

ESTUDIO COMPARATIVO DEL CONSUMO ENERGÉTICO PARA EL SECADO
DE CACAO CON LA IMPLEMENTACIÓN DE EMISORES RADIANTES DE
INFRARROJO LEJANO VERSUS GASES CALIENTES

JIM VALERIE VALENCIA BARAJAS
MICHELL DANILO BAUTISTA DÍAZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2022

ESTUDIO COMPARATIVO DEL CONSUMO ENERGÉTICO PARA EL SECADO
DE CACAO CON LA IMPLEMENTACIÓN DE EMISORES RADIANTES DE
INFRARROJO LEJANO VERSUS GASES CALIENTES

JIM VALERIE VALENCIA BARAJAS
MICHELL DANILO BAUTISTA DÍAZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director
YESID JAVIER RUEDA ORDOÑEZ
Ph.D. en Ingeniería Química

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2022

DEDICATORIA

A Dios por bendecir mi vida y permitir cumplir mis sueños.

A mis padres Odila Díaz y Manuel Bautista por su amor y apoyo incondicional, son mi mayor ejemplo e inspiración.

A mi segunda madre María Díaz por tanto apoyo y su amor infinito.

A mis hermanos Diana, Andrea, Edwin y mis sobrinos por estar siempre presente en mis triunfos, sus consejos y ese calor de familia.

A mi novia Verónica por creer en mí y motivarme a ser mi mejor versión cada día.

A toda mi familia y amigos por estar pendientes de mi proceso de formación.

A todos los transformadores del cacao en Colombia que le apuestan en llevar nuestros productos a todo el mundo, por creer en el campo, en la calidad y un mejor país.

Michell Bautista

DEDICATORIA

Primeramente, a Dios por regalarme sabiduría, inteligencia, entendimiento y paciencia para lograr culminar esta etapa de la mejor manera.

A mis padres Virgilio Valencia y Carmenza Barajas por su apoyo incondicional, por sus palabras de aliento y por ser mi fuente de motivación.

A mis hermanos Vanessa, Joshua, Jean Carlos y mi sobrina Heleen por estar siempre presente en mis triunfos, apoyarme y ayudarme cuando lo necesité.

A mi hija perruna Natasha, que ya no está conmigo, pero desde el inicio estuvo acompañándome en mis días de aprendizaje.

A mi mejor amiga Paola por ser tan incondicional.

A mi novio Sebastián por creer en mí y motivarme.

A Michell mi compañero de tesis, por cada aporte que hizo posible este nuevo logro en mi vida.

Este logro es de ustedes y para ustedes.

Valerie Valencia

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al profesor Yesid Javier Rueda Ordoñez Ph.D. en Ingeniería Química, director del proyecto de grado, por su asesoría y colaboración en el desarrollo de presente proyecto de grado.

Al profesor Omar Gélvez por su guía y primer asesoramiento en este proyecto.

A los estudiantes Mauricio y Dairon por su asesoramiento en el manejo del quemador ciclónico de biomasa.

A la Universidad y escuela de ingeniería mecánica por prestarnos las instalaciones para llevar a cabo el desarrollo del este proyecto.

A Duvan quien hizo posible la construcción del prototipo.

A Manuel y Jorge, trabajadores de la escuela de ingeniería mecánica por su acompañamiento y las pequeñas molestias causadas.

A los productores de cacao por abrirnos las puertas de sus fincas cacaoteras, enseñarnos del proceso y motivarnos a llevar un desarrollo al campo colombiano.

A nuestros padres por su apoyo incondicional y económico que permitió llevar a cabo el desarrollo del prototipo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	17
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	20
2. OBJETIVOS.....	22
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	22
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	23
3.1 ORIGEN DEL CACAO.....	23
3.2 CLASIFICACIÓN DEL CACAO.....	23
3.2.1 Cacao criollo.....	24
3.2.2 Forastero.....	24
3.2.3 Trinitario.....	24
3.3 PARTES DEL CACAO.....	25
3.4 BENEFICIO DEL CACAO.....	25
3.4.1 Cosecha o recolección.....	26
3.4.2 Quiebra.....	27
3.4.3 Fermentación.....	27
3.4.4 Secado.....	27
3.4.5 Limpieza.....	28

3.4.6 Almacenamiento.....	28
3.5 MÉTODOS O SISTEMAS DE SECADO PARA CACAO	28
3.5.1 Secado natural.....	28
3.5.2 Secado artificial.....	29
3.6 CALIDAD DEL GRANO EN EL SECADO	30
3.7 FACTORES DE COMPARACIÓN ENTRE EL SECADO NATURAL Y EL SECADO ARTIFICIAL DE CACAO.....	30
3.8 PRINCIPIOS DEL SECADO	31
3.9 FUNDAMENTOS DE SECADO	32
3.9.1 Estático.....	32
3.8.2 Móvil.	33
3.8.3 Fluidizado.	34
3.8.4 Diluido.....	34
3.9 CLASIFICACIÓN DE OPERACIÓN DE SECADO	35
3.9.1 El método de transmisión de calor a los sólidos húmedos.	35
3.9.2 Características de manejo y las propiedades físicas del producto mojado.....	37
4. SELECCIÓN DE LOS TIPOS DE SECADORES	39
4.1 SELECCIÓN DE LA DISPOSICIÓN DEL GRANO EN LA CÁMARA DE SECADO	39
4.1.1 Secador de bandejas.	39
4.1.2 Secadores rotatorios.	40
5. METODOLOGÍA DEL DISEÑO.....	42
5.1.1 CARACTERÍSTICAS OPERACIONALES DEL SECADOR.....	43
5.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL CACAO POST- FERMENTACIÓN.....	43

5.3 CALOR ABSORBIDO POR LOS GRANOS DE CACAO	47
5.3.1 Balance de masa.	47
5.3.2 Calculo del calor específico del cacao	50
5.3.3 Calor absorbido por el cacao.	50
5.4 DISEÑO CONCEPTUAL DEL PROTOTIPO DE SECADO CON LA IMPLEMENTACION DEL INFRARROJO LEJANO.....	52
5.4.1 Generación de calor placa infrarroja.	52
5.4.2 Calor desprendido por la placa de infrarrojo lejano.	53
5.4.3 Dimensionamiento cámara de secado.	55
5.5 FASE DE CONSTRUCCIÓN	57
5.6 ADAPTACIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE GASES CALIENTES.....	59
5.6.1 Balance de energía en el quemador.	61
5.7 CURVA DE SECADO	62
5.7.1 Velocidad del secado.....	68
5.7.2 Tiempo de secado.	70
6. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE SECADO.....	71
6.1 DETERMINACIÓN DE HUMEDAD DE CACAO SECO SEGÚN NTC 1252 (MÉTODO DE HORNO).....	71
6.2 ESPECIFICACIONES PARA LAS PRUEBAS DE INFRARROJO LEJANO.	73
6.2.1 Prueba 1 Infrarrojo, Cacao finca Ruitoque. Bandeja sin orificios.	74
6.2.3 Prueba 3 hibrida, cacao finca Lebrija con.....	79
6.3 ESPECIFICACIONES PARA LAS PRUEBAS REALIZADAS CON EL SISTEMA DE CALENTAMIENTO POR GASES CALIENTES CON BIOMASA.	81
6.3.1 Prueba 1 gases calientes. Cacao finca Lebrija.....	81
6.3.2 Prueba 2 gases calientes. Cacao finca Lebrija.....	84
6.4 PRUEBAS ADICIONALES SECADO NATURAL.....	87

6.4.1 Prueba 1 Secado natural. Cacao finca puente tierra.	87
6.4.2 Prueba 2 Secado natural, cacao finca Lebrija.	88
6.5 CARACTERIZACIÓN GENERAL POST SECADO	88
7. ESTUDIO COMPARATIVO DEL CONSUMO ENERGETICO	90
7.1 CONSIDERACIONES GENERALES	90
7.2 CONSUMO ENERGETICO EMISORES RADIANTES DE INFRARROJO LEJANO	91
7.3 CONSUMO ENERGETICO SISTEMA GASES CALIENTES CON BIOMASA.....	92
7.4 COMPARACIÓN DE LOS DOS SISTEMAS	93
7.4.1 Resumen comparativo de los dos sistemas.	94
8. CONCLUSIONES	95
9. RECOMENDACIONES	96
BIBLIOGRAFÍA.....	97
ANEXOS.....	100

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características físicas del grano en seco	30
Tabla 2. Ventajas y desventajas del secado natural y artificial.....	31
Tabla 3. Factores de comparación entre secadores directos, indirectos, dieléctricos e infrarrojos por radiación.....	36
Tabla 4. Tipos de secadores	38
Tabla 5. Factores de selección en la disposición del grano en la cámara de secado	41
Tabla 6. Información detalla de las Fincas	42
Tabla 7. Resultados cálculo humedad de las muestras de referencia	47
Tabla 8. Especificaciones placa infrarrojo lejano.....	55
Tabla 9. Caracterización del ventilador	60
Tabla 10. Porcentaje de humedad post-fermentación finca Ruitoque	74
Tabla 11. Porcentaje de humedad post-secado, prueba 1 infrarrojo	75
Tabla 12. Porcentaje de humedad post fermentación finca Lebrija.....	76
Tabla 13. Porcentaje de humedad post secado, prueba 2 infrarrojo	77
Tabla 14. Porcentaje de humedad post secado, prueba 3 hibrida	79
Tabla 15. Porcentaje de humedad post secado, prueba 1 gases calientes	82
Tabla 16. Porcentaje de humedad post secado, prueba 2 gases calientes	85
Tabla 17. Características del grano en seco	89
Tabla 18. Consumo energía placa emisora infrarrojo lejano	91
Tabla 19. Consumo energía placa emisora infrarrojo lejano con condición de humedad 7,5%.....	91
Tabla 20. Consumo energía gases calientes	93
Tabla 21. Comparativo de los dos sistemas.....	94

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Secador tipo Elba	21
Figura 2. Partes del fruto de cacao	25
Figura 3. Beneficio de la cosecha de cacao	26
Figura 4. Secado en superficie con esterillas plásticas y en patios de cemento	29
Figura 5. Secado de granos estático	32
Figura 6. Secado en lecho móvil	33
Figura 7. Secado en lecho fluido	34
Figura 8. secado por partículas diluidas	34
Figura 9. Secador de bandejas	40
Figura 10. Secador rotatorio	40
Figura 11. Sector geográfico desarrollo del proyecto	43
Figura 12. Corte longitudinal del grano fermentado al día 6	44
Figura 13. Materiales y equipos	45
Figura 14. Determinación del contenido de humedad en las almendras de cacao	45
Figura 15. Evidencia fotográfica del cacao antes y después del procedimiento	47
Figura 16. Balance de masa	48
Figura 17. Espectro electromagnético	52
Figura 18. Placa infrarrojo lejano	54
Figura 19. Prototipo de diseño	56
Figura 20. Estructura Interna	57
Figura 21. Ensamble final	57
Figura 22. Bandeja de secado	58
Figura 23. Sistema quemador ciclónico de biomasa adaptado	59
Figura 24. Manómetro analógico de la línea de entrada del aire al quemador ciclónico de biomasa	60
Figura 25. Balance de masa en el quemador	61
Figura 26. Variación de la masa del grano A vs tiempo	64
Figura 27. Variación de la masa de agua en el grano A vs tiempo	65

Figura 28. Curva experimental humedad vs tiempo	65
Figura 29. Curva de secado de grano de cacao, tramo A	66
Figura 30. Curva del secado del grano de cacao, tramo B	67
Figura 31. Curva de secado del grano de cacao, tramo C	68
Figura 32. Velocidad del secado vs tiempo	69
Figura 33. Velocidad del secado vs humedad del cacao	70
Figura 34. Materiales y equipos	72
Figura 35. Determinación del contenido de humedad en las almendras de cacao	72
Figura 36. Medición de temperaturas en la cámara de secado	74
Figura 37. Muestra aleatoria de recepción de cacao post-fermentación finca Ruitoque	75
Figura 38. Muestras aleatorias post-secado, prueba 1 infrarrojo	76
Figura 39. Muestras aleatorias de cacao post fermentación finca Lebrija	77
Figura 40. Muestras aleatorias de cacao post secado 21.5 horas, prueba 2 infrarrojo ..	78
Figura 41. Muestras aleatorias de cacao post secado 24.8 horas, prueba 2 infrarrojo ..	78
Figura 42. Muestras aleatorias de cacao post-secado, radiación solar por 6 horas y 11 horas infrarrojo, prueba 3 hibrida	80
Figura 43. Muestras aleatorias de cacao post secado, radiación solar por 6 horas y 13 horas infrarrojo, prueba 3 hibrida	80
Figura 44. Muestras aleatorias de cacao post secado, radiación solar por 6 horas y 18 horas infrarrojo, prueba 3 hibrida	81
Figura 45. Secado quemador ciclónico de biomasa, prueba 1	82
Figura 46. Muestras aleatorias de cacao secado 2 horas, prueba 1 gases calientes	83
Figura 47. Muestras aleatorias de cacao secado 4 horas, prueba 1 gases calientes	83
Figura 48. Muestras aleatorias de cacao secado 8 horas, prueba 1 gases calientes	84
Figura 49. Secado quemador ciclónico de biomasa, prueba 2	85
Figura 50. Muestras aleatorias de cacao secado 4 horas, prueba 2 gases calientes	85
Figura 51. Muestras aleatorias de cacao secado 8 horas, prueba 2 gases calientes	86
Figura 52. Muestras aleatorias de cacao secado 12 horas, prueba 2 gases calientes ..	86
Figura 53. Muestras aleatorias de secado natural finca puente tierra	87
Figura 54. Muestras de secado natural aleatorias finca Lebrija	88

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Cálculo y balance de masa de la cantidad de agua evaporada en el secado	100
Anexo B. Cálculo del calor absorbido por el cacao	101
Anexo C. Plano estructura de cámara de secado, prototipo infrarrojo lejano.....	102
Anexo D. Cálculo del calor necesario para secar los granos de cacao con gases calientes	103
Anexo E. Tabulación datos experimentales curva de secado	105
Anexo F. Consumo energético	106

GLOSARIO

ELBA: secadero hecho de madera y cubierto con techo de zinc. Costa de un piso construido a poca altura del suelo, para colocar debajo cajones de madera en forma de gavetas que se deslizan sobre rieles que las conducen bajo techo.

INOCUIDAD: conjunto de condiciones y medidas necesarias durante la producción, almacenamiento, distribución y preparación de alimentos para asegurar que una vez ingeridos, no representen un riesgo para la salud.

MUCÍLAGO: tipo de fibra con textura viscosa, que cubre ciertas partes de algunos vegetales.

PROPIEDADES ORGANOLÉPTICAS: características de los alimentos que se perciben a través de los sentidos, gusto, vista, olfato y tacto.

SOLVATACIÓN: interacción de un soluto con un solvente que conduce a la estabilización de las especies del soluto en la solución.

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO COMPARATIVO DEL CONSUMO ENERGÉTICO PARA EL SECADO DE CACAO CON LA IMPLEMENTACIÓN DE EMISORES RADIANTES DE INFRARROJO LEJANO VERSUS GASES CALIENTES*

AUTOR: JIM VALERIE VALENCIA BARAJAS, MICHELL DANILO BAUTISTA DÍAZ**

PALABRAS CLAVE: SECADO, CACAO, CONSUMO ENERGÉTICO, INFRARROJO LEJANO, GASES CALIENTES, BIOMASA

DESCRIPCIÓN: El presente trabajo contempla el estado actual de la producción de cacao en el mundo y la relación que tiene Colombia con la comercialización de granos de cacao. La relevancia que tiene el proceso de secado para competir con mercados externos y los antecedentes y desarrollos en la mejora de este proceso. Se encuentra la caracterización de las propiedades físicas del grano de cacao al culminar el proceso de fermentación de tres fincas seleccionadas del departamento de Santander, se realizan pruebas experimentales de secado con el seguimiento de la pérdida de masa a través del tiempo con el fin de obtener la curva característica del proceso y predecir el tiempo necesario para llevar los granos a un 7,5% de humedad según la norma NTC 1252. Se seleccionan dos métodos de secado para cacao, con el objetivo de realizar un estudio comparativo del consumo energético; uno con el diseño y construcción de un prototipo con la implementación de una placa emisora radiante de infrarrojo lejano y otra con la adaptación de un quemador de biomasa como generador de gases calientes por combustión. Posteriormente se realizan pruebas de secado de ambos métodos con 5 kg de cacao para comparar el consumo energético y la humedad final en el proceso, se evalúan las muestras representativas de cada método con granos secos molidos. Finalmente se dan los resultados con los costos asociados al consumo energético de ambas alternativas.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez. Ph.D. en Ingeniería Química.

ABSTRACT

TITLE: COMPARATIVE STUDY OF ENERGY CONSUMPTION FOR COCOA DRYING WITH THE IMPLEMENTATION OF FAR INFRARED RADIANT EMITTERS VERSUS HOT GASES*

AUTHOR: JIM VALERIE VALENCIA BARAJAS, MICHELL DANILO BAUTISTA DÍAZ**

KEY WORDS: DRYING, CACAO, ENERGY CONSUMPTION, FAR INFRARED, BIOMASS, BURNERS

DESCRIPTION: The work of this project contemplates the current state of cocoa production in the world and the relationship that Colombia has with the commercialization of cocoa beans. The relevance of the drying process to compete with external markets and the background and developments in the improvement of this process. The characterization of the physical properties of the cocoa bean is found at the end of the fermentation process of three selected farms in the department of Santander, experimental drying tests are carried out with the monitoring of mass loss over time in order to obtain the characteristic curve. of the process and predict the time needed to bring the grains up to 7.5% moisture according to the NTC 1252 standard. Two drying methods for cocoa are selected, with the aim of conducting a comparative study of energy consumption; one with the design and construction of a prototype with the implementation of a far infrared radiant emitting plate and another with the adaptation of a biomass burner as a generator of hot gases by combustion. Subsequently, drying tests of both methods are carried out with 5 kg of cocoa to compare energy consumption and final moisture in the process, representative samples of each method are evaluated with ground dry beans. Finally, the results are given with the costs associated with the energy consumption of both alternatives.

*Degree work

**Faculty of Physics-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez. D.Sc. Chemical Engineering.

INTRODUCCIÓN

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es una especie vegetal originaria de los bosques húmedos de América, que se ha extendido en el mundo principalmente en zonas tropicales. Su fruto contiene los granos que son utilizados en su mayoría como materia prima para la industria del chocolate con una demanda internacional y para la industria farmacéutica y cosmética a menor escala. En la elaboración de chocolate, los granos de cacao previamente pasan por diferentes procesos industriales como la fermentación, secado, tostado, triturado y prensado, con el fin de obtener la manteca y torta de cacao. En Colombia, el departamento de Santander se ha caracterizado por ser el principal productor de cacao en grano y con grandes índices de crecimiento en las exportaciones.

Para la comercialización de los granos de cacao, es importante contar con los cuidados apropiados en el cultivo y post-cosecha que permita obtener la materia prima ideal para la industria transformadora. El secado es una etapa esencial para el beneficio del cacao, proceso que consiste en retirar la humedad en exceso contenida en el grano y etapa responsable de la principal transformación del grano en la post-cosecha consumiendo alrededor del 50 % de la energía total en la transformación y a su vez es el procedimiento que más atención requiere para no afectar la calidad y las características organolépticas (color, aroma y sabor). Tomando en cuenta los factores de consumo energético y de calidad, se puede apreciar la importancia que adquiere su correcta realización. Además, el secado en la agroindustria es indispensable para facilitar las tareas de transporte, manejo, almacenamiento y comercialización del grano sin la aparición de hongos en la superficie del mismo.

Los secadores en la actualidad se diferencian entre sí por la metodología seguida en el procedimiento de secado, la diferencia reside fundamentalmente en la forma en que se mueven los sólidos a través de la zona de secado y en la forma en la que se transmite el calor del producto a secar. Convencionalmente se clasifican de la siguiente manera:

continuos o por lotes; directos o indirectos; de túnel, de bandejas, rotativos, al vacío, por aspersion, entre otros.

El desarrollo tecnológico en la agroindustria colombiana orientado a los procesos de secado para granos ha tenido un gran avance en el sector del café, quienes por su parte por medio del Centro de Investigaciones Cenicafé de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, han desarrollado los conocimientos prácticos, basados en investigación científica para el mejoramiento post-cosecha en el café; una de sus contribuciones es la implementación de ventiladores centrífugos y generadores de calor con gases calientes en el secado artificial para café. Por otro lado, países como España están implementando nuevas tecnologías de secado en el sector agrícola donde utilizan emisores radiantes de infrarrojo lejano como generadores de calor obteniendo un mejor desempeño en el consumo energético.

