



1859



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables

Carrera de Ingeniería Electromecánica

Diseño y construcción de un prototipo de secador de café, por aire caliente forzado generado por un módulo de inducción.

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Electromecánico

AUTOR:

Marco Vinicio Báez Feijóo

DIRECTOR:

Ing. Byron Agustín Solorzano Castillo, Mg. Sc.

Loja-Ecuador

2024

Certificación

Loja, 25 de abril del 2024

Ing. Byron Agustín Solórzano Castillo Mg. Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo proceso de la elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Diseño y construcción de un prototipo de secador de café, por aire caliente forzado generado por un módulo de inducción.**, de la autoría del estudiante **Marco Vinicio Báez Feijoo** , con **cédula de identidad Nro. 1105753030** , una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

Ing. Byron Agustín Solórzano Castillo Mg. Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Marco Vinicio Báez Feijóo**, declaro ser autor del presente Trabajo de Titulación denominado: **Diseño y construcción de un prototipo de secador de café, por aire caliente forzado generado por un módulo de inducción.**, y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la universidad Nacional de Loja, la publicación de mi Trabajo de Titulación en el Repositorio Institucional-Biblioteca Virtual.



Firma:

Cédula de Identidad: 1105753030

Fecha: 25 de abril del 2024

Correo electrónico: marco.baez@unl.edu.ec

Teléfono: 0990455133

Carta de autorización por parte del autor, para la consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo del Trabajo de Titulación.

Yo, **Marco Vinicio Báez Feijóo**, declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **Diseño y construcción de un prototipo de secador de café, por aire caliente forzado generado por un módulo de inducción.**, como requisito para optar al título de **Ingeniero Electromecánico**; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional.

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

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización en la ciudad de Loja, a los veinticinco días del mes de abril del dos mil veinticuatro.



Firma:

Autor: Marco Vinicio Báez Feijóo

Cédula de Identidad: 1105753030

Dirección: Loja, (ciudad de Loja)

Correo electrónico: marco.baez@unl.edu.ec

Teléfono: 0990455133

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Titulación: Ing. Byron Agustín Solorzano Castillo, Mg. Sc.

Dedicatoria

Dedicado con profundo amor y gratitud a Dios que me dio la oportunidad de vivir y darme mi familia, pilar inquebrantable en mi vida académica y personal. A mis adorados padres, cuyo amor incondicional y sabios consejos han guiado cada paso de este camino. A mis queridos hermanos, por ser mi fuerza y motivación en cada desafío. A mis entrañables abuelitos, cuya sabiduría y cariño siempre han sido una inspiración. Y a mi amada novia, mi compañera incansable, por estar a mi lado en cada instante y alentar mis sueños con su apoyo inquebrantable. Esta tesis es el fruto de nuestro amor y compromiso compartido, y es con ustedes que celebro este logro que marca un hito en mi vida. ¡Gracias por siempre estar presente y ser mi razón para alcanzar lo inalcanzable!

Marco Vinicio Báez Feijóo

Agradecimiento

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido fundamentales en el cumplimiento de este gran logro en mi vida académica.

En primer lugar, agradezco de corazón a mi amada familia, mis padres, hermanos y abuelitos, quienes han sido mi mayor fuente de apoyo, amor y comprensión a lo largo de esta travesía. Su aliento incondicional y palabras de aliento fueron mi motor en los momentos más desafiantes, y sin su presencia y respaldo, este sueño no hubiera sido posible.

A mi querida novia, mi compañera inquebrantable, gracias por estar a mi lado en cada etapa de este viaje académico. Tu presencia, cariño y comprensión me dieron la fuerza y el ánimo necesario para seguir adelante y alcanzar este objetivo juntos. Eres mi mayor inspiración y fortaleza.

También quiero expresar mi gratitud al distinguido Ing. Byron Agustín Solorzano Castillo, quien, con su sabiduría, paciencia y dedicación, me guio a través de los desafíos de mi tema de tesis. Sus enseñanzas y apoyo fueron fundamentales para alcanzar el éxito en esta investigación, y su ejemplo como mentor perdurará en mi carrera profesional.

Asimismo, no puedo dejar de agradecer a la Universidad Nacional de Loja por brindarme una formación académica excepcional durante estos años. Los conocimientos adquiridos y las experiencias vividas en esta institución han dejado una huella imborrable en mi vida, y me siento honrado de haber sido parte de esta destacada casa de estudios.

Marco Vinicio Báez Feijóo

Índice de contenido

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de Autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenido	vii
• Índice de tablas.....	viii
• Índice de figuras.....	viii
• Índice de anexos.....	xii
• Índice de símbolos.....	xiii
1. Título	1
2. Resumen	2
Abstract.....	3
3. Introducción	4
4. Marco teórico	6
5. Metodología	31
6. Resultados	42
7. Discusión	76
8. Conclusiones	78
9. Recomendaciones	79
10. Bibliografía	80
11. Anexos	82

Índice de Tablas:

Tabla 1. <i>Propiedades del Aire de Secado</i>	32
Tabla 2. <i>Propiedades Físicas del Café</i>	35
Tabla 4. <i>Temperaturas de Entrada y Salida del Prototipo Secador de Café</i>	38
Tabla 5. <i>Capacidad Calorífica y Entalpía</i>	38
Tabla 6. <i>Caudales de Aire Obtenidos según Varía la Eficiencia de Secado</i>	39
Tabla 7. <i>Dimensiones de la Cama de Secado de Capa Delgada 10 cm</i>	41

Índice de Figuras:

Figura 1. <i>Ámbitos de Temperatura – Tiempo de Exposición del Café</i>	6
Figura 2. <i>Curva Típica de Secado</i>	8
Figura 3. <i>Contenido de Humedad</i>	10
Figura 4. <i>Curva General de Secado</i>	16
Figura 5. <i>Carta Psicométrica</i>	32
Figura 6. <i>Flujo de Aire</i>	37
Figura 7. <i>Flujo de Temperatura Para el Aire y el Agua en el Café</i>	37
Figura 8. <i>Estructura y Medidas Cama de Secado</i>	47
Figura 9. <i>Medidas Banco de Aletas</i>	50
Figura 10. <i>Balace de Energía</i>	52
Figura 11. <i>Rolado de la Cama Principal</i>	61
Figura 12. <i>Rolado y Ubicación de los Anillos de Soporte Exteriores e Interior</i>	62
Figura 13. <i>Soldado y Montaje del Cono de Transición</i>	62
Figura 14. <i>Construcción de la Estructura de Soporte del Prototipo Secador</i>	62
Figura 15. <i>Montaje y Construcción del Sistema de Ductos de Aire</i>	63
Figura 16. <i>Montaje de la Planta Agujereada</i>	63
Figura 17. <i>Montaje de Compuerta y Forrado del Sistema Calentador</i>	64
Figura 18. <i>Construcción y Pruebas en el Banco de Aletas</i>	64
Figura 19. <i>Montaje de la Cocina de Inducción</i>	64
Figura 20. <i>Prototipo Secador de Café Finalizado</i>	65
Figura 21. <i>Despulpado del Café</i>	65
Figura 22. <i>Pruebas y Mediciones del Proceso de Secado</i>	66
Figura 23. <i>Curva de Secado - Ciclo 1 de Secado</i>	67
Figura 24. <i>Curva de Secado- Ciclo 2 de Secado</i>	67
Figura 25. <i>Curva de Secado- Ciclo 3 de Secado</i>	68
Figura 26. <i>Curva de Secado- Ciclo 4 de Secado</i>	68

Índice de Ecuaciones:

E.c. 1	15
E.c. 2	15
E.c. 3	15
E.c. 4	16
E.c. 5	16
E.c. 6	17
E.c. 7	17
E.c. 8	17
E.c. 9	18
E.c. 10	18
E.c. 11	18
E.c. 12	18
E.c. 13	18
E.c. 14	19
E.c. 15	19
E.c. 16	19
E.c. 17	19
E.c. 18	20
E.c. 19	20
E.c. 20	20
E.c. 21	21
E.c. 22	21
E.c. 23	22
E.c. 24	22
E.c. 25	22
E.c. 26	23
E.c. 27	23
E.c. 28	24
E.c. 29	24
E.c. 30	24
E.c. 31	24
E.c. 32	25
E.c. 33	25

E.c. 34	25
E.c. 35	26
E.c. 36	26
E.c. 37	26
E.c. 38	27
E.c. 39	27
E.c. 40	27
E.c. 41	28
E.c. 42	28
E.c. 43	28
E.c. 44	29
E.c. 45	29
E.c. 46	29
E.c. 47	29
E.c. 48	30
E.c. 49	30
E.c. 50	30
E.c. 51	30
E.c. 52	30
E.c. 53	30

Índice de Anexos:

Anexo 1. Tabla Propiedades del Agua Saturada - Tabla de Temperaturas.....	82
Anexo 2. Propiedades del Aire a la Presión de 1 ATM	83
Anexo 3. Propiedades termofísicas de gases a presión atmosférica	84
Anexo 4. Prototipo de Secador de Café	85
Anexo 5. Conjunto de Secado	86
Anexo 6. Cilindro Principal	87
Anexo 7. Aro de Refuerzo Superior.....	88
Anexo 8. Aro de Refuerzo Interior	89
Anexo 9. Tamiz.....	90
Anexo 10. Tolva de Descarga	91
Anexo 11. Compuerta de Descarga.....	92
Anexo 12. Conjunto de Transporte de Aire	93
Anexo 13. Soplante	94
Anexo 14. Ducto de Aire	95
Anexo 15. Brida	96
Anexo 16. Sección de Transición	97
Anexo 17. Base de Tamiz	98
Anexo 18. Sistema de Calefacción	99
Anexo 19. Módulo de Inducción.....	100
Anexo 20. Banco de Aletas.....	101
Anexo 21. Base de Módulo de Inducción	102
Anexo 22. Conjunto de Soporte	103
Anexo 23. Perfil Vertical	104
Anexo 24. Refuerzo Inferior	105
Anexo 25. Soporte de Soplante.....	106
Anexo 26. Pletina de Soporte.....	107
Anexo 27. Ficha de Caracterización de Proceso	108
Anexo 28. Análisis sensorial café	110
Anexo 29. <i>Certificado de traducción</i>	113

Índice de Símbolos:

m_{co} : masa de café oro

m_{cps} : masa de café pergamino seco

m_{cle} : masa de café lavado y escurrido

fr_{co-cps} : factor de conversión de café oro a café pergamino seco

$fr_{cps-cle}$: factor de conversión de café pergamino seco a café lavado y escurrido

$m_{agua,cle}$: masa de agua en la etapa de café lavado y escurrido

$m_{agua,cps}$: masa de agua en la etapa de café pergamino seco

X_{bhi} : porcentaje inicial de humedad de los granos en base húmeda (50%)

X_{bhf} : porcentaje final de humedad de los granos en base húmeda (11%)

h_{sp} : coeficiente convectivo de transferencia de calor para flujo de aire

t_{BC} : tiempo de secado del periodo a velocidad constante

hfg : calor latente de ebullición del agua

A_{cx} : área de la cama de secado

G : velocidad del aire de secado que atraviesa cada agujero

$n_{agujero}$: número aproximado de agujeros en área de secado

$v_{as a 35^\circ C}$: volumen específico en metros cúbicos por kilogramo

C_{as} : Velocidad de aire de secado

ρ_{ah} : densidad del aire humedo

t_{CD} : tiempo estimado de secado ("CD" el tramo de cálucllo)

X_{bhf} : Porcentaje de humedad final base humedad en el grano (11%)

R_C : Velocidad de evaporación en el secado para el periodo de velocidad constante BC

T_b : temperatura de base

T_s : temperatura de la superficie

T_a : temperatura del ambiente

L : longitud

T_f : temperatura final

β : coeficiente de transferencia de calor

D : diámetro

ρ : densidad

ν : viscosidad dinámica

Pr : número de Prandtl

Cp: capacidad calorífica

k: conductividad térmica de un material

g: gravedad

V: velocidad

Dh: diámetro hidráulico

Re: número de Reynolds

Pmojado: perímetro mojado

Nu: número de Nuselt

hi: Entalpia

Gr: número de Grashof

1. Título

Diseño y construcción de un prototipo de secador de café, por aire caliente forzado generado por un módulo de inducción.

2. Resumen

El trabajo de titulación se centra en el desarrollo y fabricación de un prototipo innovador de secador de café, empleando un sistema de aire caliente forzado impulsado por un módulo de inducción. Esta innovadora iniciativa persigue enriquecer la excelencia del café elaborado a nivel mundial, el cual ostenta una gran relevancia en la vida cotidiana de las personas. Los propósitos específicos del proyecto abarcan la caracterización del procedimiento de secado de café de alta calidad, la concepción y detallado del diseño del prototipo del secador, su efectiva manufactura y la evaluación de su funcionamiento.

La creación del prototipo fue ejecutada acorde a las medidas y especificaciones preestablecidas, sometiéndolo posteriormente a diferentes pruebas de secado que validaron su impacto positivo en la realización del proceso. Sin embargo, en la fase de análisis de los resultados emergió una limitación vinculada a la estructura del banco de aletas, afectando negativamente la transferencia de calor. Para subsanar este contratiempo, se propone la adopción de dimensiones precisas para las aletas de aluminio, acompañadas por técnicas de soldadura idóneas, con el propósito de elevar la operatividad del sistema.

En síntesis, la indagación culminó exitosamente en la creación y diseño de un prototipo de secador de café de excelente rendimiento, con las siguientes características, trabaja en un rango de temperaturas entre 27 °C - 40 °C, se puede variar la velocidad del aire de secado entre 2,2 m/s - 5,5 m/s y permite un secado continuo sin afectar al grano a una temperatura constante, capitalizando el potencial del aire caliente forzado, originado mediante el módulo de inducción. Esta contribución se traduce en notables beneficios tanto en la administración del proceso de secado como en la calidad intrínseca del café obtenido.

Palabras Clave: Innovador, Calidad, Fabricación, Realización, Proyecto.

Abstract.

The degree work focuses on the development and manufacture of an innovative prototype of a coffee dryer, using a forced hot air system driven by an induction module. This innovative initiative seeks to enrich the excellence of coffee produced worldwide, which has great relevance in people's daily lives. The specific purposes of the project include the characterization of the high-quality coffee drying procedure, the conception and detailing of the design of the dryer prototype, its effective manufacturing, and the evaluation of its operation.

The creation of the prototype was executed according to the pre-established measurements and specifications, subsequently subjecting it to different drying tests that validated its positive impact on the realization of the process. However, in the results analysis phase, a limitation linked to the structure of the fin bank emerged, negatively affecting heat transfer. To remedy this setback, the adoption of precise dimensions for the aluminum fins is proposed, accompanied by suitable welding techniques, with the purpose of increasing the operability of the system.

In summary, the investigation successfully culminated in the creation and design of a prototype coffee dryer with excellent performance, with the following characteristics, it works in a temperature range between 27 °C - 40 °C, the air speed can be varied drying between 2.2 m/s - 5.5 m/s and allows continuous drying without affecting the grain at a constant temperature, capitalizing on the potential of forced hot air, generated by the induction module. This contribution translates into notable benefits both in the administration of the drying process and in the intrinsic quality of the coffee obtained.

Keywords: Innovative, Quality, Manufacturing, Efficiency, Project.

3. Introducción

Ubicada en la región sur del país, la provincia de Loja disfruta de una altitud propicia para la producción de café de alta calidad siendo reconocido tanto a nivel nacional como internacional por su excelencia en sabor. No obstante, las recurrentes nubes y las lluvias obstaculizan la eficiencia del proceso de desecación. En este contexto, el método más utilizado para el secado es el solar, que está sujeto a la incertidumbre climática, afectando negativamente al proceso de producción que experimenta extensos lapsos que abarcan períodos de 10 a 15 días. Este extendido tiempo se atribuye a los desafíos planteados por las cambiantes condiciones climáticas y la dependencia de factores externos, como la presencia solar.

Reconociendo esta problemática, surge la necesidad de explorar soluciones innovadoras que optimicen los procesos de café de alta calidad. Una opción prometedora es la aplicación de la inducción electromagnética, una fuente de energía eficiente y respetuosa con el entorno. De esta idea se plantea el presente proyecto denominado: "Diseño y construcción de un prototipo de secador de café, por aire caliente forzado generado por un módulo de inducción".

El objetivo principal de este proyecto investigativo radica en diseñar y materializar un prototipo que haga uso de aire caliente forzado por medio de un módulo de inducción. Esto busca mejorar el proceso de desecado y cumplir con los rigurosos estándares de alta calidad. Para concretar este objetivo, se plantea la siguiente metodología:

Caracterización del proceso de secado para café de calidad: Se llevará a cabo un estudio exhaustivo, analizando los elementos clave, las condiciones ideales y los requisitos necesarios para asegurar la calidad del café.

Elaboración del diseño conceptual y detallado del prototipo de secador de café: Se desarrollará un diseño integral y minucioso del prototipo, tomando en cuenta los aspectos técnicos y funcionales. Se considerarán las demandas específicas del procesamiento y se buscará optimizar el proceso de secado.

Fabricación del prototipo de secador de café: Se llevará a cabo la construcción del prototipo diseñado, utilizando los materiales apropiados y siguiendo las especificaciones establecidas. Se realizarán las pruebas necesarias para verificar su correcto funcionamiento y su eficacia.

Evaluación del desempeño del secador de café: Se efectuarán análisis y pruebas minuciosas del prototipo, evaluando su rendimiento, y capacidad para cumplir con los estándares de alta calidad. Se realizarán ajustes y mejoras en caso de ser necesarios, con el propósito de optimizar su funcionamiento.

Alcanzar los objetivos previstos permitirá la obtención de un prototipo de secador de café eficaz y eficiente, que contribuirá a mejorar el proceso de secado y a garantizar la calidad del café. Los beneficios de este proyecto se extienden más allá del ámbito local, ya que su enfoque en el uso de una fuente de energía más limpia también contribuye a la preservación del medio ambiente y a la reducción de los impactos negativos relacionados con los enfoques tradicionales de secado mecánico del café.

Además de mejorar la calidad, es esencial destacar los aspectos educativos. Este proyecto no solo tiene relevancia en la industria cafetalera, sino que también posee un significativo valor académico. Contribuirá a la generación de conocimiento y al desarrollo de competencias técnicas y científicas en los investigadores involucrados. Asimismo, se fomentará la difusión de los resultados obtenidos, de acuerdo con las políticas de publicación y divulgación de la Universidad Nacional de Loja.

4. Marco Teórico

Capítulo I

Requerimientos Mínimos en el Proceso de Secado del Café

Tiempo de Secado del Café

El tiempo de secado es un factor crucial en la producción de café de calidad. Durante este proceso, la humedad contenida en los granos de café se reduce, lo que permite obtener características sensoriales óptimas y un perfil de sabor distintivo. Una investigación realizada por Rodríguez-Morales y colaboradores (2018) señaló que el tiempo de secado influye directamente en la calidad del café, ya que afecta la formación de compuestos volátiles y la estabilidad de los aromas. Además, un secado adecuado contribuye a prevenir la proliferación de microorganismos indeseables, como hongos y bacterias, que podrían afectar negativamente la calidad del café. Por lo tanto, es esencial controlar y optimizar el tiempo de secado para garantizar la producción de café de calidad superior.

La temperatura desempeña un papel fundamental en el tiempo de secado del café de calidad. Según un estudio realizado por Pérez-González y colaboradores (2019), la temperatura de secado afecta directamente la composición química y las propiedades físicas de los granos de café. Un control preciso de la temperatura durante el proceso de secado permite una evaporación adecuada de la humedad sin comprometer la calidad del café. Además, se ha observado que temperaturas inadecuadas pueden conducir a la formación de compuestos indeseables como lo indica la *Figura 1*, como sabores astringentes o quemados. Por lo tanto, es esencial mantener una temperatura óptima durante el tiempo de secado para lograr un café de calidad superior, siendo estas las siguientes:

Nota. La figura muestra temperaturas y tiempo para el secado de café. Datos tomados del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2010.

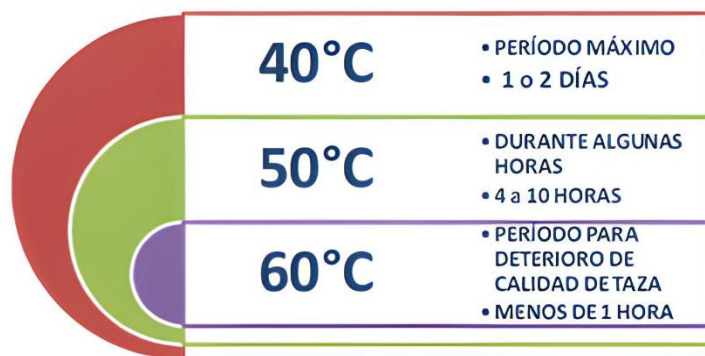


Figura 1. Ámbitos de Temperatura – Tiempo de Exposición del Café

Beneficio del Café

Al proceso post cosecha del café se conoce como el “Beneficio del café”, es la etapa que sigue luego de la recolección de las cerezas del café del árbol, proceso mediante el cual se transforma el fruto en un producto comercial llamado café pergamino. La elección del método de procesamiento afecta directamente la rentabilidad de la producción de café y depende de diversos factores como las condiciones climáticas regionales; capital, tecnología y equipo disponibles; demanda de los consumidores de características de calidad específicas; derechos de uso del agua; y la disponibilidad de tecnología (González Ríos, 2007).

Para elegir el método de procesamiento de café es necesario realizar un análisis de costo/beneficio, cumplimiento de la legislación ambiental y calidad física y sensorial deseada en el café. Las formas más utilizadas de realizar el proceso de beneficio son por vía húmeda y vía seca, ambos métodos tienen por objeto llevar el contenido de humedad del grano a un 10-12% en base húmeda (Joët, 2010).

Cualidades Químicas del Café en Diferentes Procesos

Beneficio Seco. Los frutos recolectados son depositados al secado inmediato, deshidratándolos para después trillarlos, removiendo en una sola operación todas las coberturas deshidratadas (exocarpio, mesocarpio, endocarpio y parte del endospermo) para dejar la semilla (grano sin lavar) y someterla después al proceso de torrefacción y posterior preparación de la bebida (Teixeira, R. N. G, 2005).

Beneficio Húmedo. Se realiza en dos formas. Por vía húmeda donde primeramente se efectúa el despulpado del café removiendo la cascara del fruto y la separación del mucilago a través de fermentación natural o controlada, mientras que en el proceso por vía semihúmeda se realiza la remoción mecánica del mucilago, para después deshidratar los granos. El proceso de beneficio puede incidir en la calidad del grano, mejorándola o deteriorándola si se emplean métodos inapropiados para realizar el despulpado, fermentación, lavado y secado (Chacón, 2001). Se ha reportado que el beneficio por vía húmeda del café acompañado del secado solar es adecuado para el procesamiento en la obtención de cafés especiales (Tai & Ghassem, 2014).

Sí se realiza un proceso de secado adecuado del café, se puede garantizar que continúen dentro de la almendra los compuestos orgánicos precursores del sabor y aroma. Aunque la concentración de los compuestos orgánicos puede variar, debido a la transferencia de masa y calor durante el proceso de secado (Puerta, 2011). Durante el proceso de secado del café los

CGAs pueden ser parcialmente isomerizados, hidrolizados o degradados a compuestos de bajo peso molecular (Preedy, 2014).

Cuando el café pergamino después de cosechado se deja por más de 48 horas con su contenido de humedad inicial por retraso en el proceso de secado, o cuando éste se almacena con contenidos de humedad superiores al 12% por un secado deficiente, el riesgo de ser atacado por hongos y de ser contaminado con micotoxinas es muy alto, a su vez si el café se deshidrata por debajo del 11 % (base húmeda) se generan zonas cristalizadas que en el momento de la trilla se vuelve quebradizo (Parra, 2008).

Rattanamechaiskul & Junka (2020) evaluaron el efecto de la temperatura del aire sobre el quiebre del pergamino usando el secado por fluidización. La rotura del pergamino es un factor de calidad del café asociado a la comercialización y venta. La separación del pergamino se puede asociar a altas temperaturas en el aire de secado que causan una rápida disminución del contenido de humedad aumentando al estrés mecánico en la superficie del café.

Curva típica de Secado del Café

El proceso de eliminación de humedad no sigue una relación lineal como lo indica la *Figura 2*, por lo tanto, es necesario establecer experimentalmente la correlación entre temperatura, contenido de humedad residual y duración del secado. Estos experimentos generan datos que se representan en curvas de secado, las cuales son específicas para cada producto, aunque comparten una forma general similar.

Nota. La figura representa la curva del secado de café. Información tomada de Restrepo Victoria, Burbano Jaramillo, 2005.

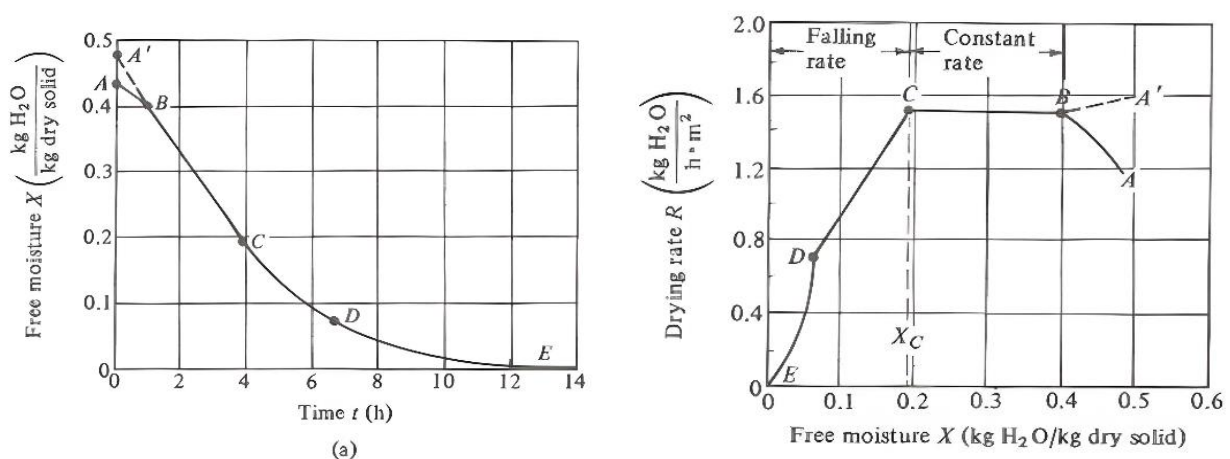


Figura 2. Curva Típica de Secado

Parámetros para el Secado del Café

El propósito del proceso de secado es alcanzar el nivel de humedad adecuado para la comercialización del café, situado en el intervalo de 10-12% (considerando la base húmeda), a continuación, se muestra algunos requerimientos mínimos para realizar de forma adecuada el proceso de secado del café de calidad, dictados por la Organización Internacional del Café (OIC).

Parámetro 1. En su resolución N°407 de enero del 2002, la Organización Internacional del Café (OIC) solicitó a sus países miembros NO comercializar café cuyo contenido de humedad se halle fuera del rango del 8% al 12%. Además, se estipula la utilización de una norma internacionalmente aceptada para la determinación del contenido de humedad, el cual se expresa “en base húmeda” (Consejo Internacional del Café, 2002).

Parámetro 2. En algunas regiones, cuando la capacidad del beneficio para procesar café húmedo se excede, se almacena el café pergamino sin secar para liberar espacio en las máquinas secadoras y patios. Sin embargo, esta práctica conlleva riesgos ya que los mohos que crecen en los granos pueden producir toxinas peligrosas para la salud humana. Algunos hongos tienen la capacidad de producir mico toxinas, como las aflatoxinas y la Ocratoxina A, que son tóxicas para los seres humanos y los animales.

Parámetro 3. Hay muchas razones por las que no deben mezclarse lotes de café que no han completado su secamiento; a continuación, se citan las más importantes según:

- Con el fin de prevenir posibles contaminaciones de lotes de alta calidad, se puede ilustrar de la siguiente manera: Durante el procesamiento del café, un lote puede sufrir una disminución en su calidad debido a la presencia de fermentaciones no deseadas.
- Con el objetivo de garantizar la homogeneidad en cuanto al contenido de humedad de todos los granos.
- Con el fin de garantizar que los procedimientos de trazabilidad se cumplan de manera segura en el procesamiento del café de alta calidad.

Parámetro 4. En el proceso de secado solar en patios de café pergamino lavado, se debe tener cuidado de lograr una humedad uniforme entre los granos, para lo cual se recomienda voltear la masa de café cada hora, el requerimiento hace hincapié en la importancia de extender inmediatamente el café lavado y descargado sobre el patio para comenzar el proceso de oreado y secado superficial del grano. Se recomienda el uso de una carretilla para distribuir el café y formar una capa uniforme en el patio de secado solar y evitar prácticas inapropiadas. También

se debe asegurar que el equipo utilizado tenga la capacidad suficiente para secar la cantidad de café que se ha comprometido o planificado.

Parámetro 5. Al inicio del secado, cuando el café tiene una alta humedad como lo indica la *Figura 3*, los detectores de humedad electrónicos no son precisos. Sin embargo, cuando la humedad disminuye por debajo del 30%, muchos equipos electrónicos pueden medirla con precisión. Aun así, es importante monitorear la humedad durante todo el proceso para asegurar un secado adecuado, especialmente en la etapa final, y ajustar el control del proceso en consecuencia. Este monitoreo debe ser registrado en la bitácora de la secadora utilizada.

Nota. La figura muestra el contenido de humedad según Consejo Internacional del Café, 2002.

