

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Diseño, simulación y evaluación energética de un prototipo de
secador solar para el cacao con colector en lecho de rocas

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Ronaldo Ariel Castro Nunez
Kevin Alexander Pincay Avilés

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a:

Mis padres, Fidel Castro y Linda Núñez, quienes me apoyaron desde el inicio a seguir mis sueños y, aun cuando las situaciones no fueron siempre las mejores y quise desfallecer, siempre me llenaron de confianza para alcanzar esta meta.

Mi mejor amiga, Valencita Menéndez, por haberme apoyado moralmente y fortalecido desde el inicio y ser de las pocas personas en haberme acompañado durante todo el proceso universitario.

A toda mi familia y amigos que me han acompañado en esta travesía, depositando su confianza en mi vida para llegar a esta meta en mi vida.

*Sinceramente,
Ronaldo Castro.*

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a:

Mis padres, Mónica Avilés y Raúl Pincay, quienes confiaron y forjaron al profesional que soy hoy en día. Mis hermanos que día a día se preocupaban de los pequeños detalles en mi vida universitaria.

Mis amigos de colegio, que fueron mis confidentes de mis fortalezas, debilidades y supieron apoyarme en las adversidades.

*Sinceramente,
Kevin Pincay.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a la Escuela Superior Politécnica del Litoral, a la Facultad de Mecánica y todos los docentes que, con sus amplios conocimientos, me instruyeron y formaron al profesional que soy ahora.

De igual manera, agradezco a todos los contactos y expertos en el área que nos instruyeron de primera mano el proceso de secado de cacao para poder realizar este proyecto, en especial a mi tío, el Ing. Francisco Castro.

Agradezco a mi compañero Kevin Pincay por haber confiado en mí para realizar este trabajo juntos, por el arduo esfuerzo que ambos hicimos aun con las dificultades, y por haber sido un buen equipo de trabajo.

Finalmente, agradezco a nuestro tutor, el Ing. Gonzalo Zabala Ortiz, por haber confiado este proyecto en nosotros y guiarnos de la mejor manera para hacer un trabajo de calidad.

*Sinceramente,
Ronaldo Castro.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a la Escuela Superior Politécnica del Litoral, a la Facultad de Mecánica y todos los docentes que, con su vasto conocimiento, me instruyeron y formaron al profesional que soy ahora.

De igual manera, al Ing. Francisco Castro, por ser el primer contacto directo que supo guiarnos en las riendas de este proyecto. Así mismo, a mi lugar de pasantías que permitió envolverme en la producción de cacao.

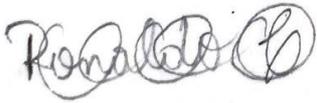
Agradezco a mi compañero de clases y prácticas preprofesionales, Ronaldo Castro quien supo liderar el proyecto.

Finalmente, agradezco a nuestro tutor, el Ing. Gonzalo Zabala Ortiz, por haber confiado este proyecto en nosotros y exigirnos en pro de la excelencia.

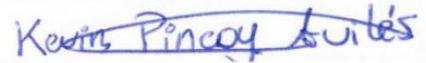
*Sinceramente,
Kevin Pincay.*

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Ronaldo Ariel Castro Núñez, Kevin Alexander Pincay Avilés* y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Ronaldo Ariel Castro Núñez
Autor 1