Sin embargo, la mayoría de los cacao-cultores en la región de Santander utilizan procedimientos de secado natural, que se llevan a cabo a la intemperie, aprovechando la luz solar, vertiendo los granos en patios de cemento, esterillas, fibras plásticas y en el mejor de los casos en secadores tipo Elba. Ya sea por desconocimiento de estas técnicas, o por falta de recursos económicos, se realiza de esta manera y con un tiempo prolongado de secado, debido a que depende de las condiciones climáticas o factores de contaminación. Esta falta de implementación tecnológica no favorece la competitividad del cultivo e impide una comercialización directa de los productores con países en el exterior.

Este proyecto tiene como objetivo realizar un estudio comparativo del consumo energético de dos métodos diferentes de secado para granos de cacao, uno implementando emisores radiantes de infrarrojo lejano y otro con gases calientes como generadores de calor, con el propósito de dar un análisis que determine qué alternativa tiene un menor consumo energético con las condiciones de humedad requeridas por la Norma Técnica Colombiana (NTC) 1252, para la comercialización internacional.

En este proyecto se realizó una fase de campo donde se tomaron muestras de cacao pos-fermentación de tres fincas del departamento de Santander y se dirigieron inmediatamente al laboratorio de combustión de ingeniería mecánica con el fin de caracterizar las propiedades físicas con las que se inicia el proceso de secado.

Se ha diseñado y construido un prototipo de secador para cacao, con la implementación de emisores radiantes de infrarrojo lejano como generadores de calor y se adaptó un secador con un sistema de calentamiento de gases calientes alimentado por biomasa con los equipos disponibles en el laboratorio de combustión de la escuela de ingeniería mecánica y así comparar ambas tecnologías.

Adicionalmente se realizaron pruebas de secado con el prototipo de emisores radiantes para conocer la curva característica de secado del cacao en grano y poder predecir los tiempos de secado, se tomaron unas muestras representativas y un seguimiento de las pérdidas de peso en el grano a través del tiempo.

Con el propósito de obtener un estudio comparativo del consumo energético de ambas alternativas, se implementaron pruebas finales con una cantidad de 5 kg de cacao en baba en cada sistema, esperando obtener un producto final ideal con una humedad del 7,5 %. Posteriormente transcurrido el tiempo de secado se verificó con la norma NTC 1252 la humedad final del grano y el comportamiento de ambas alternativas durante todo el proceso para así disponer a realizar el respectivo análisis de consumo energético.

A continuación, se verán los conceptos que rigen la investigación, el diseño, la adaptación, los resultados de la caracterización y los resultados del análisis comparativo del consumo energético.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El cacao constituye la materia prima más importante para la industria chocolatera. “El periodo entre el 2017-2018 la producción mundial de cacao se estimó en 4’638.000 t (toneladas)”¹. De este porcentaje el 93% corresponde a cacao ordinario y el 7% a cacao fino de aroma. De este último porcentaje el 87% se produjo en América. “Colombia cuenta con una producción de 60.535 toneladas, récord en producción en cacao fino y de aroma para el 2017”². Este cacao es demandado sobre todo por países chocolateros de Europa y EE. UU., que buscan cacaos de origen, con historia, altas características de calidad y sabor, uniformidad y volúmenes consistentes.

Santander es el principal productor de cacao en Colombia y los índices de exportación crecieron en un 11% para el 2017. Los resultados del último censo nacional agropecuario revelan que “Santander cuenta con un área sembrada de 46,7 mil hectáreas, que representan el 23,4% del total nacional, ubicando al departamento con la mayor superficie”³.

Productores de la región de Santander, se unen a la tarea de recolección de granos de cacao con sus respectivos procesos de fermentación, secado y empaçado. Para una buena comercialización y posibles ventas en el exterior, coinciden en que los procesos

¹ INTERNATIONAL COCOA ORGANIZATION. ‘Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics. 2017-2018, vol. 44, p.3.

² FEDECACAO. Nuevo Récord en producción de cacao. [Sitio web]. Bogotá. [Consulta: 31 octubre 2019]. Disponible en: <http://www.fedecacao.com.co/portal/index.php/es/2015-04-23-20-00-33/551-en-2017-colombia-alcanzo-nuevo-record-en-produccion-de-cacao>

³ CAMARA DE COMERCIO DE BUCARAMANGA. Informe de actualidad de cacao por provincias de Santander. [Sitio web]. [Consulta: 30 octubre 2019]. Disponible en: https://www.camaradirecta.com/temas/documentospdf/informesactualidadprovincias/sector_Cacao_provincias.pdf

críticos para dar granos de cacao con condiciones físicas de humedad exigidas en norma, calidad y aroma son los procesos de fermentación y el secado.

La mayoría de cacaocultores en Santander utilizan procedimientos de secado natural, que se llevan en campos abiertos aprovechando la luz solar, vertiendo los granos en patios de cemento, esterillas de fibra plástica o en el mejor de los casos en secadores tipo Elba (ver figura 1). Sin tener acceso a implementación de tecnologías.

Figura 1. Secador tipo Elba



Fuente: Autores

El tiempo aproximado para llevar a cabo dichos procedimientos es de 6 a 7 días, condicionado por las condiciones climáticas. Además, la inocuidad del alimento, las propiedades organolépticas y la uniformidad del secado en los granos no pueden ser controladas de la mejor manera, causando pérdidas en parte de las cosechas y dificultad para entrar en mercados extranjeros por las normativas existentes. Es de ahí que nace la necesidad de realizar un estudio comparativo de las alternativas existentes en el secado de cacao, con sistemas que garanticen retirar la humedad en grano por las normativas exigidas y que sean de consumo energético bajo.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Fortalecer el propósito misional de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander con el fin de contribuir al desarrollo tecnológico y social de la región en el sector agroindustrial, dando respuesta a las necesidades de la sociedad realizando un estudio comparativo del consumo energético para el secado de cacao implementando emisores de infrarrojo lejano versus gases calientes con la utilización de biomasa como combustible cuyos resultados apoyan a la formación académica y fomentan su aplicación.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el estudio comparativo del consumo energético para el secado de 5 kg de cacao desde una humedad post-fermentación hasta el 7.5%, requerido por la Norma Técnica Colombiana (NTC) 1252, para la comercialización internacional utilizando secado con emisores de infrarrojo lejano y gases calientes, para lo cual se deberá:
 - ✓ Diseñar y construir un prototipo para el secado de cacao con la implementación de una placa de infrarrojo lejano.
 - ✓ Adaptar el sistema de calentamiento de aire con biomasa del laboratorio de combustión de ingeniería mecánica.
 - ✓ Evaluar las dos fuentes de generación de calor con el fin de determinar la relación costo-beneficio, obteniendo los consumos de energía de los equipos incluyendo costos de materia prima.

3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

A continuación, una vez planteado el problema se procede a sustentar teóricamente el estudio de investigación, esto implicara estudiar las generalidades del cacao, sus características principales, exponer y analizar las teorías, las conceptualizaciones, las investigaciones previas y los antecedentes en general.

3.1 ORIGEN DEL CACAO

Theobroma cacao L. es el nombre científico que recibe el árbol del cacao o cacaotero, del cual se obtienen las semillas de cacao, de las cuales se preparan los conocidos chocolates, así como otros productos. Se cree que este árbol es originario del bosque tropical de la cuenca del Amazonas, donde se propago hacia el este y hacia el norte de México⁴. En la actualidad, Ghana y Costa de Marfil son los dos principales productores y exportadores de cacao a nivel global. El producto se exporta generalmente en forma de semilla seca.

3.2 CLASIFICACIÓN DEL CACAO

Colombia se caracteriza por el cultivo de cacao criollo, forastero e híbrido o trinitario. Es una nación productora de cacaos comunes y de calidad Premium, los cuales se

⁴ BARBECHO GUAILLAS, Alexis Fabián y LOJA JUCA, Juan Carlos. Desarrollo de un prototipo de máquina híbrida de secado de granos de cacao con un sistema de control automático de temperatura. Trabajo de Ingeniería mecánica. Cuenca. Universidad Politécnica Salesiana. Facultad de Ingeniería mecánica. 2019 19p.

caracterizan por un fino sabor y aroma gracias a la ubicación geográfica y a las condiciones agroecológicas con las que cuenta el país⁵.

3.2.1 Cacao criollo. Se produce un grano de cascara fina y suave de complejo sabor aromático, las semillas son grandes, redondas, de color blanco o purpura pálido, no astringente. De ellos se obtiene el cacao de mayor calidad, Sin embargo, el árbol que lo produce es de escaso rendimiento y muy frágil, por lo cual el cacao Criollo solo llega a representar el 10% de la producción mundial y se reserva para los chocolates más finos y exquisitos⁶. Se cultiva principalmente en Colombia, Madagascar, México, Nicaragua, el sur del Lago de Maracaibo y las faldas de las montañas andinas venezolanas.

3.2.2 Forastero. Planta de cacao utilizada en la producción masiva de las barras de chocolate. Tiene una pared gruesa y resistente, fruta suave, las semillas son aplanadas y de color purpura, su aroma y sabor son bajos. Los productores de cacao confían en la resistencia a las enfermedades y en la amplia producción de grano de estas plantas para lograr el cultivo a gran escala que el mercado requiere, ya que además estas plantas son fáciles de cuidar, pues requieren el mínimo mantenimiento y proporcionan a su vez un sabor muy consistente. Las variedades de cacao Forastero, es decir, de cacao ordinario, representan más del 70 % de la producción mundial de cacao⁷. Se cultivan en Venezuela, están presente en la Amazonia Occidental y Central. También, se cultiva en países como Costa de Marfil, Ghana, Brasil, Costa Rica, Ecuador y República Dominicana.

3.2.3 Trinitario. La planta de cacao Trinitario es un híbrido de las plantas de cacao Forastero y Criollo, combinando las características gustativas y olfativas de ambos, pero con un rendimiento superior a éstas. Esta planta surgió en un intento de combinar la resistencia de la planta de cacao Forastero con el fino aroma y sabor de los granos de

⁵ LEGISCOMEX. Colombia se caracteriza por el cultivo de cacao criollo, forastero e híbrido o trinitario. [Sitio web]. [Consulta: 15 Mayo 2020]. Disponible en: <https://www.legiscomex.com/Documentos/informe-sectorial-sector-cacao-demas-chocolates-colombia-2016-rci308>.

⁶ CHOCOLATISIMO. Tipos de Cacao. [Sitio web]. [Consulta:15 mayo 2020]. Disponible en: <http://chocolatisimo.com/tipos-de-cacao/>.

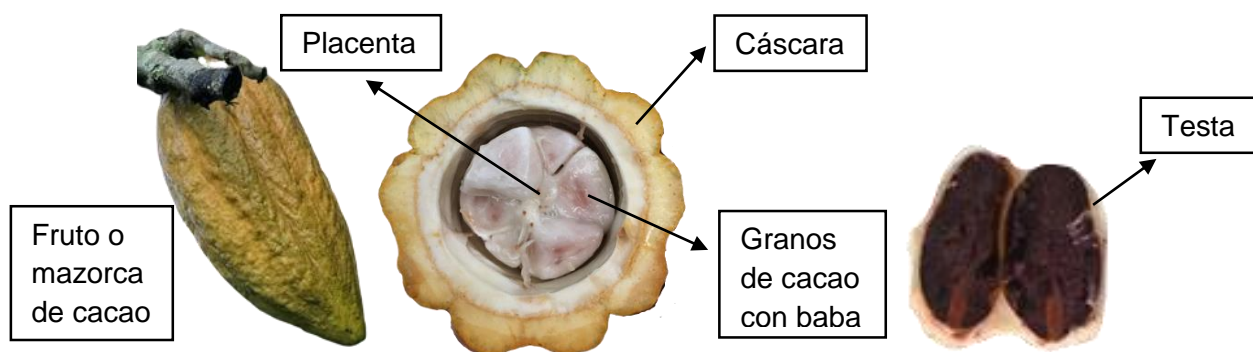
⁷ ALICE BENTLE Y CHOCOLATES. El origen y los tipos de cacao. [Sitio web]. 2014. [Consulta: 15 mayo 2020]. Disponible en: <http://alicebentleychocolates.com/index.php?route=pavblog/blog&id=12>.

cacao Criollo, para así poder producir un grano sabroso que sea a la vez más fácil de cultivar, resistente a las enfermedades y apreciado como grano de sabor. Representa el 20% de la producción mundial.⁸ Se cultivan básicamente en las mismas zonas productoras de cacao criollo.

3.3 PARTES DEL CACAO

La mazorca o fruto de cacao, es una baya protegida por una cáscara; en su parte interna alberga los granos o semillas de cacao, sostenidas por un eje central llamado placenta. Como se puede observar en la figura 2, los granos están cubiertos por una baba llamada mucílago que se desprende en el proceso del beneficio y una capa llamada testa o cascarilla que es la tela externa que protege al grano de cacao.

Figura 2. Partes del fruto de cacao



Fuente: Elaboración propia

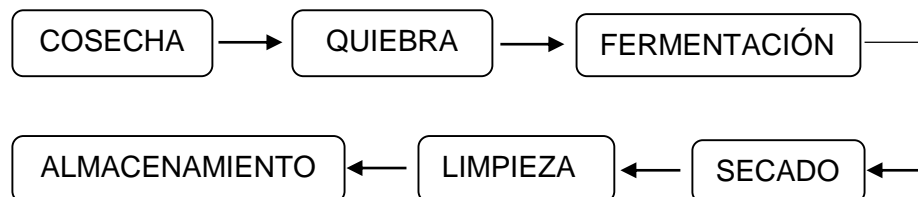
3.4 BENEFICIO DEL CACAO

⁸ Ibid., p. 1.

Para el proceso industrial se requiere que el grano este sometido a un proceso de beneficio que obedece a los principios básicos de conservación de alimentos y se hace con la finalidad de mejorar la calidad del grano. En este punto se explica brevemente el proceso de la obtención de la almendra para más adelante profundizar en el proceso de secado. El beneficio de la cosecha comprende desde el momento del corte de las mazorcas, su clasificación, el quiebre, remoción de las semillas en baba, el proceso de fermentación y secado. Estos dos últimos responsables de los cambios en los granos que darán las características organolépticas al cacao (color y sabor). Estos procesos son claves para conseguir un cacao de alta calidad.

De un buen control en el beneficio de la cosecha de cacao depende la presentación y calidad de la almendra seca para la producción del chocolate, ver detalles del proceso de benéfico en la figura 3.

Figura 3. Beneficio de la cosecha de cacao



Fuente: Adaptado de Manual del cultivo de cacao.

3.4.1 Cosecha o recolección. La cosecha se realiza aproximadamente entre un año y medio o dos años después de la siembra dependiendo del tipo de cacao que se haya cultivado⁹, ya que hay algunas semillas que maduran más rápido. La cosecha se inicia cuando el fruto o mazorca está maduro, lo cual se aprecia en el cambio de pigmentación.

⁹ BARBECHO y LOJA. Op. cit., p. 22.

3.4.2 Quiebra. Se denomina quiebra a la operación que consiste en partir la mazorca y extraer las almendras las cuales una vez separadas de la placenta, serán sometidas a la fermentación. Los frutos maduros del árbol se cortan y se recolectan en diferentes puntos del área del cultivo de cacao, para posteriormente abrir y extraer el cacao en baba.

3.4.3 Fermentación. Es un proceso que tiene como fin la mayor eliminación de baba que rodea los granos para facilitar el secado y almacenamiento, el tiempo de fermentación varía según el tipo de semilla, de 3 a 7 días. La fermentación es un proceso bioquímico interno y externo de la semilla en los que ocurren cambios notables de su nomenclatura, donde se deben aislar las almendras, con el objetivo de conservar calor, permitiendo el paso de una corriente de aire entre las almendras. Esta operación es la combinación y balance entre la temperatura, alcoholes, pH y humedad.¹⁰ Su función principal es provocar las transformaciones químicas dentro de los granos que impactan en la formación del color, aroma y sabor. A su vez en la fermentación se induce a la muerte del embrión de las almendras, que durante la fermentación con una cantidad considerable de calor se desprende mientras la pulpa se desintegra, este incremento de temperatura es el causante de la muerte del embrión; desde ese momento empiezan los cambios bioquímicos internos que posteriormente darán aroma y sabor.

3.4.4 Secado. Finalizado el proceso de fermentación el contenido de humedad de los granos de cacao está alrededor del 55% y 60% dependiendo del tipo de grano. Para poder almacenar los granos de cacao deben tener 7,5 % de humedad en grano, según lo establecido en la norma NTC 1252.¹¹ El proceso de secado no constituye únicamente una reducción de humedad, sino que además, los cambios bioquímicos continúan durante el proceso de secado, mientras el contenido de humedad desciende con lentitud

¹⁰ MAUREIRA POVEDA, Juan Pablo. Diseño y simulación de un secador de granos de cacao con colectores solares planos mediante convección forzada para una capacidad de 500 kg. Trabajo de grado Ingeniería mecánica. Sangolquí. Escuela politécnica del ejército. Facultad de ingeniería mecánica. 2006 23p.

¹¹ NORMA TÉCNICA COLOMBIANA, Cacao En Grano. Especificaciones y requisitos de calidad, NTC 1252. Bogotá D.C: 2021 6 p.

hasta que se detienen por la falta de humedad o inactividad de las enzimas. Los métodos de secado pueden ser naturales o artificiales, el secado natural dependerá de las condiciones atmosféricas para deshidratar las almendras, con una duración entre 5 a 7 días.

3.4.5 Limpieza. Una vez terminado el secado es conveniente limpiar las impurezas del grano con el fin de obtener el producto a un mayor valor comercial. Finalmente debe ser empacado y almacenado para su respectiva comercialización.

3.4.6 Almacenamiento. El cacao es altamente higroscópico, es decir que absorbe la humedad con suma rapidez. Si se almacenan almendras con menos de 8% de humedad, pueden mantenerse en buen estado por unos cinco meses, en medios menores de 75% de humedad relativa. Cuando la almendra seca es almacenada en ambientes con 95% de humedad relativa en 10 días puede superar el 15 % de humedad¹².

3.5 MÉTODOS O SISTEMAS DE SECADO PARA CACAO

El secado de los granos de cacao es un proceso físico de transferencia de calor y masa, que puede ser natural o de manera artificial.

3.5.1 Secado natural. El secado natural se basa en el aprovechamiento de la radiación solar que suministra una temperatura satisfactoria para evaporar la humedad del grano. Esto se lleva a cabo bajo diferentes alternativas, vertiendo los granos sobre esterillas plásticas en campos abiertos, patios de cemento, (ver figura 4). Igualmente se emplean

¹² PAREDES ARCE, Mendis. Manual de cultivo del cacao [En línea]. Perú: Ministerio de agricultura, programa para el desarrollo de la amazonia, 2003. [Fecha de consulta: 25 mayo 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/356728198_MINISTERIO_DE_AGRICULTURA_PROGRAMA_PARA_EL_DESARROLLO_DE_LA_AMAZONIA_PROAMAZONIA_MANUAL_DE_CULTIVO_DEL_CACAO

utensilios como rastrillos y palas de madera para remover los granos, esto con el fin de darle un poco de uniformidad al secado en los granos. Para producción mediana y alta se utilizan secadores tipo Elba, (ver figura 1), o cobertizos con bandejas deslizantes que permiten la protección en caso de lluvias y almacenamiento en horas nocturnas.

Figura 4. Secado en superficie con esterillas plásticas y en patios de cemento



Fuente: Autores

3.5.2 Secado artificial. El secado artificial es una alternativa necesaria en regiones donde las condiciones climáticas no son favorables, este secado se realiza mediante la utilización de varias alternativas, entre ellas se encuentran estufas, secadores mecánicos, silos, entre otros. En el secado artificial se usa como fuente de calor una corriente de aire caliente y recirculante provenientes de la combustión que son alimentados con leña, carbón mineral, diésel, gas natural o electricidad.

Una nueva alternativa de generación de calor es por emisores de infrarrojo lejano, la cual propaga la energía radiante térmica que puede ser absorbida por los cuerpos y cuyo

efecto inmediato es aumentar la temperatura. Este método replica la energía del sol, a menor escala y sin la radiación ultravioleta.

3.6 CALIDAD DEL GRANO EN EL SECADO

Las características físicas de la almendra de cacao son de gran importancia para la transformación en chocolate, pues toman a consideración diferentes factores al momento de seleccionar el producto (ver tabla 1).