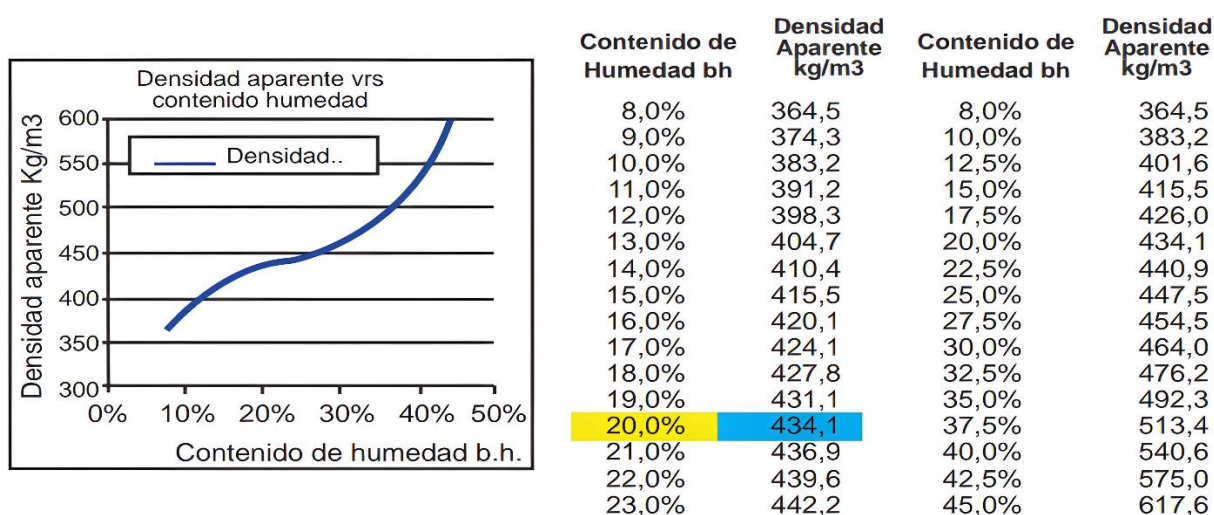


Figura 3. Contenido de Humedad

Parámetro 6. La temperatura a la que se seca el café es muy importante y debe ser considerada con mucho cuidado. Cuando se evalúa el café sin tostar, el primer aspecto que se considera es su apariencia. La calidad de los granos se puede juzgar por el color, siendo muy valorado el color verde azulado. El café que se seca rápidamente pierde calidad. Esta información proviene de Brando (2004).

Se debe tener en cuenta la importancia del secado adecuado del grano de café para su calidad y vitalidad. El café beneficiado correctamente conserva su capacidad de germinación y, por lo tanto, su estado vital. Sin embargo, cuando el grano se somete a un secado violento y a temperaturas elevadas, puede morir y perder su color y calidad. Existe un mito común de que el café puede tolerar temperaturas altas al comienzo del secado debido a su alto contenido de humedad, pero esto es incorrecto y puede dañar la calidad del grano. Una investigación realizada en CENICAFE, Colombia, respalda esta afirmación.

Es fundamental tener en cuenta que la temperatura empleada para el proceso de secado

y la temperatura natural del café son dos temperaturas distintas.

- La temperatura de secado en las secadoras mecánicas se refiere a la temperatura del aire caliente que se introduce en la secadora y que atraviesa el café en proceso de secado. Este parámetro es controlado por el operador de la máquina mediante los mecanismos propios del sistema de secado mecanizado.
- La temperatura del café es la temperatura que alcanzan los granos de café. Se puede medir con un detector de humedad electrónico, que requiere una corrección por temperatura del café. La capacidad para relacionar la temperatura de secado con la temperatura del café es importante, ya que varía para diferentes tipos de secadoras. Cleves (1995)

Límite Seguro de Temperatura

Es importante entender que establecer un límite de temperatura no es suficiente para mantener la calidad del café. El tiempo en el que se mantiene el café a una temperatura determinada es lo que realmente importa. Debido a que las condiciones y las temperaturas del café varían en diferentes tipos de secadoras, el programa de temperaturas varía con diferentes operadores. Además, el proceso de secado puede ser interrumpido por períodos de reposo para equilibrar la humedad. Es imposible especificar niveles seguros de temperatura o combinaciones seguras de tiempo y temperatura. El sobrecalentamiento durante el secado puede producir sabores agrios o "cocinados" en el café. (Sivetz, Michael & Foote, 1963).

Colorimetría del Café de Calidad

La colorimetría desempeña un papel importante en la evaluación y clasificación del café de calidad durante el proceso de secado. La medición precisa del color de los granos de café proporciona información sobre su grado de tostado y puede ser indicativa de características sensoriales como el sabor y el aroma. Según un estudio realizado por García-Molina y colaboradores (2020), la colorimetría se utiliza para determinar parámetros como el tono, la luminosidad y la intensidad del color del café durante el secado. Estos datos permiten evaluar la calidad del café y ajustar el proceso de secado para obtener perfiles de sabor deseados. Por lo tanto, la colorimetría se ha convertido en una herramienta valiosa en la industria del café para garantizar la consistencia y excelencia en la calidad.

Según García-Molina, Rodríguez-García y Lerma-Arce (2020), en su estudio sobre el análisis colorimétrico de granos de café tostados durante el proceso de secado, se encontró que la evaluación del color del grano de café durante el proceso de secado implica la observación y

medición de una amplia gama de colores que pueden presentarse. Los colores típicos del grano de café en diferentes etapas del secado incluyen:

1. Verde: Al inicio del proceso de secado, los granos de café tienen un color verde intenso. En esta etapa, el contenido de humedad es alto y los compuestos químicos aún no se han transformado debido a la falta de exposición al calor.
2. Amarillo pálido: A medida que avanza el secado, los granos de café pueden adquirir un tono amarillo pálido. Esto indica que la humedad se ha reducido y comienzan a producirse cambios químicos en el grano debido a la acción del calor.
3. Amarillo dorado: A medida que continúa el secado, el color del grano puede desarrollarse en un tono amarillo más intenso, similar al color dorado. Esto sugiere que la humedad residual está disminuyendo y que los compuestos responsables de los sabores y aromas característicos del café están comenzando a formarse.
4. Marrón claro: A medida que el secado progresa aún más, el color del grano puede volverse marrón claro. Esto indica una reducción significativa en el contenido de humedad y la presencia de compuestos resultantes de la reacción de Maillard, que contribuyen a los sabores y aromas distintivos del café.
5. Marrón oscuro: En la etapa final del secado, los granos de café pueden alcanzar un color marrón oscuro, casi negro. Esto indica que el grano está seco y listo para ser procesado y tostado.

Es importante destacar que la apariencia y los colores pueden variar según la variedad de café y las condiciones específicas de secado.

Capítulo II

Métodos de Toma y Análisis de Datos

Elegir y aplicar bien los métodos de recolección y análisis de datos es esencial en todos los tipos de evaluaciones. Esta síntesis presenta una visión general de las cuestiones relacionadas con la elección y uso de métodos para las evaluaciones.

La planificación de la recolección de datos debe comenzar por revisar en qué medida pueden utilizarse los datos existentes. En términos de indicadores, la evaluación debe procurar basarse en distintos tipos de indicadores (insumos, productos, resultados, impactos) para reflejar los principales resultados en la teoría del cambio del programa. (Unicef, 2014).

Herramientas CAD

Las herramientas CAD (diseño asistido por ordenador, por sus siglas en inglés) son

programas de software que se utilizan para crear, modificar, analizar y optimizar diseños digitales de objetos físicos en tres dimensiones (3D) y en dos dimensiones (2D).

En el marco teórico, las herramientas CAD se utilizan para describir y analizar las técnicas, métodos y procesos de diseño asistido por ordenador que se aplican en diferentes áreas de la ingeniería y la arquitectura. Algunos conceptos que se pueden abordar en el marco teórico de las herramientas CAD son:

- Descripción de las herramientas CAD más utilizadas en la actualidad, como AutoCAD, SolidWorks, Inventor, CATIA, entre otras.
- Funciones principales de las herramientas CAD, como el modelado 3D, la generación de planos de diseño, la simulación de ensamblajes y la realización de análisis de estructuras.
- Métodos de diseño asistido por ordenador, como el modelado paramétrico, la topología optimizada, la simulación dinámica y la gestión del ciclo de vida del producto (PLM).
- Aplicaciones de las herramientas CAD en diferentes áreas de la ingeniería y la arquitectura, como la mecánica, la electrónica, la aeronáutica, la construcción y la producción industrial.
- Ventajas y desventajas del uso de herramientas CAD, como la mejora de la productividad y la calidad del diseño, la reducción de errores y costos, pero también la necesidad de formación específica y el riesgo de depender demasiado de la tecnología.

Selección del Ventilador

Algunos conceptos que se pueden abordar en el marco teórico de la selección del ventilador son:

- Flujo de aire: El flujo de aire se refiere al movimiento de aire a través de un sistema o espacio determinado. Es un parámetro importante para considerar al seleccionar un ventilador, ya que determina la cantidad de aire que puede mover el ventilador en un período de tiempo determinado (Yang, 2020).
- Presión estática: La presión estática es la presión ejercida por el aire en reposo. En el contexto de la selección del ventilador, la presión estática es importante para determinar la capacidad del ventilador para superar la resistencia del sistema y mover el aire a través de conductos o filtros.
- Eficiencia del ventilador: La eficiencia del ventilador es una medida de la capacidad del ventilador para convertir la energía eléctrica en energía cinética del aire. Es un

parámetro crucial para evaluar el rendimiento del ventilador y su consumo de energía (ASHRAE, 2016).

- Curva de rendimiento del ventilador: La curva de rendimiento del ventilador muestra la relación entre el flujo de aire y la presión estática generada por el ventilador a diferentes condiciones de operación. Esta curva es útil para seleccionar el ventilador adecuado que cumpla con los requisitos de flujo y presión del sistema.
- Nivel de ruido: El nivel de ruido es un factor a tener en cuenta en la selección del ventilador, especialmente en aplicaciones donde el ruido es una preocupación, como en entornos residenciales o de oficina. Se busca seleccionar un ventilador que cumpla con los límites de ruido establecidos.
- Velocidad del aire: La velocidad del aire es la velocidad a la que se mueve el aire en un sistema de ventilación. Es un parámetro importante para determinar la eficiencia de la circulación del aire y puede influir en la distribución de temperatura y la calidad del aire interior (Kreider, 2011).
- Tipos de ventiladores: Existen diferentes tipos de ventiladores utilizados en sistemas de ventilación, como los ventiladores axiales, centrífugos y mixtos. Cada tipo tiene características distintas en términos de flujo de aire, presión estática, eficiencia, ruido, entre otros (ASHRAE, 2016).
- Selección de tamaño: La selección del tamaño adecuado del ventilador es fundamental para asegurar un rendimiento óptimo del sistema de ventilación. Se deben considerar parámetros como el caudal de aire requerido, la resistencia del sistema, la geometría del espacio y las condiciones de operación.
- Control de velocidad: El control de velocidad del ventilador permite ajustar la velocidad de rotación y, por lo tanto, el flujo de aire generado. Puede ser realizado mediante métodos como variadores de frecuencia o controles de velocidad múltiple para adaptarse a diferentes condiciones de carga y demanda (Kreider et al., 2011).
- Eficiencia energética: La eficiencia energética de un ventilador es un factor importante para considerar durante la selección. Se busca elegir un ventilador con un alto nivel de eficiencia para minimizar el consumo de energía y reducir los costos operativos.

Capítulo III

Cálculo del Sistema Secador de Café

Para el cálculo de todo el sistema secador de café se realizaron los siguientes procesos y se tomaron las diferentes recomendaciones ya mencionadas para obtener un café de calidad.

Propiedades del Aire de Secado

Las propiedades del aire de secado se calcularon haciendo uso del software CYTSoft Psychometric Chart, que nos permite obtener las propiedades aproximadas del aire de secado en las condiciones climáticas presentes en la ciudad de Loja, y posterior a ello se aplicó el método de cálculo utilizado por Roa y Ortega que indica lo siguiente:

Tasa de Evaporación del Agua

$$\Delta x = \frac{Ms}{t} \left(\frac{Ho - Hf}{100} \right) \quad E.c. 1$$

En donde:

$\Delta x =$ Tasa de vaporización, $\frac{g}{s}$.

$Ms =$ Masa de materia seca g.

$t =$ tiempo de secado s.

$Ho =$ Humedad inicial %.

$Hf =$ Humedad final %.

Poder de Vaporización del Aire de Secado

$$W = W2 - W1 \quad E.c. 2$$

En donde:

$W =$ Poder de evaporización (relación de humedad) $\frac{g_{H2O}}{kg_{As}}$.

$W2 =$ Contenido de humedad del aire de salida $\frac{g_{H2O}}{kg_{As}}$.

$W1 =$ Contenido de humedad del aire de secado $\frac{g_{H2O}}{kg_{As}}$.

Cantidad de Aire de Secado Necesaria para Remover el Vapor de Agua del Grano

$$m_{As} = \frac{\Delta x}{W} \quad E.c. 3$$

En donde:

$m_{As} =$ Cantidad de aire de secado $\frac{kg}{s}$.

$\Delta x =$ Tasa de evaporización $\frac{g_{H2O}}{s}$.

$W =$ Poder de vaporización $\frac{g_{H2O}}{kg_{As}}$.

Caudal de Secado

$$q = m_{As} * Va \quad E.c. 4$$

En donde:

$$m_{As} = \text{Cantidad de aire de secado} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$Va = \text{Volumen específico del aire} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

La Energía, que el Sistema de Secado Requiere

$$Q = m_{As}(H2 - H1) \quad E.c. 5$$

En donde:

$$Q = \text{Flujo de calor} \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$m_{As} = \text{Cantidad de aire de secado} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$H1 = \text{Entalpía del aire del ambiente} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$H2 = \text{Entalpía del aire del secado} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Tiempo de Secado

El proceso de deshidratación en un método común para secar alimentos sigue una serie de fases con distintas velocidades de secado, tal y como se puede apreciar en la representación gráfica.

Nota. La figura muestra la velocidad de secado. Información tomada de Orrego Alzate, 2003

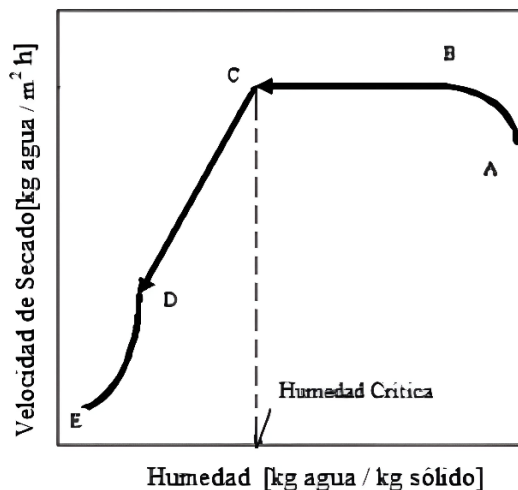


Figura 4. Curva General de Secado

La sección AB corresponde a una etapa de transición en la cual el agua presente en el producto se calienta gradualmente hasta alcanzar una temperatura específica deseada. En la fase BC, se lleva a cabo el secado a una temperatura constante que coincide con la temperatura de bulbo húmedo del aire utilizado para el proceso. En la mayoría de los casos, existe un punto crítico C de humedad, por debajo del cual la velocidad de secado disminuye con el tiempo en una o varias etapas (CD) con velocidades decrecientes (DE).

Se realiza un análisis de transferencia de calor y masa para calcular los tiempos de secado más relevantes asociados a las dos fases observadas en la curva de secado (la fase de secado a velocidad constante BC y la fase de secado a velocidad decreciente CD, como se muestra en la figura 5) (procesamiento de alimentos, Orrego Alzate 2003). Los segmentos AB y DE se han descartado debido a que su duración es corta en comparación con los segmentos analizados. El caudal de aire utilizado corresponde al método de CENICAFÉ.

Tiempo de secado del período a velocidad constante:

$$t_{BC} = \frac{m_{cps} \times h_{fg} \times (X_B - X_C)}{A_{cs} \times h_{sp} \times (T_a - T_w)} \quad E.c. 6$$

En donde:

m_{cps} : Masa de granos en café pergamino seco.

h_{fg} : Calor latente de ebullición del agua.

$(X_B - X_C)$: Diferencia de humedad entre zona de secado constante.

A_{cs} : Área de la cama de secado.

h_{sp} : Coeficiente convectivo de transferencia de calor para la condición del flujo de aire perpendicular a la superficie de secado:

$$h_{sp} = 1.17G^{0.37} \quad E.c. 7$$

En donde:

$G = \text{velocidad aire de secado} \times \text{densidad aire humedo.}$

$$G = C_{as} \times \rho_{ah} \quad E.c. 8$$

Para lo cual el valor de G representa la velocidad del aire de secado que atraviesa cada agujero de la placa perforada.

Tiempo Estimado de Secado a Velocidad Decreciente

El tiempo estimado de secado para la etapa a velocidad de secado decreciente se calcula mediante dos ecuaciones.

$$t_{CD} = \frac{m_{cps} \times X_C}{A_{cs} R_C} \ln \frac{X_C}{X_{bhf}} \quad E.c. 9$$

En donde:

X_{bhf} : Porcentaje de humedad final base humedad en el grano (11%).

R_C : Velocidad de evaporación en el secado para el periodo de velocidad constante BC.

R_C Se calcula con la siguiente ecuación:

$$R_C = \frac{h_{sp}}{h_{fg}} \times (T_a - T_w) \quad E.c. 10$$

Capacidad de la Máquina

Para el cálculo de la capacidad de la máquina se encontró la masa de café pergamino se mediante el uso del factor de conversión (1.25) (E.c.7) multiplicado por la masa de café oro y la masa de café lavado y escurrido se calculó mediante la multiplicación de su factor de conversión (1.93) por el valor de masa en café pergamino seco (E.c.8) como lo indican las siguientes ecuaciones.

Masa de café pergamino seco:

$$m_{cps} = fr_{co-cps} \times m_{co} \quad E.c. 11$$

Masa de café lavado y escurrido:

$$m_{cle} = fr_{cps-cle} \times m_{cps} \quad E.c. 12$$

En donde:

m_{cps} : masa de café pergamino seco.

m_{cle} : masa de café lavado y escurrido.

fr_{co-cps} : factor de conversión de café oro a café pergamino seco.

$fr_{cps-cle}$: factor de conversión de café pergamino seco a café lavado y escurrido.

Para conocer la masa de agua contenida en cada etapa del secado se retomó la ecuación E.c.12 obtenida de Contenido de humedad de un alimento (Cap. IV) de Menjívar, Espinoza y Navarro (2018), que relaciona la cantidad de masa de agua con la masa del café y su porcentaje de humedad, por lo que para las cantidades de masa de agua para la condición de café lavado y escurrido y café pergamino seco se tiene respectivamente:

$$m_{agua,cte} = m_{cle} \times X_{bhi} \quad E.c. 13$$

$$m_{agua,cps} = m_{cps} \times X_{bhf} \quad E.c. 14$$

En donde:

$m_{agua,cle}$: masa de agua en la etapa de café lavado y escurrido.

$m_{agua,cps}$: masa de agua en la etapa de café pergamino seco.

X_{bhi} : porcentaje inicial de humedad de los granos en base húmeda (50%).

X_{bhf} : porcentaje final de humedad de los granos en base húmeda (11%).

Por lo tanto, la carga del equipo secador de granos de café es la masa de humedad en el estado de grano lavado y escurrido menos la masa de humedad de grano pergamino seco. Para lo cual se tiene (E.c.14):

$$m_w = m_{agua,cle} - m_{agua,cps} \quad E.c. 15$$

En donde:

m_w : Carga del equipo o total de masa de agua a retirar del lote de secado

Caudal de la Máquina

Es muy importante operar los secadores de café con el correcto valor de los caudales de aire, los resultados obtenidos por Cenicafe indican que para el secado de café pergamino en capa estática el caudal de aire óptimo desde el punto de vista energético, es de 0,1 m³/min-kg de café pergamino seco. En los secadores de tres capas, la altura ideal para cada capa es de 0,25 m, mientras que, para secadores de dos capas, con inversión de dirección del aire, se recomienda una altura máxima de 0,35 m por capa. Independiente del sistema de secado, la humedad del café debe estar entre el 10 % y el 12 %

Cálculo del Flujo Másico de Aire Transportado por el Ventilador

Es importante conocer cuál debe ser el flujo de aire \dot{m}_{al} que se necesita para extraer la humedad adecuada del café, debido a que la etapa del secado es de gran importancia para garantizar la buena calidad del mismo.

Para conocer cuál debe ser el flujo de masa de aire \dot{m}_{al} se parte de la hipótesis de que el calor de vaporización ganado por el café \dot{Q}_w es igual al producto del calor perdido o cedido por el aire \dot{Q}_{al} y la eficiencia de secado n_s :

$$\dot{Q}_w = n_s * \dot{Q}_{al} \quad E.c. 16$$

$$\dot{m}_w * (Cp_w * \Delta T_w + h_{fg}) = n_s * \dot{m}_{al} * Cp_{al} * \Delta T_{al} \quad E.c. 17$$

$$\dot{m}_{al} = \frac{m_w(Cp_w*\Delta T_w+h_{fg})}{n_s*Cp_{al}*\Delta T_{al}} \quad E.c. 18$$

En la anterior ecuación \dot{m}_w es el flujo de masa de agua extraído del café pergamino; Cp_w es el calor específico para el vapor de agua; ΔT_w es el cambio de temperatura que experimenta el café pergamino en la etapa del secado; h_{fg} es la entalpía de vaporización del agua; Cp_{al} es el calor específico para el aire atmosférico; ΔT_{al} es el cambio de temperatura que experimenta el aire en la etapa del secado.

El \dot{m}_w es igual a la masa de agua extraída del café en un período de tiempo. Esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$\dot{m}_w = \frac{m_{café}}{t} * (w_o - w_f) \quad E.c. 19$$

En la anterior ecuación $m_{café}$ es la masa de café pergamino a secar, w_o y w_f son la humedad inicial y final del café respectivamente y t es el tiempo que se hace pasar el aire por el café para asegurar que la humedad final del café sea la correcta.

Remplazando la ecuación 2 en la ecuación 1 se obtiene la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{al} = \frac{m_{café}*(w_o-w_f)*(Cp_w*\Delta T_w+h_{fg})}{t*n_s*Cp_{al}*\Delta T_{al}} \quad E.c. 20$$

Transferencia de Calor

La transferencia de calor es el proceso mediante el cual la energía térmica se transfiere de un cuerpo o sistema a otro debido a una diferencia de temperatura. Este proceso puede ocurrir por conducción, convección y radiación (Incropera et al., 2019).

Existen tres modos de transferencia de calor, que son la conducción, la convección y la radiación. Cada uno de estos modos se produce de manera diferente y tiene diferentes aplicaciones en la ingeniería.

Conducción térmica: La conducción térmica es el mecanismo de transferencia de calor que se produce a través de un medio sólido, donde la energía térmica se transmite mediante la interacción directa de las partículas cercanas (Çengel & Ghajar, 2019).

Convección térmica: La convección térmica es el proceso de transferencia de calor que se produce entre una superficie sólida y un fluido circundante, ya sea líquido o gas, mediante el movimiento del fluido (Çengel & Cimbala, 2020).

Radiación térmica: La radiación térmica es la transferencia de calor mediante ondas electromagnéticas sin la necesidad de un medio material. La energía térmica se transmite en

forma de radiación electromagnética, como la radiación infrarroja (Çengel & Cimbala, 2020).

La transferencia de calor es un concepto de suma importancia en la física y abarca un amplio espectro de aplicaciones en distintos campos, desde la ingeniería y la climatización hasta la cocina y la meteorología. Comprender los fundamentos de la transferencia de calor es esencial para diseñar sistemas eficientes de calefacción y refrigeración, así como para interpretar el comportamiento térmico de objetos y sustancias en diversas circunstancias.

Cálculo del Dispositivo de Disipación de Calor por Convección Natural

Para el cálculo del dispositivo de disipación de calor o banco de aletas se utilizó los fundamentos básicos de transferencia de calor según la guía de Fórmulas, tablas y figuras de transferencia de calor y tecnología energética de la Universidad de Navarra, en donde se presenta las siguientes fórmulas para el proceso que se desarrolla:

Convección Forzada en Flujo Turbulento Interno

En este tipo de convección, el movimiento agitado y caótico del fluido favorece una transferencia de calor más eficiente en comparación con el flujo laminar, lo que significa que el calor se transfiere más rápidamente desde una superficie sólida al fluido en movimiento (Tejeda & Martinez,2018).

Cálculo de Diámetro Hidráulico

Área Transversal:

El área transversal se refiere al espacio o superficie que una figura u objeto ocupa cuando se corta de manera perpendicular a su eje principal (Huera, 2021), teniendo la siguiente ecuación:

$$A_c = x_1 * x_2 \quad E.c. 21$$

En donde:

x1: Ancho del rectángulo m.

x2: Largo del rectángulo m.

Perímetro Mojado:

Se refiere a la longitud de la parte de un objeto o superficie que está en contacto con un líquido, como el agua o aire, y este es igual a:

$$P_{mojado} = (2 * x_1) + (2 * x_2) \quad E.c. 22$$

En donde:

x1: Ancho del rectangulo m.

x2: Largo del rectangulo m.

Diámetro Hidráulico (Dh):

Es una medida que se utiliza en la ingeniería y la hidrología para caracterizar la sección transversal efectiva de un conducto o canal por el cual fluye un líquido (Rocha, 2016) y tenemos la siguiente ecuación:

$$Dh = \frac{4 * Ac}{Pmojado} \quad E.c. 23$$

En donde:

Ac: Área transversal m².

Pmojado: Périmetro mojado m.

Cálculo del Número de Reynolds

Es un número adimensional utilizado en la mecánica de fluidos para predecir el comportamiento de un flujo de líquido o gas en un conducto o alrededor de un objeto, se calcula de la siguiente manera:

$$Re = \frac{V * Dh}{\nu} \quad E.c. 24$$

En donde:

V: Velocidad de entrada del aire $\frac{m}{s}$.

Dh: Diámetro hidráulico m.

\nu: Viscosidad del fluido $\frac{m^2}{s}$.

Número de Nuselt:

Es un número adimensional utilizado en la transferencia de calor para describir la eficiencia con la que el calor se transfiere entre un fluido y una superficie sólida, y se calcula con la siguiente expresión para convección forzada en flujo interno completamente desarrollado:

$$Nu = 0.023 * Re^{\frac{4}{5}} * Pr^n \quad E.c. 25$$

En donde:

Re: Número de Reynolds.

Pr: Número de Prandtl.

n: Número de aletas.

Entalpia (hi):

Es una propiedad termodinámica que se utiliza para describir la cantidad total de energía de un sistema, incluyendo su energía interna y la energía asociada con la presión y el volumen del sistema y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$hi = \frac{Nu * k}{Dh} \quad E.c. 26$$

En donde:

Nu: Número de Nusselt.

k: Coeficiente de conductividad térmica $\frac{W}{m * K}$.

Dh: Diámetro hidráulico m.

Cálculo de las Aletas

Las aletas son estructuras alargadas que se agregan a una superficie sólida para aumentar su área de intercambio de calor. Las aletas mejoran la transferencia de calor por convección al aumentar la superficie expuesta al fluido circundante (Incropera et al., 2019).

Se utiliza las siguientes fórmulas para calcular aletas rectas de perfil rectangular:

Longitud de Aleta Corregida

La longitud de aleta corregida tiene en cuenta el efecto de la conductividad térmica del material de la aleta y su espesor en la eficiencia de la transferencia de calor y se calcula con la siguiente ecuación:

$$Lc = l + \frac{t}{2} \quad E.c. 27$$

En donde:

l: altura de la aleta cm.

t: espesor de la aleta cm.

Superficie Total de la Aleta

Se refiere a la suma de todas las áreas de la superficie expuesta en una aleta utilizada para mejorar la transferencia de calor y se expresa de la siguiente manera:

$$Af = 2 * W * Lc$$

E.c. 28

En donde:

W: Longitud total de la aleta cm.

Lc: Longitud de aleta corregida cm.

Factor Geométrico

Se utiliza para cuantificar la eficiencia de una aleta en la transferencia de calor y se expresa mediante la siguiente expresión.

$$m = \sqrt{\left(\frac{2*hi}{K*t}\right)}$$

E.c. 29

En donde:

hi: Entalpía $\frac{W}{m^2 * K}$.

K: Coeficiente de conductividad térmica $\frac{W}{m * K}$.

t: espesor de la aleta cm.

Eficiencia para Aleta Recta Rectangular

Se refiere a la medida de cuán efectiva es una aleta en la mejora de la transferencia de calor en relación con una aleta ideal de las mismas dimensiones geométricas se calcula mediante la siguiente expresión:

$$nf = \frac{\tanh(m * Lc)}{m * Lc}$$

E.c. 30

En donde:

m: Factor geométrico cm.

Lc: Longitud de aleta corregida cm.

Área Corregida de la Aleta

El propósito de calcular el área corregida de la aleta es obtener una estimación más precisa de la superficie efectiva que contribuye a la transferencia de calor, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Ac = W * t$$

E.c. 31

En donde:

W: Longitud total de la aleta cm.

t: espesor de la aleta cm.

Área de la Base de la Aleta

Se refiere a la superficie que constituye la parte inferior o la base de una aleta utilizada en aplicaciones de transferencia de calor y se expresa de la siguiente manera:

$$Ab = A_{aletas} - N * Ac \quad E.c. 32$$

En donde:

A_{aletas}: área de las aletas m².

Ac: Área transversal m².

N: Número de aletas.