Kevin Alexander Pincay Avilés
Autor 2

EVALUADORES

Ángel Ramírez M., Ph.D.
PROFESOR DE LA MATERIA

Gonzalo Zabala O., MSc.
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El cacao ecuatoriano es un producto emblema del país, siendo reconocido mundialmente como uno de los mejores granos por su sabor y aroma; sin embargo, para el primer eslabón de esta cadena productiva, el secado a pequeña escala que realiza el agricultor sigue siendo un reto tecnológico, El presente estudio establece como objetivo diseñar un secador solar indirecto de convección natural con lecho de rocas y capacidad de 40kg, mediante la caracterización del proceso de secado del grano y el dimensionamiento óptimo del equipo que satisfaga parámetros de calidad, beneficiando así al agricultor con tiempos de operación cortos, mínimo mantenimiento y fuente de energía sostenible. Mediante las pruebas realizadas, se definió que, para lograr un tiempo de secado de máximo 12 horas en cualquier época del año, se necesita un equipo con unas medidas de 2.75 metros de largo, 0.85 metros de ancho y 3.30 metros de alto. Se concluyó la validez del modelo mediante una simulación térmica, estableciéndose un rendimiento energético de alrededor del 65%, dependiendo enormemente del lecho de rocas, el cual llega hasta un máximo de 170 °C. Además, se validó la cinética de secado y el modelo matemático planteado, pero se requiere acompañar con experimentación y prototipado para corroborar resultados. El costo de producción es de \$900.00 con un tiempo de retorno de inversión para el cliente de 1.25 años, mientras que el capital solicitado como inversiones es de \$12,800.00 con un tiempo retorno de 1 año.

Palabras Clave: Cacao, Humedad, Secador Solar, Lecho de Rocas.

ABSTRACT

Ecuadorian Cocoa is one of the distinguishing products of the country, being recognized as one of the best beans worldwide due to its flavor and smell; however, for the first link in this productive chain, adequate small scale drying remains a technological challenge. The current work sets as goal to design a natural convection indirect solar dryer with a rock bed and a batch capacity of 40kg, by characterizing the beans drying process and optimum machine size that satisfies set quality parameters, benefiting farmers with short operation times, minimum maintenance, and usage of sustainable energy. Through performing theoretical tests, it was established that, to achieve a maximum drying time of 12 hours at any weather conditions throughout the year, a machine with measures of 2.75 meters long, 0.85 meters wide and 3.30 meters tall, approximately, is needed. The validity of the model was concluded by performing thermal simulations, where the thermal efficiency of the device reached a 65%, which is heavily dependent on the rock bed, where it gets up to about 170°C. Moreover, the validity of drying mechanics and the math model was verified, but further experiments and prototype development are required to check results. The production cost is of \$900.00 with an investment return time of 1.25 years for the client, whereas the capital needed to fund this project is about of \$12,800.00 with a return time of 1 year.

Keywords: *Cocoa, Humidity, Solar Dryer, Rock Bed.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE PLANOS.....	XII
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Definición del Problema.....	1
1.2 Justificación del proyecto	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Marco teórico.....	2
1.4.1 Cacao (<i>Theobroma Cacao</i> L.).....	2
1.4.2 Cacaos Ecuatorianos.....	3
1.4.3 Cultivo y Cosecha de Cacao en Ecuador.....	5
1.4.4 Comercialización del Grano de Cacao Ecuatoriano.....	5
1.4.5 Entes Reguladores del Manejo de Cacao en Ecuador	5
1.4.6 Procesamiento del Cacao	7
1.4.7 Técnicas de Secado de Cacao Actuales en Ecuador	8
1.4.8 Secador Solar	10
CAPÍTULO 2.....	11
2. Metodología	11

2.1	Alternativas de solución del problema	11
2.2	Selección de la mejor alternativa de solución	12
2.2.1	Requerimientos del Cliente	12
2.2.2	Especificaciones Técnicas	13
2.2.3	Matriz de decisión	13
2.3	Diseño de concepto	14
2.4	Metodología de Diseño del Equipo	15
2.5	Condiciones Geográficas y Ambientales de Operación del Equipo	16
2.6	Curva de Secado del Cacao	18
2.7	Diseño de la cámara de secado	18
2.7.1	Caracterización de la Carga de Trabajo (Granos de Cacao)	19
2.7.2	Cinética de Secado del Cacao	20
2.7.3	Condiciones de Operación del Flujo de Aire dentro del Equipo	20
2.7.4	Análisis de las Bandejas de Cacao	22
2.8	Diseño del Colector Solar	23
2.9	Diseño de la Chimenea	26
2.10	Diseño de la Bancada	27
CAPÍTULO 3.....		28
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	28
3.1	Bandejas Propuestas	28
3.2	Selección de materiales	29
3.3	Curva de velocidad de secado del cacao	29
3.4	Ángulo de Inclinación del Colector	30
3.5	Selección de las Dimensiones del Equipo	31
3.5.1	Dimensiones del Colector Solar	31
3.5.2	Dimensiones de la Chimenea	32
3.6	Comportamiento termodinámico del equipo	33