Tabla 1. Características físicas del grano en seco

Características del grano seco	Grano bien fermentado	Grano ligermente fermentado	Grano insuficientemente fermentado
Forma	Hinchado	Algo aplanado o pachado	Panchito
Color del grano por fuera	Café oscuro	Amarillo claro, amarillo rojizo	Blanquecino, rojizo
Cascarilla	Se desprende fácilmente al tocarlo con los dedos	Es difícil de arrancar con las uñas	No se desprende, está pegado al grano
Consistencia del grano	Fácil de quebrar y desbaratar con los dedos	se desbarata con los dedos	Es duro como de hule, pero se puede partir con navaja
El grano por dentro	Este todo quebrado	Entero	Muy duro y solido
Color del grano por dentro	Color chocolate o café claro	Entre cenizo y morado	Color negruzco
Olor	Chocolate aromático agradable	A vinagre desagradable	Sin olor, o con olor a moho
Sabor o gusto	Amargo agradable	Amargo	Muy amargo

Fuente: tomada y adaptada norma técnica colombiana NTC 1252:2021. p.14-16

La calidad física se determina por el tamaño, peso de la almendra, el porcentaje de fermentación, contenido de humedad y defectos.

3.7 FACTORES DE COMPARACIÓN ENTRE EL SECADO NATURAL Y EL SECADO ARTIFICIAL DE CACAO

Se describen las ventajas del secado natural y artificial, si bien se espera que la selección del método más adecuado sea el de menor consumo energético como lo es el secado natural, este no presenta la flexibilidad de implementar nuevas tecnologías que puedan garantizar la uniformidad, inocuidad y calidad del producto.

Tabla 2. Ventajas y desventajas del secado natural y artificial.

Factores	Secado Natural	Secado Artificial
Consumo energético	Aprovecha la luz solar disponible y gratuita.	Implica costos en consumo energético tales como: gas, gasoil, bomba de calor, radiador eléctrico, infrarrojos.
Inocuidad	Muchas veces, están en contacto con animales de las fincas, se vierten en suelos de concreto, o esterillas plásticas.	Fabricados con materiales que garantizan la inocuidad en los alimentos como acero inoxidable.
Uniformidad	Son estáticos, el movimiento del grano se realiza de manera manual con herramientas como palas de madera o rastrillos.	Algunos no generan movimiento del grano para garantizar la uniformidad en el secado del grano, otros utilizan tambores rotatorios y control de temperatura para garantizar
Disposición de espacio	Se requieren de grandes espacios para extender los granos de cacao.	Utilizan tambores o parrillas de secado con gran capacidad de grano en volúmenes más pequeños.
Continuidad del proceso	Depende de las condiciones climáticas del ambiente, el uso de la energía solar es intermitente.	Es independiente a cambios climáticos.
Calidad del grano	Permite culminar lentamente las reacciones oxidativas. Presenta riesgos de dejar mojar los granos por las lluvias y generar moho.	Tiene riesgos a cambios bruscos de temperatura si no hay un adecuado control de temperatura lo cuál genera un grano con sabor astringente. Se puede contaminar con olores de los gases de quemado artificial.
Tiempo promedio de secado	3 a 5 días.	15 a 36 horas.

Fuente: tomada y adaptada del catálogo ir confort 2016 y libro del cacao al chocolate¹³.

3.8 PRINCIPIOS DEL SECADO

¹³ BENÍTEZ LEÓN, Alvaro. Del Cacao Al Chocolate, Procedimientos, Sabor y Aroma, primera Bucaramanga, 2013. ISBN 978-95-846-561-5

El secado de sólidos consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de humedad hasta un valor aceptable para la industria con el objetivo de conseguir un producto en condiciones óptimas de estabilidad¹⁴. La humedad se presenta en forma de solución líquida dentro del sólido atrapada en su microestructura, la cual ejerce una presión de vapor menor que el líquido puro, esta es llamada humedad intrínseca, la humedad en exceso se llama humedad extrínseca.

3.9 FUNDAMENTOS DE SECADO

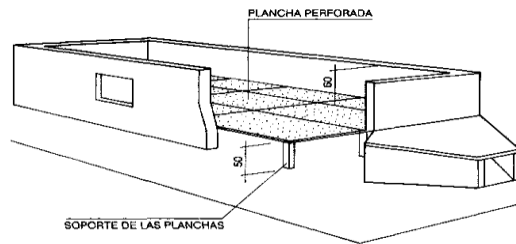
En los equipos de secado la fuente de calor son gases calientes y el material de secado puede estar estático, móvil, fluido o diluido.

3.9.1 Estático. El material es un lecho denso de sólidos en el cual cada partícula descansa sobre otras, debido a la densidad de la masa de la fase sólida. Es decir, no existe movimiento relativo entre las partículas sólidas¹⁵. En la figura 5 se puede observar la cámara de secado y cámara de distribución del aire en un secador de lecho fijo.

Figura 5. Secado de granos estático

¹⁴ IPN ESIQIE AOU PSE. Introducción Al Secado y Al Enfriamiento de Agua. [Sitio web]. [Consulta: 22 mayo 2020]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/ipnesiqieaoupse/1-introduccion-al-secado-y-al-enfriamiento-de-agua>.

¹⁵ ACADEMIA.COM. Secadores. [Sitio web]. México. [Consulta: 20 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.coursehero.com/file/44541112/Secadorespdf/>. p. 2



Fuente: Clasificación de los secadores respecto al flujo del producto.

3.8.2 Móvil. El material es un tipo de lecho de sólidos ligeramente restringido en el cual las partículas están separadas apenas lo suficiente para fluir o deslizarse unas sobre otras (ver figura 6). Por lo común el flujo es descendente por acción de la fuerza de gravedad pero también se puede registrar un movimiento ascendente debido a la elevación mecánica o a la agitación generadas dentro del equipo¹⁶.

Figura 6. Secado en lecho móvil

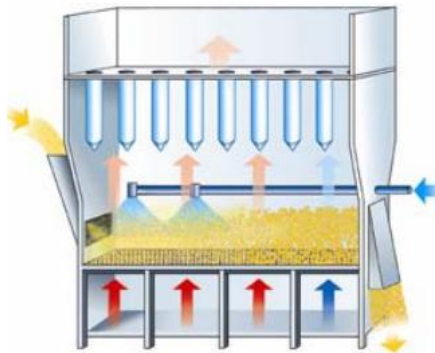


Fuente: https://personales.us.es/mfarevalo/recursos/tec_far/secado.pdf

¹⁶ Ibid., p. 2

3.8.3 Fluidizado. La fluidización se refiere al proceso de suspensión o levitación de partículas por la acción del paso de un fluido a través de ellas, de manera que el conjunto de partículas también tiende a comportarse como fluido¹⁷. Las partículas sólidas se sostienen por medio de fuerzas de arrastre provocadas por la fase gaseosa que pasa por los intersticios de las partículas, con una velocidad crítica dada (ver figura 7).

Figura 7. Secado en lecho fluido

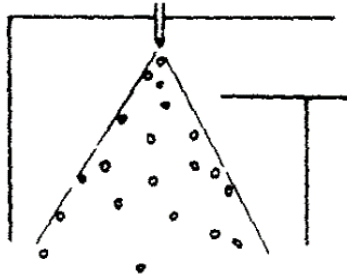


Fuente: https://personales.us.es/mfarevalo/recursos/tec_far/secado.pdf

3.8.4 Diluido. Ésta es una condición de expansión total en la cual las partículas sólidas están tan separadas entre sí que prácticamente no ejercen ninguna influencia unas sobre otras (ver figura 8).

Figura 8. secado por partículas diluidas.

¹⁷ DOCPLAYER. Fluido-dinámica de lechos fluidizados. [Sitio web]. [Consulta: 6 noviembre 2020]. Disponible en: <https://docplayer.es/68825726-Fluido-dinamica-de-lechos-fluidizados-al-conjunto-de-particulas-fluidizadas-se-le-denomina-tambien-lecho-fluidizado.html>



Fuente: https://www.academia.edu/30244923/Operaciones_Unitarias._Secadores_

3.9 CLASIFICACIÓN DE OPERACIÓN DE SECADO

El primer método de clasificación de transmisión de calor a los sólidos húmedos revela las diferencias en el diseño y el funcionamiento del secador (ver tabla 3), mientras que el segundo, método de características de manejo y las propiedades físicas del producto húmedo, es más útil para seleccionar entre un grupo de secadores que se someten a consideración preliminar con relación a un problema específico (ver tabla 4).

3.9.1 El método de transmisión de calor a los sólidos húmedos. Se distinguen: los secadores directos, en el que se utilizan gases calientes en contacto directo con el sólido húmedo para suministrar el calor y arrastrar el líquido vaporizado; los secadores indirectos, en los que el calor se transmite al sólido húmedo a través de la pared que lo contiene, eliminándose el líquido vaporizado independientemente del medio calefactor; secadores dieléctricos, operan sobre el principio de generación de calor dentro de los sólidos, colocándolos dentro de un campo eléctrico de alta frecuencia que provoca una gran agitación de las moléculas polares, cuya fricción genera el calor necesario para la

evaporación¹⁸ y secadores por radiación, que dependen de la transferencia de energía radiante para evaporar la humedad. La energía radiante se suministra eléctricamente por medio de lámparas infrarrojas y resistencias eléctricas.

Tabla 3. Factores de comparación entre secadores directos, indirectos, dieléctricos e infrarrojos por radiación

¹⁸ MAUPOEY, Pedro Fito y otros. Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Madrid: Universitat Politècnica de València, 2001. p. 13. ISBN: 978-84-9705-025-8.

	Secado Directo	Secado Indirecto	Secadores Dieléctricos	Infrarrojos
Temperaturas	Temperaturas de trabajo máxima de 740° C	Temperaturas máxima de 550°C	Falta de uniformidad en las temperaturas generadas en el material	Temperatura máxima de 150 °C
Transferencia	Por convección	Por Conducción	Por campo eléctrico de alta frecuencia	Por radiación
Economía	Consumo menor de combustible por kg, bajo costo de construcción inicial, cantidades Gran capacidad de carga inicial, desde 50 kg.	Consumo mayor de combustible, mayor costo de construcción inicial, baja capacidad de carga inicial, menor a 50 kg.	Costos elevados en la fabricación por productos de alto valor añadido, consumen una gran cantidad de energía eléctrica	Tiene un ahorro significativo del consumo energético y costos de mantenimiento nulo.
Sólidos a secar	Seca sólidos finos hasta de gran tamaño, sólidos granulados, abrasivos y cristalinos.	Láminas u hojas, como papel, celofán, pulpas vegetales, materiales pastosos y sólidos finos.	Para materiales que son fáciles de cosechar en el secado y donde la humedad interna es difícil de eliminar como el cuero.	La onda de infrarrojo lejano permite el secado en el grano desde el interior al exterior del grano sin alterar los procesos oxidativos. La energía no se dispersa hacia objetos que no lo necesitan.
Contaminación del sólido	Pueden contaminar el grano a secar	Es menos factible la contaminación del grano	No contaminan el sólido	No contaminan el sólido a secar
Tiempo promedio de secado	Mas rápido que secado indirecto	El tiempo de secado se prolonga más al directo.	Puede acortar el tiempo de secado	15 a 46 horas

Fuente: basada en el libro el secado de Kneule Friedrich y JASE-W Productos y Tecnologías Japonesas de Punta para el Ahorro Inteligente de Energía

3.9.2 Características de manejo y las propiedades físicas del producto mojado.

De esta clasificación se distinguen: secadores directos, continuos donde la operación es sin interrupciones; los secadores directos por lotes, son diseñados para un tamaño específico de lote de producto húmedo, para tiempos de ciclos determinados donde las condiciones de contenido de humedad y temperatura varían continuamente en cualquier punto del equipo; secadores indirectos continuos, en estos la desecación se efectúa haciendo pasar el material de manera continua por el secador, y poniéndolo en contacto

con las superficies calientes y el líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento; secadores indirectos por lotes, se adaptan muy bien a operaciones al vacío y se subdividen en tipos agitados y no agitados.

Tabla 4. Tipos de secadores

DIRECTOS	CONTINUOS	<ul style="list-style-type: none"> a. Bandejas secadoras b. Transporte neumático c. Rotativos d. De lecho fluidizado e. Circulación a través del material
	NO CONTINUOS	<ul style="list-style-type: none"> a. Circulación a través del material b. Bandejas y compartimiento
INDIRECTOS	CONTINUOS	<ul style="list-style-type: none"> a. Cilíndricos b. Tambores c. Transporte por tornillo d. Tubo giratorio con vapor e. Bandejas vibradoras f. Tipos especiales

Fuente: Introducción al secado de alimentos por aire caliente

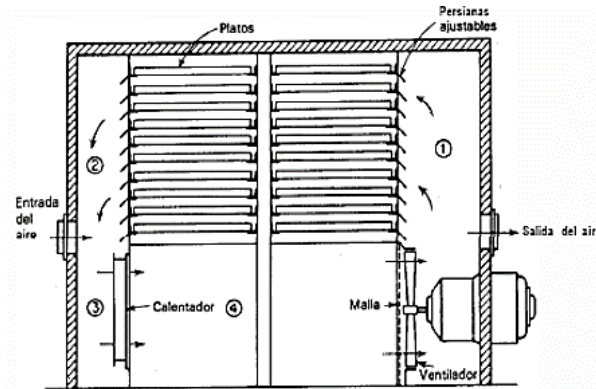
4. SELECCIÓN DE LOS TIPOS DE SECADORES

De acuerdo con la clasificación anteriormente descrita, los secadores directos presentan las mejores características para la aplicación del secado para cacao con un sistema de gases calientes alimentado por productos de combustión que hace menor el costo de funcionamiento. En primera instancia se descartó el secado dieléctrico para la aplicación por su alto costo de operación, que puede ser diez veces superior al del combustible necesario en los secadores directos y al elevado costo del equipo auxiliar requerido para generar este tipo de energía. Por otra parte, el infrarrojo es una nueva tecnología poco aplicada para el secado para cacao en Colombia que hace interesante su estudio.

4.1 SELECCIÓN DE LA DISPOSICIÓN DEL GRANO EN LA CÁMARA DE SECADO

4.1.1 Secador de bandejas. Consiste en una cámara rectangular con soportes móviles que sostienen los bastidores, cada bastidor lleva numerosas bandejas de poca profundidad (ver figura 9), en las cuales se hace circular el aire. Este tipo de secador resulta conveniente cuando la capacidad de producción es pequeña.

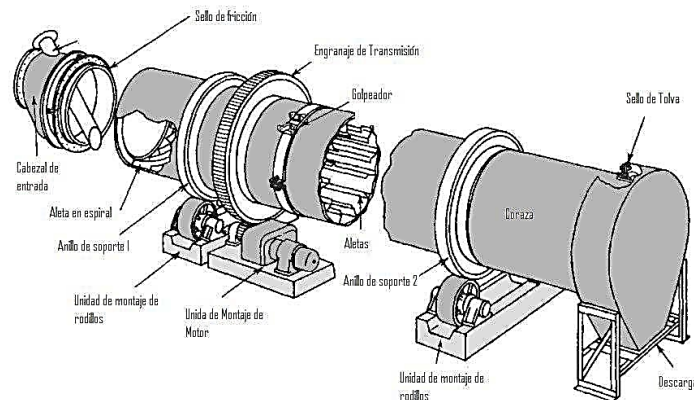
Figura 9. Secador de bandejas



Fuente: Robert E. Treybal. Operaciones de transferencia de masa

4.1.2 Secadores rotatorios. Un secador rotatorio consta de un cilindro que gira sobre su eje, dispuesto horizontalmente o con una ligera inclinación a la salida. El calentamiento se lleva a cabo por contacto directo con gases calientes mediante un flujo a contracorriente y en algunos casos el contacto indirecto a través de la pared calentada del cilindro. Los equipos rotatorios, se aplican al procesamiento de sólidos con sistemas por lotes o continuos.

Figura 10. Secador rotatorio



Fuente: Manejo de solido

Tabla 5. Factores de selección en la disposición del grano en la cámara de secado

ALTERNATIVAS	PRODUCTO A SECAR	VENTAJAS	DESVENTAJAS
BANDEJAS	Se utilizan principalmente para deshidratar frutas y verduras	Adaptable a grandes y pequeñas cantidades de deshidratación	Se controla con dificultad, por lo que es difícil un producto con características homogéneas.
		Bajo mantenimiento	
		Acelera la deshidratación.	
		Facilidad de evacuación del producto	
ROTATORIO	comprimidos de carne, azúcar granulado, tratamiento de las semillas de cacao.	Facilidad de operación	El deterioro mecánico provocado por la abrasión hace que este sistema solamente resulte aplicable a determinados productos.
		Amplia gama de materiales y tamaños de partícula	
		Apropiado para materiales con un porcentaje de humedad elevado	
		Evaporación rápida sin sobrecalentar el producto	
		Reduce el tamaño del equipo, así como la inversión y gastos de funcionamiento.	
		Deshidratación homogénea.	
		Adecuado para el procesamiento continuo y por lotes	
permite el ahorro de energía y la integración de sistemas			

Fuente: Elaboración propia

5. METODOLOGÍA DEL DISEÑO

5.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE GRANOS DE CACAO FERMENTADOS

Para la identificación de estas condiciones se realizaron visitas a diferentes fincas cacaoteras en la región de Santander (ver figura 11), con la finalidad de seleccionar los granos de estudio y elegir las fincas proveedoras. La selección se realizó en base a tres factores, el primero, la producción, que garantice contar con el volumen necesario de producto para realizar pruebas; segundo, la ubicación, que fuera un lugar próximo a la universidad y con condiciones climáticas similares; tercero, que los productores necesiten mejorar el proceso de secado.

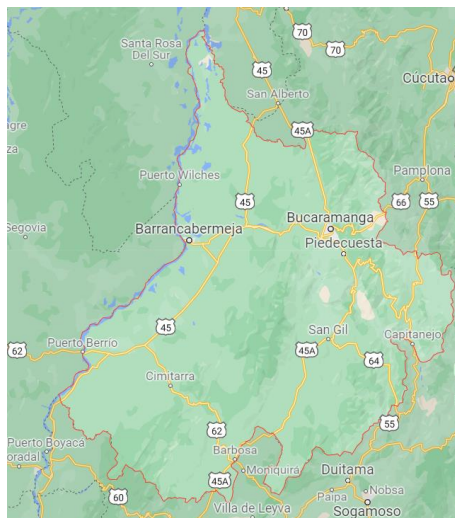
La recolección de muestras se ejecutó en tres fincas diferentes con cacao listo para iniciar el proceso de secado. La primera vía Rionegro km 8, vereda Puente Tierra municipio de Bucaramanga, Santander con condiciones ambientales del lugar, temperatura promedio del ambiente a 28 °C y humedad relativa promedio del 71%. La segunda finca en el km 4.5, vereda Paramito, Ruitoque Alto, Floridablanca, Santander con condiciones ambientales del lugar de temperatura promedio del ambiente 26 °C y humedad relativa promedio del 76%. La tercera finca en el km 9, vía Lebrija-El Cebadero, vereda El Cedro, Lebrija, Santander con condiciones ambientales del lugar, temperatura promedio del ambiente 25 °C y humedad relativa promedio del 78% (Ver tabla 6).

Tabla 6. Información detalla de las Fincas

SECTOR	N° DE LA FINCA	PROPIETARIO	UBICACIÓN Latitud/ Longitud	ALTITUD m.s.n.m
BUCARAMANGA	1	Oscar Gutierrez	7°12'39.2"N 73°08'08.1"W	950
RUITOQUE FLORIDABLANCA	2	Jose Osorio	7°02'01.9"N 73°05'04.7"W	1200
LEBRIJA	3	Isidoro Ripre	7°05'19.8"N 73°16'57.2"W	1250

Fuente: Elaboración propia

Figura 11. Sector geográfico desarrollo del proyecto



Fuente: Santander Colombia. Google Maps.

5.1.1 CARACTERÍSTICAS OPERACIONALES DEL SECADOR

- Cacao con proceso de fermentación finalizado.
- La temperatura de secado será menor o igual a 70 °C y mayor a 30 °C.
- Los sistemas deben reducir el contenido de humedad de los granos de cacao de un proceso post-fermentación hasta un ideal esperado de 7,5%.
- El equipo deberá estar diseñado para una capacidad de 5 kg con un tiempo supuesto de secado de 15 horas.