Área Total de la Aleta

El área total de la aleta es un parámetro importante para determinar la cantidad total de superficie disponible para la transferencia de calor entre la aleta y el fluido circundante con la siguiente ecuación:

$$At = Ab + N * Af \quad E.c. 33$$

En donde:

N: Número de aletas.

Ab: Área de la base m².

Af: Área que ocupa el fluido m².

Eficiencia Global de la Superficie

Es una medida que se utiliza para evaluar qué tan efectiva es una configuración de superficie en la transferencia de calor en un sistema de intercambio térmico, se expresa de la siguiente manera:

$$no = 1 - \frac{N * Af}{At} * (1 - nf) \quad E.c. 34$$

En donde:

N: Número de aletas.

Af: Área que ocupa el fluido m².

At: Área total de las aletas m².

nf: Eficiencia para aleta rectangular

Rendimiento de una Sola Aleta

Se refiere a la eficiencia con la que una aleta específica y se calcula de la siguiente forma:

$$qf = nf * hi * Af * (Tb - T\alpha) \quad E.c. 35$$

En donde:

nf: Eficiencia para aleta rectangular.

Af: Área que ocupa el fluido m².

hi: Entalpía $\frac{W}{m^2 * K}$.

Tb: Temperatura en la base de la aleta °C.

Tα: Temperatura ambiente °C.

Efectividad de una Aleta

Mide la capacidad de la aleta para cumplir su función de disipar o absorber calor en comparación con un estándar ideal, y se calcula de la siguiente manera:

$$Ef = \frac{qf}{hi * Ac * (Tb - T\alpha)} \quad E.c. 36$$

En donde:

hi: Entalpía $\frac{W}{m^2 * K}$.

Tb: Temperatura en la base de la aleta °C.

Tα: Temperatura ambiente °C.

Ac: Área transversal m².

qf: Energía del sistema W.

Energía Total Disipada por el Sistema

Es la cantidad total de energía que se convierte en calor o se pierde como resultado de diversos procesos y disipaciones dentro de un sistema se expresa como:

$$qt = no * hi * At * (Tb - T\alpha) \quad E.c. 37$$

En donde:

hi: Entalpía $\frac{W}{m^2 * K}$.

Tb: Temperatura en la base de la aleta °C.

Ta: Temperatura ambiente °C.

At: Área total m².

no: Eficiencia global de la superficie.

Rendimiento Total del Sistema

Se refiere a la medida de cuán eficiente es un sistema en su conjunto para cumplir su objetivo deseado, y es igual a la energía total del sistema sobre la potencia del inductor multiplicado por 100.

$$wnsistema = \frac{qt}{P} * 100 \quad E.c. 38$$

Balance de Energía del Inductor

Para el cálculo de la energía del inductor se determina mediante un balance de energía planteado de la siguiente manera:

El balance de energía es una herramienta fundamental en la transferencia de calor que permite evaluar y equilibrar las entradas y salidas de energía en un sistema. Se basa en la conservación de la energía, donde la energía total que entra en un sistema debe ser igual a la energía total que sale del sistema, más la energía almacenada en el sistema (Incropera et al., 2019), se establece según el principio de la termodinámica que la energía de entrada es igual a:

$$E_{ent} = E_{sal} \quad E.c. 39$$

Por lo tanto, según el balance de energía que existe dentro del prototipo secador de café, se establecen la siguiente interacción dentro del sistema:

$$PelecI = qt + (Qs + Ql) + PelecV \quad E.c. 40$$

En donde:

qt: transferencia total de calor del sistema W.

Qs: Calor sensible en la cama de café W.

Ql: Calor latente en la cama de café W.

PelecV: Potencia eléctrica del ventilador seleccionado W.

Como la convección en el sistema puede darse de forma forzada y natural se procede a

calcular de esta manera el balance de energía del prototipo secador de café aplicando las siguientes fórmulas para este tipo de convecciones.

Cálculo de Grashof:

Se utiliza específicamente para predecir cuándo un flujo de convección natural se volverá dominado por la fuerza de flotación

$$Gr1 = \frac{g \cdot \beta 1 \cdot (Ti - Te\alpha) \cdot L^3}{(v1)^2} \quad E.c. 41$$

En donde:

g: fuerza de gravedad $\frac{m}{s^2}$

$\beta 1$: coeficiente de expansión térmica K^{-1} .

L: longitud total del sistema de ductos m.

Tb: Temperatura en la base de la aleta °C.

Te α : Temperatura ambiente °C.

v: Viscosidad del fluido $\frac{m^2}{s}$.

Aplicamos la siguiente condicional para comprobar si existe una convección libre y forzada combinadas, que se produce cuando el valor de la siguiente expresión es cercano a 1.

$$\frac{Gr1}{Re1^2} \quad E.c. 42$$

En donde:

Gr: número de Grashof.

Re: número de Reynolds.

Cercano al 1 cumple por ende procedemos a calcular el número de Nuselt tanto de forma forzada como natural

Correlación de Churchill y Chu para la Convección Libre

Se utiliza la siguiente condicional para comprobar si se puede aplicar la correlación de Churchill y Chu, en este caso para un cilindro largo horizontal.

$$\frac{35}{Gr1^{\frac{1}{4}}} 1 > Cch \quad E.c. 43$$

Correlación de Churchill y Chu:

Es una ecuación empírica ampliamente utilizada en ingeniería térmica y mecánica de fluidos. Esta correlación se utiliza para estimar el coeficiente de transferencia de calor convectivo en flujo forzado de un fluido a través de un tubo o conducto.

Número de Rayleigh

Es fundamental en la predicción de la transición de flujos laminar a turbulento y en el análisis de sistemas de transferencia de calor en aplicaciones como la circulación de aire caliente.

$$Ra1 = Gr1 * Pr1 \quad E.c. 44$$

En donde:

Gr: número de Grashof.

Pr: número de Prandt.

Nusselt Convección Natural

El número de Nusselt en convección natural se utiliza para relacionar la tasa de transferencia de calor convectiva con las propiedades del fluido y las características del sistema

$$Nun1 = \left(0.825 + \frac{0.387 * Ra1^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr1} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 \quad E.c. 45$$

En donde:

Ra: Número de Rayleigh.

Pr: Número de Prandt.

Nusselt del Sistema

El número de Nusselt total del sistema es igual a la sumatoria del Nusselt en convección forzada más el Nusselt en convección natural.

$$Nuc1 = \sqrt[3]{(Nuf1^3 + Nun1^3)} \quad E.c. 46$$

Entalpía total del sistema

$$he = \frac{Nuc1 * k1}{L} \quad E.c. 47$$

En donde:

K: Coeficiente de conductividad térmica $\frac{W}{m * K}$.

Nuc: Nusselt del sistema.

L: longitud total del sistema de ductos m.

Para el cálculo del calor perdido en la cama de café se hace uso del artículo científico denominado “Mathematical model and experimental analysis of a solar dryer with Parvati Geometry for coffer beans” de Tapia D, Solórzono B, Cuenca J, Ortega C, Paccha E, se establece las condiciones iniciales del sistema secador de café.

Para el calor específico utilizamos la siguiente fórmula en función del contenido de humedad.

$$C_{pc} = 1.3556 + 5.7859 * M \quad E.c. 48$$

Para el calor latente de vaporización utilizamos la siguiente fórmula dada en función de la temperatura que es constante a lo largo del proceso de secado y el contenido de humedad.

$$L_v = [2502.4 - (2.42958 * T_c)] * (1 + 1.44408e^{-21.5011M}) \quad E.c. 49$$

Finalmente calculamos el calor que se transmite en la cama de secado de café con las siguientes ecuaciones.

Calor sensible en la cama de café

$$Q_s = \frac{mc * C_{pc1} * (T_{ic} - T_{fc})}{t} \quad E.c. 50$$

Calor latente en la cama de café

$$Q_l = \frac{mc * L_v1}{t} \quad E.c. 51$$

Calor total en la cama de café

$$Q_{cafe} = Q_s + Q_l \quad E.c. 52$$

Energía necesaria del inductor

$$Q_{inductor} = Q_{cafe} + P_{elec}V + qt \quad E.c. 53$$

5. Metodología

Métodos

Planteamiento de los Parámetros Principales para el Sistema Secador de Café por Aire Caliente Forzado Generado por un Módulo de Inducción

Caracterización del Proceso de Secado para Café de Calidad

Para caracterizar el proceso de secado para café de calidad se realizó una búsqueda bibliográfica sobre secado de café y el proceso a seguir por las normas establecidas en el Ecuador y el Mundo para el procesamiento de alimentos dando como resultado la siguiente ficha de caracterización como lo muestra el Anexo 27.

Temperatura de Trabajo

Según la IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura) y la OIC (International Coffee Organization), la temperatura máxima a la que debe estar un café de calidad para evitar daños en el pergamino, no debe sobrepasar los 40 °C, y debe estar ubicada en un rango óptimo entre 30-35 °C, en un período máximo de 1 a 2 días, hasta alcanzar una humedad entre 10-12.5% (b.h.) , además se recomienda que el secado no sea de forma abrupta, pues un “aspecto crucial, al cual debe darse la máxima importancia, es la temperatura que el café alcanza durante su secamiento, que puede ser superior a la dada por la máquina.

Propiedades del Aire de Secado

El siguiente análisis implica calcular las propiedades del aire utilizado en el proceso de secado a través de una carta psicrométrica como lo indica la figura 4. Para facilitar este cálculo, se puede utilizar un software como CYTSoft Psychrometric Chart, que ofrece una solución sencilla y eficaz para obtener las propiedades requeridas del aire, en donde indica las variaciones de estado que experimenta el aire en el proceso de secado, para ello se ingresan las condiciones iniciales del sistema según las condiciones climáticas presentes en el lugar donde la máquina funcionara en este caso la ciudad de Loja, obteniendo los siguientes resultados.

Nota. La figura representa las propiedades del secado, CYTSoft Psychrometric Chart.

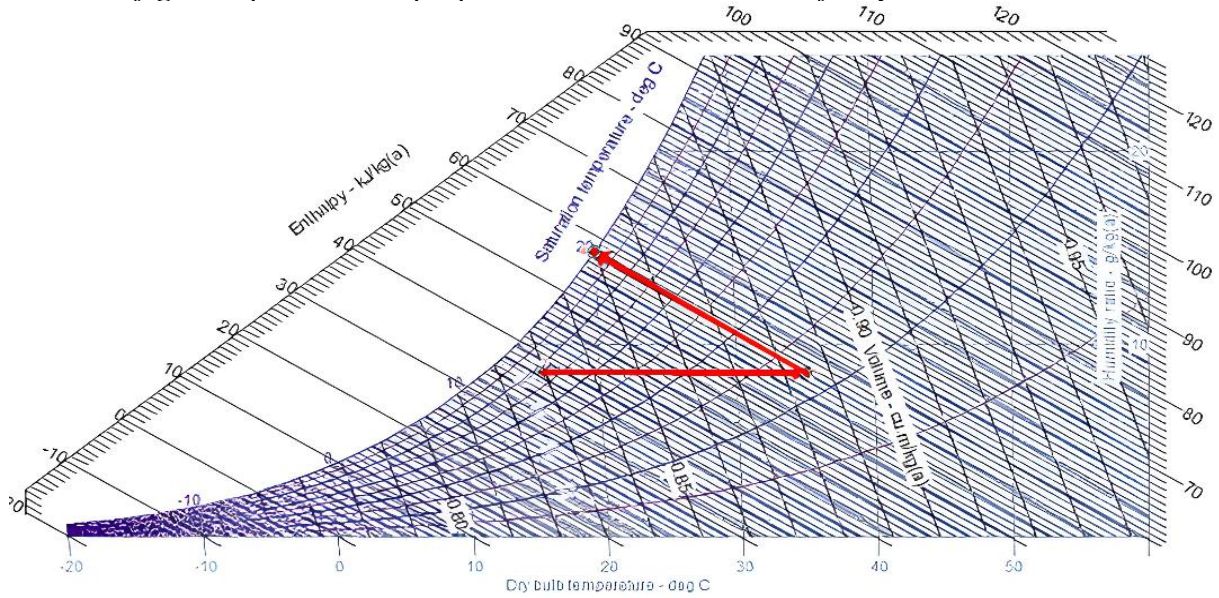


Figura 5. Carta Psicométrica

Las propiedades identificadas se detallan en la Tabla 1 a continuación:

Tabla 1. Propiedades del Aire de Secado

Estados del aire	Temperatura de bulbo seco °C	Temperatura de bulbo húmedo °C	Contenido de humedad g_{H2O}/kg_{As}	Entalpía kJ/kg
Aire de entrada	16	13.37	8.52	37.64
Aire de secado	35	20.003	8.51	57.04
Aire de salida	20.01	20.008	14.76	57.58

Nota. La tabla muestra las propiedades del aire de secado.

Con estos datos podemos calcular la tasa de evaporización del agua haciendo uso de E.c.1

$$\Delta x = \frac{Ms}{t} \left(\frac{Ho - Hf}{100} \right)$$

Para calcular el poder de vaporización del aire de secado está definido por:

$$W = W2 - W1$$

La cantidad de aire de secado necesaria para remover el vapor de agua del grano se determina por la siguiente expresión:

$$m_{As} = \frac{\Delta x}{W}$$

El caudal de secado se determina con la expresión

$$q = m_{As} * Va$$

El volumen específico del aire, a una atmosfera de presión, es de $1 \frac{m^3}{kg}$. Este valor es utilizado para la mayoría de los cálculos, ya que el cambio que este tiene en relación a la altura es mínimo.

La energía, que el sistema de secado requiere, se calcula con la expresión

$$Q = m_{As}(H2 - H1)$$

Tiempo Secado

El proceso de secado del café se debe llevar a cabo en diferentes fases debido a que se realiza en periodos de velocidad constante tal y como se lo indico anteriormente se seguirá la siguiente metodología de cálculo

Cálculo del Tiempo de Secado a Velocidad Constante (Tramo BC).

Se realiza este cálculo tomando en consideración dos ecuaciones que se encuentran en “Método predictivo para la etapa de secado a velocidad constante”.

Tiempo de secado del período a velocidad constante:

$$t_{BC} = \frac{m_{cps} \times h_{fg} \times (X_B - X_C)}{A_{cs} \times h_{sp} \times (T_a - T_w)}$$

Los valores obtenidos para cada variable a sustituir en las ecuaciones antes dichas se resumen a continuación:

m_{cps} : Masa de granos en café pergamino seco 12.5 kg (Tabla 1).

h_{fg} : Calor latente de ebullición del agua a 21.58 °C $\rightarrow 2449.77 \times 10^3$ J/kg, temperatura de bulbo húmedo correspondiente a una temperatura de aire de secado de 35 °C (tomado de: tabla A-4, Termodinámica Yunus A. Cengel, séptima edición, (Anexo A2).

$(X_B - X_C)$: Diferencia de humedad entre zona de secado constante, el valor de X_B es el porcentaje de humedad con el cual el grano entra a la cámara de secado y el valor de la variable X_C representa el valor de humedad crítico (19 % tomado de una prueba de secado de café en deshidratador) el cual es el punto de inflexión en el que el valor de humedad en el grano se ve reducida en valores porcentuales mínimos en comparación del periodo constante en la curva de secado.

A_{cs} : Área de la cama de secado (dimensiones en cama de secado: r=0.375 m, 0.44 m2).

h_{sp} : Coeficiente convectivo de transferencia de calor para la condición del flujo de aire perpendicular a la superficie de secado:

$$h_{sp} = 1.17G^{0.37}$$

En donde:

$G = \text{velocidad aire de secado} \times \text{densidad aire humedo}$

$$G = C_{as} \times \rho_{ah}$$

Para lo cual el valor de G representa la velocidad del aire de secado que atraviesa cada agujero de la placa perforada multiplicado por la densidad del aire húmedo a una temperatura de 21.58 °C.

Velocidad de Aire

Número aproximado de agujeros en área de secado se obtiene con la siguiente ecuación:

$$n_{agujeros} = \frac{A_{perforada}}{A_{agujeros}}$$

Caudal de Aire de Secado

$v_{as \text{ a } 35^{\circ}\text{C}} = 1.130 \text{ m}^3/\text{kg}$ Obtenido CYTSoft Psychometric Chart

$$\dot{V}_{agujero} = \frac{\dot{m}_{ar} \times v_{as \text{ a } 35^{\circ}\text{C}}}{n_{agujeros}}$$

Densidad de Aire de Secado

$\rho_{ah} = 1.130 \text{ kg}/\text{m}^3$ Para una temperatura de 35 °C (obtenido del software CYTSoft Psychometric Chart), por lo que se tiene:

$$h_{sp} = 1.17(C_{as} \times \rho_{ah})^{0.37}$$

Capacidad de la Máquina

Dado que se trata de un secador de granos de café, la tarea consiste en procesar la cantidad de agua presente en los granos. En otras palabras, se busca reducir el nivel de humedad de los granos de café obtenidos del proceso de despulpado (café lavado y escurrido) hasta alcanzar una condición óptima para su almacenamiento o transporte.

Con el fin de determinar la capacidad de carga del equipo secador, se realizó la caracterización de las propiedades físicas de los granos de café en dos puntos clave: antes de

ingresar a la cama de secado (después del proceso de lavado y escurrido) y al final del proceso (en la condición de pergamino seco). Esto permitió establecer la cantidad precisa de humedad que se debe eliminar por lote. Se creó una tabla resumiendo estas propiedades del café para la especie arábica en las condiciones mencionadas anteriormente (Tabla 2).

Tabla 2. *Propiedades Físicas del Café Relacionadas con la Cantidad de Humedad según el Estado en el Proceso de Transformación*

Propiedad	Grano Lavado y escurrido	Grano pergamino seco	Grano trillado u oro
Densidad aparente	698.20 kg/m ³	385.52 kg/m ³	-
Porcentaje de humedad base húmeda	50 %	11 %	11 %
Masa total del grano	0.41 g	0.22 g	0.19 g

Nota. Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café durante el proceso de beneficiado húmedo tradicional 2008. Cenicafé.

Una vez establecidas las propiedades físicas pertinentes para el secado mecánico del café se determinó la cantidad de agua a remover de los granos de café para llevarlo del estado de lavado y escurrido a pergamino seco, los valores de masa se calcularon para obtener lotes de 10 kilogramos de café oro (según el diseñador).

Por lo tanto, tenemos que la masa de café oro es:

$$m_{co} = 10 \text{ kg}$$

Masa de café pergamino seco:

$$m_{cps} = fr_{co-cps} \times m_{co}$$

Masa de café lavado y escurrido:

$$m_{cle} = fr_{cps-cle} \times m_{cps}$$

Por lo que para el cálculo de la masa de café pergamino seco y la masa de café lavado y escurrido se obtuvo respectivamente:

Masa de café pergamino seco:

$$m_{cps} = fr_{co-cps} \times m_{co} = 1.25 \times 10 \text{ kg}$$

$$m_{cps} = 12.5 \text{ kg}$$

Masa de café lavado y escurrido:

$$m_{cle} = fr_{cps-cle} \times m_{cps} = 1.93 \times 12.5 \text{ kg}$$

$$m_{cle} = 24.125 \text{ kg}$$

Los valores de conversión de masa de café se obtuvieron de: Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café durante el proceso de beneficiado húmedo tradicional, CENICAFÉ, 2008.

Para conocer la masa de agua contenida en cada etapa del secado se retomó a las siguientes ecuaciones:

$$m_{agua,cle} = m_{cle} \times X_{bhi}$$

$$m_{agua,cps} = m_{cps} \times X_{bhf}$$

Al sustituir las masas que anterior mente fueron calculadas, se tiene para las masas de agua en condiciones descritas:

$$m_{agua,cle} = m_{cle} \times X_{bhi} = 24.125 \text{ kg} \times 50 \% = 12.0625 \text{ kg}$$

$$m_{agua,cps} = m_{cps} \times X_{bhf} = 12.5 \text{ kg} \times 11 \% = 1.375 \text{ kg}$$

Los resultados obtenidos de masa de agua y masa de café para los estados de interés se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 3. Masa Total de Café y Humedad en los Estados Lavado y Ecurrido, Pergamino Seco y Oro, Equipo Secador de Granos de Café para 10 kg de Café Oro.

Propiedad	Grano Lavado y escurrido	Grano pergamino seco	Grano trillado u oro
Masa total de café	24.12 kg	12.5 kg	10 kg
Masa de agua (humedad)	12.06 kg	1.37 kg	1.1 kg

Nota. La tabla muestra la masa total para obtener 10 kg de café. CENICAFÉ, 2008.

Por lo tanto, la carga del equipo secador de granos de café es

$$m_w = m_{agua,cle} - m_{agua,cps}$$

$$m_w = 12.0625 \text{ kg} - 1.375 \text{ kg}$$

$$m_w = 10.68 \text{ kg}$$

El total de masa de agua que el equipo secador debe retirar para obtener 10 kg de café es de 10.68 kg y la masa inicial a colocar en el equipo de secado es de 24.12 kg.

Caudal por Utilizar

Para encontrar el caudal a utilizar se seguirá la siguiente metodología de cálculo.

Cálculo del Flujo Másico de Aire Transportado por el Ventilador

Para calcular el flujo de aire que pasa a través del ventilador se deben calcular y sumar el flujo de aire que pasa a través del café.

Nota. La figura muestra el flujo de aire que a través del ventilador.

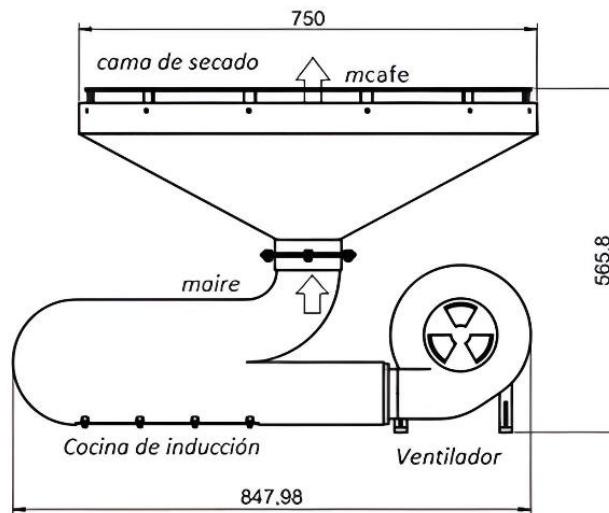


Figura 6. Flujo de Aire

Cálculo del Flujo Másico de Aire que Pasa a Través del Café

Es importante conocer cuál debe ser el flujo de aire \dot{m}_{al} que se necesita para extraer la humedad adecuada del café, debido a que la etapa del secado es de gran importancia para garantizar la buena calidad del mismo a partir de la siguiente ecuación.

$$\dot{m}_{al} = \frac{m_{café} * (w_o - w_f) * (Cp_w * \Delta T_w + h_{fg})}{t * n_s * Cp_{al} * \Delta T_{al}}$$

Teniendo nuestra máquina una capacidad de 24.10 kg de café con una humedad inicial de 50 % se lo desea secar a 10.68 kg de café con 11 % de humedad y a este se lo desea secar en un tiempo estimado de 61200 s (17 horas). El diagrama de cambio de temperatura para el aire y para el agua se muestra en la siguiente figura.

Nota. La figura muestra el flujo de temperatura para el aire y el agua. Cenicafé

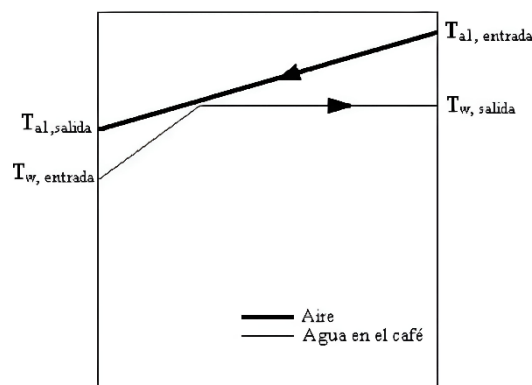


Figura 7. Flujo de Temperatura Para el Aire y el Agua en el Café

La temperatura del aire se estableció en 35 °C puesto que es la temperatura recomendada según la guía de secado de CENICAFE para no producir sobre secado en la capa inicial de café siendo establecidas las siguientes temperaturas:

Tabla 4. *Temperaturas de Entrada y Salida del Prototipo Secador de Café*

Ta1, entrada (°C)	70
Ta1, salida (°C)	40
Tw, entrada (°C)	15
Tw, salida (°C)	35

Nota.: *La tabla representa temperaturas de entrada y salida del prototipo del secador de café.*

Con los datos de la tabla se calcula los cambios de temperatura para el aire y el agua del café:

$$\Delta T_{al} = 30 \text{ °C}$$

$$\Delta T_w = 20 \text{ °C}$$

Las temperaturas de agua durante la etapa de secado se extraen de Cengel Yunus Termodinámica tomo II.

$$\Delta T_{w \text{ prom}} = \frac{15 \text{ °C} + 35 \text{ °C}}{2} = 25 \text{ °C}$$

$$\Delta T_{al \text{ prom}} = \frac{40 \text{ °C} + 70 \text{ °C}}{2} = 55 \text{ °C}$$

Entonces se tiene que:

Tabla 5. *Capacidad Calorífica y Entalpía*

$Cp_w = 1872.3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$h_{fg} = 2442.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
$Cp_{al} = 1007 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Nota. *La tabla muestra información acerca de la capacidad calorífica y entalpía, tomado de Cengel Yunus Termodinámica tomo II.*

Si reemplazamos todos los valores ya conocidos en la E.c.18, el flujo másico de aire queda expresado en función de la masa de café y la eficiencia:

$$\dot{m}_{al} = \frac{m_{café} * (w_o - w_f) * (Cp_w * \Delta T_w + h_{fg})}{t * n_s * Cp_{al} * \Delta T_{al}}$$

$$\dot{m}_{al} = \frac{m_{café} * (0.5 - 0.11) * \left(1872.3 \frac{J}{kg \cdot K} * 25 \text{ °C} + 2442.3 \frac{kJ}{kg}\right)}{61200 \text{ s} * n_s * 1007 \frac{J}{kg \cdot K} * 55 \text{ °C}}$$

$$\dot{m}_{al} = \frac{m_{café}}{n_s} * \frac{9543224.925 \frac{kJ}{kg}}{5981580000 \frac{kJ}{kg \cdot s}} = \frac{m_{café}}{n_s} * 1.595 \times 10^{-3}$$

Entonces para una masa de 25 kg evaluado a diferencia eficiencia

Tabla 6. Caudales de Aire Obtenidos según Varía la Eficiencia de Secado

Para un tiempo t=13h y una densidad del aire de 1.0760 kg/m3 y 0.02598m2				
Masa de café(kg)	Eficiencia de secado ns	Flujo másico de aire (kg/s)	Caudal de aire normal (m3/s)	Velocidad (m/s)
25	0.1	0.70	0.65	25.17
25	0.2	0.35	0.33	12.58
25	0.3	0.23	0.22	8.35
25	0.4	0.17	0.16	6.24
25	0.5	0.14	0.13	5.04
25	0.6	0.12	0.11	4.13
25	0.7	0.10	0.09	3.52
25	0.8	0.09	0.08	3.12
25	0.9	0.08	0.07	2.72
25	1	0.07	0.07	2.52

Nota. La tabla representa los caudales de aire según la variación de eficiencia del secado.

A continuación, se realizará una breve validación de los resultados de caudal obtenidos con el método empleado por CENICAFE.

Extracción de Humedad

Los secadores de café deben operar con los caudales de aire correctos. Según los resultados de Cenicafé, para el secado de café pergamino en capa estática, se recomienda un caudal de aire óptimo de 0.1 m3/min-kg de café pergamino seco desde una perspectiva energética. En los secadores de tres capas, la altura ideal para cada capa es de 0.25 m, mientras que, en los secadores de dos capas con inversión de dirección del aire, se sugiere una altura máxima de 0.35 m por capa. Sin importar el sistema de secado, la humedad del café debe estar entre el 10 % y el 12 %.

Caudal con el Método de CENICAFE

Para el cálculo real de aire que se requiere para efectuar el secado de los granos de café,

se recurre a utilizar una ecuación aprobada mediante experimentación en laboratorio, mencionada en la investigación desarrollada por C. A. González Salazar, J. R. Sanz Uribe, C. E. Oliveros Tascón; Cenicafé, 2010 con título: Control de caudal y temperatura de aire en el secado mecánico de café y además comparada con un método de condiciones ideales por V.A. Espinoza, A.G. Menjivar, Á.U. Najarro, 2018 con título: Diseño, construcción y caracterización de secador de granos de café, utilizando la energía térmica contenida en fluidos geotérmicos; dicha ecuación se presenta a continuación:

$$V_{ar} = q * m_{cps}$$

En donde:

- V_{ar} : caudal de aire real para el secado de granos de café.
- q : caudal específico óptimo y tiene un valor de $0.1 \text{ m}^3/\text{min} * \text{kg}_{cps}$.
- m_{cps} : masa de café pergamino seco (25 kg).

$$\dot{V}_{ar} = 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = 1500 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Por lo que el caudal de aire real para el secado de granos de café es de $2.5 \text{ m}^3/\text{min}$. Se determinó el flujo másico de aire real correspondiente al caudal de aire real de secado calculado en el paso anterior por lo que se planteó la ecuación siguiente:

$$\dot{m}_{ar} = \frac{\dot{V}_a}{v_a}$$

En donde:

- \dot{m}_{ar} : flujo de aire real de secado.
- v_a : Volumen específico del aire a una temperatura de $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ($1.256 \text{ kg}/\text{m}^3$) tomado del Anexo 1.
- \dot{V}_a : Caudal de aire para el secado de granos de café $5.75 \text{ m}^3/\text{min}$.