3.7	Simulación Térmica del Equipo	37
3.8	Análisis de Costos	38
3.8.1	Costos de inversión	38
3.8.2	Factibilidad Económica	40
CAPÍTULO 4.....		43
4.	Conclusiones Y Recomendaciones	43
4.1	Conclusiones.....	43
4.2	Recomendaciones.....	44
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

ABREVIATURAS

∞	Ambiente
<i>m</i>	Media entre dos Temperaturas
<i>c</i>	Cacao (general)
<i>1c</i>	1 grano de Cacao
<i>l</i>	Lecho de Rocas
<i>cup</i>	Cubierta de Vidrio
<i>ban</i>	Bandejas
<i>T</i>	Total
<i>0</i>	Inicial / Ambiente
<i>f</i>	Final
<i>cr</i>	Crítica
<i>1</i>	Estado Caliente entre el colector y la cámara
<i>2</i>	Estado luego del secado
<i>chi</i>	Chimenea
<i>malla</i>	Malla de las Bandejas
<i>tec</i>	Techo de la Cámara
<i>v</i>	Vapor de Agua
<i>hel</i>	Heliofanía

SIMBOLOGÍA

T	[°C, K]	Temperatura de Bulbo Seco
T_w	[°C, K]	Temperatura de Bulbo Húmedo
P	[Pa]	Presión Absoluta
ΔP	[Pa]	Caídas de Presión
A_s	[m ²]	Área superficial
A_L	[m ²]	Área longitudinal
V	[m ³]	Volumen
g	[m/s ²]	Aceleración de la gravedad
a	[m]	Ancho
L	[m]	Longitud / Largo
δ	[m]	Espesor
H	[m]	Altura
D	[m]	Diámetro
θ	[°]	Ángulo de Inclinación
φ	[°]	Latitud Geográfica
m	[kg]	Masa
\dot{m}	[kg/s]	Flujo másico
u	[m/s]	Velocidad
n	-	Cantidad / Número de ...
X	[kg/kg]	Humedad del Cacao en base Húmeda
X_s	[kg/kg]	Humedad del Cacao en base Seca
R	[kg/s · m ²]	Velocidad de secado
t	[h]	Tiempo de secado
ρ	[kg/m ³]	Densidad
c	[J/kg · K]	Calor Específico a presión constante
k	[W/m · K]	Conductividad Térmica
μ	[Pa · s]	Viscosidad Dinámica
ν	[m ² /s]	Viscosidad Cinemática
β	[K ⁻¹]	Coefficiente de Expansión del Aire
Pr	-	Número de Prandtl
ω	[kg/kg]	Humedad del Aire en base Seca

ϕ	[% , Pa/Pa]	Humedad Relativa
h_f	[J/kg]	Entalpía de Líquido Saturado
h_g	[J/kg]	Entalpía de Vapor Saturado
h_{fg}	[J/kg]	Entalpía de Vaporización
K	-	Coefficiente de Pérdidas Menores
f	-	Coefficiente de Fricción
ϵ	[m]	Rugosidad Absoluta
ε	-	Emisividad / Porosidad
α	-	Absortividad
τ	-	Transmisividad
Re	-	Número de Reynolds
Gr	-	Número de Grashoff
Nu	-	Número de Nusselt
h_c	[W/m ² · K]	Coefficiente de Transferencia de Calor por Convección
h_r	[W/m ² · K]	Coefficiente de Transferencia de Calor por Radiación
U	[W/m ² · K]	Coefficiente de Transferencia de Calor Global
h_{hel}	[h/mes]	Horas de Heliofanía Mensual
I''_0	[J/m ² · dia]	Energía Solar Global Diaria
I''	[W/m ²]	Irradiación Solar Global Mensual
q	[W]	Calor
E	[W]	Energía
I''	[W/m ²]	Irradiación Solar Global
F_B	[N]	Fuerza de Flotabilidad
ΔP	[Pa]	Caída de Presión
ΔB	[Pa]	Presión de Flotabilidad
η	%	Eficiencia