5.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL CACAO POST-FERMENTACIÓN

Se realiza una inspección con la selección de granos a secar para verificar visualmente que vengan de un buen proceso de fermentación, se realizan cortes longitudinales al grano,

basados en el color y textura del grano, como se aprecia en la figura 12, se trata de un grano con testa de color blanquecino con alto grado de humedad y presencia de mucilago

Figura 12. Corte longitudinal del grano fermentado al día 6



Fuente: Autores

5.2.1 Determinación de humedad de cacao post-fermentación (método de horno).

La valoración del contenido de humedad del grano después de la fermentación permitió tener una referencia de las condiciones iniciales del proceso de secado.

El proceso de valoración se fundamentó en determinar la pérdida de contenido de agua cuando una muestra de material es sometida a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ por un tiempo que asegure la pérdida de agua de solvatación que generalmente es de 12 horas, de un grano con alto contenido de humedad.

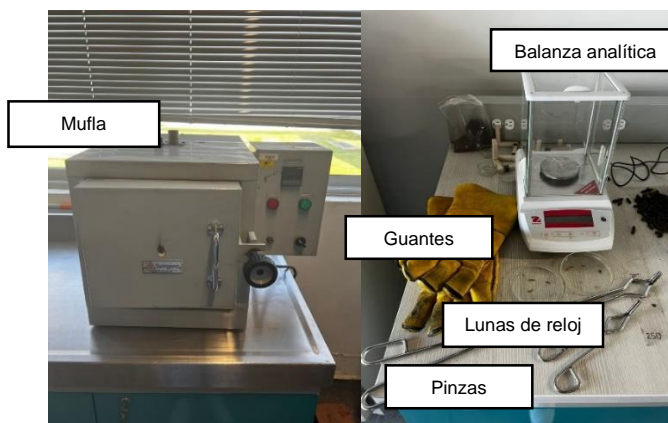
Materiales

- Lunas de reloj, resistente al ataque en las condiciones de ensayo.
- Pinzas
- Guantes

Equipos

- Balanza analítica, con al menos una legibilidad de 1 mg.
- Mufla TERRÍGENO d8, Control de temperatura Maxthermo MC5438.

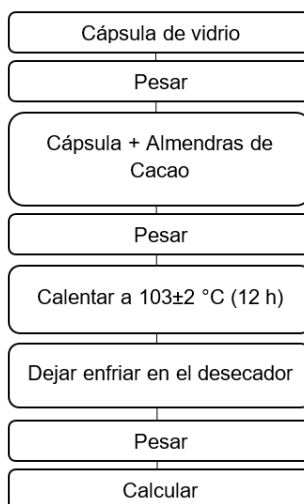
Figura 13. Materiales y equipos



Fuente: Autores

Diagrama de flujo del procedimiento

Figura 14. Determinación del contenido de humedad en las almendras de cacao



Fuente: Elaboración propia

Fracción de la muestra de ensayo

Este proceso consistió en: pesar la cápsula vacía, colocar rápidamente en la cápsula la fracción de la muestra de ensayo; para este procedimiento se usaron 5 granos de cacao fermentado. Para el aseguramiento de la calidad del ensayo, todas las muestras se realizan en duplicado o triplicado, los resultados no debían exceder una repetibilidad superior al 5% para poder promediar los valores obtenidos y expresarlos en porcentaje de humedad.

Determinación

Consistió en: colocar la cápsula que contiene la muestra de ensayo en la mufla controlada a 103 ± 2 °C. Dejar durante 12h, teniendo en cuenta de no abrir la mufla. Al final de este periodo, retirar la cápsula, y colocarla en el desecador, dejar que se enfríe a temperatura ambiente (aproximadamente de 30 min a 40 min) y pesar.

Método de cálculo y formula

El contenido de humedad de la muestra de referencia, expresado como fracción de masa, está dado por la fórmula:

$$H = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 100}{m_1 - m_0} \quad (1)$$

donde, H es el contenido de humedad, en %, m_0 es la masa de la cápsula vacía, m_1 es la masa de la capsula con la fracción de muestra de ensayo antes de ingresar a la mufla, m_2 es la masa de la cápsula y la fracción de muestra de ensayo después de ingresar a la mufla (12h después).

Figura 15. Evidencia fotográfica del cacao antes y después del procedimiento.



Fuente: Autores

Tabla 7. Resultados cálculo humedad de las muestras de referencia

Post-Fermentación	Muestra A	Muestra B
Mo (g)	45,3431	43,3508
M1 (g)	62,4828	61,6506
M2 (g)	52,7847	51,2876
% Humedad	56,58	56,63
% Humedada Promedio	56,61	

Fuente: Elaboración propia

5.3 CALOR ABSORBIDO POR LOS GRANOS DE CACAO

5.3.1 Balance de masa. Basados en la metodología del análisis termodinámico, se realiza un análisis de flujo de entrada y salida de producto húmedo. Se especificó que la capacidad del equipo será secar 5 kg con un tiempo de secado supuesto de 15 horas según la caracterización experimental de las propiedades físicas del cacao, a una temperatura de cámara de secado de 70° C. Con estos datos podemos obtener el flujo

másico del cacao húmedo que ingresa a la cámara de secado, para esto usamos la ecuación 2.

$$\dot{m}_{c\ in} = \frac{m_{total}}{t_s} \left[\frac{Kg}{h} \right] \quad (2)$$

Donde:

$\dot{m}_{c\ in}$: Flujo masico del cacao húmedo que entra a la cámara, Kg/s.

m_{total} : Masa total de cacao a secar, kg.

t_s Tiempo de secado, s

En la figura 16 se analiza el balance de masa existente en la cámara de secado.

Figura 16. Balance de masa



Fuente: Elaboración propia

En la ecuación 3, al realizar el balance general tenemos que la masa de cacao húmedo inicial ($\dot{m}_{c\ in}$) será la suma del cacao seco ($\dot{m}_{c\ out}$) más la cantidad de agua evaporada (\dot{m}_w); los cuales, a su vez tienen base sólida y líquida.

$$\dot{m}_{c\ in} = \dot{m}_{c\ out} + \dot{m}_w \quad (3)$$

$$\dot{m}_{c\ in} = \dot{m}_{s\ in} + \dot{m}_{w\ in} \quad (4)$$

$$\dot{m}_{c\ out} = \dot{m}_{s\ out} + \dot{m}_{w\ out} \quad (5)$$

A la entrada del secador, el cacao tiene un contenido de humedad (X_{in}) de 56,61% bulbo húmedo (bh), lo que indica que el cacao está compuesto de un 56,61% de agua y un 43,39% de solido seco. Para obtener el flujo másico de solido seco ($\dot{m}_{s\ in}$) y el flujo masico de agua ($\dot{m}_{w\ in}$) a la entrada del secador se utilizan las ecuaciones 6 y 7 respectivamente.

$$\dot{m}_{s\ in} = (1 - X_{in}) * \dot{m}_{c\ in} \quad (6)$$

$$\dot{m}_{w\ in} = X_{in} * \dot{m}_{c\ in} \quad (7)$$

El flujo de solido seco no cambia, es decir permanece constante todo el proceso.

$$\dot{m}_{s\ out} = \dot{m}_{s\ in} \quad (8)$$

Para determinar el flujo másico de agua a la salida del secador sabemos que a la salida del secador la humedad del producto debe ser de 7,5% bh (X_{out}), es decir que el cacao estará compuesto 7,5% de agua y 92,5% en base sólida.

$$\dot{m}_{s\ out} = (1 - X_{out}) * \dot{m}_{c\ out} \quad (9)$$

$$\dot{m}_{w\ out} = X_{out} * \dot{m}_{c\ out} \quad (10)$$

Despejando de la ecuación 10 el flujo másico de cacao seco y reemplazando en la ecuación 11 tenemos:

$$\dot{m}_{w\ out} = \frac{\dot{m}_{s\ in} * X_{out}}{1 - X_{out}} \quad (11)$$

Calculamos el flujo másico de producto húmedo a la salida del secador utilizando la siguiente relación:

$$\dot{m}_{c\ out} = \dot{m}_{s\ out} + \dot{m}_{w\ out} \quad (12)$$

Con la ecuación 13, sabremos la cantidad de cacao en kg que vamos a obtener al finalizar el proceso ($m_{t,out}$), donde t es el tiempo de secado supuesto.

$$m_{t,out} = \dot{m}_{c\ out} * t \quad (13)$$

Durante el proceso de secado, al extraer humedad el flujo de agua va disminuyendo, la diferencia entre el flujo de agua inicial $\dot{m}_{w\ in}$ y el flujo de agua final $\dot{m}_{w\ out}$ se denomina tasa de vaporización de agua (\dot{m}_w) y es la base para calcular el calor necesario.

$$\dot{m}_w = \Delta\dot{m}_w = \dot{m}_{w\ in} - \dot{m}_{w\ out} \quad (14)$$

Los cálculos detallados se encuentran en el Anexo A.

5.3.2 Calculo del calor específico del cacao

$$C_{pc} = \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_{c\ in}} \cdot Cp_{H_2O} + \frac{\dot{m}_{s\ in}}{\dot{m}_{c\ in}} \cdot C_{ps} \quad (15)$$

Donde C_{pc} es el calor específico del cacao, m_{H_2O} es la masa del agua, m masa total del agua, Cp_{H_2O} es el calor específico del sólido, m_s es la masa del sólido, C_{ps} es el calor específico del sólido.

5.3.3 Calor absorbido por el cacao. El flujo de aire caliente dentro de la cámara de secado permitirá una transferencia de calor por convección forzada. El aire durante su proceso cede energía en forma de calor hacia los sólidos, que están a menor temperatura para de esa manera producir la evaporación de la humedad superficial. La masa del agua evaporada sale de las partículas debido a la diferencia de presiones parciales de vapor y es arrastrada por la corriente de aire. En este proceso la entalpia del aire permanece

constante, ya que la misma energía que cede el aire para la evaporación es devuelta hacia el en forma de vapor de agua, incrementando de esa manera su humedad relativa y absoluta.

Para saber la cantidad de energía que se debe proporcionar a la cámara de secado, es necesario determinar la cantidad de calor que se requiere para que el cacao pase de una humedad inicial de 56,61% a una humedad final de 7,5% bh.

La energía o calor requerido (\dot{Q}_c) para retirar la humedad, es la que entrega el aire caliente que se obtiene del quemador ciclónico de biomasa del laboratorio de ingeniería mecánica de la Universidad industrial de Santander y es la misma energía que el aire perderá para efectuar el proceso de secado, además se debe añadir el calor ganado por los granos de cacao utilizando el calor específico correspondiente, se denomina \dot{Q}_c al calor absorbido por el cacao y esta cantidad de calor que absorbe el grano está conformada por la suma del calor sensible (\dot{Q}_s) para subir la temperatura sin que cambie su estado y el calor latente (\dot{Q}_L) de cambio de estado de la sustancia para evaporar el contenido de agua en los granos de cacao y se determina en la ecuación 16, donde h_{fg} es el calor latente de vaporización del agua, C_{p_c} es el calor específico del cacao y T_1, T_2 son las temperaturas de los granos de cacao a la entrada y salida del secador respectivamente.

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_s + \dot{Q}_L = \dot{m}_{c\ in} * C_{p_c} * (T_2 - T_1) + \Delta\dot{m}_w * h_{fg} \quad (16)$$

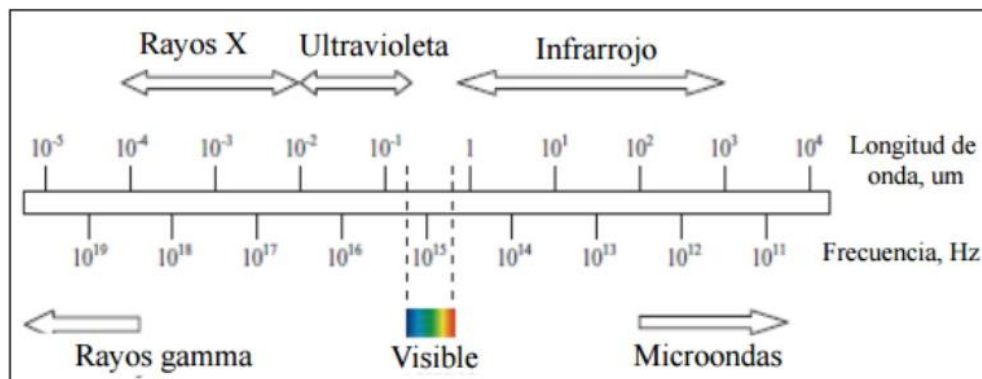
El calor que debe absorber los 5 kg durante el tiempo supuesto es $\dot{Q}_c = 122,7 [Watts]$, Los cálculos detallados se encuentran en el Anexo B.

5.4 DISEÑO CONCEPTUAL DEL PROTOTIPO DE SECADO CON LA IMPLEMENTACION DEL INFRARROJO LEJANO

Para el diseño del secador se consideran dos aspectos, primero el dimensionamiento y segundo las condiciones de generación de la fuente de calor.

5.4.1 Generación de calor placa infrarroja. El infrarrojo es un tipo de radiación electromagnética cuya longitud de onda es más larga que la de la luz visible pero más corta que la del microondas, la radiación infrarroja puede ser clasificada en tres regiones llamadas cercana o near (NIR), media o mid (MIR) y lejana o far (FIR), cuyas longitudes de ondas se encuentran entre 0,75 a 1,4; 1,4 a 3 y 3 a 1000 μm respectivamente.

Figura 17. Espectro electromagnético



Fuente: Informe de secado por FIR ministerio de producción de Perú

En general, los alimentos absorben radiación infrarroja lejana (FIR) más eficientemente a través de los mecanismos de cambio en el estado vibracional de las moléculas, lo que puede llevar a calentamiento por radiación. El agua y los compuestos orgánicos como proteínas y almidones, (principales componentes de los alimentos) absorben la energía

FIR a longitudes de onda λ mayores a $2,5 \mu\text{m}$. Dentro de estos componentes, el agua tiene un rol predominante en la absorción de la energía radiante en todas las longitudes de onda. Los enlaces O-H en el agua absorben la energía infrarroja y comienzan a rotar con la misma frecuencia que la radiación incidente. La transformación de la radiación infrarroja en energía rotacional causa la evaporación del agua. el infrarrojo lejano tiene la peculiaridad de que penetra en los cuerpos, lo que permite que el deshidratado acontezca de dentro hacia afuera¹⁹.

5.4.2 Calor desprendido por la placa de infrarrojo lejano. La placa para poder emitir la onda infrarroja que transporta la energía hasta los granos que se quieren calentar, requiere precisar una temperatura concreta, esta temperatura se obtiene utilizando una resistencia eléctrica que se calienta por efecto joule. Sin embargo, no se utiliza la energía para calentar el volumen de aire, sino que se utiliza para conseguir la emisión de onda infrarroja con una serie de longitudes de onda y energía determinadas y la onda infrarroja es la que proporciona la energía que permite que se sequen los granos.

Todo esto sucede gracias al efecto joule, que es el desprendimiento de calor provocado por el movimiento de electrones o corriente eléctrica. La energía eléctrica se transforma en energía radiante térmica que es la que se transmite. La transmisión de calor hacia los cuerpos a través de ondas infrarrojas no implica un calentamiento perceptible del aire de manera que prácticamente no se producen las corrientes de convección que aparecen en otros sistemas de calefacción y que consumen una cantidad de energía considerable.

El efecto joule y la cantidad de calor que se desprende depende de varias variables, entre ellas, la intensidad de corriente o el número de electrones que pasan por unidad de tiempo, la resistencia, la diferencia de potencial o voltaje, el tiempo y la potencia. Este efecto se recoge en la fórmula 17, y es utilizado para calcular la energía disipada.

¹⁹ Informe de secado por FIR ministerio de producción de Perú [En línea]. Instituto tecnológico de la producción. Perú, 10 abril 2017. [Fecha de consulta: 7 febrero 2022]. Disponible en: <https://www.gob.pe/itp#publicaciones>

$$E = P * t \quad (17)$$

Donde E es la energía o calor desprendido (medido en julios o calorías), P es la potencia consumida (medida en vatios) y t es el tiempo transcurrido.

La potencia disipada es igual a la diferencia potencial V a la que está sometido multiplicado por la intensidad de corriente I que lo atraviesa.

$$P = V * I \quad (18)$$

Se realizó la selección de la placa emisora radiante de infrarrojo lejano considerando la potencia requerida para 15 horas de secado, por un valor superior a 122,7 watts que es la cantidad de calor que absorbe los 5 kg de cacao despreciando las perdidas. En el comercio se pudo ubicar una placa de infrarrojo lejano de la empresa Econohome de 400 Watts, con un rango de temperatura de trabajo de 85°C. en la figura 18 se puede observar la imagen real de la placa y en la tabla 8 sus especificaciones.

Figura 18. Placa infrarrojo lejano



Fuente: Autores

- Dimensiones de la placa de infrarrojo lejano: 59,8 x 59,8 cm y un espesor de 1,33 cm.
- La placa tiene una diferencia potencial de 120 Voltios a 60 Hz y lo atraviesa una intensidad de corriente de 3,33 Amperios, y una potencia de 400 watts.
- Elemento calefactor cristal de carbono, diseño de superficie blanco, material de la superficie tereftalato de polietileno y soportes de aleación de aluminio.

Tabla 8. Especificaciones placa infrarrojo lejano

Características	Dimensión/Tipo
Alimentación	120 [V]
Corriente	3,33 [A]
Potencia	400 [W]
Temperatura Máxima	85[°C]
Dimensiones Área Infrarrojo	59,8 x 59,8 [cm]

Fuente: Elaboración propia

5.4.3 Dimensionamiento cámara de secado. Las dimensiones de la cámara de secado tienen una relación con la capacidad o cantidad de producto a tratar. Para el dimensionamiento de la cámara es importante determinar el volumen de cacao a secar (\tilde{V}_{cacao}) se sabe que el equipo debe estar diseñado para una capacidad de recepción de 5 kg de cacao post-fermentación.

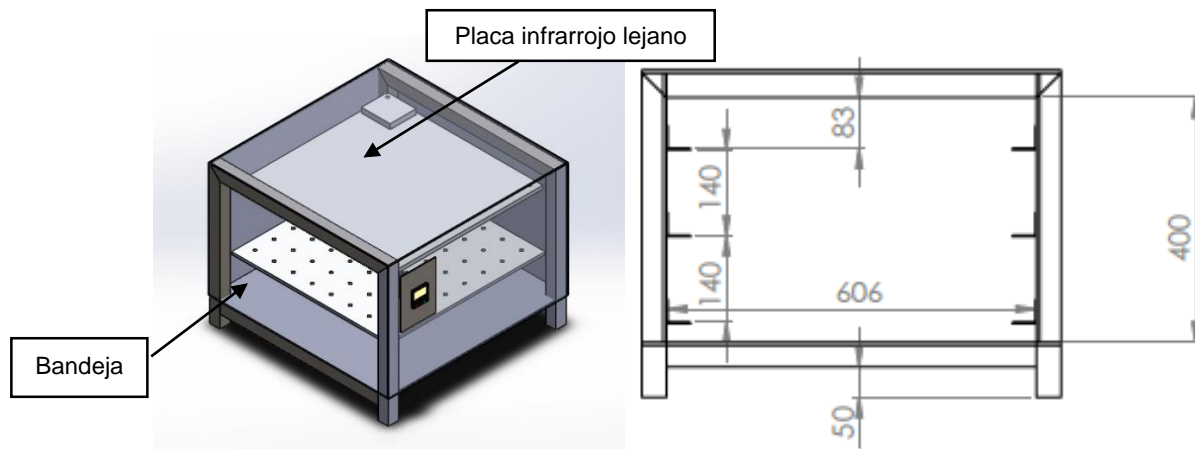
La ecuación 19 permite calcular el volumen de cacao post-fermentación a secar.

$$\tilde{V}_{cacao} = \frac{m_{total}}{\rho_{cacao}} \quad (19)$$

Donde m_{total} es la masa de cacao a secar y ρ_{cacao} es la densidad del cacao fermentado con valor de $775 \frac{Kg}{m^3}$, $\tilde{V}_{cacao} = 0,00645 [m^3]$.

Teniendo en cuenta las dimensiones ya establecidas del fabricante del emisor radiante, con un área de 0.596 m x 0,596 m; permite establecer el rango de medidas para la construcción de la bandeja de secado con una altura de 20 mm, cumpliendo con las recomendaciones, donde la masa de cacao no debe tener un espesor superior a los 5 cm en bandejas o camas²⁰. Las dimensiones geométricas que más se adaptan para realizar el respectivo ensamblaje de la placa se pueden ver en la figura 19.

Figura 19. Prototipo de diseño



Fuente: Elaboración propia

Las medidas están dadas en milímetros. Los detalles del diseño y dimensionamiento se encuentran en el anexo C.