Por lo tanto:

$$\dot{m}_{ar} = 1.990 \text{ kg}/\text{min}$$

$$\dot{m}_{ar} = 0.0331 \text{ kg}/\text{s}$$

El flujo de aire real necesario para el secado de 25 kg de café según el método propuesto por CENICAFÉ, basado en las investigaciones desarrolladas es de $0.0331 \text{ kg}/\text{s}$, presenta

condiciones muy parecidas de operación y diseño de con el valor real del flujo másico de aire de secado y el calculado en el apartado anterior.

Cama de Secado

Las dimensiones de la cama de secado fueron obtenidas a partir de información recopilada, como necesitamos una cama de secado con un volumen de 0.034 m³ debido a que la masa de café lavado y escurrido es de 24.12 kg, y su densidad del café lavado y escurrido (698.20 kg/m³), se ha planteado las siguientes dimensiones:

Tabla 7. Dimensiones de la Cama de Secado de Capa Delgada 10 cm

Propiedad	Masa (kg)	Radio (m)	Área (m ²)	Espesor (m)	Volumen (m ³)	Capacidad para 10kg (m ³)
Requisitos	24.125	0.375	0.442	0.10	0.0442	0.014

Nota. La tabla muestra las dimensiones de la cama de secado.

A partir de los datos presentados en la tabla, se concluye que la cama de secado seleccionada será de forma circular tendrá un área de secado de 0.442 m² y una capacidad máxima de 34.91 kg (para una capa de café de 0.10 m o 10 cm); la masa de café que se determinó para nuestro diseño es de 24.12 kg de café lavado y 12.06 kg escurrido, la capa de café en la cama de secado se calculó es de 0.10 m.

Transferencia de Calor Respecto al Secado del Café

El calor latente, calor sensible y densidad se los toma a la temperatura promedio de 55 (°C) =328(K), con respecto a las condiciones del aire en el flujo, estos son tomados del libro “Fundamentos de transferencia de Calor” apéndice A4 de Incropera 4ta Edición.

Tabla 8. Transferencia de Calor

T	p	Cp	u.10-5	v.10-5
70	1.028	1007	2.052	1.995
73	1.00798	1007.3	2.0828	2.0664
80	0.9994	1008	2.096	2.097

Nota. Fundamentos de transferencia de Calor” apéndice A4 de Incropera 4ta Edición.

Resolviendo cada una de las partes de la ecuación tenemos:

$$\dot{m}C_p(T_2 - T_1)$$

Para la segunda parte de la ecuación tenemos lo siguiente:

$$h_o A (T_w - T_1)$$

El cálculo de h_o se utiliza la siguiente correlación, siendo la convección libre la que predomina entre la superficie externa del secador y el medio ambiente:

$$h_o = 1.42 \left(\frac{\Delta T}{l} \right) \text{ para } 10^4 < Gr \text{ Pr} < 10^9$$

$$h_o = 0.95(\Delta T) \text{ para } Gr \text{ Pr} < 10^9$$

En donde:

El número de Grashof (Gr) y el número de Prandtl (Pr) es calculado a la temperatura de la película, el valor de ΔT es la diferencia de temperatura entre la pared y el medio ambiente y es dada en °C , y l que es la longitud vertical de la pared en (m).

Estimando la temperatura de la pared es 40°C y la temperatura del ambiente es 20°C se calcula la temperatura de película:

$$T_f = \frac{40 + 20}{2} = 30^\circ\text{C}$$

De la tabla A4 de “Fundamentos de transferencia de Calor” de Incropera 4ta Edición, se obtiene el número de Prandtl a 30 °C es 0.693441, realizando los cálculos se obtiene el número de Grashof con la siguiente formula:

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\alpha)L^3}{\nu^2}$$

En donde:

g = es la aceleración de la gravedad.

β = es el coeficiente de expansión volumétrica.

L = es la longitud característica.

ν = es la viscosidad cinemática.

6. Resultados

En el apartado de resultados se explica el proceso de cálculo seguido para el diseño y conceptualización de la máquina haciendo uso de los fundamentos básicos de transferencia de calor y métodos de cálculo utilizados en diferentes trabajos investigativos realizados por diferentes empresas y organismos que trabajan en el mejoramiento de la calidad en la industria cafetalera.

Propiedades Requeridas para el Aire de Secado

Como se lo menciono anteriormente se requiere saber las propiedades necesarias que debe tener el aire para secar el café para ello se recurre a las siguientes fórmulas.

Aplicando la E.c.1 con los datos de la tabla 1 se obtiene:

$$\Delta x = \frac{12500 \text{ g}}{50079.7 \text{ s}} \left(\frac{50\% - 12\%}{100} \right)$$
$$\Delta x = 0.0948 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Para calcular el poder de vaporización del aire de secado de café, se deben considerar varios factores, como la temperatura y humedad relativa del aire, la presión atmosférica y las propiedades termodinámicas del agua. Estos parámetros influyen directamente en la capacidad del aire para absorber y transportar la humedad. Utilizando:

$$W = W2 - W1$$

$$W = 18.792 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{As}} - 8.5201 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{As}}$$

$$W = 10.2719 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{As}}$$

La cantidad de aire de secado necesario para retirar el vapor de agua del grano se determina con la ecuación E.c.2:

$$m_{\text{As}} = \frac{0.0948 \frac{\text{g}}{\text{s}}}{10.2719 \frac{\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{As}}}}$$
$$m_{\text{As}} = 9.234 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Aplicando la ecuación E.c.3 se determina el caudal de secado:

$$q = 9.234 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 1 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$
$$q = 9.234 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Se aplica la ecuación E.c.4 y se determina la energía que requiere el sistema de secado:

$$Q = 9.234 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} (72.3986 - 37.6452) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$
$$Q = 0.321 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 320.9\text{W}$$

Una vez obtenida la energía requerida por el sistema de secado se procede a calcular los tiempos estimados de secado según el método utilizado por CENICAFE, estos valores son resultados aproximados del tiempo que tardara el prototipo en secar cierto lote de granos de café tanto en velocidad constante como en el periodo de velocidad decreciente o reposo.

Tiempo Estimado de Secado para el Tramo a Velocidad Constante

Para el cálculo se retomaron 2 ecuaciones que se encuentran en el apartado de metodología utilizada, para ello se hace uso de las siguientes ecuaciones E.c.5 a la E.c.9

Coefficiente convectivo de transferencia de calor para flujo de aire perpendicular a la superficie de secado:

$$h_{sp} = 1.17G^{0.37}$$

Tiempo de secado del período a velocidad constante:

$$t_{BC} = \frac{m_{cps} \times h_{fg} \times (X_B - X_C)}{A_{CS} \times h_{sp} \times (T_a - T_w)}$$

Los valores obtenidos para cada variable a sustituir en las ecuaciones antes dichas se resumen a continuación:

- m_{cps} : Masa de granos en café pergamino seco 57.5 kg (Tabla 1).
- h_{fg} : Calor latente de ebullición del agua a 21,58 °C $\rightarrow 2449.77 \times 10^3$ J/kg temperatura de bulbo húmedo correspondiente a una temperatura de aire de secado de 35 °C (tomado de: tabla A-4, Termodinámica Yunus A. Cengel, séptima edición, (Anexo A2)).
- $(X_B - X_C)$: Diferencia de humedad entre zona de secado constante, el valor de X_B es el porcentaje de humedad con el cual el grano entra a la cámara de secado y el valor de la variable X_C representa el valor de humedad crítico (19 % tomado de una prueba de secado de café en deshidratador) el cual es el punto de inflexión en el que el valor de humedad en el grano se ve reducida en valores porcentuales mínimos en comparación del periodo constante en la curva de secado.
- A_{CS} : Área de la cama de secado (dimensiones en cama de secado: r = 0,375 m, 0.44 m²).
- h_{sp} : Coeficiente convectivo de transferencia de calor para la condición del flujo de aire perpendicular a la superficie de secado.

$$h_{sp} = 1.17G^{0.37}$$

En donde:

$$G = C_{as} \times \rho_{ah}$$

Para lo cual el valor de G representa la velocidad del aire de secado que atraviesa cada agujero de la placa perforada multiplicado por la densidad del aire húmedo a una temperatura de 21,58 °C.

Velocidad de Aire de Secado

- Número aproximado de agujeros en área de secado (asumiendo que el 25 % del área total de secado esta perforada)

$$n_{agujeros} = \frac{A_{perforada}}{A_{agujeros}}$$

$$n_{agujeros} = \frac{0.44 \text{ m}^2 \times 10\%}{2.88 \times 10^{-5}}$$

$$n_{agujeros} = 1529.15 \sim 1529 \text{ agujeros}$$

Caudal de Aire de Secado por Agujero

$v_{as \text{ a } 35^\circ\text{C}} = 1.256 \text{ m}^3/\text{kg}$ Obtenido de software Psychard de LENNOX

$$\dot{V}_{agujero} = \frac{\dot{m}_{ar} \times v_{as \text{ a } 35^\circ\text{C}}}{n_{agujeros}}$$

$$\dot{V}_{agujero} = \frac{0.076 \text{ kg/s} \times 1.256 \text{ m}^3/\text{kg}}{1529}$$

$$\dot{V}_{agujero} = 6.24 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

Por lo tanto, la velocidad de aire de secado es:

$$C_{as} = \frac{\dot{V}_{agujero}}{A_{agujeros}}$$

$$C_{as} = \frac{6.24 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}{2.88 \times 10^{-5}}$$

$$C_{as} = 2.17 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Densidad de Aire de Secado

$\rho_{ah} = 1.256 \text{ m}^3/\text{kg}$ Para una temperatura de 21.58°C (obtenido del software Psychard de LENNOX), por lo que se tiene:

$$h_{sp} = 1.17(C_{as} \times \rho_{ah})^{0.37}$$

$$h_{sp} = 1.17 \left(2.17 \text{ m/s} \times 1.256 \text{ m}^3/\text{kg} \right)^{0.37}$$

$$h_{sp} = 35.09 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$(T_a - T_w)$: Diferencia de temperaturas entre el aire de secado (35°C) y su temperatura de bulbo húmedo (21.58°C), ($35^\circ\text{C} - 21.58^\circ\text{C} = 13.42^\circ\text{C}$). El tiempo de secado en el periodo

constante es:

$$t_{BC} = \frac{m_{cps} \times h_{fg} \times (X_B - X_C)}{A_{cs} \times h_{sp} \times (T_a - T_w)}$$

$$t_{BC} = \frac{12.5 \text{ kg} \times 2449.77 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \times 31\%}{0.44 \text{ m}^2 \times 35.09 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \times 13.42 \text{ }^\circ\text{C}}$$

$$t_{BC} = 45815.08 \text{ s} = 12.73 \text{ h}$$

Tiempo Estimado de Secado a Velocidad Decreciente

El tiempo estimado de secado para la etapa a velocidad de secado decreciente se calcula mediante dos ecuaciones.

$$t_{CD} = \frac{m_{cps} \times X_C}{A_{cs} R_C} \ln \frac{X_C}{X_{bhf}}$$

R_C Se calcula con la siguiente ecuación:

$$R_C = \frac{h_{sp}}{h_{fg}} \times (T_a - T_w)$$

Al sustituir los valores en R_C anteriormente definidos tenemos:

$$R_C = \frac{h_{sp}}{h_{fg}} \times (T_a - T_w)$$

$$R_C = \frac{35.09 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}}{2449.77 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}}} \times (13.42 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$R_C = 1.93 \times 10^{-4} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}}$$

Al sustituir las variables en la ecuación del tiempo t_{CD} tenemos

$$t_{CD} = \frac{m_{cps} \times X_C}{A_{cs} R_C} \ln \frac{X_C}{X_{bhf}}$$

$$t_{CD} = \frac{12.5 \text{ kg} \times 19\%}{0.44 \text{ m}^2 \times 1.93 \times 10^{-4} \frac{\text{kg} \times \text{m}^2}{\text{s}}} \ln \frac{19\%}{11\%}$$

$$t_{CD} = 15285.46 \text{ s} = 4.24 \text{ h}$$

Por lo que el tiempo total aproximado de secado es:

$$t_{TS} = t_{BC} + t_{cd} = 12.73 \text{ h} + 4.24 \text{ h} = 17 \text{ h}$$

El tiempo total de secado es 17 horas aproximadamente; valor que podría tener una

ligera variación de mayor o menor tiempo en función de las pérdidas de temperatura en todo el sistema o los niveles de calentamiento del aire dentro del secador de café.

Cálculo del Dispositivo de Disipación de Calor

Para el cálculo del dispositivo de disipación de calor o banco de aletas se utilizó los fundamentos básicos de transferencia de calor según la guía de Fórmulas, tablas y figuras de transferencia de calor y tecnología energética de la Universidad de Navarra, en donde se presenta las condiciones de diseño según la geometría de la máquina previamente establecida, para ello se estableció el uso de un banco de aletas rectangulares distribuidas de manera uniforme en una placa de acero o placa inductora.

Nota. La figura representa el dispositivo de dispositivo representa el sistema de secado del prototipo.

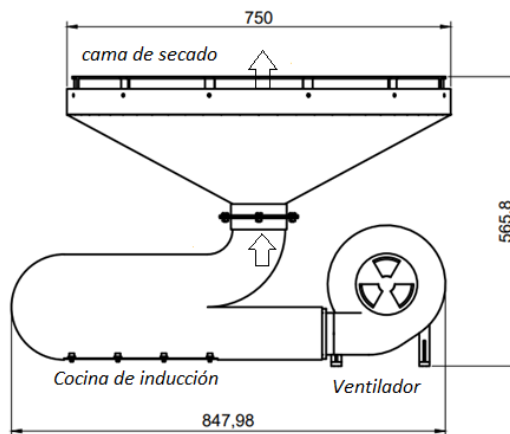


Figura 8. Estructura y Medidas Cama de Secado

Datos Iniciales:

- $T_b = 130 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_s = T_b = 403.15 \text{ K}$
- $T_\alpha = 32 \text{ }^\circ\text{C}$

Aire

- $L = 144.638 \text{ cm} = 0.5 \text{ m}$
- $T_f = \frac{(T_b + T_\alpha)}{2} = 354.15 \text{ K}$
- $\beta = \frac{1}{T_f} = 0.003 \frac{1}{\text{K}}$
- $x_1 = 25 \text{ cm}$
- $x_2 = 10 \text{ cm}$

Datos Tomados de Tabla de Datos para Propiedades del Aire (Anexo 2)

- $\rho = 0.97456 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- $\nu = 2.1906 * 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
- $Pr = 0.7132$
- $Cp = 1.007 * 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}}$
- $k = 0.030169 \frac{\text{W}}{\text{m} * \text{K}}$
- $g = 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
- $V = 5.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- $\mu = 2.1347 * 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- $\alpha = 3.0705 * 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
- $n = 0.4$ para calentamiento

Como la convección que se da dentro del sistema se establece como forzada en flujo interno, y la entrada del ducto es de forma rectangular, se procede a aplicar la metodología planteada para aletas rectas rectangulares que se encuentran dentro de una sección de ducto rectangular, para ello se calcula el diámetro hidráulico y se obtiene el número de Reynolds para este tipo de sistema.

Cálculo de Diámetro Hidráulico

Área Transversal:

$$Ac = x1 * x2$$

$$Ac = (25 * 10)$$

$$Ac = 0.025 \text{ m}^2$$

Perímetro mojado:

$$P_{\text{mojado}} = (2 * x1) + (2 * x2)$$

$$P_{\text{mojado}} = (2 * 25) + (2 * 10)$$

$$P_{\text{mojado}} = 0.7 \text{ m}$$

Diámetro hidráulico (Dh):

$$Dh = \frac{4 * Ac}{P_{\text{mojado}}}$$

$$Dh = \frac{4 * (0.025)}{0.7}$$

$$Dh = 0.143 \text{ m}$$

Cálculo del Número de Reynolds

$$Re = \frac{V * Dh}{\nu}$$

$$Re = \frac{5.5 * 0.143}{2.1906 * 10^{-5}}$$

$$Re = 3.587 \cdot 10^4 \rightarrow \text{turbulento}$$

$$3000 < Re < 5 \cdot 10^6$$

Se aplica la siguiente condicional para comprobar si se puede utilizar la correlación de Dittus – Boelter para flujo turbulento interno completamente desarrollado, esto para ver si las condiciones planteadas cumplen con lo establecido en el sistema de aletas, esto para encontrar la entalpia del sistema.

$$0.7 \leq Pr \leq 16.700 \rightarrow \text{Si cumple}$$

$$Re \geq 10.000 \rightarrow \text{Si cumple}$$

$$\frac{L}{Dh} = \frac{1.446}{0.143} = 10.124$$

$$10.125 \geq 10 \rightarrow \text{Si cumple}$$

Número de Nuselt:

$$Nu = 0.023 * Re^{\frac{4}{5}} * Pr^n$$

$$Nu = 0.023 * (4.565 * 10^4)^{\frac{4}{5}} * (0.713)^{0.4}$$

$$Nu = 88.465$$

Entalpia (hi):

$$hi = \frac{Nu * k}{Dh}$$

$$hi = \frac{88.465 * 0.03169}{0.143}$$

$$hi = 18.682 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Luego de encontrar la entalpía se calcula las dimensiones, distribución, eficiencia y pérdidas del sistema de aletas, cabe recalcar que debido a los materiales que existían en la localidad se tuvo que adaptar este diseño del banco de aletas.

Cálculo de las Aletas

Las aletas presentarán las siguientes características serán de Aluminio, y tendrán las siguientes dimensiones 25 cm de largo, 3.8 cm de altura y 6 mm de espesor, medidas que se obtuvieron según el material comprado en este caso una pletina de aluminio; además estarán ubicadas sobre una placa de inducción de 28 cm por 28 cm.

Nota. La figura representa el banco de aletas de perfil rectangular.

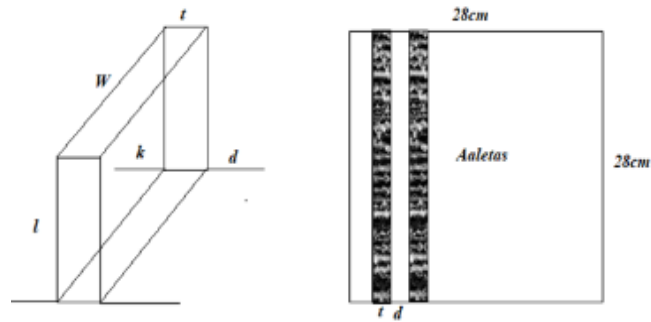


Figura 9. Medidas Banco de Aletas

Condiciones Iniciales

- $W = 25 \text{ cm} = 0.25 \text{ m}$
- $t = 6 \text{ mm} = 0.006 \text{ m}$
- $l = 3.8 \text{ cm} = 0.038 \text{ m}$
- $\delta = 1 \text{ cm} = 0.01 \text{ m}$
- $A_{\text{aletas}} = W^2 = 0.063 \text{ m}^2$
- $\Delta x = t + \delta = 0.016 \text{ m}$
- $N = \frac{W}{\Delta x} = 15.625 \text{ aletas}$
- $N \approx 15 \text{ aletas}$
- $f = 0.0625 \text{ m}$
- $K = 237 \frac{W}{\text{m} * K}$

Se utiliza las siguientes fórmulas para calcular aletas rectas de perfil rectangular:

Longitud de aleta corregida

- $L_c = l + \frac{t}{2} = 0.041 \text{ m}$

Superficie total de la aleta

- $A_f = 2 * W * L_c = 0.021 \text{ m}^2$

Factor Geométrico

- $m = \sqrt[2]{\left(\frac{2 \cdot hi}{K \cdot t}\right)} = 5.126 \frac{1}{m}$

Se aplica la siguiente condicional para comprobar si la longitud de la aleta W es menor a el factor de fricción f

- $W < menor < f \quad \frac{hi \cdot t}{K} = 4.73 \cdot 10^{-4}$

Si se cumple < 0.0625 , Se aplica el método aproximado mediante tablas

Eficiencia para aleta recta rectangular

- $nf = \frac{\tanh(m \cdot Lc)}{m \cdot Lc} = 0.986$

Área corregida de la aleta

- $Ac = W \cdot t = 0.002 \text{ m}^2$

Área de la base de la aleta

- $Ab = A_{aletas} - N \cdot Ac = 0.039 \text{ m}^2$

Área total de la aleta

- $At = Ab + N \cdot Af = 0.359 \text{ m}^2$

Eficiencia global de la superficie

- $no = 1 - \frac{N \cdot Af}{At} \cdot (1 - nf) = 0.987$

Rendimiento de una sola aleta

- $qf = nf \cdot hi \cdot Af \cdot (Tb - T\alpha) = 36.99 \text{ W}$

Efectividad de una aleta

- $Ef = \frac{qf}{hi \cdot Ac \cdot (Tb - T\alpha)} = 13.469 \geq 2 \text{ por lo tanto es correcto}$

Energía total disipada por el sistema

- $qt = no \cdot hi \cdot At \cdot (Tb - T\alpha) = 649.486 \text{ W}$

Potencia total a disipar

- $P = 1004 \text{ W}$

Rendimiento total del sistema

- $w_{sistema} = \frac{qt}{P} \cdot 100 = 64.69$

Se aplica la siguiente condicional para comprobar que las dimensiones tomadas en el

sistema estén dentro del rango permitido que debe darnos como resultado menos a 2.65.

- $m * Lc = 10.365 \cdot 0.053 = 0.231 > 2.65 \rightarrow \text{Correcto}$

Para el cálculo de la energía del inductor se determina mediante un balance de energía planteado de la siguiente manera:

Se establece según el principio de la termodinámica que la energía de entrada es igual a la energía de salida dentro del sistema por ende tenemos que:

- $E_{ent} = E_{sal}$

Por lo tanto, según el balance de energía que existe dentro del prototipo secador de café, se establecen la siguiente interacción dentro del sistema:

Nota. La figura muestra las energías que interactúan en el sistema secador de café.

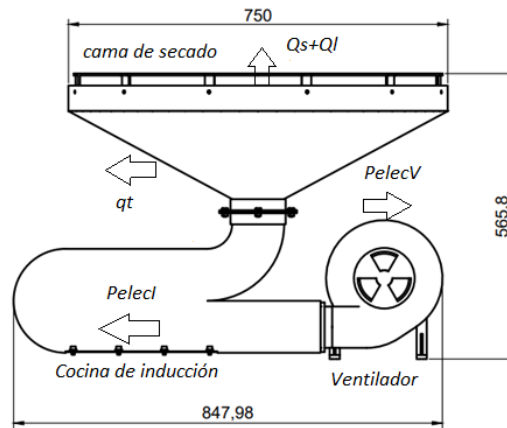


Figura 10. Balance de Energía

- $PelecI = qt + (Qs + Ql) + PelecV$

Siendo los datos iniciales los siguientes:

- $PelecV = 372.85 \text{ W}$
- $Ti = 130 \text{ }^\circ\text{C}$ pared – delgada
- $Te\alpha = 16 \text{ }^\circ\text{C}$
- $Ka = 47 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$
- $hi = 18.682 \frac{\text{kg}}{\text{s}^3\cdot\text{K}}$
- $D = 0.75 \text{ m}$
- $Tf2 = \frac{Ti+Te\alpha}{2} = \frac{(40+273)+(16+273)}{2} = 346.15 \text{ K}$
- $\beta_1 = \frac{1}{Tf2} = 0.003 \frac{1}{\text{K}}$

- $K2 = 0.04 \frac{W}{m \cdot K}$
- $Di = 0.73 \text{ m}$

Nota: Se toma de tabla de datos para propiedades del aire Anexo 2.

- $\rho1 = 1.00798 \frac{kg}{m^3}$
- $\nu1 = 2.0664 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$
- $Pr1 = 0.71609$
- $Cp1 = 1007.3 \frac{J}{kg \cdot K}$
- $k1 = 0.029314 \frac{W}{m \cdot K}$
- $Ve = 5.5 \frac{m}{s}$
- $\mu1 = 2.0828 \cdot 10^{-5} \text{ Ps} \cdot \text{s}$
- $\alpha1 = 2.8857 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$
- $n1 = 0.3$

Como la convección en el sistema puede darse de forma forzada y natural se procede a calcular de esta manera el balance de energía del prototipo secador de café aplicando las siguientes fórmulas para este tipo de convecciones.

Cálculo de Grashof:

$$Gr1 = \frac{g * \beta1 * (Ti - Te\alpha) * L^3}{(\nu1)^2}$$

$$Gr1 = \frac{9.81 \cdot 0.003 \cdot (130 - 16) \cdot 1.446^3}{(2.0664 \cdot 10^{-5})^2}$$

$$Gr1 = 2.287 \cdot 10^{10}$$

Cálculo del número de Reynolds:

$$Re1 = \frac{Ve \cdot L}{\nu1}$$

$$Re1 = \frac{5.5 \cdot 1.446}{2.0664 \cdot 10^{-5}}$$

$$Re1 = 3.85 \cdot 10^5$$

Aplicamos la siguiente condicional para comprobar si existe una convección libre y

forzada combinadas, que se produce cuando el valor de la siguiente expresión es cercano a 1.

$$\frac{Gr1}{Re1^2} = \frac{2.287 \cdot 10^{10}}{(3.85 \cdot 10^5)^2} = 0.154$$

Cercano al 1 por lo tanto si se cumple por ende procedemos a calcular el número de Nuselt tanto de forma forzada como natural

Correlación de Ditus-Boelter para la convección forzada:

Área corregida

$$Ac = \frac{\pi \cdot L^2}{4}$$

$$Ac = \frac{\pi \cdot (1.446)^2}{4}$$

$$Ac = 1.643 \text{ m}^2$$

Flujo másico

$$M = \rho1 \cdot Ve \cdot Ac$$

$$M = 1.004 \cdot 5.5 \cdot 1.643$$

$$M = 9.109 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Nusselt convección forzada

$$Nuf1 = 0.023 \cdot Re1^{\frac{4}{5}} \cdot Pr1^n$$

$$Nuf1 = 0.023 \cdot (3.85 \cdot 10^5)^{\frac{4}{5}} \cdot (0.716)^{0.4}$$

$$Nuf1 = 591.463$$

$$\frac{D1}{L} = \frac{0.75}{1.446} = 0.519$$

Correlación de Churchill y Chu para la convección libre

Se utiliza la siguiente condicional para comprobar si se puede aplicar la correlación de Churchill y Chu, en este caso para un cilindro largo horizontal.

$$\frac{35}{Gr1^{\frac{1}{4}}} = \frac{35}{(2.287 \cdot 10^{10})^{\frac{1}{4}}} = 0.09 \quad 1 > 0.09$$

Por lo tanto, si se cumple.

Correlación de Churchill y Chu:

Número de Rayleigh

$$\begin{aligned}Ra1 &= Gr1 \cdot Pr1 \\Ra1 &= (2.287 \cdot 10^{10}) \cdot 0.716 \\Ra1 &= 1.638 \cdot 10^{10}\end{aligned}$$

Nusselt convección natural

$$\begin{aligned}Nun1 &= \left(0.825 + \frac{0.387 \cdot Ra1^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr1} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 \\Nun1 &= \left(0.825 + \frac{0.387 \cdot (1.638 \cdot 10^{10})^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{0.716} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 \\Nun1 &= 295.294\end{aligned}$$

Nusselt del sistema

$$\begin{aligned}Nuc1 &= \sqrt[3]{(Nuf1^3 + Nun1^3)} \\Nuc1 &= \sqrt[3]{((591.643)^3 + (295.294)^3)} \\Nuc1 &= 615.212\end{aligned}$$

Entalpía total del sistema

$$\begin{aligned}he &= \frac{Nuc1 \cdot k1}{L} \\he &= \frac{615.212 \cdot 0.029}{1.446} \\he &= 12.469 \frac{W}{m^2 \cdot K}\end{aligned}$$

Como las paredes del prototipo están constituidas por placa de acero inoxidable y forrada con lana de vidrio se procede a calcular las resistencias térmicas que estas provocan obteniendo los siguientes resultados:

$$R1 = \frac{1}{\pi \cdot D1 \cdot L \cdot hi}$$

$$R1 = \frac{1}{\pi \cdot 0.75 \cdot 1.446 \cdot 18.682}$$

$$R1 = 0.016 \frac{\text{s}^3 \cdot \text{K}}{\text{kg} \cdot \text{m}^2}$$

$$R2 = \frac{1}{\pi \cdot D1 \cdot L \cdot h_e}$$

$$R2 = \frac{1}{\pi \cdot 0.75 \cdot 1.446 \cdot 12.469}$$

$$R2 = 0.024 \frac{\text{s}^3 \cdot \text{K}}{\text{kg} \cdot \text{m}^2}$$

$$R3 = \frac{\ln\left(\frac{D}{Di}\right)}{2 \cdot \pi \cdot K2 \cdot L}$$

$$R3 = \frac{\ln\left(\frac{0.75}{0.73}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 0.04 \cdot 1.446}$$

$$R3 = 0.074 \frac{\text{s}^3 \cdot \text{K}}{\text{kg} \cdot \text{m}^2}$$

Siendo la transferencia total de calor del prototipo secador de café la siguiente:

$$qt = \frac{Ti - Te\alpha}{R1 + R2 + R3}$$

$$qt = \frac{130 - 16}{0.016 + 0.024 + 0.074}$$

$$qt = 1.004 \cdot 10^3 \text{ W}$$

Necesitamos saber el calor de ventilación este lo calculamos con la siguiente fórmula y va a ser igual:

$$\varphi = Ve \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$\varphi = 5.5 \cdot \left(\frac{\pi \cdot (0.75)^2}{4} \right)$$

$$\varphi = 0.088 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_{vent} = 370 \text{ W}$$

Para el cálculo del calor perdido en la cama de café se hace uso del artículo científico denominado “Mathematical model and experimental analysis of a solar dryer with Parvati Geometry for coffee beans” de Tapia D, Solórzono B, Cuenca J, Ortega C, Paccha E, se establece las condiciones iniciales del sistema secador de café.

- $M = 0.11$
- $T_c = 25$
- $T_{fc} = 16 \text{ }^\circ\text{C}$
- $t = 17 \text{ h} = 61200 \text{ s}$
- $mc = 25 \text{ kg}$
- $T_{ic} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$
- $C_{pc1} = 0.58 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
- $Lv1 = 2.745 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$

Para el calor específico utilizamos la siguiente fórmula en función del contenido de humedad.

$$C_{pc} = 1.3556 + 5.7859 \cdot M$$

$$C_{pc} = 1.3556 + 5.7859 \cdot 0.11$$

$$C_{pc} = 1.992$$

Para el calor latente de vaporización utilizamos la siguiente fórmula dada en función de la temperatura que es constante a lo largo del proceso de secado y el contenido de humedad.

$$Lv = [2502.4 - (2.42958 \cdot T_c)] \cdot (1 + 1.44408e^{-21.5011M})$$

$$Lv = [2502.4 - (2.42958 \cdot 25)] \cdot (1 + 1.44408e^{-21.5011 \cdot 0.11})$$

$$Lv = 2.773 \cdot 10^3$$

Finalmente calculamos el calor que se transmite en la cama de secado de café con las siguientes ecuaciones.

Calor sensible en la cama de café

$$Q_s = \frac{mc \cdot C_{pc1} \cdot (T_{ic} - T_{fc})}{t}$$

$$Q_s = \frac{25 \cdot 0.58 \cdot (25 - 16)}{61200}$$

$$Q_s = 0.0021 \text{ W}$$

Calor latente en la cama de café

$$Q_l = \frac{mc \cdot Lv1}{t}$$

$$Q_l = \frac{25 \cdot 2.745 \cdot 10^3}{61200}$$

$$Q_l = 1.12 \text{ W}$$

Calor total en la cama de café

$$Q_{cafe} = Q_s + Q_l$$

$$Q_{cafe} = 0.0021 + 1.12$$

$$Q_{cafe} = 1.12 \text{ W}$$

Energía necesaria del inductor

$$Q_{inductor} = Q_{cafe} + P_{elec}V + qt$$

$$Q_{inductor} = 1.12 + 370 + 1.004 \cdot 10^3$$

$$Q_{inductor} = 1.375 \text{ kW}$$

Siendo la cocina a seleccionar de 1500W de potencia

Cálculo de Pérdidas de Presión

Es importante entender que este proceso es crucial para garantizar una operación eficiente y segura del equipo. Las pérdidas de presión son una medida de la resistencia que experimenta el flujo de aire a través del secador, y pueden ser causadas por diversos factores como la geometría del equipo, la velocidad del aire y la presencia de obstáculos en el camino del flujo. Por lo tanto, calcular las pérdidas de presión adecuadamente puede ayudar a optimizar el rendimiento del secador y prevenir fallos en el equipo debido a una operación inadecuada.

Datos:

- $Phumedo = 24.125 \text{ kg}$
- $Pseco = 12.5 \text{ kg}$
- $Humedad = 0.12$
- $Tca = 35$
- $x1 = 25 \text{ cm}$
- $x2 = 10 \text{ cm}$
- $Ti = 35 \text{ }^\circ\text{C}$
- $Tf = 16 \text{ }^\circ\text{C}$
- $pc = 1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- $C_{paire} = 1.005 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
- $Taire = 16 \text{ }^\circ\text{C}$
- $Tfinal = 35 \text{ }^\circ\text{C}$

Según la guía de cálculo de Cenicafe se recomienda para secadores de flujo externo velocidades no mayores a 7 m/s por lo cual se toma dicha velocidad para realizar los cálculos

y a la vez se corrobora con un método de cálculo en donde se obtiene estos valores aproximados.

$$V = 5.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Área total del ducto

$$At = x1 \cdot x2$$

$$At = 25 \cdot 10$$

$$At = 0.025 \text{ m}^3$$

Por lo cual podemos calcular el caudal que atravesara el ducto, con los siguientes valores de velocidad y área transversal.

$$Q = V \cdot At$$

$$Q = 5.5 \cdot 0.025$$

$$Q = 0.152 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Cálculos de las Pérdidas

Para el cálculo de pérdidas de presión dentro de los ductos se desarrollará por accesorios y por fricción en el sistema, ya que cuenta con las aletas como rejillas, con dos codos, una unión y la cama de secado en la parte superior, para ello se usó sus respectivas constantes.

- $\rho = 1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- $kale = 0.80$
- $kec = 0.5$
- $kcd = 0.90$
- $kab = 0.20$
- $L = 75 \text{ cm}$

Pérdidas de Presión por Accesorios

Pérdida de presión en la unión inicial

$$\Delta Pc1 = kcd \cdot \left(\frac{\rho}{2}\right) \cdot Vc^2$$

$$\Delta Pc1 = 20.378 \text{ Pa}$$

Pérdida de presión en el banco de aletas

$$\Delta Pc2 = kale \cdot \left(\frac{\rho}{2}\right) \cdot Vc^2$$

$$\Delta Pc2 = 18.114 \text{ Pa}$$

Pérdida de presión en el codo 1

$$\Delta P_{c3} = k_{ec} \cdot \left(\frac{\rho}{2}\right) \cdot Vc^2$$

$$\Delta P_{c3} = 11.321 \text{ Pa}$$

Pérdida de presión en el codo 2

$$\Delta P_{c4} = k_{ab} \cdot \left(\frac{\rho}{2}\right) \cdot Vc^2$$

$$\Delta P_{c4} = 4.528 \text{ Pa}$$

Pérdida de presión en la cama de secado

$$\Delta P_{c5} = k_{ale} \cdot \left(\frac{\rho}{2}\right) \cdot Vc^2$$

$$\Delta P_{c5} = 18.114 \text{ Pa}$$

Pérdida de presión total de los accesorios

$$\Delta P_{Total} = \Delta P_{c1} + \Delta P_{c2} + \Delta P_{c3} + \Delta P_{c4} + \Delta P_{c5}$$

$$\Delta P_{Total} = 20.378 + 18.114 + 11.321 + 4.528 + 18.114$$

$$\Delta P_{Total} = 72.454 \text{ Pa}$$

Pérdidas por Presión por Fricción de Tubería

Para calcular las pérdidas de presión por fricción en la tubería del ducto se necesitan datos como el diámetro hidráulico y la longitud total del ducto, además de datos ya calculados en apartados anteriores

Cálculo del diámetro hidráulico

- Perímetro mojado

$$P = 2 \cdot (x1 + x2)$$

$$P = 2 \cdot (0.25 + 0.10)$$

$$P = 0.7 \text{ m}$$

Diámetro hidráulico

$$Dh = 4 \cdot \frac{At}{P}$$

$$Dh = 4 \cdot \frac{0.025}{0.7}$$

$$Dh = 0.143 \text{ m}$$

Datos:

- $L1 = 1446.38 \text{ mm}$

- $V_c = 6.08 \frac{m}{s}$
- $D_h = 0.143 \text{ m}$
- $Re = 2.012 \cdot 10^5$
- $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$
- $\varepsilon = 0.002 \text{ mm}$
- $\rho_a = 1.225 \frac{kg}{m^3}$
- $f = 0.016$

Perdidas de presión por longitud de tubería.

$$\Delta Pl = \frac{L1 \cdot f \cdot \rho_a \cdot V_c^2}{2 \cdot Dh}$$

$$\Delta Pl = \frac{1446.38 \cdot 0.016 \cdot 1.225 \cdot (6.08)^2}{2 \cdot Dh}$$

$$\Delta Pl = 3.001 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{final} = \Delta Pl + \Delta P_{totales} = \mathbf{75.456 \text{ Pa}}$$

Como las pérdidas de presión no son muy elevadas se considera el caudal y velocidades establecidas en el soplador como correctas.

Construcción de la Secadora de Café

Se compro una plancha de acero inoxidable de 2 mm de espesor, y se recortó de forma rectangular según las medidas del Anexo 5, luego se procedió a realizar un proceso de rolado sobre la plancha para obtener una forma circular con un diámetro de 75 cm.

Nota. La figura representa la estructura de la cama principal.



Figura 11. Rolado de la Cama Principal

Así mismo se ubicó 3 pletinas de acero negro que fueron roladas, 2 en el exterior y 1 en el interior para dar soporte a la forma cilíndrica según el Anexo 5, estas fueron perforadas en su contorno y sujetadas con pernos avellanados.

Nota. La figura muestra los anillos de soporte.



Figura 12. *Rolado y Ubicación de los Anillos de Soporte Exteriores e Interior*

Para la construcción de la transición de rectángulo-círculo se procedió a realizar el diseño del prototipo en el software Inventor según las medidas del Anexo 6, se realizó un despliegue del dibujo con una herramienta del software y se realizó los cortes para la construcción del cono, se soldó con la ayuda de argón para un mejor acabado superficial y se procedió a montar el cono sobre el cilindro principal.

Nota. La figura representa la construcción del cono de transición.



Figura 13. *Soldado y Montaje del Cono de Transición*

Se construyo y monto la estructura de soporte del prototipo en acero negro con tubo cuadrado según las dimensiones que se indican en el Anexo 8.

Nota. La figura muestra la montura de la estructura del soporte.



Figura 14. *Construcción y Montaje de la Estructura de Soporte del Prototipo Secador*

Para el sistema de ductos se tomó las medidas presentadas en el Anexo 14, se realizaron los respectivos cortes y montaje para posteriormente ser ubicados en la transición cónica, sujeta con pernos avellanados.

Nota. La figura representa el sistema de ductos de aire para su montaje.



Figura 15. Montaje y Construcción del Sistema de Ductos de Aire

Una vez montados todos los elementos se procede a ubicar la plancha perforada de acero inoxidable en la que irá el café, para ello se realizó una estructura de soporte en forma de cruz con las medidas del Anexo 9 y Anexo 17, se recortó la plancha perforada de forma circular y se la sujeto sobre la cama de secado.

Nota. La figura muestra el montaje de la plancha perforada.



Figura 16. Montaje de la Planta Agujereada

Se procedió a forrar con lana de vidrio la parte cónica y el ducto de aire para minimizar las pérdidas de calor, también se añadió una compuerta para retirar el café como lo indica el Anexo 11.

Nota. La figura muestra el montaje de la compuerta y revestimiento del sistema de calentado.



Figura 17. *Montaje de Compuerta y Forrado del Sistema Calentador*

Se realizó la construcción del banco de aletas con las medidas del Anexo 20, se utilizó soldadura epóxica para pegar las aletas sobre la pletina inductora y se procedió a realizar pruebas para medir su funcionamiento.

Nota. La figura representa el banco de aletas.



Figura 18. *Construcción y Pruebas en el Banco de Aletas*

Fue montada la cocina de inducción con su banco de aletas mediante un sistema de resortes, como lo indica el Anexo 21.

Nota. La figura muestra la cocina de inducción.



Figura 19. *Montaje de la Cocina de Inducción*

Se montaron todos los elementos del prototipo secador de café incluido el ventilador como vemos el Anexo 5.

Nota. La figura muestra el prototipo de secado para café.



Figura 20. Prototipo Secador de Café Finalizado

Se iniciaron las pruebas de secado, para ello se logró recolectar 8 kg de café despulpado, y mediante asesoría técnica de productores de la localidad, en este caso finca el “aguacate” ubicado en el sector Sauces Norte de la ciudad de Loja, se obtuvo información importante para lograr un beneficio húmedo en el café, fue combinado mediante fermentación anaeróbica con pomarrosa y míspero para lograr un sabor distinto en el café.

Nota. La figura muestra el proceso de despulpado del café.



Figura 21. Despulpado del Café

Se fermento el café por alrededor de 3 días por recomendación técnica, luego se inició el proceso de oreado del café en el prototipo secador de café, y se procedió a tomar medidas de temperatura, tiempo y humedad para tener un control exacto del proceso, esto se lo realizo en periodos de 4 horas, dejando al café reposar por 2 horas para que la humedad en el interior del grano salga.

Nota. La figura muestra medidas de temperatura, tiempo y humedad.



Figura 22. *Pruebas y Mediciones del Proceso de Secado*

Pruebas de secado

Con el propósito de llevar a cabo las pruebas de secado, se optó por realizar ciclos de duración de 4 horas cada uno. Esta elección se basó en el hecho de que, al concluir cada prueba, se obtuvo una lectura de humedad aparente en lugar de la humedad real del grano. Por consiguiente, se dejó reposar el grano durante un tiempo significativo de 2 horas antes de dar paso a las siguientes pruebas. El objetivo buscado era alcanzar una humedad final del 11%. En cuanto a la operación del prototipo de secador de café, se trabajó dentro de un rango de temperaturas que oscilaban entre los 30 y 35 grados Celsius. Además, se llevó a cabo el movimiento del café cada 20 minutos

1. Ciclo 1 de secado tiempo 4 horas muestras realizadas cada 10 minutos

Nota. La figura representa el ciclo 1 de secado en un máximo de 4 horas.

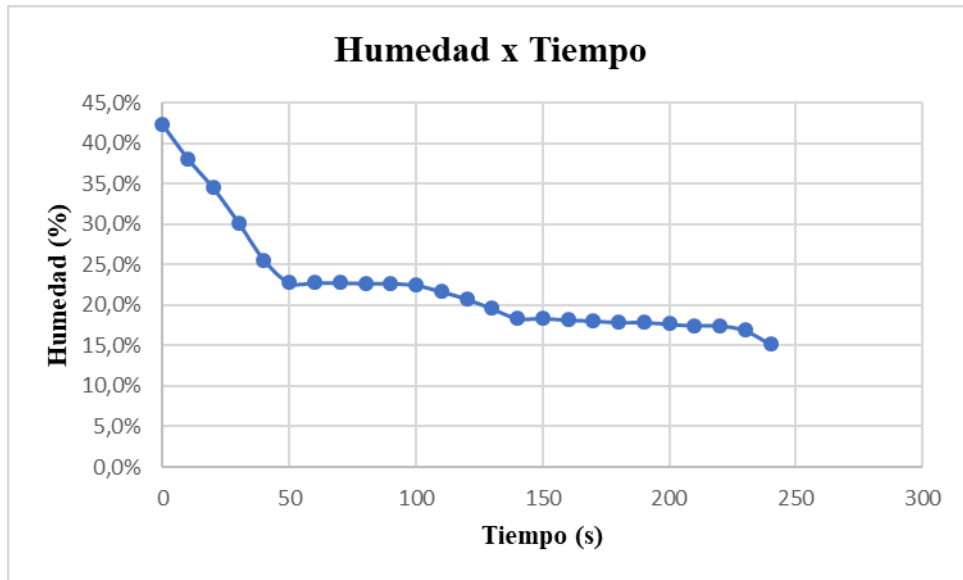


Figura 23. Curva de Secado - Ciclo 1 de Secado

2. Ciclo 2 de secado tiempo 4 horas muestras realizadas cada 10 minutos

Nota. La figura representa el ciclo 2 de secado en un máximo de 4 horas.

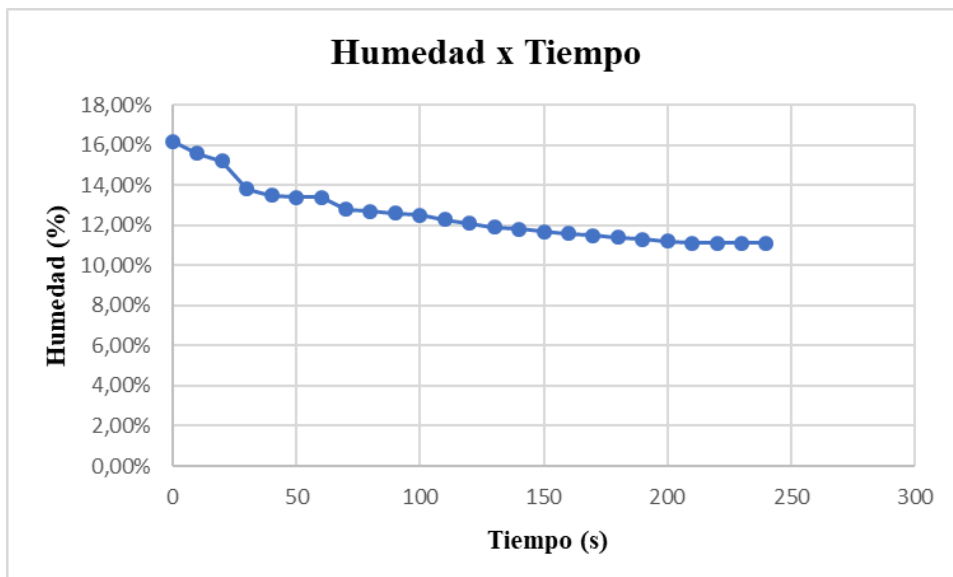


Figura 24. Curva de Secado- Ciclo 2 de Secado

3. Ciclo 3 de secado tiempo 4 horas muestras realizadas cada 10 minutos

Nota. La figura representa el ciclo 3 de secado en un máximo de 4 horas.

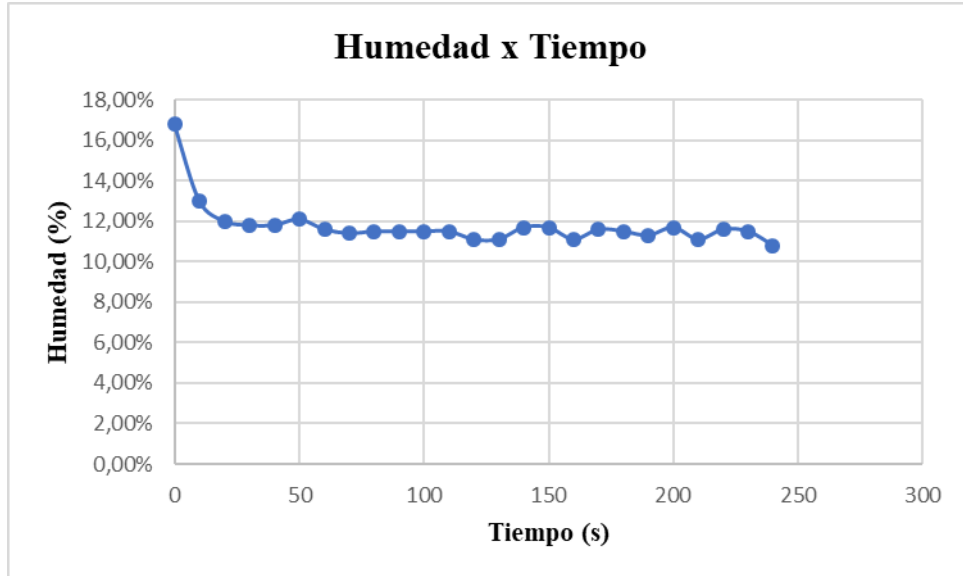


Figura 25. Curva de Secado- Ciclo 3 de Secado

4. Ciclo 4 de secado tiempo 4 horas muestras realizadas cada 10 minutos

Nota. La figura representa el ciclo 4 de secado en un máximo de 4 horas.

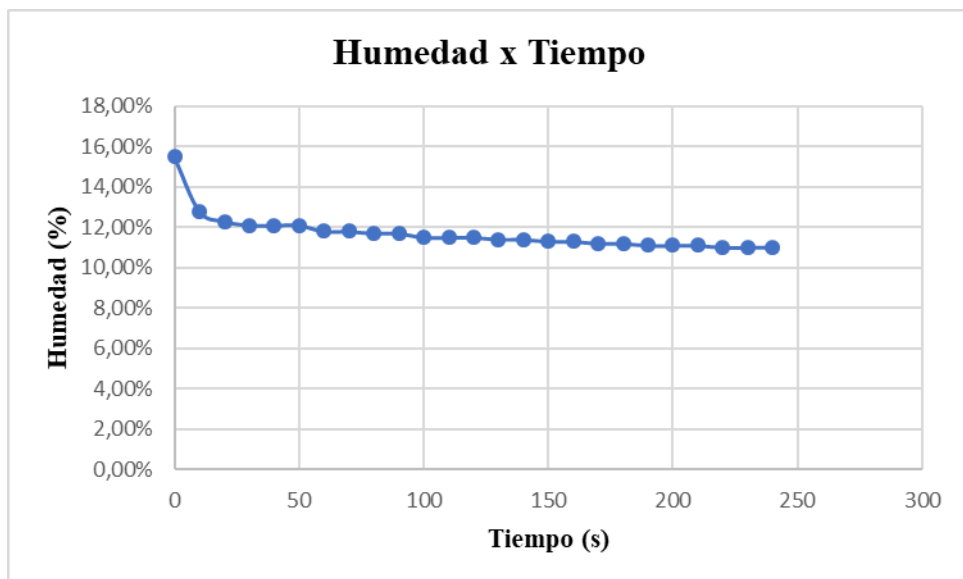


Figura 26. Curva de Secado- Ciclo 4 de Secado

Consumo de Energía del prototipo secador de café

El consumo eléctrico del prototipo de secador de café se refiere a la cantidad de energía eléctrica que utiliza el dispositivo durante su funcionamiento. Se calcula para comprender cuánta electricidad necesita el secador para operar y, por lo tanto, cuánto costará su funcionamiento en términos de consumo de energía.

Este cálculo es importante por varias razones:

- **Eficiencia energética:** Permite evaluar la eficiencia del secador en la conversión de energía eléctrica en calor para secar el café.
- **Costos de operación:** Ayuda a estimar cuánto costará operar el secador en términos de consumo eléctrico y, por lo tanto, a planificar los gastos relacionados con su uso.
- **Dimensionamiento de la infraestructura eléctrica:** Conocer el consumo eléctrico del secador es esencial para dimensionar adecuadamente la infraestructura eléctrica necesaria para soportar su funcionamiento, como la capacidad del generador, paneles solares o la capacidad de la red eléctrica.

En resumen, calcular el consumo eléctrico de un prototipo de secador de café es esencial para comprender su eficiencia, costos de operación y su impacto ambiental, lo que a su vez puede guiar decisiones sobre su diseño, uso y desarrollo futuro, se utiliza la siguiente fórmula para su cálculo:

$$\text{Consumo de Energía} = \text{Potencia de secado} \times \text{Número de horas} \times \text{Costo del kWh}$$

$$\text{Consumo de Energía} = 1.87 \text{ kW} \times 17\text{h} \times 0.09 \text{ ctvs}$$

$$\text{Consumo de Energía} = 1.87 \text{ kW} \times 17\text{h} \times 0.09 \text{ ctvs}$$

$$\text{Consumo de Energía} = 2.86 \$$$

Considerando las potencias máximas de la cocina de inducción y el soplador, se obtiene que por cada operación de secado de café con beneficio debemos gastar 2.86 \$ para obtener 12.5 kg de café lo que equivale a 28 lbs de café seco.

Eficiencia de secado del prototipo secador de café

La eficiencia de secado del prototipo de un secador de café es una medida que evalúa la capacidad del secador para eliminar la humedad del café de manera efectiva y con un consumo de energía mínimo. Esta eficiencia se calcula comparando la energía utilizada en el proceso de evaporación del agua contenida en el café con la energía total consumida por el secador durante el mismo período de tiempo

Energía utilizada en evaporación

En el contexto del secado, la energía utilizada en la evaporación se refiere específicamente a la energía necesaria para evaporar el agua contenida en el material que está siendo secado. Esta energía se calcula multiplicando la masa de agua evaporada por la entalpía de vaporización del agua. Esencialmente, esta energía se utiliza para romper los enlaces intermoleculares en el líquido y permitir que las moléculas escapen hacia la fase de vapor. Cuanta más agua se evapore durante el proceso de secado, mayor será la energía utilizada en la evaporación.

$$\text{Energía utilizada en la evaporación} = m \cdot h_v$$

$$\text{Energía utilizada en la evaporación} = 15 \text{ kg} \cdot 2449.77 \times 10^3 \text{ J/kg}$$

$$\text{Energía utilizada en la evaporación} = 36746.55 \text{ kJ}$$

Eficiencia de secado

$$\text{Eficiencia de secado} = \left(\frac{\text{Energía utilizada en la evaporación}}{\text{Energía total consumida}} \right) \times 100$$

$$\text{Eficiencia de secado} = \left(\frac{10.3 \text{ kWh}}{17 \text{ kWh}} \right) \times 100$$

$$\text{Eficiencia de secado} = 60.6 \%$$

6.1. Beneficios para los productores de café

Ventajas del secado por aire caliente forzado con módulo de inducción

Mejora en la calidad del grano

El secado por aire caliente forzado con módulo de inducción permite una mejora sustancial en la calidad del café, evidenciada a través de análisis sensoriales y evaluaciones de defectos. Estos análisis rigurosos demuestran que este método produce un café de calidad superior, con una reducción significativa en la presencia de defectos y una mayor preservación de las características sensoriales deseadas, como aroma, sabor y cuerpo ver **Anexo 28**.

Reducción de tiempos de secado

En comparación con métodos tradicionales como el secado solar, el uso de aire caliente forzado acelera considerablemente el proceso de secado, reduciendo los tiempos necesarios para completar esta etapa crucial en la producción del café. Esta reducción de tiempos implica una mayor eficiencia en el proceso productivo, permitiendo un flujo más ágil y una optimización de los recursos.

Mayor control y uniformidad en el proceso de secado

Este método innovador ofrece un mayor control sobre las condiciones de secado, garantizando una uniformidad en todo el proceso que resulta fundamental para la calidad final del café. Al tener la capacidad de regular con precisión factores como la temperatura, el flujo de aire y la humedad, se asegura un secado homogéneo y consistente.

Reducción de pérdidas y desperdicios

La eficiencia y precisión del secado por aire caliente forzado minimiza las pérdidas y desperdicios durante esta etapa, lo que se traduce en una mayor eficiencia productiva. Al tener un control óptimo sobre las condiciones de secado, se reduce el riesgo de sobre secado o daños en el grano, evitando así la pérdida de producto y maximizando el rendimiento.

Otros beneficios

Además de los mencionados, este método ofrece ventajas adicionales como facilidad de operación, mantenimiento sencillo y eficaz, lo que contribuye a una gestión más eficiente y efectiva del proceso. La automatización y el control preciso de los parámetros de secado simplifican la operación y reducen la necesidad de intervención manual, disminuyendo así los costos asociados a la mano de obra.

Comparación con métodos tradicionales

Descripción de métodos tradicionales

Los métodos tradicionales de secado, como el secado al sol en patios o el secado mecánico convencional, suelen ser más dependientes de factores climáticos externos y menos controlados que el secado brindado por el prototipo secador de aire caliente forzado. Por ejemplo, el secado solar está sujeto a las condiciones climáticas cambiantes que pueden afectar significativamente la calidad final del producto, así como prolongar los tiempos de secado; y el secado mecánico en la mayoría de los casos se da de manera abrupta o existe contaminación directa de los gases de combustión que se da en la mayoría de los secadores mecánicos lo que afecta significativamente la calidad del producto final.

Análisis comparativo

Para evaluar de manera objetiva las ventajas del secado por aire caliente forzado con módulo de inducción sobre los métodos tradicionales, se realizó un estudio comparativo detallado en una finca cafetalera de Calera, Piñas. Se analizaron los siguientes aspectos clave:

Tiempos de secado

El secado por aire caliente forzado demostró una reducción significativa en los tiempos de secado en comparación con el método tradicional de secado solar en patios. En condiciones óptimas, el secado por aire caliente forzado completó el proceso en aproximadamente en 14 horas, mientras que el secado solar requirió entre 7 y 15 días, dependiendo exclusivamente de las condiciones climáticas.

Costos asociados

El método de aire caliente forzado representa un ahorro en costos operativos relacionados con combustible y mano de obra en comparación con el secado solar. Esto se debe a las siguientes razones:

- **Eficiencia energética:** El secado por aire caliente forzado utiliza sistemas de calentamiento y distribución de aire eficientes. En comparación, el secado solar depende únicamente del factor solar, que puede ser variable e inconsistente, lo que requiere períodos más prolongados de secado y, por lo tanto, un mayor trabajo para el manejo y movimiento de los granos.
- **Reducción de mano de obra:** Debido a la automatización del proceso, el secado por aire caliente forzado requiere menos mano de obra en comparación con el secado solar. Este último implica tareas manuales intensivas, como el tendido, volteo y recolección de los granos en los patios de secado, lo que aumenta los costos de mano de obra.
- **Optimización del espacio:** Los secadores por aire caliente forzado ocupan un espacio más compacto y eficiente en comparación con los patios de secado solar, que requieren grandes áreas abiertas. Esto reduce los costos asociados con el mantenimiento y el cuidado de estas áreas extensas.

Calidad del producto final

Se realizaron análisis sensoriales y evaluaciones de defectos por parte de un catador certificado de la ciudad de Loja. Los resultados revelaron que el café secado por aire caliente forzado obtuvo puntajes superiores en atributos como aroma, acidez, cuerpo y sabor, con una nota de taza de 82.25 considerada en el rango para cafés de calidad ver

Eficiencia energética

El secador por aire caliente forzado con módulo de inducción demostró una eficiencia energética significativamente mayor que los sistemas de secado mecánico convencional. Se

estimó un costo de energía de \$ 2.86 que es un costo bajo para obtener 12.5 kg de café con una eficiencia de secado de 60.6% que puede ser elevada significativamente con una repotenciación del banco de aletas.

Otros aspectos relevantes

- Control de proceso: El secado por aire caliente forzado ofrece un control preciso sobre la temperatura, flujo de aire y humedad, lo que garantiza una uniformidad en el secado que no se puede lograr con los métodos tradicionales.
- Facilidad de operación: El sistema controlado por módulos de inducción simplifica la operación y reduce la necesidad de intervención manual, lo que facilita la gestión del proceso y disminuye los costos de mano de obra.