²⁰ COMPAÑÍA NACIONAL DE CHOCOLATE. *Cosecha beneficio y calidad del cacao*. [sitio web]. Medellín, Colombia. [Consulta: 11 de noviembre 20221]. Disponible en: <https://chocolates.com.co/wp-content/uploads/2020/06/Cartilla-Cosecha-Benef-Calidad-SEP-2019.pdf>.

5.5 FASE DE CONSTRUCCIÓN

En esta fase se muestran las imágenes tomadas durante el proceso de trabajo, construcción y ensamble del prototipo de la máquina de secado infrarrojo lejano, se llevó a cabo en talleres externos de la Universidad industrial de Santander.

Figura 20. Estructura Interna



Fuente: Autores

Figura 21. Ensamble final



Fuente: Autores

Al tratarse de materiales en contacto con alimentos el material más adecuado para la construcción es el acero inoxidable, sin embargo, para la selección del material de la estructura se tuvo en cuenta que el grano de cacao no estaría en contacto directo, por lo cual se realizó la construcción en lámina acero Cold Rolled. Es un producto de acero que se obtiene por laminación en frío de bobinas o bandas en caliente mediante reducción mecánica de espesor (estiramiento) y aplicando tratamientos térmicos para obtener características finales. Para los perfiles estructurales se seleccionó como material acero calibre 18 y para los perfiles tipo L hierro.

La bandeja se diseñó y construyó con ángulos de hierro de 20x20 mm, con una malla plástica red 5000 cafetera, esto con el fin de que el grano de cacao no se contaminara y pudiera ir eliminando sus impurezas.

Figura 22. Bandeja de secado



Fuente: Autores

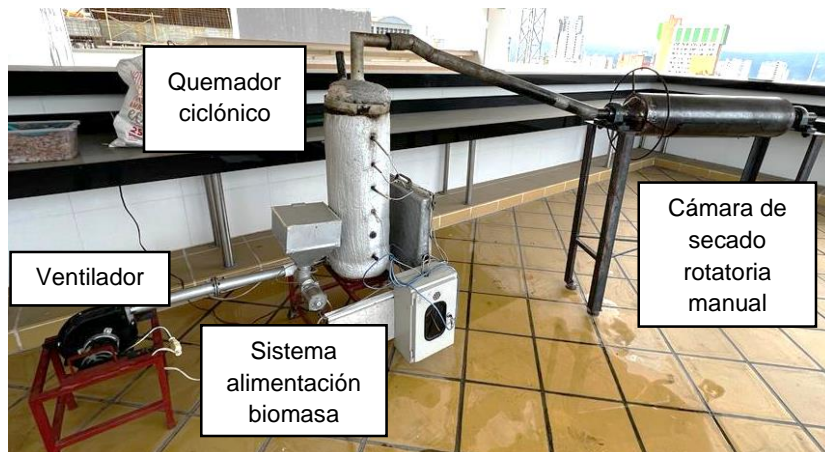
5.6 ADAPTACIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE GASES CALIENTES

El laboratorio de combustión de ingeniería mecánica, tiene a disposición: Un tambor cilíndrico de rotación manual, con volumen interior del cilindro de $\tilde{V}_1 = 0,02513 \text{ m}^3$ y una capacidad de 19,48 kg de cacao, que puede ser utilizado como cámara de secado. Un quemador ciclónico de biomasa con las siguientes características:

- Quemador de combustible sólido con capacidad de 1 a 5 kg/h de biomasa a una granulometría menor a 250 micras.
- Un ventilador con velocidad variable.
- Un tornillo sin fin de alimentación de biomasa con velocidad variable.
- Un manómetro análogo de la línea de salida del ventilador.

Que puede ser utilizado como fuente generadora de gases calientes.

Figura 23. Sistema quemador ciclónico de biomasa adaptado



Fuente: Autores

Figura 24. Manómetro analógico de la línea de entrada del aire al quemador ciclónico de biomasa



Fuente: Autores

Tabla 9. Caracterización del ventilador

Caudales de aire utilizando placa de orificio							
$\Delta H(m)$	$g(m/s^2)$	$\rho_{agua}(kg/m^3)$	$T(^{\circ}C)$	$\Delta P(Pa)$	$\dot{m}(kg/s)$	$\dot{m}(kg/h)$	$q_v(m^3/s)$
0,005	9,8	998,9	25	97,9	0,00801	28,836	0,006195
0,01	9,8	998,9	25	195,8	0,01602	57,672	0,01239
0,015	9,8	998,9	25	293,7	0,02403	86,508	0,01858
0,02	9,8	998,9	25	391,6	0,03204	115,344	0,02478

Fuente: Diseño y construcción de un quemador ciclónico de biomasa²¹.

La lectura del manómetro analógico $\Delta H(m)$ para las condiciones donde se garantiza una temperatura aproximada de $70^{\circ} C$ en la entrada de la cámara de secado es de: 0,02 m que hace referencia a un flujo másico de $\dot{m}_{aire,seg} = 0,03204 \text{ kg/s}$.

²¹ APARICIO, Andrés y HERRERA, Dairon. Diseño y construcción de un quemador ciclónico de biomasa para el laboratorio de combustión de la escuela de ingeniería mecánica. Trabajo de grado. Ingeniero mecánico. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenieras Físico-Mecánicas, 2022.

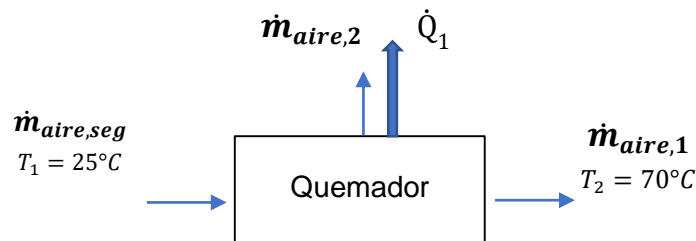
5.6.1 Balance de energía en el quemador. Realizando un balance de energía La potencia necesaria \dot{Q}_1 para sostener el sistema de gases calientes en funcionamiento es:

$$\dot{Q}_1 = V \cdot A \cdot \rho \cdot Cp \cdot (T_2 - T_1) \quad (20)$$

Donde, V es la velocidad del aire a calentar, A es el área que debe atravesar el aire, ρ es la densidad del aire, Cp es el capacidad calorífica del aire, T_2 y T_1 temperaturas de salida y entrada del aire respectivamente. Reemplazando los valores en la ecuación 20, se obtiene que $\dot{Q}_1 = 12,79 \text{ KW}$.

El flujo másico de aire que debe mover el ventilador ($\dot{m}_{aire,seg}$) es la suma del flujo másico que pasa a través del grano de cacao ($\dot{m}_{aire,1}$) más el flujo másico de aire que se utiliza en la combustión ($\dot{m}_{aire,2}$).

Figura 25. Balance de masa en el quemador.



Fuente: Elaboración propia

$$\dot{m}_{a,seg} = \dot{m}_{a,1} + \dot{m}_{a,2} \quad (21)$$

$$\dot{m}_{a,2} = \dot{m}_{comb} \cdot ACT \cdot (1 + e) \quad (22)$$

$$\dot{m}_{comb} = \frac{m_{comb}}{t} \quad (23)$$

Donde, \dot{m}_{comb} es la masa de combustible utilizado para mantener el sistema 15 horas en funcionamiento, ACT es el aire teórico estequiométrico del combustible, e es el exceso de aire en la combustión y se asume de un 30%. Se calcula ACT con la fórmula 24.

$$ACT = 11,53.C + 34,5 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 4,3.S \quad (24)$$

Donde, C es el % de carbono, H es el % de hidrógeno y S es el % de azufre en el combustible.

El flujo másico de combustible necesario para sostener el sistema de gases calientes en funcionamiento 15 horas, se determina con la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_{a,2}.PCI.\eta \quad (25)$$

Con un valor de \dot{Q}_1 de 12,79 KW, un poder calorífico inferior de aserrín de pino como biomasa PCI es de 19,775 KJ/Kg y una eficiencia térmica η del sistema de 45%. La cantidad de masa calculada con la ecuación 23 es de $m_{comb} = 10,07 \text{ kg}$.

Los detalles de los cálculos anteriormente descritos se encuentran en el anexo D.

5.7 CURVA DE SECADO

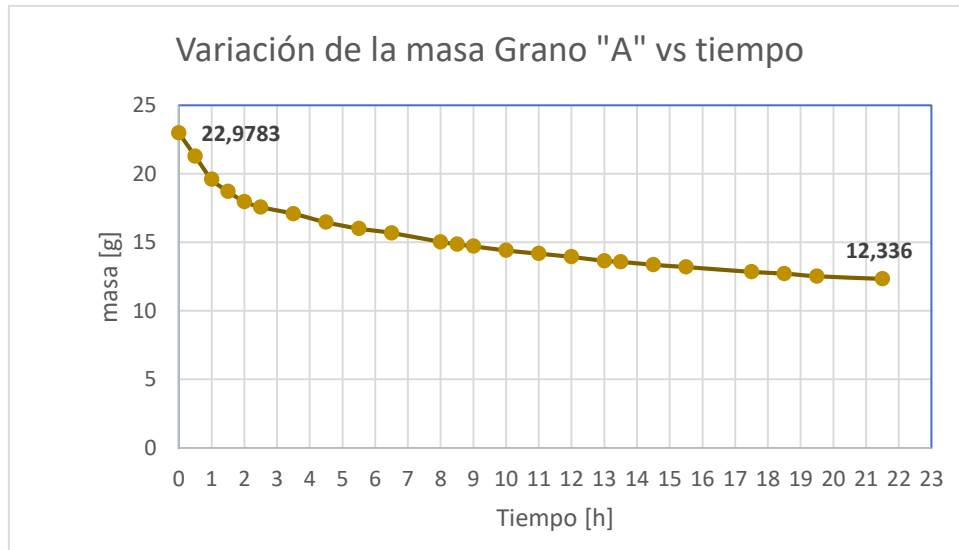
Las curvas de secado son construidas a partir de datos experimentales que dan información sobre la velocidad de secado de un alimento bajo determinadas condiciones. La información obtenida de estas curvas es útil para calcular, estimar o predecir el tiempo de secado.

El proceso para la obtención de la curva de secado consiste en registrar el cambio de la masa del grano con el tiempo. Este cambio se debe a la pérdida de agua y está relacionado con la humedad del grano. La humedad es una variable física definida como la cantidad de agua disuelta en un gas o absorbida en un sólido, en este caso en los granos de cacao post-fermentación, puede expresarse y ser calculada por la ecuación 1. Las especificaciones del equipo utilizado para realizar las curvas de secado fueron: prototipo con placa de infrarrojo lejano a una temperatura de placa de 70°C con bandeja de secado 60x60 cm de malla plástica perforada red 5000 y registrador de temperatura de bulbo seco; se tomaron 2 muestras representativas en partes iguales cada una con 7 granos de cacao, denominadas “Grano A” y “Grano B” para tener repetibilidad del ensayo. La humedad inicial en base húmeda de la muestra fue calculada en el capítulo 5.2.1 (ver tabla 7), con un valor promedio de 56,61 % de las muestras de cacao. Manteniendo constantes todas las variables del proceso de secado y obteniendo periódicamente el valor de humedad del sólido, de tal manera que puede graficarse la variación de la humedad en función del tiempo, obteniéndose la curva de secado.

En la figura 26 se muestra la pérdida de agua del producto “Grano A”, con respecto al tiempo de secado; al iniciar el proceso de secado la masa inicial m_{1Ai} es el valor de la masa del soporte de muestra más la fracción de muestra de ensayo $m_{1Ai} = 22,9783 \text{ g}$, la masa final de cacao obtenida de forma experimental en un tiempo de secado de 21,5 horas es de $m_{1Af} = 12,336 \text{ g}$.

Las tomas de datos se realizaron en diferentes tiempos para así tabular los resultados y tener una mejor aproximación, ver anexo E.

Figura 26. Variación de la masa del grano A vs tiempo



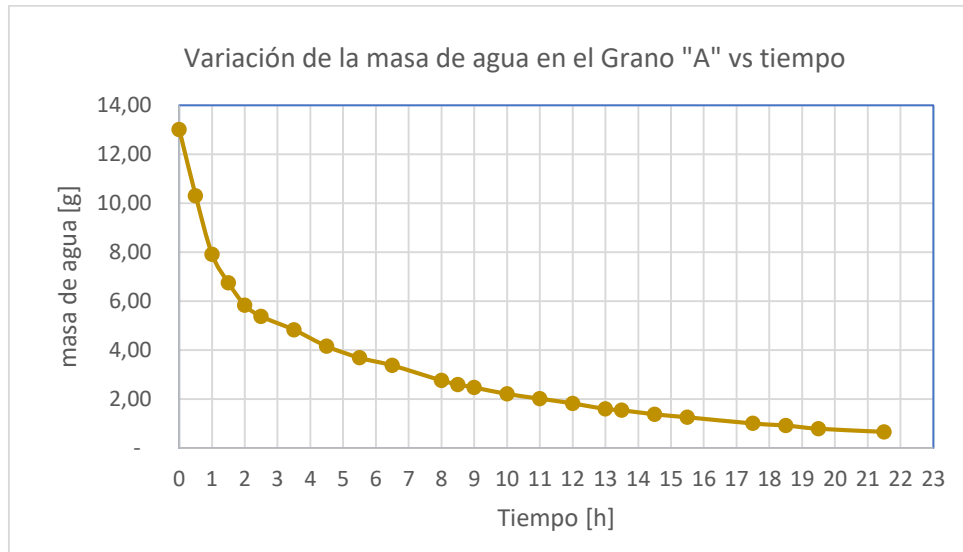
Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la figura 26 que las pérdidas de agua en el tiempo no son constantes, ni son lineales lo que significa que el grano de cacao post-fermentación entrega cantidades diferentes de agua en las mismas condiciones de temperatura, pero a diferentes condiciones físicas en cada instante de tiempo ver figura 27.

Como lo indica Pedro Fito Maupoey²² en la teoría del secado de alimentos una curva típica presenta 3 tendencias dentro de la curva humedad versus tiempo, tramo "A" es curvo bien definido por un polinomio de grado 3, tramo "B" una región donde la humedad disminuye aproximadamente de forma lineal a medida que aumenta el tiempo y por último se encuentra el tramo "C" una curva bien definida por una tendencia logarítmica, dicho fenómeno se presenta en la práctica experimental en la figura 27. Donde X_w representa la humedad, t el tiempo, X_{wo} la humedad inicial del sólido, X_{wc} el valor de la humedad crítica y X_{we} la humedad de equilibrio.

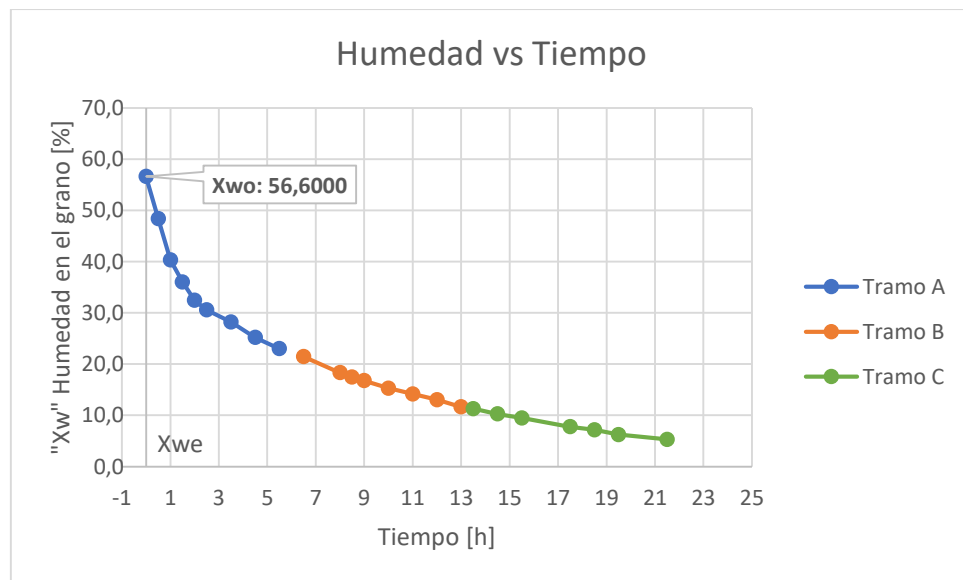
²² MAUPOEY, pedro fito. Op. cit..

Figura 27. Variación de la masa de agua en el grano A vs tiempo



Fuente: Elaboración propia

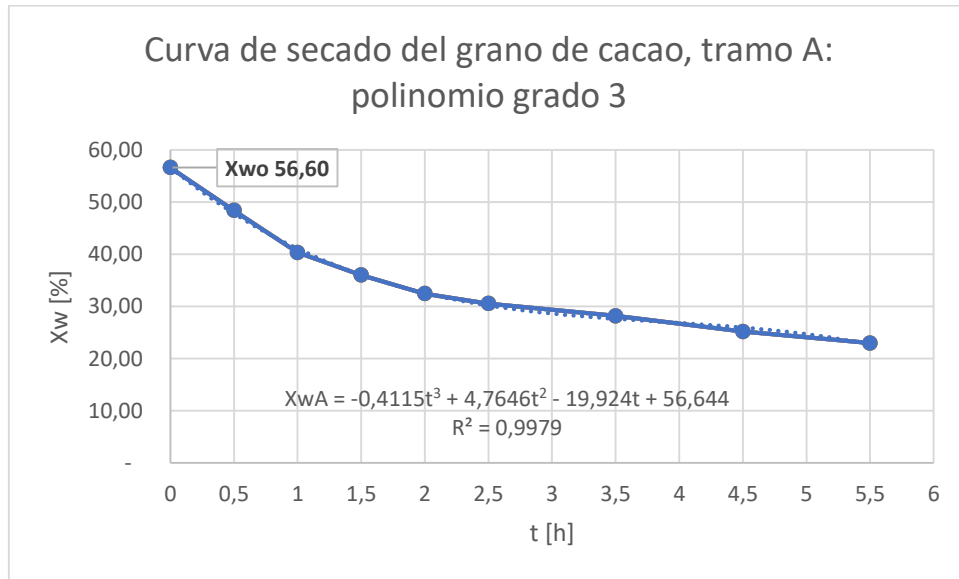
Figura 28. Curva experimental humedad vs tiempo



Fuente: Elaboración propia

Durante las primeras 5.5 horas las pérdidas de agua de la muestra van decreciendo según lo indicado por la curva típica de secado en el tramo “A”, ver figura 29.

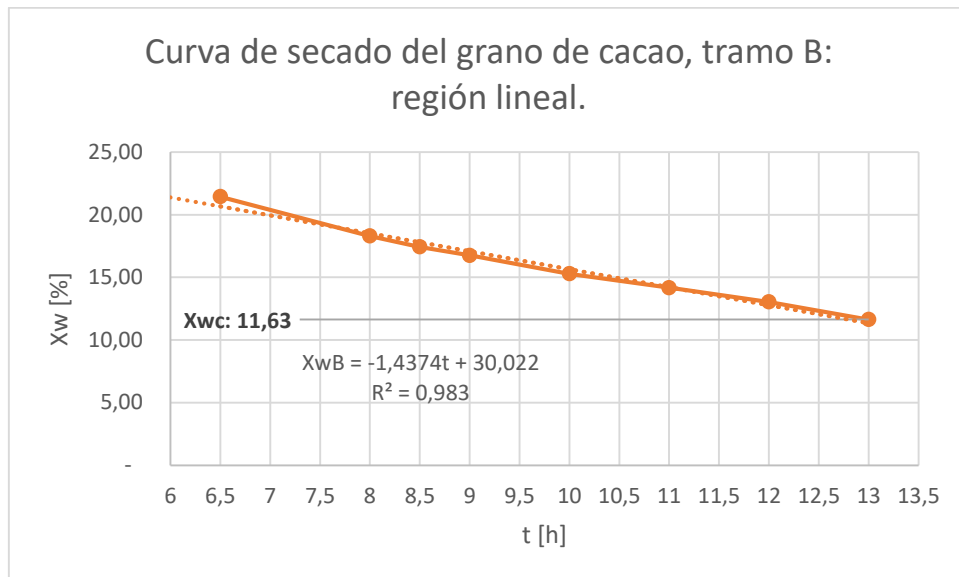
Figura 29. Curva de secado de grano de cacao, tramo A



Fuente: Elaboración propia

Después de las 6 horas y aproximadamente a las 13 horas de secado las pérdidas de agua de la muestra van decreciendo linealmente en el tramo “B”, ver figura 30. Por tanto, existe una relación directa constante para extraer agua del sólido dependiendo del contenido de su humedad, teniendo en cuenta que la temperatura sería un factor que delimite la velocidad de extracción.