En resumen, el análisis comparativo demuestra que, a pesar de una inversión inicial más alta, el secado por aire caliente forzado con módulo de inducción ofrece beneficios tangibles en términos de reducción de tiempos, ahorro de costos operativos, mejora en la calidad del producto, eficiencia energética y control del proceso. Estos beneficios respaldan la adopción de esta tecnología innovadora en el sector cafetalero, ya que compensa la inversión inicial y mejora significativamente la productividad y rentabilidad a largo plazo.

Cuantificación de ahorros y beneficios económicos

La cuantificación de ahorros y beneficios económicos es un componente esencial en la evaluación de la viabilidad y rentabilidad de la implementación de un nuevo método, como el secado por aire caliente forzado. En este sentido, es crucial analizar detalladamente los costos operativos asociados con el método actual en comparación con el nuevo método propuesto, así como también evaluar el impacto en la eficiencia general del proceso y la reducción de pérdidas de producto. Este análisis permitirá a los productores tomar decisiones informadas y respaldar la inversión inicial con datos sólidos sobre el retorno económico esperado.

De acuerdo con la investigación de campo realizada. Se ha identificado lo siguiente:

Análisis de Costos

Costo de Adquisiciones:

- El costo promedio del café sin secar es de \$6.75 por 25 kg.
- La mano de obra para el proceso de beneficio tiene un costo de \$10 por unidad.
- La energía utilizada tiene un costo de \$0.92 por unidad, con un total de \$2.86 para 1 periodo de secado.

Total, de Costos:

- Sumando los costos anteriores, el costo total operativo es de \$19.61.

Análisis de Producción y Ventas

Precio de Venta y Cantidad:

- El café procesado sin beneficiar se vende a \$4 por unidad, con una producción posible de 28 unidades y un total anual de 681 unidades.
- El café procesado beneficiado se vende a \$10 por unidad, con una producción posible de 28 unidades y un total anual de 10220 unidades.

Los datos obtenidos del análisis de costos y producción son fundamentales para este propósito. Se ha identificado que el costo total operativo del método actual es de \$19.61 por lote de 28 unidades, mientras que el café procesado sin beneficiar se vende a \$4 por unidad y el café procesado beneficiado se vende a \$10 por unidad. Además, se ha observado que el café procesado beneficiado tiene un precio de venta más alto que el café sin beneficiar, lo que sugiere un mayor margen de beneficio potencial.

A pesar de que el proceso beneficiado implica costos elevados por la inversión inicial, el precio de venta más alto del producto final y las ventajas que su uso ofrece compensa estos costos adicionales. Esta observación refuerza la idea de que enfocarse en el proceso beneficiado puede conducir a mayores márgenes de beneficio.

Por lo tanto, se justifica ampliamente la necesidad de cuantificar los ahorros económicos potenciales al adoptar el nuevo método, ya que esta información proporciona una base sólida para la toma de decisiones empresariales. Además, esta cuantificación permite a los productores comprender mejor los beneficios económicos tangibles que pueden esperar al implementar el secado por aire caliente forzado, lo que contribuye a una planificación estratégica más efectiva y una maximización de los recursos disponibles.

Impacto en la cadena de valor y comercialización

Mejora en la trazabilidad y certificaciones de calidad

El uso del secador por aire caliente forzado con módulo de inducción permite una mejor trazabilidad del producto desde su origen hasta su comercialización final. Al tener un mayor control y uniformidad en el proceso de secado, es posible rastrear con mayor facilidad cada lote de café y mantener registros detallados de las condiciones en las que fue procesado. Esta trazabilidad facilita la obtención de certificaciones de calidad, cada vez más valoradas por los

mercados especializados de café de alta gama.

Acceso a mercados especializados y de mayor valor

La calidad mejorada del café obtenida mediante este método, respaldada por certificaciones y análisis sensoriales, abre puertas a mercados especializados que valoran productos diferenciados y con altos estándares de calidad. Estos mercados, conformados por consumidores exigentes y dispuestos a pagar un precio premium por un producto excepcional, representan una oportunidad para que los productores aumenten su rentabilidad y accedan a segmentos de mayor valor.

Aumento de la competitividad y rentabilidad para los productores

Al acceder a estos mercados especializados y obtener precios más elevados por su café de alta calidad, los productores pueden aumentar significativamente su competitividad en el mercado y lograr una mayor rentabilidad para sus productos. La diferenciación de su oferta, respaldada por la calidad y la trazabilidad garantizadas, les permitirá destacarse en un mercado cada vez más exigente y obtener mayores beneficios económicos.

Consideraciones ambientales y sociales

Reducción de emisiones y huella de carbono

El secado por aire caliente forzado con módulo de inducción, al ser un método de bajo consumo energético, contribuye a reducir las emisiones contaminantes y la huella ambiental asociada al proceso de secado del café. Al optimizar el uso de energía y minimizar el desperdicio, se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes, lo que representa un beneficio ambiental significativo.

Menor impacto en el entorno y las comunidades locales

La implementación de este método innovador implica un menor impacto en las comunidades locales al reducir ruidos molestos o emisiones dañinas asociadas a métodos tradicionales menos eficientes. Al ser un proceso más controlado y automatizado, se minimiza la contaminación acústica y atmosférica, mejorando así la calidad de vida de las poblaciones cercanas a las zonas de producción.

Generación de empleos y desarrollo económico local

La adopción de tecnologías innovadoras como el secador por aire caliente forzado con módulo de inducción puede fomentar la generación de empleo especializado e impulsar el desarrollo económico local al mejorar la productividad y competitividad del sector cafetalero. La necesidad de personal capacitado para operar y mantener estos sistemas crea oportunidades laborales calificadas, mientras que el aumento de la rentabilidad de los productores contribuye al crecimiento económico de las comunidades productoras de café.

7. Discusión

En este proyecto, se logró caracterizar el proceso de secado del café de alta calidad, identificando factores críticos como la temperatura, humedad y tiempo de secado, así como las condiciones ideales para preservar los atributos de calidad y sabor. Los resultados demostraron que la utilización de aire caliente forzado producido por un módulo de inducción electromagnética acelera significativamente el proceso de secado en comparación con los métodos tradicionales, reduciendo la dependencia de las cambiantes condiciones climáticas y optimizando el beneficio del café.

El diseño conceptual y detallado del prototipo de secador de café contempló aspectos técnicos y funcionales. Al implementar el aire caliente forzado por inducción, se optimizó la distribución uniforme del calor, asegurando un secado homogéneo y preservando los atributos distintivos de calidad. La construcción del prototipo se realizó según las especificaciones establecidas, utilizando materiales adecuados. Las pruebas confirmaron su funcionamiento preciso y capacidad para cumplir con los estándares de calidad del café durante el beneficio, destacando la reducción considerable del tiempo de secado en comparación con los enfoques convencionales.

A través de evaluaciones detalladas, se determinó que el prototipo de secador de café desarrollado es altamente eficiente, exhibiendo un rendimiento óptimo en términos de calidad final del café y conformidad con los rigurosos estándares de beneficio. No obstante, se encontró una limitación relacionada con la construcción del banco de aletas, donde las restricciones de disponibilidad de materiales locales obligaron a recurrir a alternativas menos eficaces en transferencia de calor. Además, el método de soldadura empleado introdujo una ligera contaminación al inicio de las pruebas. Para futuras investigaciones, se recomienda emplear materiales y métodos de soldadura adecuados para garantizar un sistema más eficiente.

Los resultados obtenidos en este estudio sobre el desarrollo de un secador de café mediante inducción electromagnética resaltan una solución innovadora para los desafíos persistentes en el proceso de secado, particularmente en regiones como la provincia de Loja. Al comparar estos resultados con otras investigaciones en el campo, se evidencia que la introducción de tecnologías basadas en inducción electromagnética representa un avance significativo en la mejora del proceso y calidad del secado de café, superando las limitaciones de los secadores solares debido a las fluctuaciones climáticas y la dependencia de factores externos.

A diferencia de investigaciones previas centradas en secadores mecánicos utilizando

electricidad, como la de D. Carranza y J. Mori (2019), enfocados en el secado en grandes cantidades pero sin garantizar la mejora de la calidad del café, la aplicación de aire caliente forzado por medio de inducción electromagnética no solo se destaca por su respeto al medio ambiente, sino que también busca cumplir con los rigurosos estándares de calidad, siendo esta una contribución valiosa al campo del café de calidad.

En síntesis, este trabajo propone una solución práctica a los desafíos del secado de café, posicionándose como un avance significativo en comparación con otras investigaciones. La combinación de sostenibilidad ambiental y mejora de la calidad del café establece un nuevo estándar en la optimización de procesos de secado, marcando un hito en el campo y abriendo nuevas perspectivas para investigaciones futuras.

8. Conclusiones

- Se logró con éxito el diseño y construcción de un prototipo innovador de secador de café, que emplea aire caliente forzado generado mediante un módulo de inducción electromagnética. Este enfoque aporta ventajas notables en la gestión del proceso de secado del café, permitiendo mantener una temperatura constante y brindando un control preciso sobre su funcionamiento.
- La caracterización exhaustiva del proceso de secado aplicado al café de alta calidad permitió obtener un entendimiento profundo de las variables críticas que influyen en la calidad final del producto. Factores determinantes como la temperatura, la humedad relativa y el tiempo de secado fueron identificados, controlados y regulados minuciosamente para garantizar la producción de café de excelente calidad, cumpliendo con las normativas alimentarias ecuatorianas vigentes.
- A través de un enfoque integral en el diseño conceptual y detallado, se ha desarrollado un prototipo de secador de café que satisface todos los requerimientos esenciales para el procesamiento de café de alta calidad. Aspectos cruciales como la capacidad de carga, la uniformidad en la distribución del calor, la facilidad de operación y mantenimiento fueron cuidadosamente considerados y optimizados.
- La construcción del prototipo de secador de café se realizó conforme a las especificaciones y diseños previamente establecidos, seleccionando materiales apropiados y aplicando estrictos estándares de seguridad para garantizar su funcionamiento seguro, confiable y duradero.
- Mediante pruebas exhaustivas y rigurosas, se evaluó minuciosamente el rendimiento del secador de café. Se realizaron mediciones precisas de temperatura, humedad y tiempo de secado, asegurando el cumplimiento de los estándares establecidos. Los resultados obtenidos demostraron un desempeño consistente y óptimo del prototipo, alineándose con las curvas de secado esperadas.
- El proceso de diseño, construcción y evaluación del prototipo de secador de café basado en el principio de aire caliente forzado mediante inducción electromagnética ha sido exitosamente concluido. Este trabajo incluyó la caracterización detallada del proceso de secado para café de alta calidad, la formulación de un diseño óptimo, la construcción del prototipo y su meticulosa evaluación operativa. Los resultados obtenidos son promisorios y representan un avance significativo en la optimización del proceso de beneficio del café, asegurando una calidad superior en el producto final.

9. Recomendaciones

- Para el uso del prototipo, se recomienda implementar un monitoreo continuo y una calibración adaptativa de los parámetros de secado, considerando las características específicas de las distintas variedades de café. Esto permitirá asegurar una consistencia óptima en la calidad del producto final, acorde con las propiedades inherentes del grano procesado, garantizando así una producción continua de café de excelencia.
- Dada la constante evolución tecnológica, se recomienda mantener una vigilancia activa y periódica sobre posibles mejoras o innovaciones en los materiales empleados, los componentes utilizados y las estrategias de diseño. Esta práctica garantizará que el prototipo se mantenga a la vanguardia, mejorando continuamente en términos de eficiencia, funcionalidad y desempeño.
- Se sugiere la implementación de un programa de mantenimiento preventivo regular y meticulosamente documentado para el prototipo. Este programa debe incluir inspecciones periódicas de los componentes esenciales y los sistemas críticos. Mantener esta práctica asegurará la durabilidad, confiabilidad y óptimo rendimiento operativo del prototipo a lo largo de su vida útil.
- Se recomienda un seguimiento detallado y análisis exhaustivo a lo largo de ciclos de producción más extensos y bajo diversas condiciones de operación. Este enfoque permitirá validar y fortalecer aún más la confiabilidad y la estabilidad del prototipo, proporcionando información valiosa para cualquier ajuste o refinamiento necesario en el diseño o los parámetros operativos.
- Se recomienda encarecidamente la divulgación y transferencia de los conocimientos y resultados obtenidos, tanto en el ámbito académico como en el profesional. Esta diseminación contribuirá significativamente al avance de la tecnología aplicada al procesamiento de café, facilitando la incorporación de soluciones innovadoras en la industria cafetalera e impulsando una mejora continua y sostenible en la calidad del café y en los procesos de beneficio.

10. Bibliografía

- ASHRAE. (2016). *ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment*. New York: ASHRAE.
- CENICAFÉ. (10 de 08 de 2023). *Centro nacional de investigaciones de café*. Obtenido de <https://www.cenicafe.org/>
- Chacón, O. (2001). *El proceso de beneficio del café*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura: San José.
- D, T. (2015). *Guía básica para el análisis de calidad del café*. Cuenca.
- Dong, L. (2017). Efectos de diferentes técnicas de secado sobre componentes bioactivos, composición de ácidos grasos y perfil de compuestos volátiles de granos de café robusta. *LWT - Ciencia y Tecnología de los Alimentos*, 365-372.
- Espinoza Vladimir, M. A. (Marzo de 2018). Diseño, construcción y caracterización de secador de granos de café, utilizando la energía térmica contenida en fluidos geotérmicos. Ciudad Universitaria, El Salvador: Universidad de el Salvador.
- Figueroa E, P. F. (2013). *La producción y el consumo de café*. España: ECORFAN.
- González Ríos. (2007). El beneficio del café: una revisión crítica de los principales factores que afectan la calidad del café. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 105-114.
- Joët, T. (2010). *Influence of processing on the biochemical and sensorial qualities of Arabica coffee*. Indonesia.
- Kreider, J. (2011). *Heating and Cooling of Buildings: Design for Efficiency (2nd)*. CRC Press.
- Livramento, K. (2017). Perfil proteómico de granos de Coffea arabica despulpados y naturales secados en patio y por aire caliente a 60 °C. *Investigación Internacional de Alimentos*, 9-16.
- Martínez, M. A. (2017). Evaluación del proceso de secado del café usando un secador de lecho fijo. *Agroecosistemas*, 11-21.
- OIC. (15 de 09 de 2023). *Organización Internacional del Café*. Obtenido de <https://icocoffee.org/es/>
- Oliveros M. (2016). *Gestión del proceso de secado de café. Caso: Finca villa Loyola, Nariño*. Bogotá: Pontificia Universidad Javierana.
- Parra, H. (2008). *Control de calidad en la cadena productiva del café*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Preedy, V. (2014). *Isomerización, hidrólisis o degradación de los CGAs durante el proceso de secado del café*.

- Puerta, G. (2011). Importancia de un proceso adecuado de secado del café.
- Sivetz, M. (1963). *Tecnología del Café*. Michigan: HathiTrust.
- Tai, M., & Ghassem, M. (2014). Mejora de la calidad en el procesamiento del café. *Producción más Limpia*, 294-258.
- Teixeira, R. N. G. (2005). Determinación de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos en Granos de Café Tostados por Cromatografía de Gases-Espectrometría de Masas. *Química agrícola y alimentaria*, 4096-4101.
- Unicef. (Septiembre de 2014). *Síntesis metodología*. Obtenido de https://www.unicef-irc.org/publications/pdf/brief_10_data_collection_analysis_spa.pdf
- Yang, W. (2020). Ventilation and Air. *Conditioning System Desingn: Theory and Applications*.

11. Anexos

Anexo 1. Tabla Propiedades del Agua Saturada - Tabla de Temperaturas

914
TABLAS DE PROPIEDADES, FIGURAS Y DIAGRAMAS (UNIDADES SI)

TABLA A-4

Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., T °C	Pres. sat., P_{sat} kPa	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, $kJ/kg \cdot K$		
		Líqu. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líqu. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Líqu. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líqu. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302

Fuente: Engineering Thermodynamics de Yunus A. Cengel y Michael A. Boles.

Anexo 2. Propiedades del Aire a la Presión de 1 ATM

TABLA A-15

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

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

Nota: Para los gases ideales, las propiedades c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de ρ , a la temperatura dada, por P y al dividir ν y α entre P .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 1984, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermann, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-30607020-8.

Fuente: Gómez, T. & Acebo Temes, A. (2010). *Tablas Termodinámicas y Propiedades en el Sistema Internacional*

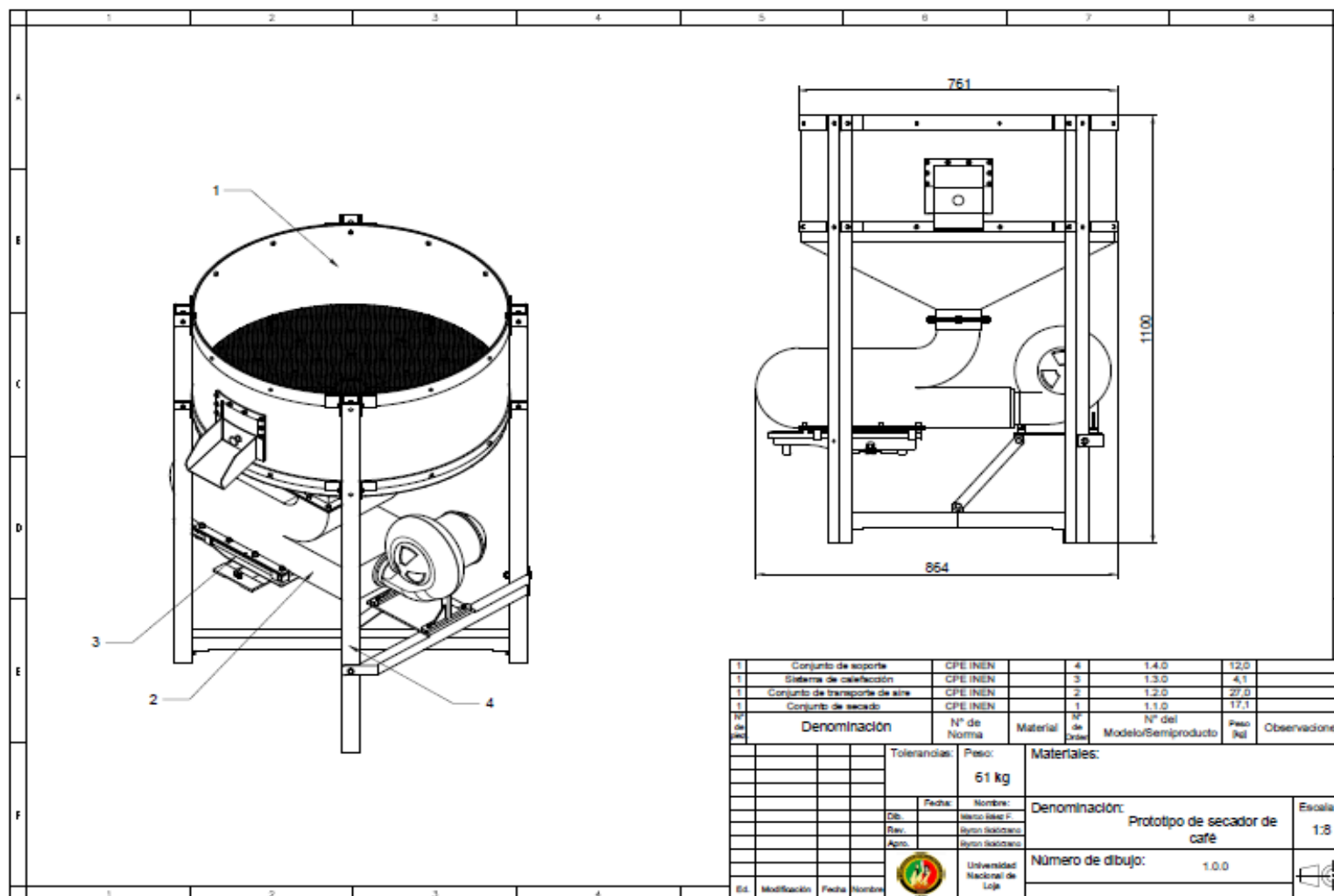
Anexo 3. Propiedades termofísicas de gases a presión atmosférica

TABLA A.4 Propiedades termofísicas de gases a presión atmosférica^a

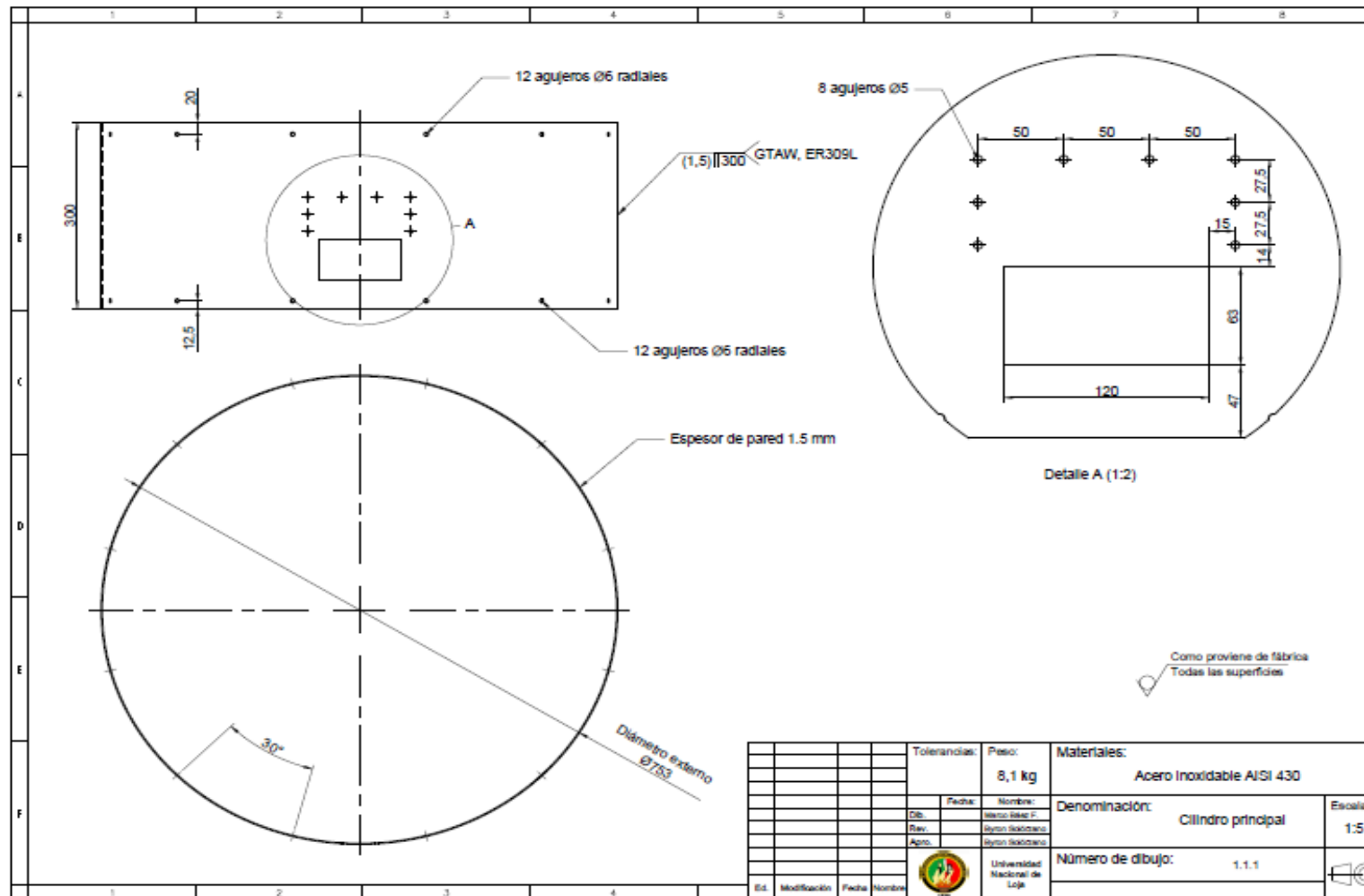
T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Aire							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536

Fuente: Fundamentos de transferencia de Calor apéndice A4 de Incropera 4ta Edición.

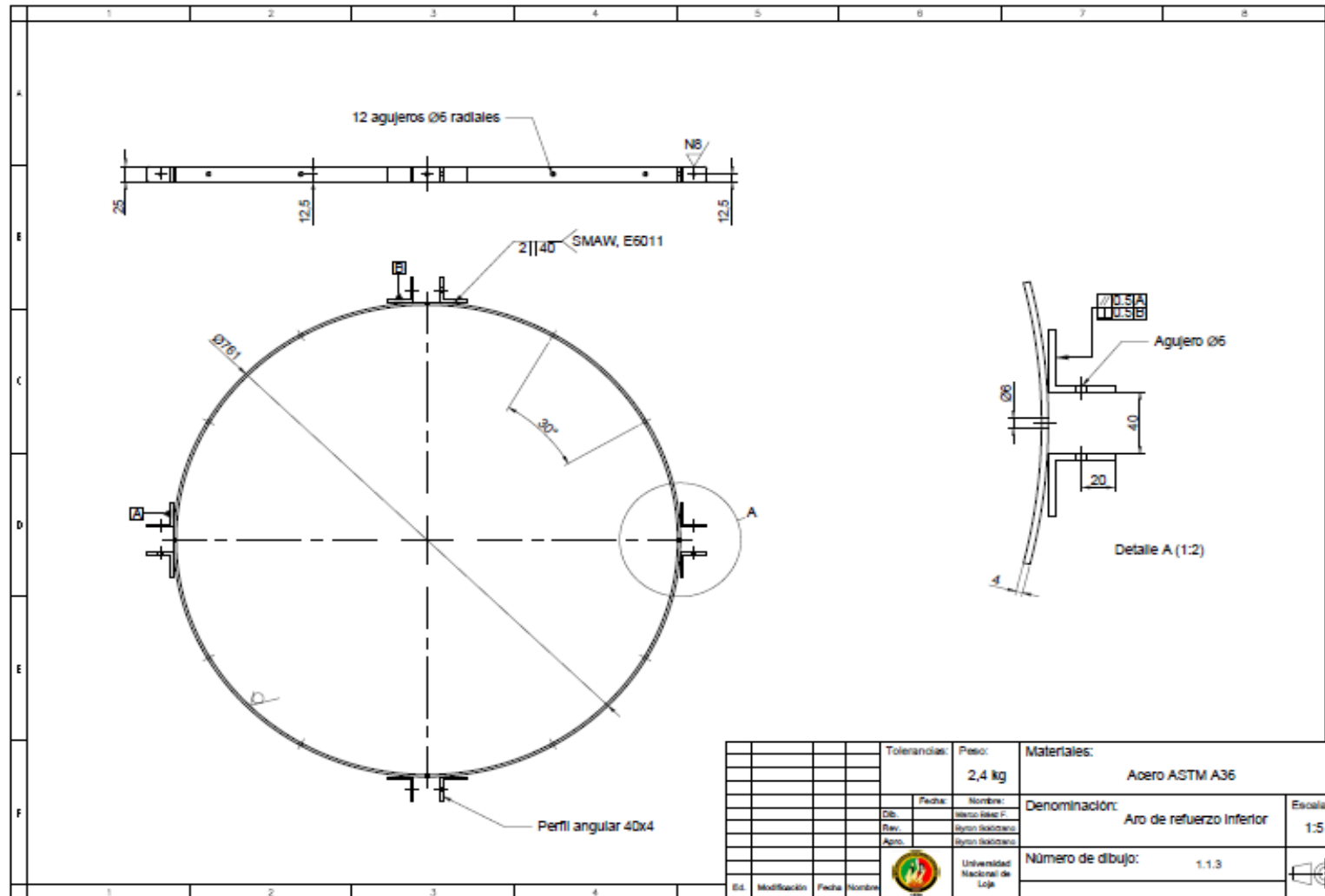
Anexo 4. Prototipo de Secador de Café



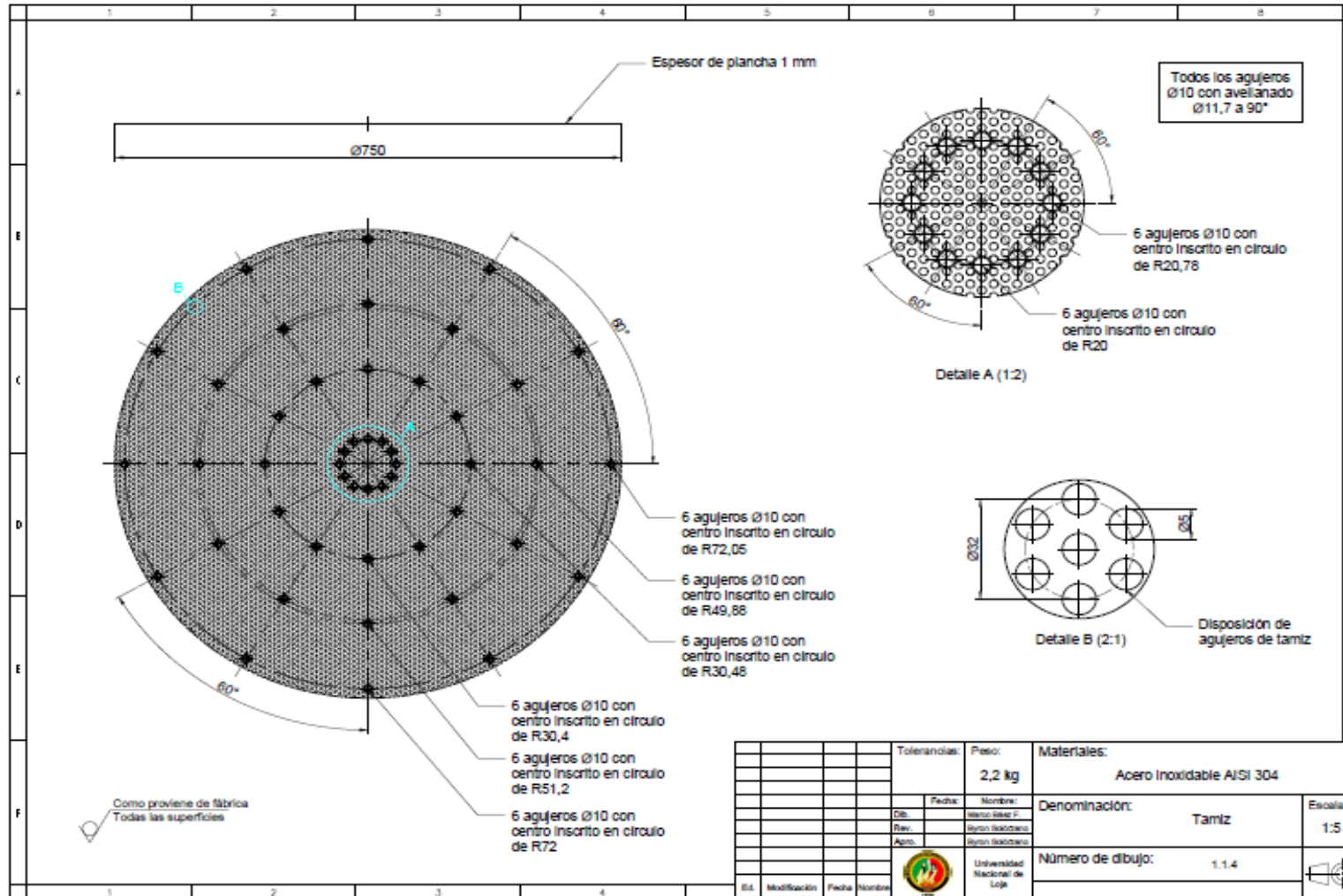
Anexo 6. Cilindro Principal



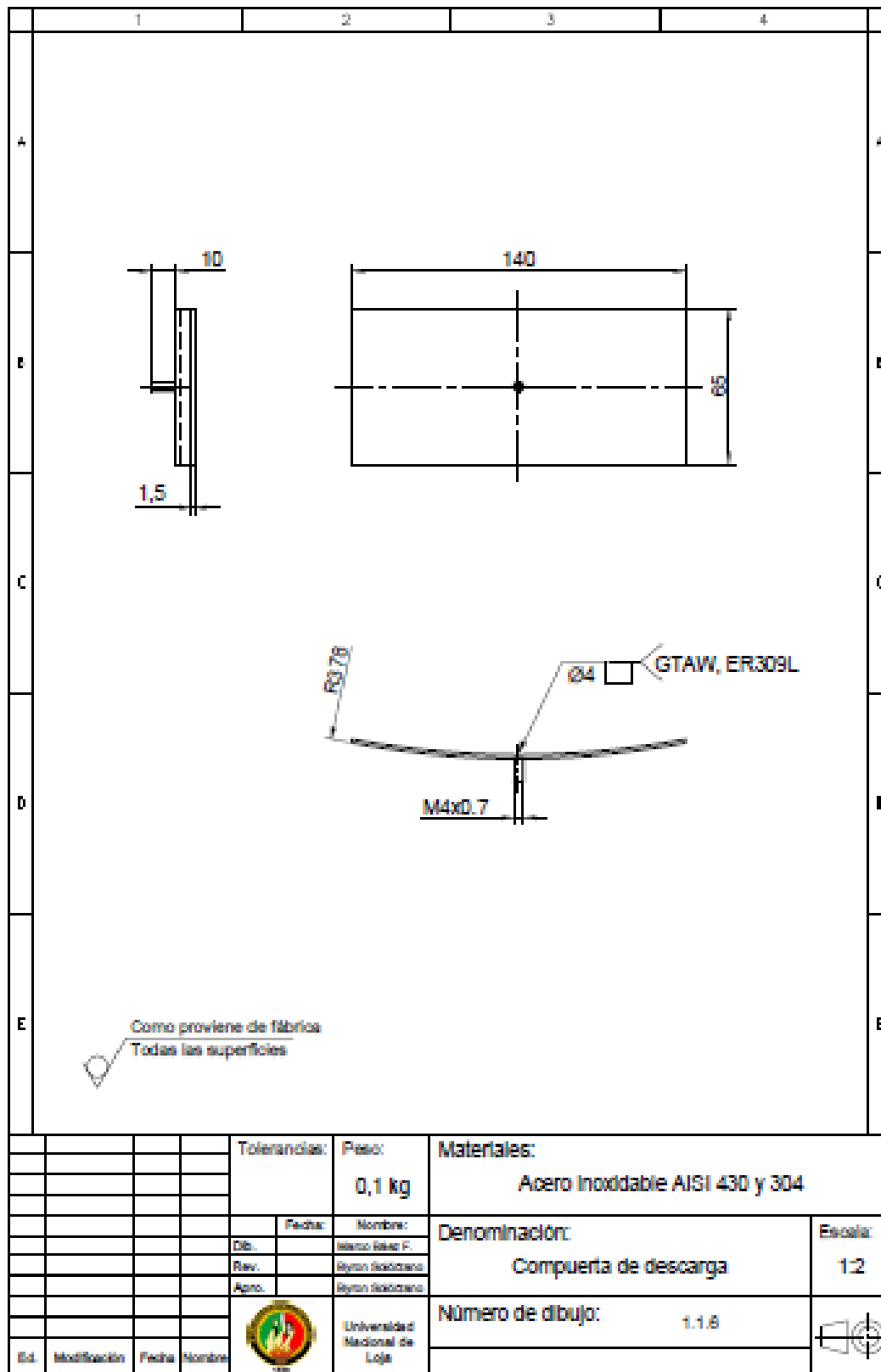
Anexo 8. Aro de Refuerzo Interior



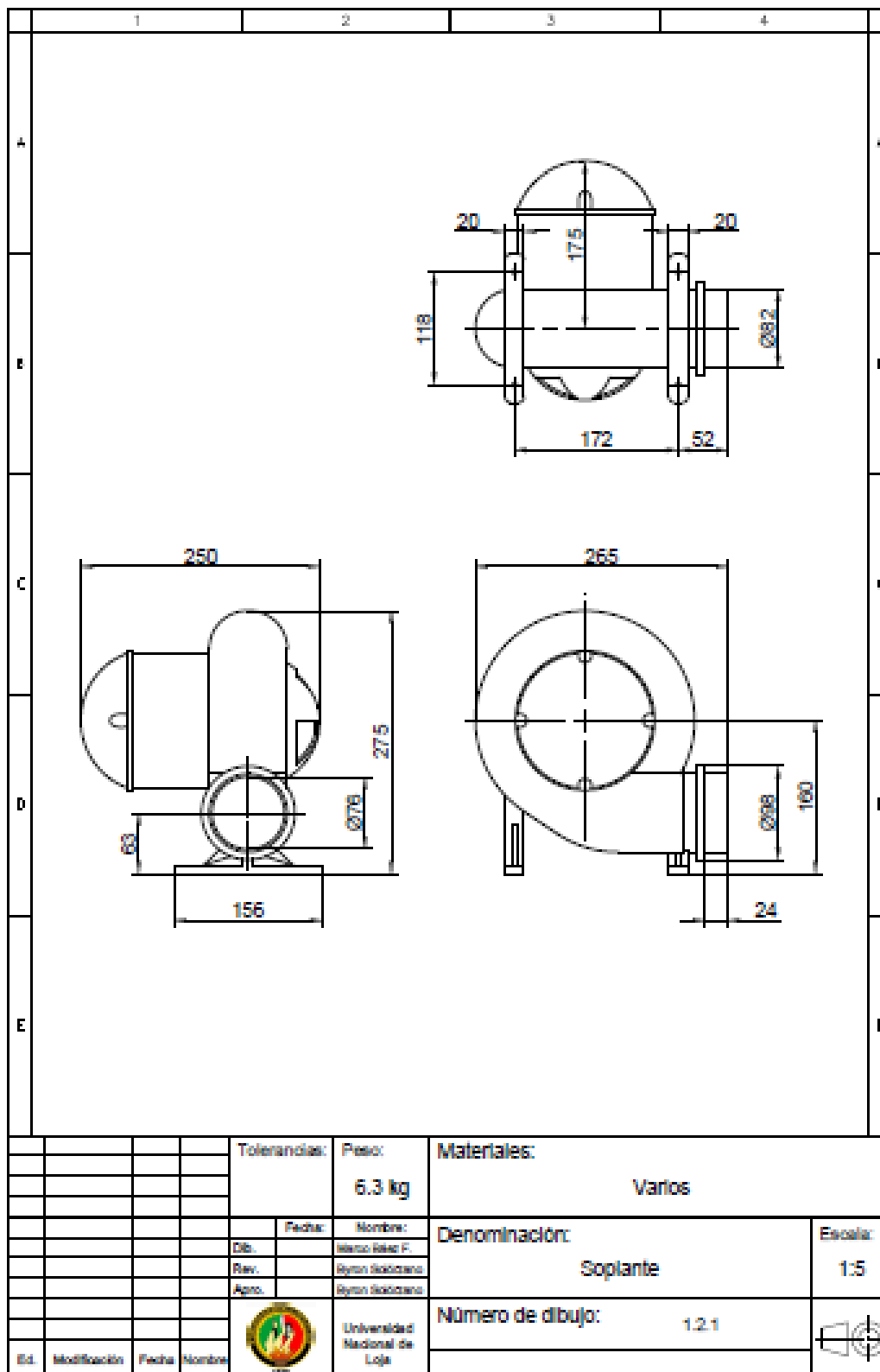
Anexo 9. Tamiz



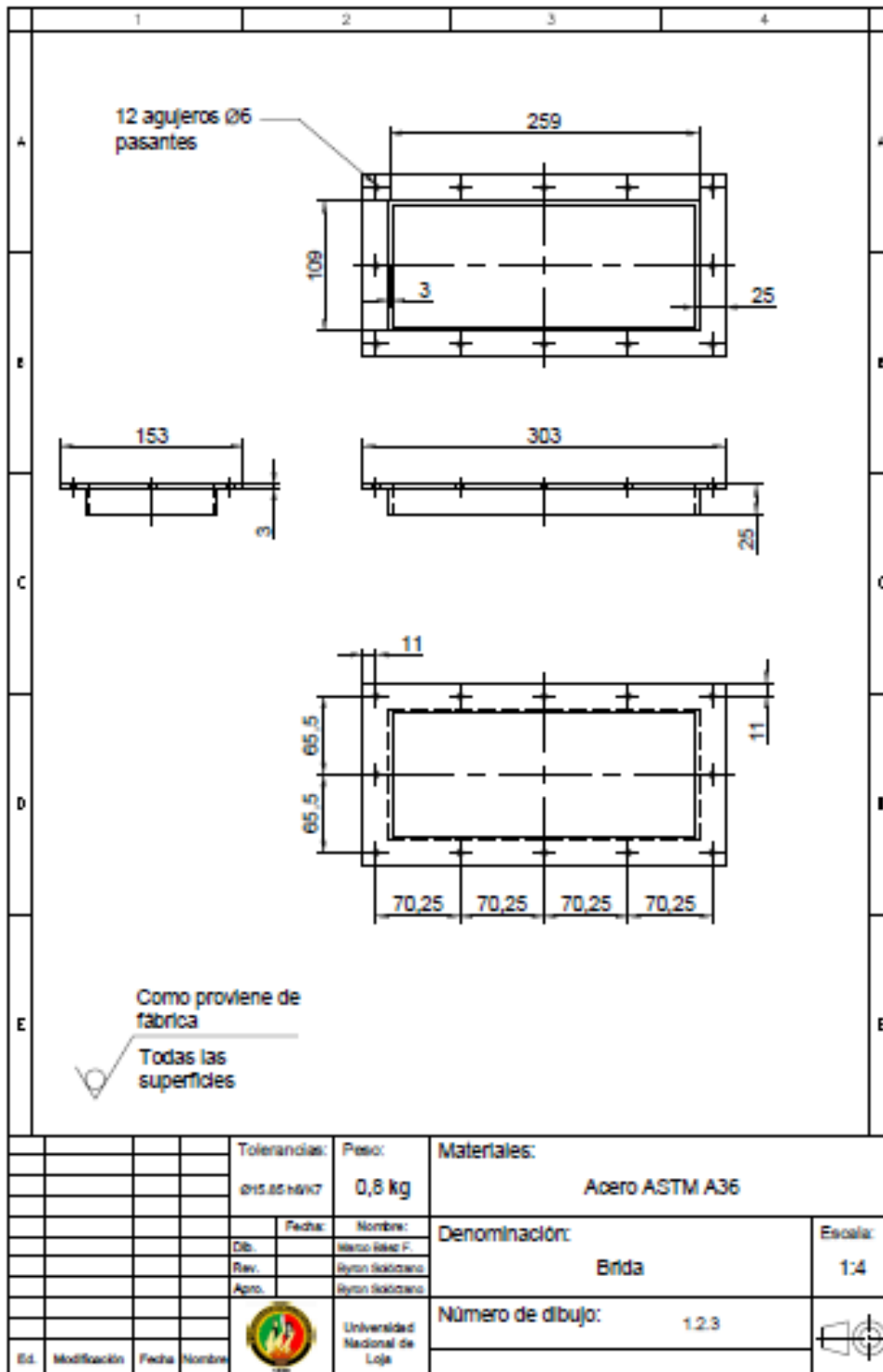
Anexo 11. Compuerta de Descarga



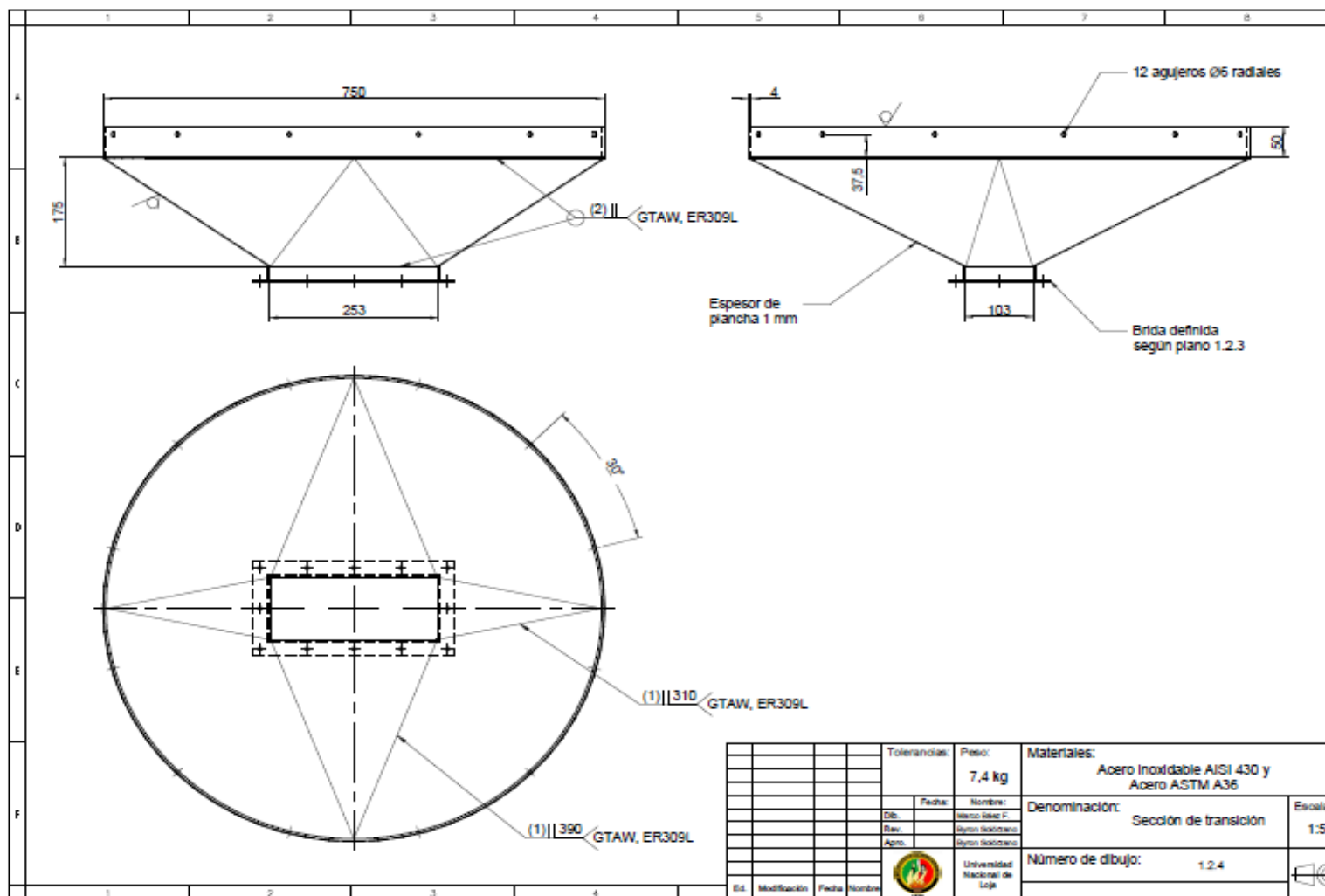
Anexo 13. Soplante



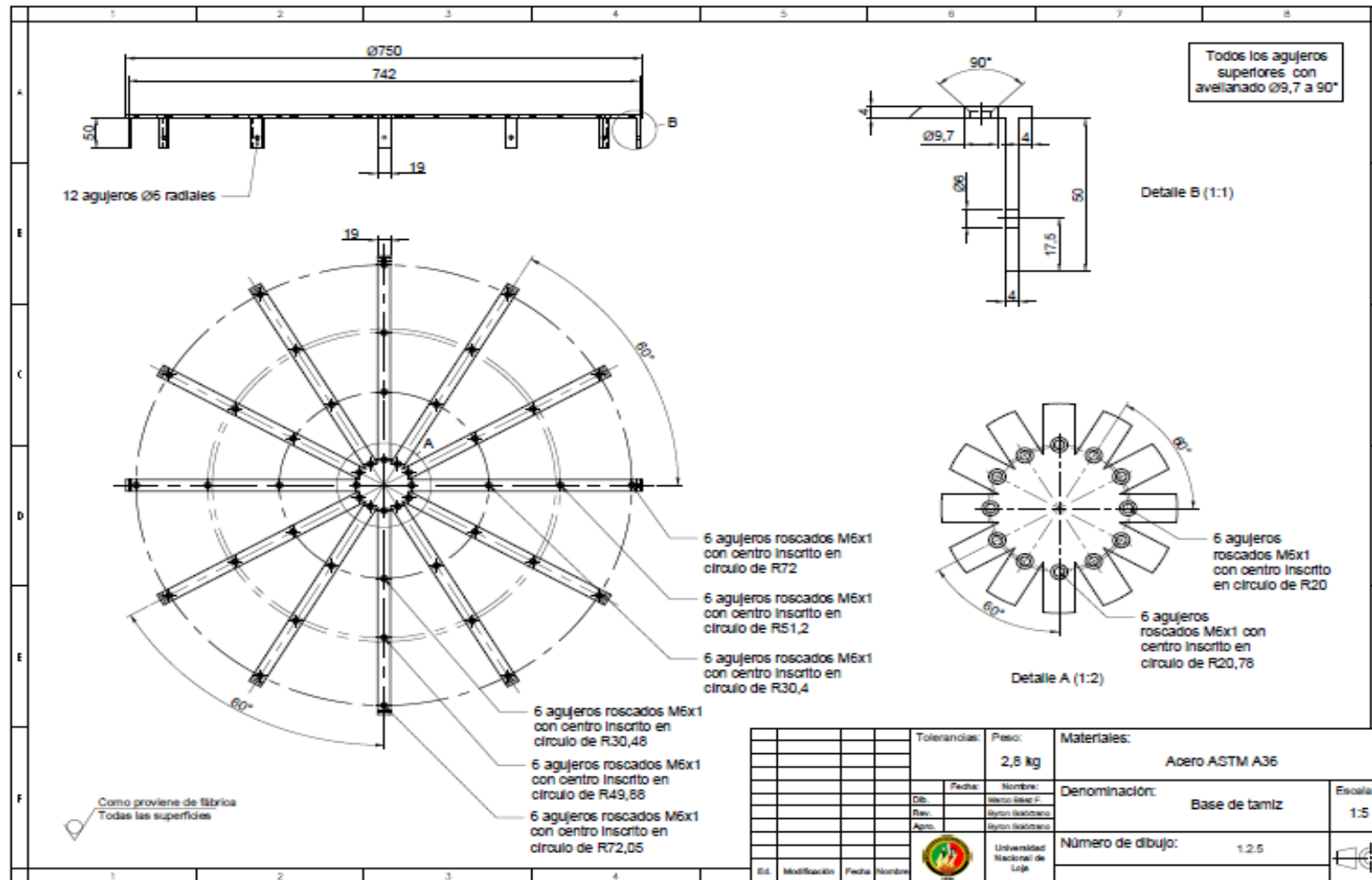
Anexo 15. Brida



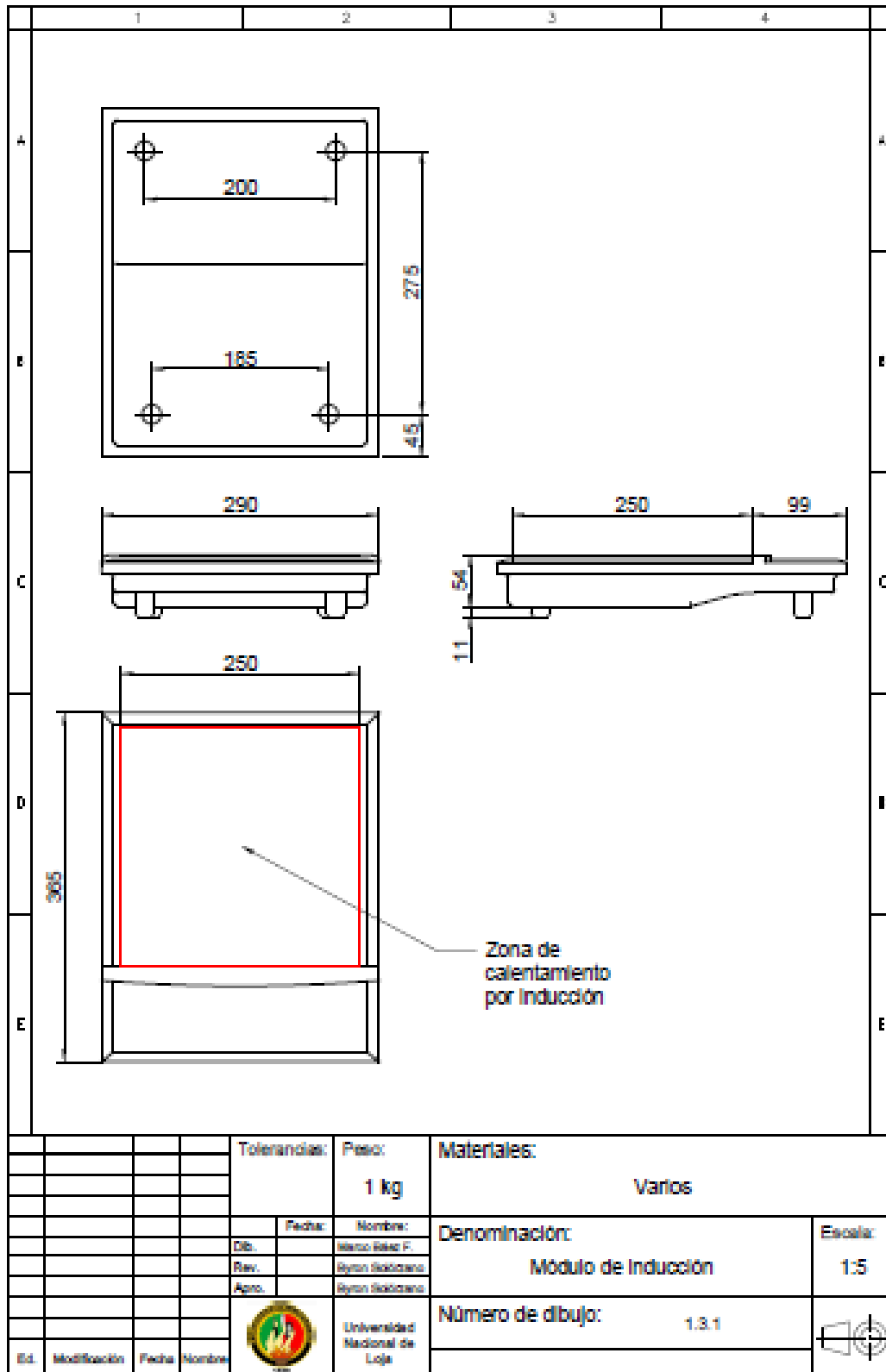
Anexo 16. Sección de Transición



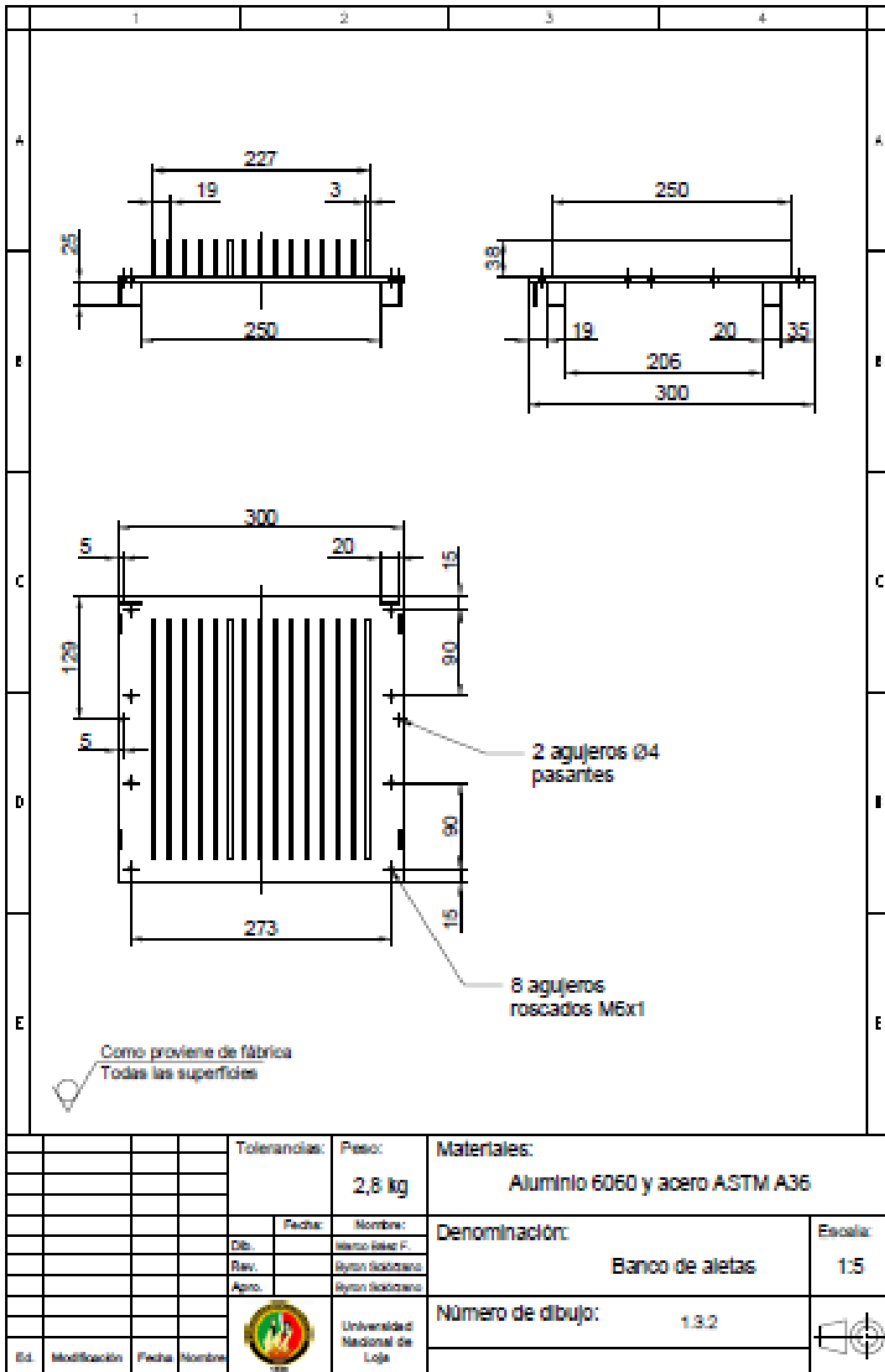
Anexo 17. Base de Tamiz





Anexo 19. Módulo de Inducción

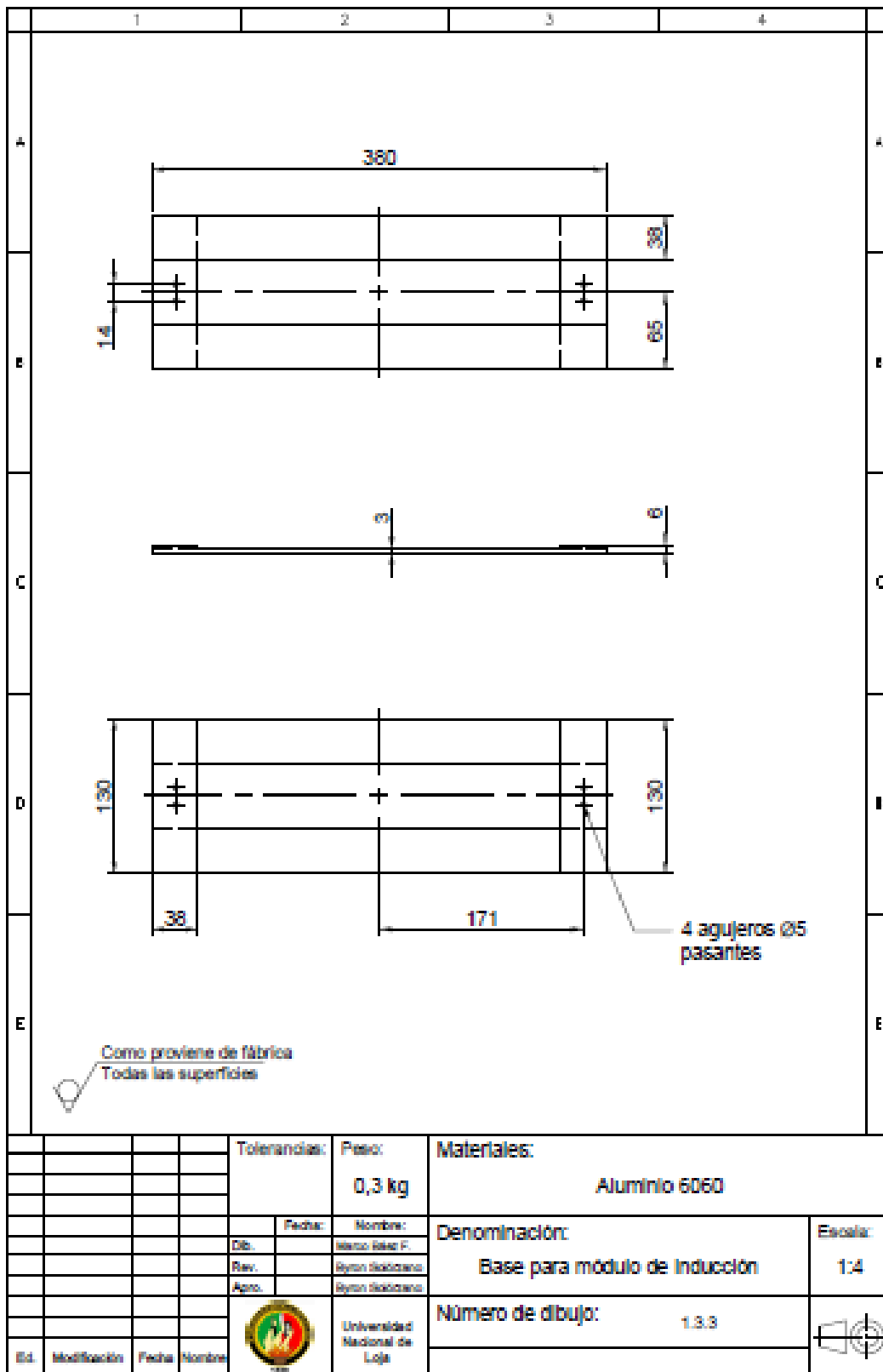


Anexo 20. Banco de Aletas

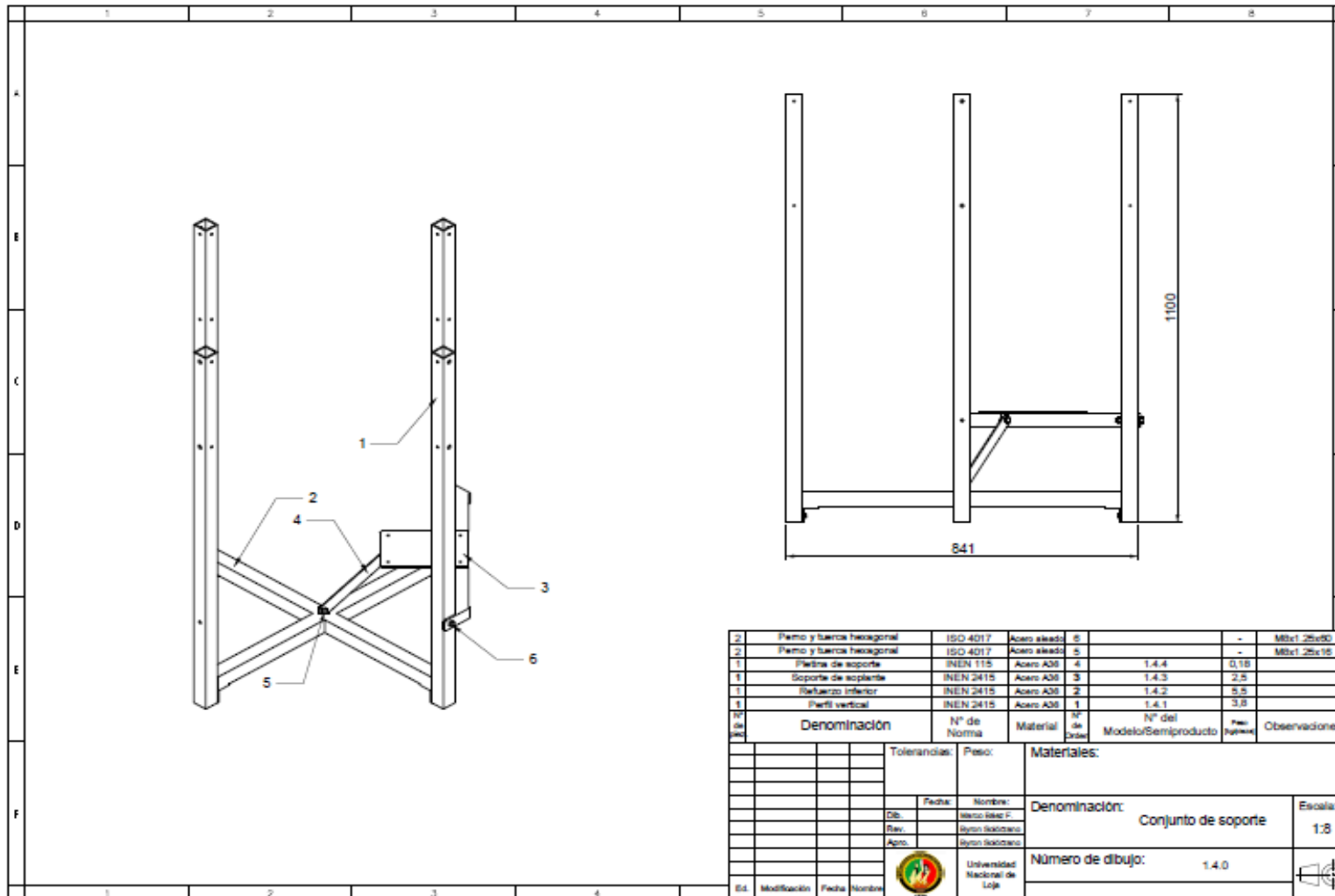


				Tolerancias:	Peso:	Materiales:	
					2,8 kg	Aluminio 6060 y acero ASTM A36	
				Fecha:	Nombre:	Denominación:	Escala:
				Dib.	Byron Isidoro		
				Rev.	Byron Isidoro		
				Apro.	Byron Isidoro	Número de dibujo:	1:5
					Universidad Nacional de Loja		
Ed.	Modificación	Fecha	Nombre				

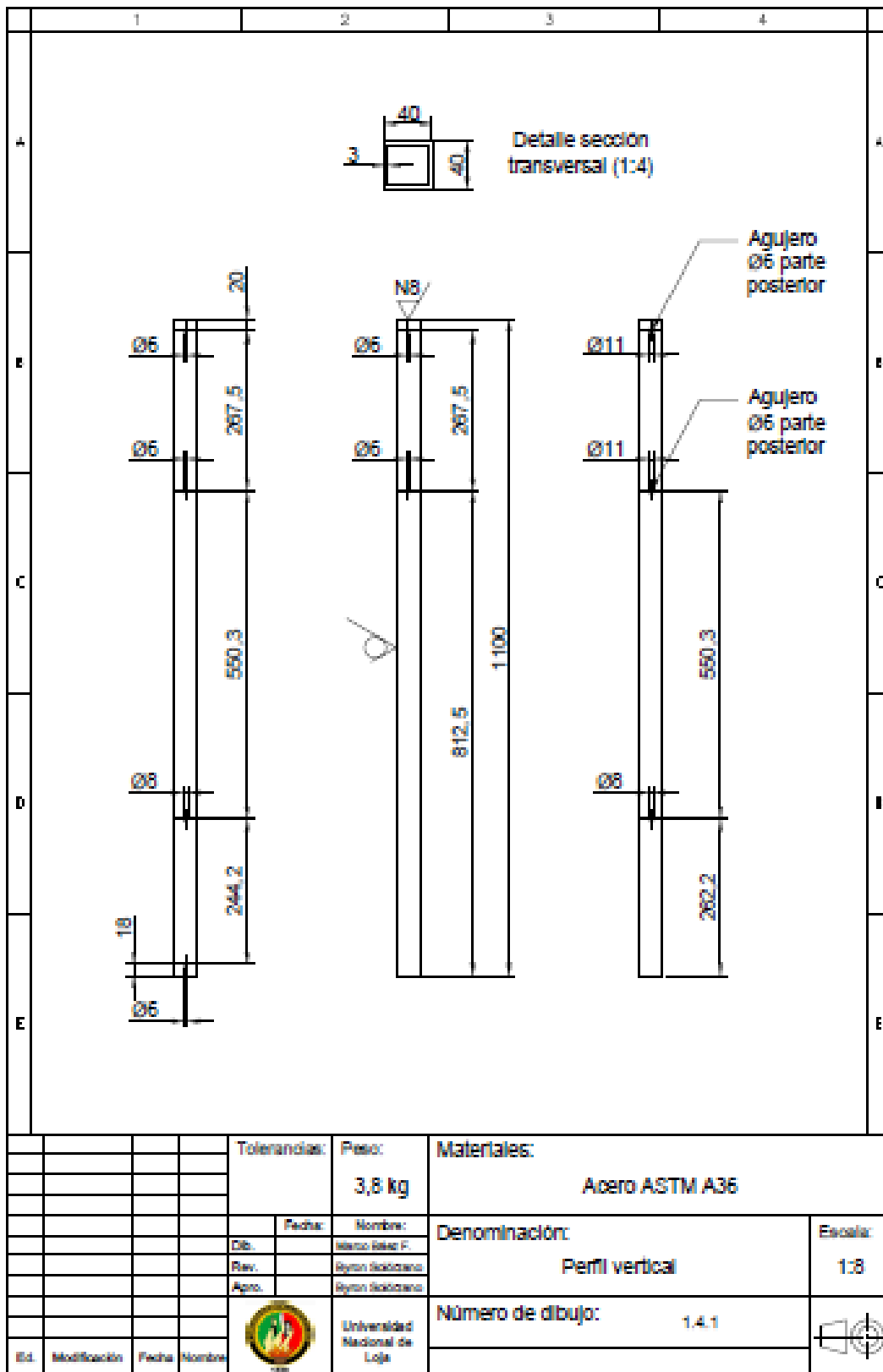
Anexo 21. Base de Módulo de Inducción



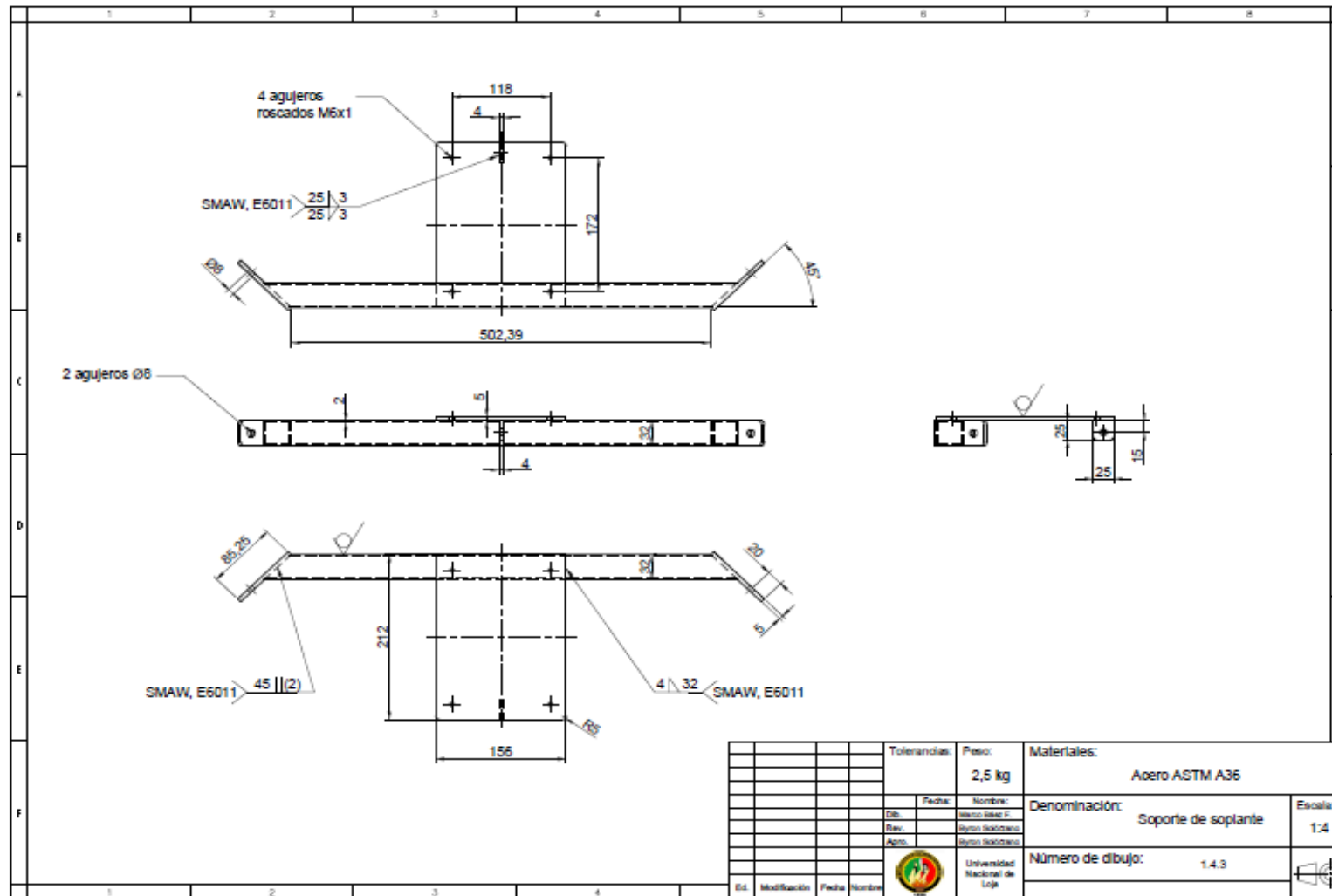
Anexo 22. Conjunto de Soporte



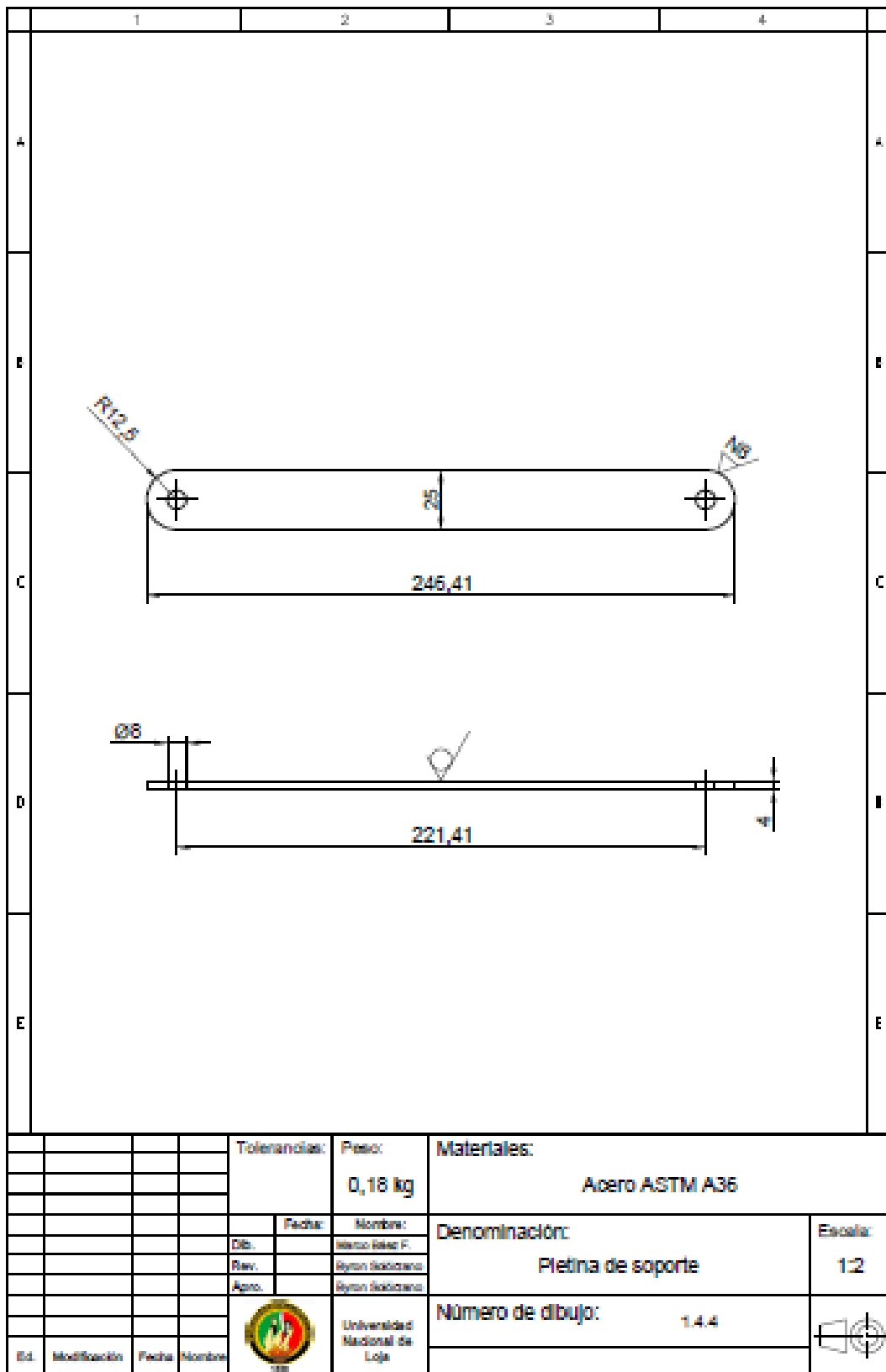
Anexo 23. Perfil Vertical



Anexo 25. Soporte de Soplante



Anexo 26. Pletina de Soporte



Anexo 27. Ficha de Caracterización de Proceso

		Fecha de actualización:	25/05/2023	
Nombre del Proceso		Proceso de secado del café de calidad		
Dueño del proceso		Marco Vinicio Báez Feijoo		
Misión del proceso		Realizar el proceso de secado de café obteniendo el mayor beneficio en el producto final		
Entradas del proceso		Proveedores de las entradas		
Tabla de control de calidad del grano en el proceso de secado		1	Mediciones durante el proceso de secado	
Prototipo de la máquina secadora de café de calidad generando calor mediante un módulo de inducción		2	Construcción de la máquina secadora de café	
Café despulpado con una humedad entre 50%-60%		3	Finca de café chamba (Ubicada en el sector de Gonzanamá)	
Salidas del proceso		Receptores de las salidas		
Control de la calidad durante el proceso de secado		1	Control del proceso de secado de café	
Café secado con una humedad entre 11%-12.5% para cafés de especialidad y exportación según la International Coffe Council y la norma INEN 285		2	Producto final	
Controles establecidos				
Temperatura de secado	2	Humedad del grano durante el secado	3	Temperatura del grano
DESCRIPCIÓN DEL PROCESO				
Etapas/actividades del proceso		Responsable de la actividad	Documentos de referencia	Registros generados
1	Selección de los granos	Marco Vinicio Báez Feijoo	INEN 285-289	Separar granos con cualquier defecto y
2	Oreado del café	Marco Vinicio Báez Feijoo	INEN 285	Café escurrido luego del lavado con una humedad superior al 20% y según Aguilar (2015) entre 55-57%
3	Transporte del café al área de secado	Marco Vinicio Báez Feijoo	Tabla de control de calidad INEN 285-290	Hacerlo con la mayor inocuidad posible y evitar el humedecimiento de los
4	Medición de la humedad del grano	Marco Vinicio Báez Feijoo	Tabla de control de calidad INEN 285-290	Medir la humedad de los granos que debe ser entre 55-57%
5	Peso de la cantidad de granos a secar	Marco Vinicio Báez Feijoo	Tabla de control de calidad INEN 285-290	Pesar los granos a secar según la capacidad de la máquina
6	Colocación de los granos en la máquina	Marco Vinicio Báez Feijoo	Tabla de control de calidad INEN 285-290	Evitar que los granos estén muy amontonados uno sobre otro

7	Establecimiento de la temperatura de secado entre 35 a 40 grados Celsius	Marco Vinicio Báez Feijoo	Tabla de control de calidad INEN 285-290	Establecer una temperatura de secado pues según varíe está la calidad final del producto será diferente
8	Control de la temperatura de la cámara y humedad en la misma	Marco Vinicio Báez Feijoo	Tabla de control de calidad INEN 285-290	Realizar un control constante de la temperatura y humedad de la cámara preferible en la mañana
9	Mover los granos cada cierto intervalo de tiempo para que el secado sea uniforme	Marco Vinicio Baez Feijoo	Tabla de control de calidad INEN 285-290	Mover los granos cada cierto intervalo para un secado homogéneo en todo el lote