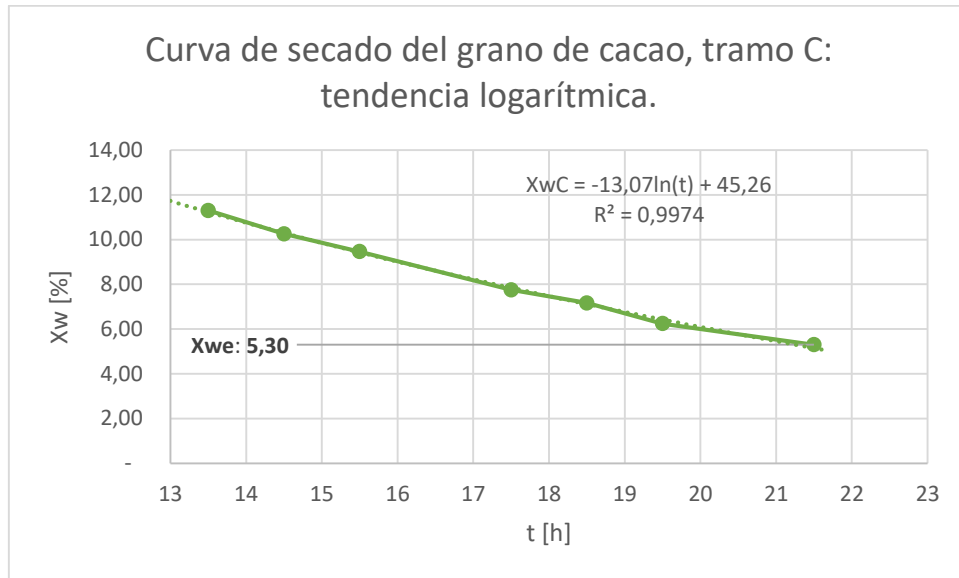
Figura 30. Curva del secado del grano de cacao, tramo B



Fuente: Elaboración propia

En la figura 31 se observa que después de las 13 horas, el comportamiento es el esperado con una tendencia logarítmica y que el contenido de humedad tiende a estabilizarse en el tiempo, se comprobó posteriormente con la norma NTC 1252 evaluando el contenido de humedad real final de las muestras con un valor de 11,29 % de humedad en el grano. Por tanto, se puede predecir que es necesario tener un mayor tiempo de secado.

Figura 31. Curva de secado del grano de cacao, tramo C



Fuente: Elaboración propia

5.7.1 Velocidad del secado. La rapidez con la que disminuye el contenido de humedad del sólido se conoce como velocidad de secado, al obtener las ecuaciones paramétricas de los 3 tramos “A, B y C”, fueron derivadas y evaluadas en función del tiempo, para obtener la curva de velocidad de secado versus el tiempo que se presenta en la figura 32. Las Ecuaciones de humedad vs tiempo en los tramos A, B y C son respectivamente:

$$X_{wA} = -0,4115 \cdot t^3 + 4,7646 \cdot t^2 - 19,924 \cdot t + 56,644 \quad (26)$$

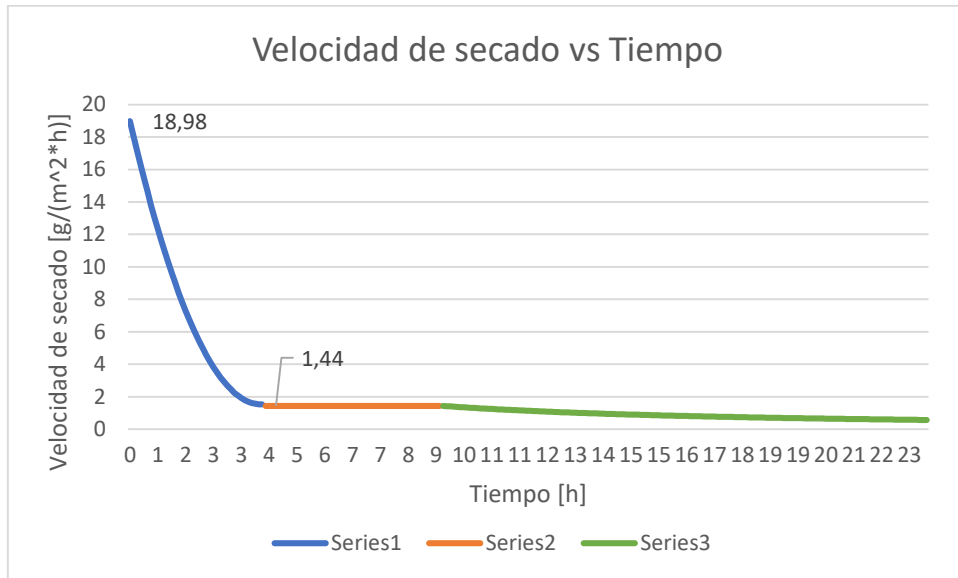
$$X_{wB} = -1,4373 \cdot t + 30,022 \quad (27)$$

$$X_{wC} = -13,07 \ln(t) + 45,26 \quad (28)$$

Ecuación de velocidad de secado vs tiempo:

$$v_{\text{secado}} = -\frac{d(X_w)}{dt} \quad (29)$$

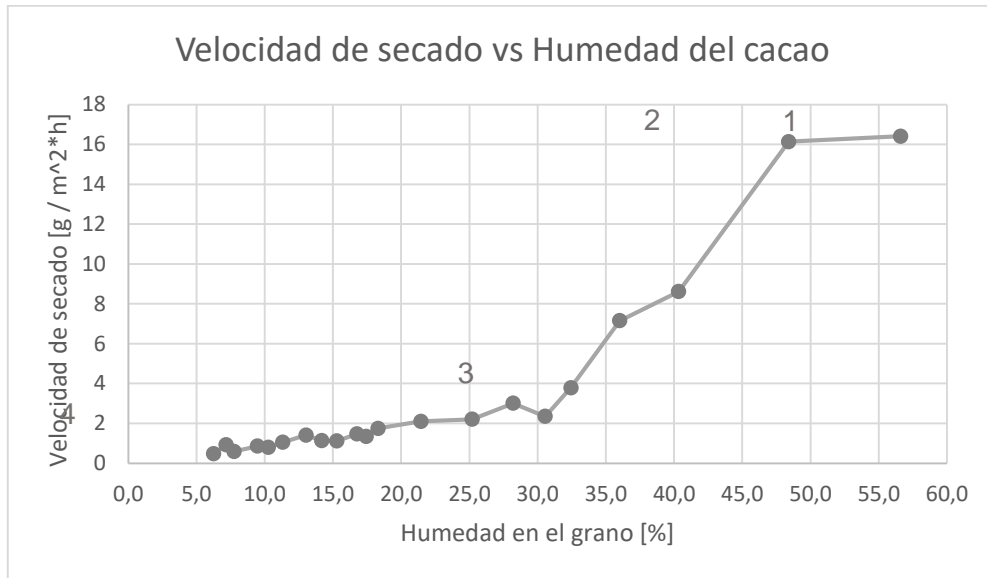
Figura 32. Velocidad del secado vs tiempo



Fuente: Elaboración propia

En el proceso de deshidratación del cacao, la velocidad de secado mayor se da al inicio cuando la humedad en el grano post-fermentación es mayor al 50% como se observa en la figura 32, con un valor 18,98 $[g/m^2s]$, cuando la humedad se presenta entre 50 y 30% correspondiente al tramo “B” la velocidad mantiene un valor constante de 1,44 $[g/m^2s]$ y en el tramo “C” decae hasta hacerse mínima.

Figura 33. Velocidad del secado vs humedad del cacao



Fuente: Elaboración propia

La reducción de humedad se realiza en una serie de etapas en las que la velocidad de secado va variando a lo largo del tiempo. El punto (1), es el punto de partida del proceso de secado. Durante el tramo (1-2) se produce una gran disminución de agua, manteniéndose constante la velocidad de secado, en el punto (2) se produce un cambio brusco de la velocidad en forma decreciente, hasta alcanzar el punto crítico (3) y por último el tramo (3-4) el proceso de extracción de humedad se vuelve lento.

5.7.2 Tiempo de secado. El punto crítico donde el proceso de extracción es lento es en el tramo C, el cual tiene una tendencia logarítmica. De los datos experimentales se obtiene una ecuación que describe la velocidad de secado como hipótesis en el tramo C para un tiempo total de 21,5 horas con humedad final esperada de 5,3 %.

Según lo establecido por la NTC 1252 para cacao de exportación es necesario obtener una humedad de 7,5%, por lo tanto el tiempo de secado experimental calculado con la ecuación 28 es $t_s = 18,9$ horas.

6. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE SECADO

Con el fin de conocer los comportamientos de los sistemas de secado propuestos, se pretende comprobar el tiempo de secado experimental con los diferentes factores expuestos en cada sistema, como el movimiento interior de los granos, la temperatura y la velocidad del medio desecante. Una vez realizadas las pruebas de secado de cada sistema, se comprueba por norma del cacao en grano NTC 1252, el valor real de la humedad al finalizar el proceso de secado con el fin de comparar si se ha llegado a la humedad requerida o si se necesita un mayor o menor tiempo de secado.

6.1 DETERMINACIÓN DE HUMEDAD DE CACAO SECO SEGÚN NTC 1252 (MÉTODO DE HORNO).

El proceso de valoración se fundamentó en determinar la pérdida de contenido de agua cuando una muestra de material es sometida a 103 ± 2 C por un tiempo que asegure que pierde agua de solvatación, según la NTC 1252 es de 16 horas, tiempo que asegura una pérdida de agua debido a la humedad de las muestras.

Materiales

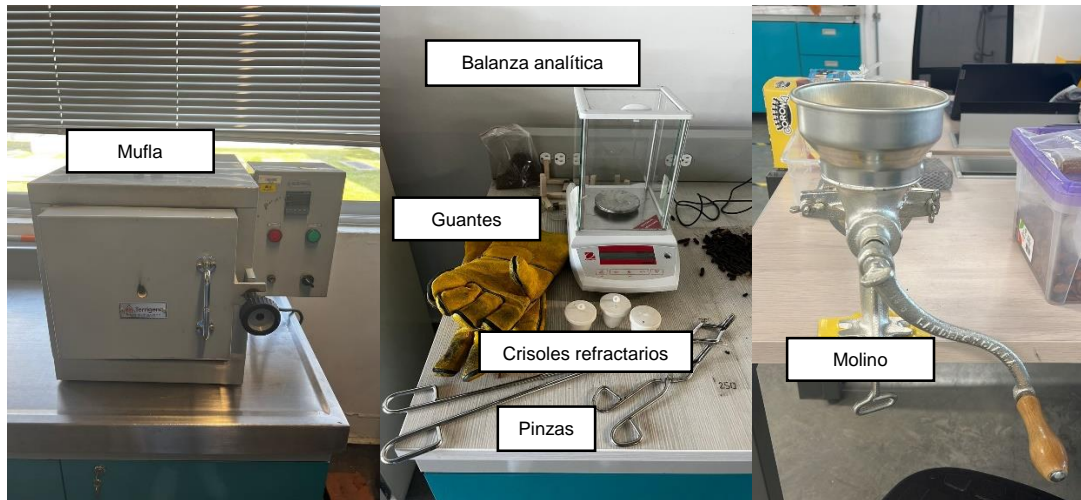
- Crisoles refractarios con tapa, resistente al ataque de las condiciones de ensayo, 30 ml
- Pinzas
- Guantes

Equipos

- Molino, que permita moler los granos sin calentar
- Balanza analítica, con al menos una legibilidad de 1 mg.

- Mufla TERRÍGENO d8, Control de temperatura Maxthermo MC5438.
-

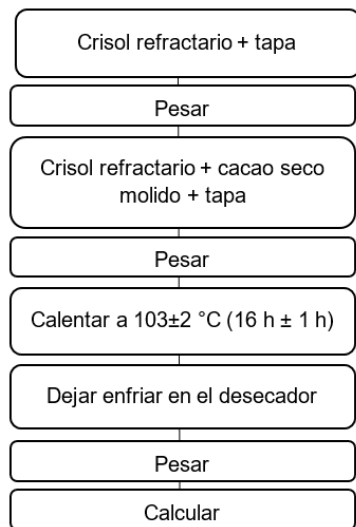
Figura 34. Materiales y equipos



Fuente: Autores

Diagrama de flujo del procedimiento

Figura 35. Determinación del contenido de humedad en las almendras de cacao



Fuente: Elaboración propia

Fracción de la muestra de ensayo

Procedimiento en el cual se debe: pesar el crisol refractario vacío, seleccionar aleatoriamente una muestra representativa de granos, colocar rápidamente en la cápsula la fracción de la muestra de ensayo con 10 g de cacao molido, pesar el crisol refractario con tapa, que contenga la fracción de la muestra de ensayo. Para el aseguramiento de la calidad del ensayo, todas las muestras serán realizadas en duplicado o triplicado, los resultados no deben exceder una repetibilidad superior al 5% para poder promediar los valores obtenidos y expresarlos en porcentaje de humedad.

Determinación

Consistió en: Colocar la cápsula que contiene la muestra de ensayo en la mufla controlada a 103 ± 2 °C. Dejar durante $16 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$ teniendo en cuenta de no abrir la mufla. Al final de este periodo, retirar la cápsula, y colocar en el desecador, dejar que se enfríe a temperatura ambiente (aproximadamente de 30 min a 40 min) y pesar.

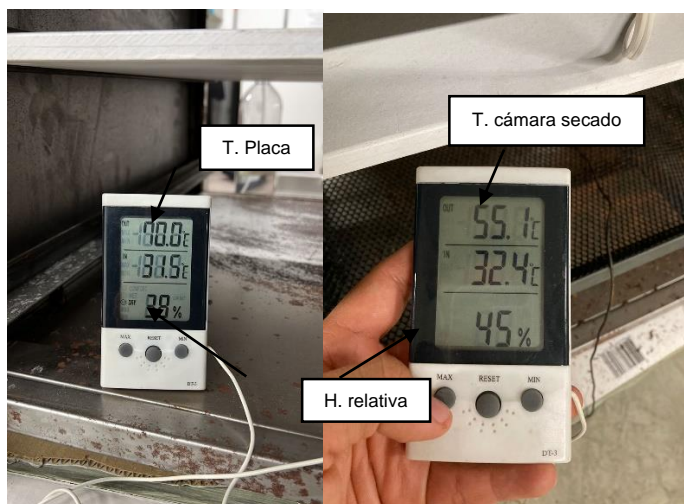
Método de cálculo y fórmula

El contenido de humedad de la muestra de referencia, expresado como fracción de masa, está dado por la Ecuación 1.

6.2 ESPECIFICACIONES PARA LAS PRUEBAS DE INFRARROJO LEJANO.

La cámara de secado logró tres temperaturas, la de la placa que es la de superficie de radiación la cual fue de 70°C, 32 °C la temperatura del aire próximo que está en la cámara de secado que se da por convección natural y la temperatura de la bandeja de secado de 55.1°C. El otro valor es la humedad relativa del ambiente que esta varía de acuerdo a las condiciones de secado. Ver figura 36.

Figura 36. Medición de temperaturas en la cámara de secado



Fuente: Autores

Se utilizó la metodología expuesta anteriormente en el numeral 6.1 y la ecuación 1 de la caracterización de las propiedades físicas del cacao del numeral 5.2.1 y según la NTC 1252 para determinar la humedad del grano post-secado.

6.2.1 Prueba 1 Infrarrojo, Cacao finca Ruitoque. Bandeja sin orificios. Se comprueba la humedad inicial del secado de los granos según el numeral 5.2.1 los resultados de dicha humedad se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 10. Porcentaje de humedad post-fermentación finca Ruitoque

Muestra (5 granos)	Peso luna vacía	Peso inicial	Peso final	% Humedad	% H Promedio
1 prueba de secado	45,3426	57,8753	51,8159	48,35	51,13
	43,3406	55,9093	49,4378	51,49	
	42,63	58,314	49,9167	53,54	

Fuente: Elaboración propia

A continuación, Se tomaron 5 kg de muestra, a la temperatura máxima de la placa, y humedad promedio de 51,13% del grano, la duración de dicha prueba fue de 17 horas y 30 minutos, durante las cuales el cacao no se le realizó volteos constantes de masa.

Se comprueba la humedad de cacao seco según NTC 1252 descrita en el numeral 5.8.1 y se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 11. Porcentaje de humedad post-secado, prueba 1 infrarrojo

Muestra (10g)	Peso Crisol vacío	Peso inicial	Peso final	% Humedad	% H Promedio
1 prueba de secado	39,5981	49,472	48,319	11,68	10,94
	36,9400	49,8999	45,8706	10,33	
	36,1625	46,100	45,0258	10,81	

Fuente: Elaboración propia

Figura 37. Muestra aleatoria de recepción de cacao post-fermentación finca Ruitoque



Fuente: Autores

Figura 38. Muestras aleatorias post-secado, prueba 1 infrarrojo



Fuente: Autores

6.2.2 Prueba 2 Infrarrojo, Cacao finca Lebrija. Bandeja con malla pastica red 5000 cafetera. Se comprueba la humedad inicial del secado de los granos según el numeral 5.2.1 los resultados de dicha humedad se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 12. Porcentaje de humedad post fermentación finca Lebrija

Muestra (5 granos)	Peso Luna vacía	Peso inicial	Peso final	% Humedad	% H Promedio
2 prueba de secado	45,3431	62,4828	52,7847	56,58	56,61
	43,3508	61,6506	51,2876	56,63	

Fuente: Elaboración propia

A continuación, Se tomaron 5 kg de muestra, a la temperatura máxima de la placa, y humedad promedio de 56,61% del grano, para esta prueba se tuvo en cuenta realizar volteos constantes de masa y se tomaron diferentes muestras aleatorias en diferentes tiempos, las duraciones de dichas pruebas fueron de 15.5 horas para la muestra A, 21.5

horas para la muestra B y por ultimo 24.8 horas muestra C, de las cuales se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 13. Porcentaje de humedad post secado, prueba 2 infrarrojo

Muestra (10 g)		Tiempo	Peso Crisol vacío	Peso inicial	Peso final	% Humedad
2 prueba de secado	Muestra A	15.5 h	39,5889	49,5896	47,716	18,73
	Muestra B	21.5 h	36,9352	46,940	45,8101	11,29
	Muestra C	24,8 h	36,1573	46,3359	45,59	7,34

Fuente: Elaboración propia

Como resultado se requiere un tiempo de 24,66 horas para obtener una humedad de 7,5 %, valor calculado de la iteración con los datos de la tabla anterior.

Figura 39. Muestras aleatorias de cacao post fermentación finca Lebrija



Fuente: Autores

Figura 40. Muestras aleatorias de cacao post secado 21.5 horas, prueba 2 infrarrojo



Fuente: Autores

Figura 41. Muestras aleatorias de cacao post secado 24.8 horas, prueba 2 infrarrojo



Fuente: Autores

6.2.3 Prueba 3 híbrida, cacao finca Lebrija con luz solar e infrarrojo. Se propuso una prueba adicional implementando secado natural y artificial con el infrarrojo lejano, sin exponer los granos a una temperatura alta durante las primeras 6 horas, tiempo en el cual se presenta el mayor retiro de agua.

Para determinar la humedad post-fermentación, se realizó el respectivo proceso para poder promediar los valores obtenidos y expresarlos en porcentaje de humedad, los resultados de dicha humedad se detallan anteriormente en la tabla 12.

A continuación, Se tomaron 5 kg gramos de muestra, y se expusieron al sol durante el primer día por 6 horas, posteriormente se tomaron las muestras se hizo la recepción de su peso y se llevaron a la cámara de secado con infrarrojo lejano para culminar el proceso de secado, se expusieron a la temperatura máxima de la placa, con una humedad promedio de 56,61% del grano, para esta prueba se tuvo en cuenta realizar volteos constantes de masa y se tomaron diferentes muestras aleatorias en diferentes tiempos, las duraciones de dichas pruebas fueron, 11 horas para la muestra A, 13 horas para la muestra B y por ultimo 18 horas para la muestra C, de las cuales se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 14. Porcentaje de humedad post secado, prueba 3 híbrida

Muestra (10 g)		Tiempo	Peso Crisol vacío	Peso inicial	Peso final	% Humedad
1 prueba de secado	Muestra A	11 h	34,5114	43,864	42,7394	12,02
	Muestra B	13 h	36,1607	46,1766	45,3078	8,674
	Muestra C	18 h	36,9397	46,946	46,2488	6,97

Fuente: Elaboración propia

Como resultado se requiere un tiempo de 16,44 horas para obtener una humedad de 7,5 %, valor calculado de la iteración con los datos de la tabla anterior.

Figura 42. Muestras aleatorias de cacao post-secado, radiación solar por 6 horas y 11 horas infrarrojo, prueba 3 hibrida



Fuente: Autores

Figura 43. Muestras aleatorias de cacao post secado, radiación solar por 6 horas y 13 horas infrarrojo, prueba 3 hibrida



Fuente: Autores

Figura 44. Muestras aleatorias de cacao post secado, radiación solar por 6 horas y 18 horas infrarrojo, prueba 3 hibrida



Fuente: Autores

6.3 ESPECIFICACIONES PARA LAS PRUEBAS REALIZADAS CON EL SISTEMA DE CALENTAMIENTO POR GASES CALIENTES CON BIOMASA.

Se realizaron dos pruebas con el sistema de generación de gases calientes. Para generar la combustión se utilizó como biomasa aserrín con una granulometría menor a 250 micras, y se logró llegar a una temperatura máxima de 70°C y se mantuvo entre 60° y 70°C en las pruebas realizadas, con humedades relativas entre 70% la máxima y 47% la mínima. Se utilizó la misma metodología y ecuaciones para la caracterización de las propiedades físicas del cacao del numeral 5.2.2 y del numeral 6.1 para determinar la humedad del grano inicial y final del secado respectivamente.

6.3.1 Prueba 1 gases calientes. Cacao finca Lebrija. Se tomó como referencia la humedad inicial del proceso que se detalla anteriormente en la tabla 12.

Se inicia el proceso de secado después de la debida liberación de los gases contaminantes de combustión. Se tomaron 5 kg de muestra en malla pastica red 5000 cafetera, durante 8 horas, en las cuales la temperatura máxima alcanzada fue de 70°C y la cual se mantuvo, con una humedad relativa entre 62% y 70%. Se tomaron muestras aleatorias en diferentes tiempos, los intervalos de dichas muestras fueron de 2 horas para la muestra A, 4 horas para la muestra B y por ultimo 8 horas para la muestra C, de las cuales se obtuvieron los siguientes resultados.

Figura 45. Secado quemador ciclónico de biomasa, prueba 1



Fuente: Autores

Tabla 15. Porcentaje de humedad post secado, prueba 1 gases calientes

Muestra (10 g)	Tiempo	Peso Crisol vacío	Peso inicial	Peso final	% Humedad	
1 prueba de secado	Muestra A	4 h	36,1483	46,1399	41,9346	42,1
	Muestra B	6 h	39,5889	49,498	45,7687	37,6
	Muestra C	8 h	36,9352	46,876	43,7407	31,52

Fuente: Elaboración propia

Figura 46. Muestras aleatorias de cacao secado 2 horas, prueba 1 gases calientes



Fuente: Autores

Figura 47. Muestras aleatorias de cacao secado 4 horas, prueba 1 gases calientes



Fuente: Autores

Figura 48. Muestras aleatorias de cacao secado 8 horas, prueba 1 gases calientes



Fuente: Autores

6.3.2 Prueba 2 gases calientes. Cacao finca Lebrija. Se tomó como referencia la humedad inicial del proceso que se detalla anteriormente en la tabla 12.

Se inicia el proceso de secado después de la debida liberación de los gases contaminantes de combustión. Se tomaron 5 kg de muestra en malla pastica red 5000 cafetera totalmente cubierta, para reducir la contaminación que se genera debido a los gases de combustión, durante 13 horas en las cuales la temperatura máxima alcanzada fue de 69.4°C y se logró mantener entre 60°C y 69.4°C. Con una humedad aproximada de 50%, Se tomaron muestras aleatorias en diferentes tiempos, los intervalos de dichas muestras fueron de 4 horas para la muestra A, 8 horas para la muestra B y por ultimo 13 horas para la muestra C, de las cuales se obtuvieron los siguientes resultados.

Figura 49. Secado quemador ciclónico de biomasa, prueba 2



Fuente: Autores

Tabla 16. Porcentaje de humedad post secado, prueba 2 gases calientes

Muestra (10 g)		Tiempo	Peso Crisol vacío	Peso inicial	Peso final	% Humedad
2 prueba de secado	Muestra A	4 h	39,5939	49,462	45,1616	43,6
	Muestra B	8 h	35,9492	45,9703	42,3647	35,98
	Muestra C	12 h	36,93	46,854	43,9741	29,06

Fuente: Elaboración propia

Figura 50. Muestras aleatorias de cacao secado 4 horas, prueba 2 gases calientes



Fuente: Autores

Figura 51. Muestras aleatorias de cacao secado 8 horas, prueba 2 gases calientes



Fuente: Autores

Figura 52. Muestras aleatorias de cacao secado 12 horas, prueba 2 gases calientes



Fuente: Autores

6.4 PRUEBAS ADICIONALES SECADO NATURAL

Se realizaron dos pruebas adicionales para comparar el secado natural y artificial en términos de calidad.

6.4.1 Prueba 1 Secado natural. Cacao finca puente tierra. Se tomaron 400 g de muestra de la finca puente tierra, y se expusieron a los rayos solares durante 7 días, durante los cuales al grano de cacao se le realizó volteos constantes de masa, dejando secar el primer día de 2 a 3 horas, el segundo día de 4 a 6 horas y el tercer día 8 horas y a partir del cuarto día se expusieron a la luz solar tratando de dejar el tiempo máximo de exposición solar, teniendo en cuenta condiciones climáticas.

En la figura 53 se observan muestras aleatorias de granos de cacao en el día 7 de secado de forma natural.

Figura 53. Muestras aleatorias de secado natural finca puente tierra



Fuente: Autores

6.4.2 Prueba 2 Secado natural, cacao finca Lebrija. Se tomaron 250 g de muestra de la finca puente tierra, y se expusieron a los rayos solares durante 7 días, durante los cuales al grano de cacao se le realizó volteos constantes de masa, dejando secar el primer día de 2 a 3 horas, a partir del segundo día se expusieron a la luz solar tratando de dejar el tiempo máximo de exposición solar, teniendo en cuenta condiciones climáticas.

En la figura 54 se observan muestras aleatorias de granos de cacao en el día 7 de secado de forma natural.

Figura 54. Muestras de secado natural aleatorias finca Lebrija



Fuente: Autores

6.5 CARACTERIZACIÓN GENERAL POST SECADO

Se tuvo en cuenta el tiempo experimental para las diferentes pruebas de secado con emisores de infrarrojo lejano y por gases calientes, al finalizar el proceso se determinó la humedad de cacao según la NTC 1252 debidamente.

Se obtuvieron las humedades finales de los dos sistemas de secado, tomando 10 g en muestras aleatorias de grano molido.

La tabla 17 muestra un resumen de la fase de pruebas y caracteriza los granos según la tabla 1 del presente proyecto.

Tabla 17. Características del grano en seco

Metodo	N° de prueba	Tiempo de secado	Humedad final %	Características	Causas
Infrarrojo	1	17,5 h	10,94 (promedio 3 muestras)	Aspecto compacto, muy duro y sólido, color violeta intenso	Insuficiente movimiento del grano, aceleración del proceso de secado
	2	21,5 h	11,29	Aspecto algo compacto, color violeta intenso, pocas grietas	Aceleración del proceso de secado en el tramo A
		24,8 h	7,3	Color café oscuro, el grano por dentro se esta quebrado, la cascarilla se desprende fácilmente	
Hibrida (6 h al sol + Tiempo de secado)	3	11 h	12,02	Algunos granos con aspecto quebradizo, sin embargo se aprecia un poco de humedad en ellos, fácil de quebrar con los dedos	Insuficiente tiempo de secado
		13 h	8,674	Grietas, quebradizo, cascara fácil de separar, sin embargo no llego a la humedad deseada	Cerca del punto de humedad deseada
		18 h	6,97	Grietas, quebradizo, cascara fácil de separar, sin embargo sobrepaso la humedad deseada	Excedido tiempo de secado
Gases calientes	1	2 h	43,6	Grano contaminado Grano bastante húmedo, algo aplanado, y como se puede observar se necesitan más de 8 horas para reducir su humedad. Aún no se observan grietas	Insuficiente tiempo de secado y condiciones no adecuadas
		4 h	39,98		
		8 h	43,6		
	2	4 h	24,6	Grano contaminado, húmedo, se observan pocas grietas, color violeta intenso	Insuficiente tiempo de secado y condiciones no adecuadas
		8 h	18,3		
		12 h	13,2		
Secado Natural	1	7 días	N/A	Color marrón en la mayoría de sus granos, quebradizos, con grietas, unos pocos semi compactos	Condiciones climáticas desfavorables
	2	7 días	N/A	Granos agrietados, de color marrón, la cascara tiene a ser un poco difícil de desprender	

Fuente: Elaboración propia

7. ESTUDIO COMPARATIVO DEL CONSUMO ENERGETICO

7.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Para el estudio comparativo del consumo energético se requiere establecer un periodo de análisis del sistema y conocer los costos específicos de la cantidad de energía demandada, para este estudio se relaciona la operación durante una hora.

Según la NTC 1252 el grano de cacao se debe reducir hasta una humedad final de 7,5 % condición que se cumplió por el prototipo diseñado de infrarrojo lejano en un tiempo de 24,66 horas, sin embargo, para el sistema de gases calientes la humedad mínima final alcanzada fue de 29,06 % en un tiempo de 12 horas.

EL costo de la energía está dado por:

$$C_E = C_{esp,E} * E \quad (30)$$

Donde, C_E es el costo de la energía, $C_{esp,E}$ es el costo específico de la energía que se utiliza y E es la energía de consumo.

$$E = \dot{Q} * t \quad (31)$$

Donde, \dot{Q} la potencia necesaria para sostener el sistema en funcionamiento y t el tiempo.

7.2 CONSUMO ENERGETICO EMISORES RADIANTES DE INFRARROJO LEJANO

El costo específico para la placa emisora de infrarrojo lejano es la tarifa de la energía eléctrica para el departamento de Santander en sitios oficiales, que para este caso el sitio de pruebas fue la Universidad Industrial de Santander, $C_{esp,E} = 628,46 \frac{\$}{KW-h}$.

Tabla 18. Consumo energía placa emisora infrarrojo lejano

Metodo	Temp. placa °C	Horas conexión	Potencia instalada W	Consumo dia KW/H	Precio KW/h Colombia	Costo hora COP
Infrarrojo	70	1	400	0,4	\$ 628,46	\$ 251,38

Fuente: Elaboración propia

El consumo de energía en los tiempos de secado en los cuales la condición final de humedad es 7,5% se muestran en la figura 19.

Tabla 19. Consumo energía placa emisora infrarrojo lejano con condición de humedad 7,5%

Metodo	Temp. placa °C	Horas conexión	Potencia instalada W	Consumo dia KW/H	Consumo mes KW/mes	Precio KW/h Colombia	Días de funcion	Costo al terminar el proceso	Costo mes COP
Infrarrojo	70	24,66	400	9,864	295,92	\$ 628,46	30	\$ 6.199,13	\$ 185.973,88
Hibrido	70	16,44	400	6,576	197,28	\$ 628,46	30	\$ 4.132,75	\$ 123.982,59

Fuente: Elaboración propia

7.3 CONSUMO ENERGETICO SISTEMA GASES CALIENTES CON BIOMASA

El costo específico de la energía de la biomasa está dado por la siguiente ecuación:

$$C_{esp,E} = \frac{\$_{esp,E}}{1 \text{ kg, aserrín} * PCI_{aserrín}} \quad (32)$$

Donde, $PCI_{aserrín}$ es el poder calorífico inferior de la biomasa y $\$_{esp,E}$ es el costo específico de la biomasa que está condicionado a los costos de recolección del residuo húmedo, traslado del residuo a la zona de acopio o de secado, traslado a la zona de molienda, costo energético de la molienda, costo de cernido y operación.

El material considerado combustible posee un poder calorífico que es la cantidad de energía específica por unidad de masa desprendida durante el proceso termoquímico de oxidación denominado combustión, para las pruebas experimentales se utilizaron residuos y desperdicios del proceso de serrado de madera, de diversos tamaños y contenido de humedad, que fueron recolectados de manera gratuita.

Si bien la biomasa disponible no tuvo ningún costo, se deben considerar los valores de operación de molienda, cernido y transporte para cumplir con las características del equipo que requiere el ingreso de una biomasa con granulometría a 250 micras.

El laboratorio de combustión tiene un molino con una capacidad de operación de 60 a 90 Kg/h a un tamizado de 0,8 mm que funciona con un motor de 2 HP. El tiempo de operación para la molienda fue de una hora para 40 kg de residuos de madera, La cantidad de biomasa que requiere el sistema para $t = 1 \text{ hora}$, es de 2,5 kg, reemplazando los valores de la ecuación 30, se obtiene que el costo de la energía de molienda para 2,5 kg es de \$58,56 COP. Posteriormente se realizó un tamizado hasta cumplir la granulometría menor a 250 micras. Con un valor de transporte de residuo al centro de molienda de \$312.5 COP. Con un costo específico total igual a 371.06 COP y un poder calorífico calculado del aserrín de $PCI_{aserrín} = 5309 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$.

El consumo energético total para este sistema de gases calientes es la sumatoria de todos los componentes, tales como el ventilador, motor del tornillo sinfín y el costo de la energía de adquisición de biomasa. El costo específico para el ventilador y el tornillo sinfín es el valor de la energía eléctrica mencionada anteriormente.

$$C_{ET} = C_E + C_{E,vent} + C_{E,sinfín} \quad (33)$$

Reemplazando en las ecuaciones 30, 31 y 32, el costo de la energía térmica para el sistema es de $C_E = 3.217 \text{ COP}$ y el costo de la energía total del sistema es $C_{ET} = 3.283 \text{ COP}$.

Tabla 20. Consumo energía gases calientes

Sistema	Temp. Camara °C	Horas conexión	Potencia instalada KW	Precio Biomasa	Costo hora
Quemador	70	1	12,89	\$ 371	\$ 3.283,0

Fuente: Elaboración propia

Los cálculos de la potencia \dot{Q} , $Pot, vent$ y $Pot, sinfín$ y costos se detallan en el anexo F.

7.4 COMPARACIÓN DE LOS DOS SISTEMAS

Un sistema con gases calientes se basa en el calentamiento de aire, por lo que producen unas grandes pérdidas energéticas debido a la necesidad de potencias altas y largo tiempo de funcionamiento, además, estos sistemas están condicionados por mas factores que pueden afectar la eficiencia del funcionamiento, como, por ejemplo, las características de la biomasa, en este caso debe tener unas condiciones óptimas para

tener un mayor rendimiento. El contenido de humedad en el aserrín es un determinante importante del valor calorífico en la quema, debido a la cantidad de energía necesaria para calentar las cantidades de aire sobrante y vaporizar la humedad que se encuentre en el residuo. El poder calorífico esperado para el aserrín era de 19,775 [KJ/Kg], sin embargo, el poder calorífico experimental de las muestras de biomasa fue de 5,309 [KJ/Kg], lo que indica que la cantidad de energía térmica aprovechada en la quema fue menor, lo que implica un mayor consumo de energía para garantizar las condiciones de secado requeridas.

Por lo contrario, un sistema que funcione con emisores de infrarrojo lejano en comparación con el sistema de gases calientes es más eficiente y tiene menos factores que condicionen su operación. El periodo de calentamiento del infrarrojo es menor comparado con el otro sistema ya que este requiere un tiempo de estabilización.

7.4.1 Resumen comparativo de los dos sistemas. En cuanto a ahorros en consumos podemos determinar en la tabla 21 una comparativa del ahorro de potencia y ahorro en precio monetario respecto a una hora de funcionamiento

Tabla 21. Comparativo de los dos sistemas

Metodo	Potencia instalada W	% Ahorro (Potencia)	Consumo mes/COP	% Ahorro (\$)	Mantenimiento
Infrarrojo	400	-96,87	\$ 251,38	-92,34	Nulo
gases calientes	12790	0	\$ 3.283,00	0	Alto

Fuente: elaboración propia

8. CONCLUSIONES

El sistema de secado artificial para cacao implementando emisores radiantes de infrarrojo lejano es una alternativa viable que cumple con el objetivo propuesto de reducir la humedad del grano de cacao hasta el 7,5 %.

Los emisores radiantes de infrarrojo lejano, son de bajo consumo y máxima eficiencia energética, que no requiere mantenimiento, y pueden ser adaptados fácilmente a un sistema de secado para cacao sin contaminaciones.

Se logró adaptar el sistema de calentamiento de gases calientes del laboratorio de ingeniería mecánica, aprovechando el poder calorífico del aserrín como combustible en la generación de gases calientes. Sin embargo, el sistema no llegó a las condiciones finales esperadas debido a las características de la biomasa utilizada y pérdidas de calor en los acoples del sistema.

El tamaño, homogeneidad y contenido de humedad son indispensables para aprovechar la mayor cantidad de energía térmica que puede obtenerse de la biomasa, ya que al no cumplir con estas condiciones el poder calorífico disminuye, incrementando el tiempo de secado o la cantidad de biomasa para la combustión.

Comparando el sistema de infrarrojo lejano diseñado en este proyecto y el quemador ciclónico de biomasa del laboratorio de combustión de la escuela de ingeniería mecánica con las condiciones de la cámara de secado de 70°C para 5 Kg, se concluyó que el sistema de emisores de infrarrojo lejano tiene un ahorro de 96,87% de energía respecto al sistema de gases calientes. Si a la relación costo-beneficio del proceso de secado se le suman costos de construcción y de mantenimiento, la implementación de un sistema con gases calientes al requerir más elementos para su funcionamiento conllevará una mayor inversión.

9. RECOMENDACIONES

Para el sistema de generación de gases calientes en el secado de cacao, no se recomienda utilizar el contacto directo de los gases con los granos de cacao ya que afecta la calidad del grano.

Para llevar a cabo un buen proceso de secado, es indispensable tener un control de los procesos anteriores tales como la fermentación y selección de los granos de cacao que puedan garantizar la homogeneidad del proceso.

Se recomienda analizar el secado de cacao implementado sistemas híbridos que contemplen el aprovechamiento de la radiación solar junto con diferentes generadores de calor para optimizar el consumo de energía.

Se recomienda realizar una caracterización de la testa o cascarilla, para revisar las implicaciones que puede tener en el comportamiento del secado del grano, ya que, al inicio del proceso de secado, en el tramo A, es donde se lleva a cabo la mayor disminución de agua en el grano, causando un posible cierre prematuro de la cascarilla del grano llevando con esto un aumento en el tiempo de secado.

En el diseño de la cámara de secado se recomienda tener en la superficie de contacto con el grano, una bandeja con orificios que permitan circular una corriente de aire por convección natural o forzada para evitar posibles quemaduras del grano y sea fácil la eliminación de impurezas.

Se recomienda realizar un secado de biomasa en el sistema de gases calientes previo a la combustión para disminuir el contenido de humedad de esta y así aprovechar el poder calorífico máximo.

BIBLIOGRAFÍA

ACADEMIA.COM. Secadores. [Sitio web]. México. [Consulta: 20 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.coursehero.com/file/44541112/Secadorespdf/>. p. 2.

ALICE BENTLE Y CHOCOLATES. EL ORIGEN Y LOS TIPOS DE CACAO. [Sitio web]. 2014. [Consulta: 15 mayo 2020]. Disponible en: <http://alicebentleychocolates.com/index.php?route=pavblog/blog&id=12>.

APARICIO, Andrés y HERRERA, Dairon. Diseño y construcción de un quemador ciclónico de biomasa para el laboratorio de combustión de la escuela de ingeniería mecánica. Trabajo de grado. Ingeniero mecánico. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenieras Físico-Mecánicas, 2022.

BARBECHO GUAILLAS, Alexis Fabián y LOJA JUCA, Juan Carlos. Desarrollo de un prototipo de máquina híbrida de secado de granos de cacao con un sistema de control automático de temperatura. Trabajo de Ingeniería mecánica. Cuenca. Universidad Politécnica Salesiana. Facultad de Ingeniería mecánica. 2019 19p.

BENÍTEZ LEÓN, Alvaro. Del Cacao Al Chocolate, Procedimientos, Sabor y Aroma, primera Bucaramanga, 2013. ISBN 978-95-846-561-5.

CAMARA DE COMERCIO DE BUCARAMANGA. Informe de actualidad de cacao por provincias de Santander. [Sitio web]. [Consulta: 30 octubre 2019]. Disponible en:

https://www.camaradirecta.com/temas/documentospdf/informesactualidadprovincias/sector_Cacao_provincias.pdf.