10	Control de la humedad de los granos cada cierto intervalo de tiempo	Marco Vinicio Báez Feijoo	Tabla de control de calidad INEN 285-290	Medir la humedad en los granos en la mañana tarde y noche
11	Cuando el proceso este por finalizar bajar la temperatura de forma homogénea hasta llegar a la temperatura ambiente	Marco Vinicio Báez Feijoo	INEN 285-290	Bajar la temperatura de la máquina de forma gradual para evitar cualquier tipo de defecto del producto final
12	Medir la humedad de los granos luego del proceso de secado	Marco Vinicio Báez Feijoo	INEN 285	Medir la humedad de los granos que se debe encontrar entre un 10-12.5% que es la humedad óptima para un café beneficiado, evitar danos en el pergamino del grano en el secado
13	Pesar lo granos de café luego del proceso de secado	Marco Vinicio Báez Feijoo	Tabla de control de calidad INEN 285-290	Pesar el lote obtenido luego de haber perdido humedad
14	Analizar la colorimetría final del grano y realizar la respectiva clasificación y identificación del lote según su tipo y cualidades.	Marco Vinicio Báez Feijoo	INEN 285-289	Clasificar al grano según su color lo que nos permite clasificarlo según las normas INEN de la zona
15	Limpieza de la máquina	Marco Vinicio Báez Feijoo	INEN 285-290	Realizar la respectiva limpieza de la máquina con el líquido butoxol 15% para desinfección de superficies procesadoras de alimentos
indicador del proceso		Control constante de la calidad final del producto		Frecuencia de Medición 15 veces por proceso
Recursos				
1	Prototipo de máquina secadora de café por aire caliente forzado generado por un módulo de inducción			Habitación libre de cambios de temperatura y humedad
2	Café beneficiado previamente en el proceso de recolectado y despulpado			Persona encargada del proceso de secado
3	Medidores de humedad de los granos, temperatura y tiempo			Insumos necesarios para una inocuidad correcta en el proceso



LABORATORIO Y TOSTADORA DE
CAFES EPECIALES.

ANALISIS SENSORIAL
MUESTRAS DE CAFÉ VERDE.

Cupping Results

Nombre: MARCO VINICIO BAEZ FEIJOO

Juez: HUBERT ONTANEDA CATADOR QGRADER/ CATADOR SCAA

Mesa: 1

Fecha: JUNIO/ 2023

MUESTRA: AMC

Origen: LOJAS

Productor: CARLOS
CHAMBA

Beneficio: **LAVADO**

Variedad: TYPICA

Altura: 1235msnm

Humedad: 11.6%

MUESTRA SRAL04 MARCO BAEZ
HUMEDAD 11.6%

MUESTRA SRAL04:

Análisis café verde PESO NETO 300gr

Defectos primarios:	CANTIDAD	Defectos secundarios:	CANTIDAD
Grano negro		Negro parcial	
Grano Agrio		Agrio parcial	4
Cereza seca		pergamino	
Materia extraña		flotador	3
Grano brocado severo		inmaduros	7
Daño por hongo	8	Avenarado	9
		conchas	3
		partido	2
		Broca leve	12

RENDIMIENTO:

Peso completo en grano verde:
300 gr

MUESTRA SE TOSTO SIN CLASIFICAR

RENDIMIENTO

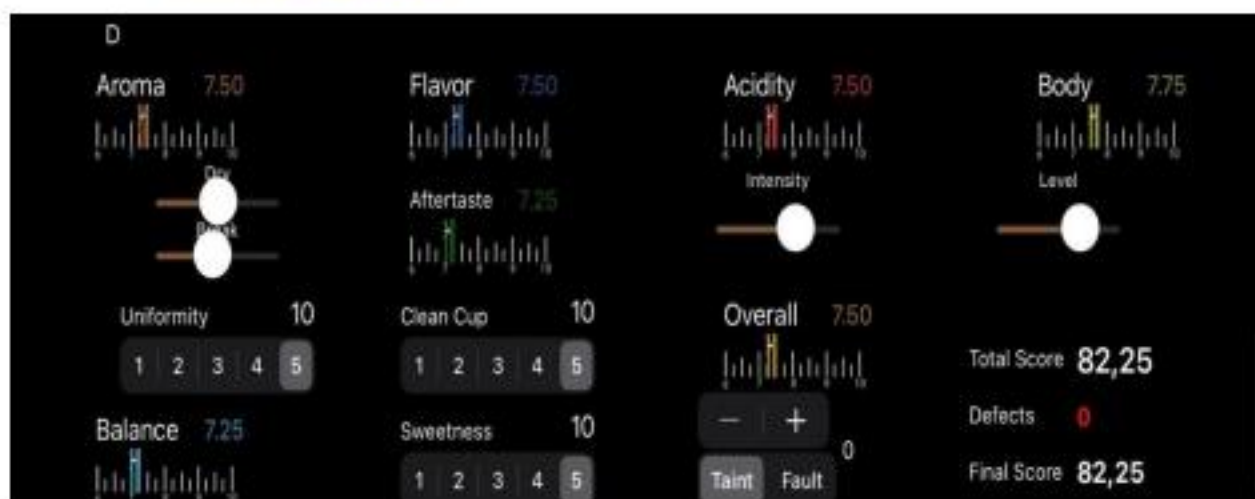
La muestra fue tostada, seleccionada escogiendo defectos.

Tostadora: IKAWA (Origen Reino Unido)

CURVA DE TUESTE: Soul coffee Roaster cupping profile.

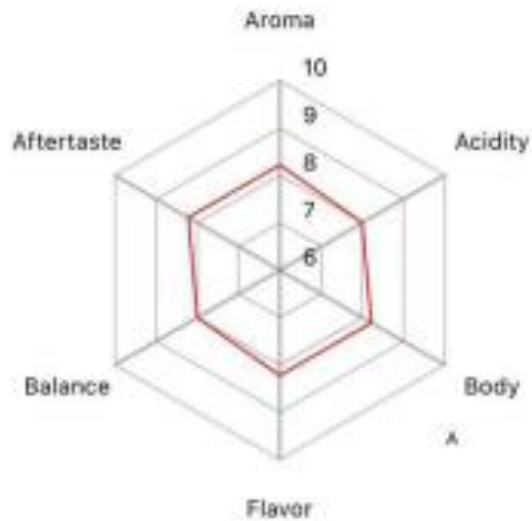
TABLA DE CALIFICACION FORMATO SCAA

RESULTADOS CATAACION TUESTE PARA CATA: CLARO



Fragancia frutal, ligero floral y verde aroma dulce té verde, notas a miel, té verde, delicado, frutos secos, almendra, cuerpo medio rasposo, residual dulce corto, en tibio perdió consistencia se aplano y nota a metal, ligero cereal y vegetaloso, residual corto medio amargo..

Spiderweb Graphs



FIRMA DE CATADOR:

HUBERT ONTANEDA LEON
QGRADER/CATADOR/2019-2025 TOSTADOR
Y BARISTA SCA.
2021 NATIONAL ROASTER CHAMP
2022 CUP OF EXCELLENCE JUDGE
2022 GOLDEN CUP INTERNATIOANL JUDGE

Anexo 29. Certificado de traducción

CERTIFICADO DE TRADUCCIÓN

Loja, 15 de abril de 2024

Yo, **Ariana Gabriela Báez Feijóo**, con **CI: 1105753048**, en mi calidad de Licenciada de Pedagogía del Idioma inglés con capacidades que pueden ser probadas a través de la Certificación de conocimiento del inglés, nivel B2, certifico: que la traducción del Resumen (Abstract) del Trabajo de Titulación denominado: **“Diseño y construcción de un prototipo de secador de café, por aire caliente forzado generado por un módulo de inducción”**, de autoría del estudiante: **Marco Vinicio Báez Feijóo**. Con **CI: 1105753030**, es correcta y completa según las normas internacionales de traducción de textos.

Atentamente,



Lcda. Ariana Gabriela Báez Feijóo

Docente de Lenguas Extranjeras

Nro registro Senecyt 1031-2022-2416308