CHOCOLATISIMO. Tipos de Cacao. [Sitio web]. [Consulta: 15 mayo 2020]. Disponible en: <http://chocolatisimo.com/tipos-de-cacao/>.

DOCPLAYER. Fluido-dinámica de lechos fluidizados. [Sitio web]. [Consulta: 6 noviembre 2020]. Disponible en: <https://docplayer.es/68825726-Fluido-dinamica-de-lechos-fluidizados-al-conjunto-de-particulas-fluidizadas-se-le-denomina-tambien-lecho-fluidizado.html>.

FEDECACAO. Nuevo Récord en producción de cacao. [Sitio web]. Bogotá. [Consulta: 31 octubre 2019]. Disponible en: <http://www.fedecacao.com.co/portal/index.php/es/2015-04-23-20-00-33/551-en-2017-colombia-alcanzo-nuevo-record-en-produccion-de-cacao>.

Informe de secado por FIR ministerio de producción de Perú [En línea]. Instituto tecnológico de la producción. Perú, 10 abril 2017. [Fecha de consulta: 7 febrero 2022]. Disponible en: <https://www.gob.pe/itp#publicaciones>.

INTERNATIONAL COCOA ORGANIZATION. 'Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics. 2017-2018, vol. 44, p.3.

IPN ESIQIE AOU PSE. Introducción Al Secado y Al Enfriamiento de Agua. [Sitio web]. [Consulta: 22 mayo 2020]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/ipnesiqieaoupse/1-introduccion-al-secado-y-al-enfriamiento-de-agua>.

LEGISCOMEX. Colombia se caracteriza por el cultivo de cacao criollo, forastero e híbrido o trinitario. [Sitio Web]. [Consulta: 15 Mayo 2020]. Disponible en: <https://www.legiscomex.com/Documentos/informe-sectorial-sector-cacao-demas-chocolates-colombia-2016-rci308>.

MAUREIRA POVEDA, Juan Pablo. Diseño y simulación de un secador de granos de cacao con colectores solares planos mediante convección forzada para una capacidad de 500 kg. Trabajo de grado Ingeniería mecánica. Sangolquí. Escuela politécnica del ejército. Facultad de ingeniería mecánica. 2006 23p.

MAUPOEY, Pedro Fito y otros. Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Madrid: Universitat Politècnica de València, 2001. p. 13. ISBN: 978-84-9705-025-8.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA, Cacao En Grano. Especificaciones y requisitos de calidad, NTC 1252. Bogotá D.C: 2021 6 p.

PAREDES ARCE, Mendis. Manual de cultivo del cacao [En línea]. Perú, 2003. [Fecha de Consulta: 25 mayo 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/356728198_MINISTERIO_DE_AGRICULTURA_PROGRAMA_PARA_EL_DESARROLLO_DE_LA_AMAZONIA_PROAMAZONIA_MANUAL_DE_CULTIVO_DEL_CACAO.

ANEXOS

Anexo A. Cálculo y balance de masa de la cantidad de agua evaporada en el secado

diseño termico para la fuente de calor

$$M_{\text{cacao,humin}} = 5 \text{ [kg] cantidad de cacao a secar}$$

$$\text{Tiempo} = 15 \text{ [H] Tiempo de secado supuesto}$$

$$t_{\text{seg}} = \text{Tiempo} \cdot 3600 \text{ [s]}$$

$$X_{\text{in}} = 0,566 \text{ Humedad inicial}$$

$$X_{\text{out}} = 0,075 \text{ Humedad final esperada}$$

Balance General

$$M_{\text{cacao,humin}} = \frac{M_{\text{cacao,humin}}}{\text{Tiempo}}$$

$$M_{\text{cacao,humin,seg}} = \frac{M_{\text{cacao,humin}}}{3600}$$

$$\dot{M}_{\text{sin}} = [1 - X_{\text{in}}] \cdot M_{\text{cacao,humin}}$$

$$\dot{M}_{\text{win}} = X_{\text{in}} \cdot M_{\text{cacao,humin}}$$

$$M_{\text{cacao,humin}} = \dot{M}_{\text{sin}} + \dot{M}_{\text{v}}$$

$$\dot{M}_{\text{wout}} = \frac{\dot{M}_{\text{sin}} \cdot X_{\text{out}}}{1 - X_{\text{out}}}$$

$$M_{\text{cacao,humout}} = \dot{M}_{\text{sout}} + \dot{M}_{\text{wout}}$$

$$M_{\text{cacao,humout}} = \frac{M_{\text{cacao,humout}}}{\text{Tiempo}}$$

$$\dot{\Delta M}_{\text{w}} = \dot{M}_{\text{win}} - \dot{M}_{\text{wout}} \text{ Tasa de vaporización de agua}$$

$$\dot{\Delta M}_{\text{wseg}} = \frac{\dot{\Delta M}_{\text{w}}}{3600}$$

$$\dot{M}_{\text{sin}} = \dot{M}_{\text{sout}}$$

SOLUTION

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$$\dot{\Delta M}_{\text{w}} = 0,1769 \text{ [kg/H]}$$

$$\dot{M}_{\text{sin}} = 0,1447 \text{ [kg/H]}$$

$$\dot{M}_{\text{v}} = 0,1887 \text{ [kg/H]}$$

$$\dot{M}_{\text{wout}} = 0,01173 \text{ [kg/H]}$$

$$M_{\text{cacao,humin,seg,dot}} = 0,00009259 \text{ [kg/H]}$$

$$M_{\text{cacao,humout}} = 2,346$$

$$\text{Tiempo} = 15 \text{ [H]}$$

$$X_{\text{in}} = 0,566$$

$$\dot{\Delta M}_{\text{wseg,dot}} = 0,00004915 \text{ [kg/H]}$$

$$\dot{M}_{\text{sout}} = 0,1447 \text{ [kg/H]}$$

$$\dot{M}_{\text{win}} = 0,1887 \text{ [kg/H]}$$

$$M_{\text{cacao,humin}} = 5 \text{ [kg]}$$

$$M_{\text{cacao,humin,dot}} = 0,3333 \text{ [kg/H]}$$

$$M_{\text{cacao,humout,dot}} = 0,1564 \text{ [1/H]}$$

$$t_{\text{seg}} = 54000 \text{ [H-s]}$$

$$X_{\text{out}} = 0,075$$

Anexo B. Cálculo del calor absorbido por el cacao

Calculo de $c_{p,cacao}$

$$Cp_{cacao} = \frac{\dot{M}_{w,seg}}{M_{cacao,humin}} \cdot Cp_{H2O} + \frac{\dot{M}_{sin}}{M_{cacao,humin}} \cdot Cp_s$$

$$Cp_{H2O} = 4,187 \text{ [KJ/Kg-}^\circ\text{C]}$$

$$Cp_s = 1,38 \text{ [KJ/Kg-}^\circ\text{C]}$$

Calor absorbido por el cacao Q_c

$$Q_c = Q_s + Q_l$$

$$T_1 = 25 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T_2 = 70 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$Q_s = M_{cacao,humin,seg} \cdot Cp_{cacao} \cdot [T_2 - T_1]$$

$$Q_l = \dot{M}_{w,seg} \cdot h_{fg}$$

Hfg. Calor latente de vaporización del agua

$$h_{fg} = \text{Enthalpy}_{\text{vaporization}} [\text{water ; T = T}]$$

$$T = 100 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$Q_{c,watt} = Q_c \cdot 1000$$

$$Cp_{cacao} = 2,821$$

$$h_{fg} = 2257 \text{ [kJ/kg]}$$

$$\dot{M}_{wout} = 0,01173 \text{ [kg/H]}$$

$$M_{cacao,humout,dot} = 0,1564 \text{ [1/H]}$$

$$T = 100 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$X_{in} = 0,566$$

$$Cp_{H2O} = 4,187 \text{ [KJ/Kg-}^\circ\text{C]}$$

$$\dot{M}_{sin} = 0,1447 \text{ [kg/H]}$$

$$M_{cacao,humin} = 5 \text{ [kg]}$$

$$Q_{c,dot} = 0,1227 \text{ [Kw]}$$

$$\text{Tiempo} = 15 \text{ [H]}$$

$$X_{out} = 0,075$$

$$Cp_s = 1,38 \text{ [KJ/Kg-}^\circ\text{C]}$$

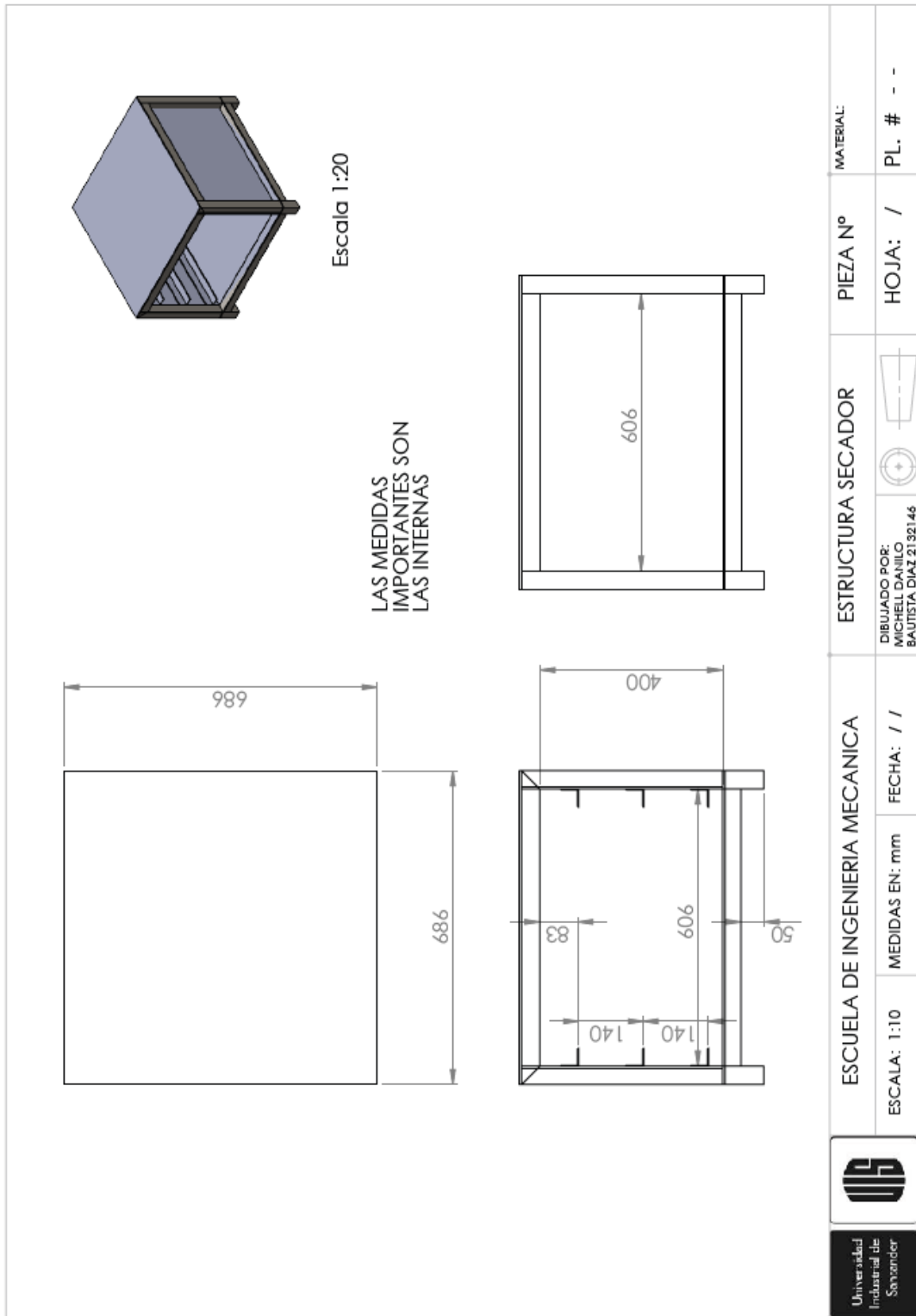
$$\dot{M}_{sout} = 0,1447 \text{ [kg/H]}$$

$$M_{cacao,humin,seg,dot} = 0,00009259 \text{ [kg/s]}$$

$$Q_{c,dot,watt} = 122,7 \text{ [w]}$$

$$t_{seg} = 54000 \text{ [s]}$$

Anexo C. Plano estructura de cámara de secado, prototipo infrarrojo lejano



Anexo D. Cálculo del calor necesario para secar los granos de cacao con gases calientes

(potencia) necesaria para sostener el sistema en funcionamiento.

$$\dot{Q} = [T_2 - T_1] \cdot c_{p\text{air}} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot A \cdot V$$

$$T_1 = 25 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$

$$T_2 = 70 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$

$$c_{p\text{air}} = 1,007 \text{ } [\text{KJ/Kg}\cdot^{\circ}\text{C}]$$

$$\rho_{\text{air}} = 0,9979 \text{ } [\text{kg/m}^3]$$

$$r = 0,1 \text{ } [\text{m}]$$

$$b = 0,8 \text{ } [\text{m}]$$

$$A = [b + r] \cdot 2 \cdot \pi \cdot r$$

$$V = 0,5 \text{ } [\text{m/s}]$$

Gasto másico de la biomasa

$$t = 15 \text{ } [\text{H}]$$

$$t_{\text{seg}} = t \cdot 3600$$

$$m_{\text{comb}} = \frac{m_{\text{comb}}}{t}$$

$$m_{\text{combseg}} = \frac{m_{\text{comb}}}{t_{\text{seg}}}$$

Flujo masico de aire en la combustion

$$m_{\text{a2}} = m_{\text{comb}} \cdot \text{ACT} \cdot [1 + e]$$

$$m_{\text{a2seg}} = m_{\text{combseg}} \cdot \text{ACT} \cdot [1 + e]$$

Relación ACT

$$\text{ACT} = 11,53 \cdot C + 34,5 \cdot \left[H - \frac{O}{8} \right] + 4,3 \cdot S$$

$$C = 0,498$$

$$O = 0,437$$

$$H = 0,06$$

$$S = 0,0002$$

$$N = 0,005$$

Se tomara exceso de 30%

$$e = 0,3$$

$$\dot{Q} = m_{\text{a2seg}} \cdot \text{PCI}_{\text{aserrín1}} \cdot \text{EFI}$$

$$\text{EFI} = 0,45$$

$$\text{PCI}_{\text{aserrín1}} = 19775 \text{ } [\text{kJ/kg}] \text{ Poder calorífico aserrín de pino}$$

SOLUTION

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$$A = 0,5655 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$b = 0,8 \text{ [m]}$$

$$c_{\text{pair}} = 1,007 \text{ [kJ/Kg-}^\circ\text{C]}$$

$$\text{EFI} = 0,45$$

$$m_{a2\text{seg},\text{dot}} = 0,001437 \text{ [1/H]}$$

$$m_{\text{comb}} = 10,07$$

$$m_{\text{comb},\text{dot}} = 0,6712 \text{ [1/H]}$$

$$O = 0,437$$

$$\dot{Q} = 12,79 \text{ [kJ/m}^2\text{-s]}$$

$$r_{\text{air}} = 0,9979 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$t = 15 \text{ [H]}$$

$$T_2 = 70 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$V = 0,5 \text{ [m/s]}$$

$$\text{ACT} = 5,928$$

$$C = 0,498$$

$$e = 0,3$$

$$H = 0,06$$

$$m_{a2,\text{dot}} = 5,172 \text{ [1/H]}$$

$$m_{\text{combseg},\text{dot}} = 0,0001864 \text{ [1/H]}$$

$$N = 0,005$$

$$PC_{\text{laserrin1}} = 19775 \text{ [kJ/kg]}$$

$$r = 0,1 \text{ [m]}$$

$$S = 0,0002$$

$$T_1 = 25 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_{\text{seg}} = 54000 \text{ [H]}$$

Anexo E. Tabulación datos experimentales curva de secado

W_Ao [g]	2,2325
W_A1 [g]	22,9783

t (h)	t (min)	W_2 (g)
0	0	22,9783
0,5	30	21,2761
1	60	19,6021
1,5	90	18,7085
2	120	17,9665
2,5	150	17,5738
3,5	210	17,087
4,5	270	16,4631
5,5	330	16,0055
6,5	390	15,6862
8	480	15,0327
8,5	510	14,8518
9	540	14,7124
10	600	14,4072
11	660	14,1767
12	720	13,9402
13	780	13,6485
13,5	810	13,5811
14,5	870	13,3637
15,5	930	13,1995
17,5	1050	12,8449
18,5	1110	12,7227
19,5	1170	12,5313
21,5	1290	12,336

Anexo F. Costos del consumo energético

$$\dot{Q} = m_{a2seg} \cdot PCI \cdot EFI$$

$$EFI = 0,45$$

Consumo Energético

Con los cálculos del equipo térmico

$$Energia = \dot{Q} \cdot t_{seg}$$

Costo de la energía

$$C_{Energia} = C_{especifico;Energia} \cdot Energia$$

El costo Especifico de la energía, para este caso está relacionado con el precio por kg del aserrín pulverizado, que cumpla con una granulometría menor a 250 micras

$$m_{especifica;biomasa} = 1 \text{ [kg]}$$

$$C_{aserrin;250m} = 371,06 \text{ [\$COP]}$$

$$C_{especifico;Energia} = \frac{C_{aserrin;250m}}{m_{especifica;biomasa} \cdot PCI}$$

Consumo Energético de otros equipos

Motor-Sinfin alimentación de Biomasa

$$Pot_{sinfin} = 0,095 \text{ [W]}$$

$$C_{kWh} = 628,46 \text{ [\$COP]}$$

$$C_{Energia,sinfin} = C_{kWh} \cdot E_{sinfin}$$

$$E_{sinfin} = Pot_{sinfin} \cdot t$$

$$Pot_{vent} = \delta_p \cdot \dot{V}_{vent}$$

$$\delta_p = 0,3916$$

$$\dot{V}_{vent} = 0,02478$$

$$C_{Energia,vent} = C_{kWh} \cdot E_{vent}$$

$$E_{vent} = Pot_{vent} \cdot t$$

$$C_{Energia,T} = C_{Energia} + C_{Energia,sinfin} + C_{Energia,vent}$$

SOLUTION

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$$A = 0,5655 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$b = 0,8 \text{ [m]}$$

$$c_{p\text{air}} = 1,007 \text{ [KJ/Kg}^\circ\text{C]}$$

$$C_{Energia} = 3217 \text{ [\$COP]}$$

$$C_{Energia,T} = 3283$$

$$C_{especifico;Energia} = 0,06989$$

$$\delta_p = 0,3916$$

$$EFI = 0,45$$

$$E_{sinfin} = 0,095 \text{ [W} \cdot \text{H]}$$

$$H = 0,06$$

$$m_{a2seg,\text{dot}} = 0,005352 \text{ [kg/s]}$$

$$m_{aseg,\text{dot}} = 0,03204 \text{ [kg/s]}$$

$$m_{combseg,\text{dot}} = 0,0006944 \text{ [kg/s]}$$

$$m_{especifica;biomasa} = 1 \text{ [kg]}$$

$$O = 0,437$$

$$Pot_{sinfin} = 0,095 \text{ [W]}$$

$$\dot{Q} = 12,79 \text{ [KJ/s]}$$

$$r_{\text{Oair}} = 0,9979 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$t = 1 \text{ [H]}$$

$$T_2 = 70 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$V = 0,5 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

$$ACT = 5,928$$

$$C = 0,498$$

$$C_{aserrin;250m} = 371,1 \text{ [\$COP]}$$

$$C_{Energia,sinfin} = 59,7$$

$$C_{Energia,vent} = 6,098$$

$$C_{kWh} = 628,5 \text{ [\$COP]}$$

$$e = 0,3$$

$$Energia = 46028 \text{ [KJ]}$$

$$E_{vent} = 0,009704 \text{ [H]}$$

$$m_{a1seg,\text{dot}} = 0,02669 \text{ [kg/s]}$$

$$m_{a2,\text{dot}} = 19,27 \text{ [kg/H]}$$

$$m_{comb} = 2,5 \text{ [kg]}$$

$$m_{comb,\text{dot}} = 2,5 \text{ [kg/H]}$$

$$N = 0,005$$

$$PCI = 5309 \text{ [KJ/Kg]}$$

$$Pot_{vent} = 0,009704$$

$$r = 0,1 \text{ [m]}$$

$$S = 0,0002$$

$$T_1 = 25 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_{seg} = 3600 \text{ [H]}$$

$$\dot{V}_{vent} = 0,02478$$