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mazorcas de Cacao.....	4
Figura 1.2. Provincias con mayor volumen de ventas de empresas dedicadas al cultivo de cacao (2010-2019)	5
Figura 1.3. Flujo del Manejo Poscosecha del Cacao.....	8
Figura 1.4. Cuatro métodos de secado comunes.	9
Figura 2.1. Diagramas de las Alternativas de Solución Propuestas.	11
Figura 2.2. Diseño de Concepto de la Alternativa Seleccionada.	14
Figura 2.3. Esquema de las partes principales del equipo.	15
Figura 2.4. Diagrama de Flujo Completo del Proceso Diseño del Equipo.	15
Figura 2.5. Ubicación Geográfica del lugar de operación del Equipo.	17
Figura 2.6. Diagrama de Flujo para la Obtención de la Curva de Secado.....	18
Figura 2.7. Esquema de las partes principales de la Cámara de Secado.	19
Figura 2.8. Diagrama de Flujo para el Diseño de la Cámara de Secado.....	19
Figura 2.9. Dimensiones de un grano de Cacao.	19
Figura 2.10. Comportamiento del Aire descrito en la Carta Psicrométrica.	21
Figura 2.11. Modelo del flujo de aire a través de las bandejas.....	22
Figura 2.12. Esquema de las partes principales del colector solar.....	24
Figura 2.13. Diagrama de Flujo para el Diseño del Colector Solar.....	24
Figura 2.14. Balance de Energía de la Cubierta.....	24
Figura 2.15. Balance de Energía del Lecho de Rocas.....	25
Figura 2.16. Balance de Energía del Flujo de Aire dentro del Colector.	25
Figura 2.17. Diagrama de Flujo para el Diseño de la Chimenea.	26
Figura 2.18. Diagrama de Flujo para el Diseño de la Bancada.	27
Figura 3.1. Dimensiones de las Bandejas de Cacao.	28
Figura 3.2. Curva de Secado Típica del Cacao.	30
Figura 3.3. Irradiación Solar Global mensual y Ángulo de Inclinación Óptimo para cada mes.....	30
Figura 3.4. Longitud del Colector para diferentes Condiciones Meteorológicas.	31
Figura 3.5. Efecto del Ángulo de Inclinación del Colector.....	32
Figura 3.6. Altura Mínima de la Chimenea para cada Mes.....	33
Figura 3.7. Diseño Propuesto para el equipo.	34
Figura 3.8. Tiempo de Secado para las Dimensiones Elegidas.	34

Figura 3.9. Temperaturas de varios Elementos del Equipo a lo largo del Año.	35
Figura 3.10. Velocidad del Aire en diferentes Tramos del Equipo.	36
Figura 3.11. Eficiencias del Equipo.	36
Figura 3.12. Vista superior de la Simulación Térmica del Flujo de Aire dentro del Equipo.	38
Figura 3.13. Vista Inferior de la Simulación Térmica del Flujo de Aire dentro del Equipo.	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Parámetros físicos y termodinámicos del grano de cacao.....	3
Tabla 2.1. Descripción de los Requerimientos del Cliente.....	12
Tabla 2.2. Detalle de las Especificaciones Técnicas	13
Tabla 2.3. Matriz de Decisión para las Alternativas de Diseño	14
Tabla 2.4. Condiciones Meteorológicas mensuales de “El Deseo”	17
Tabla 2.5. Dimensiones Promedio de un Grano de Cacao.....	20
Tabla 3.1. Dimensiones Propuestas de las bandejas	28
Tabla 3.2. Materiales Utilizados en el Proyecto	29
Tabla 3.3. Costos de los Materiales del Equipo.....	39
Tabla 3.4. Costos de Diseño del Equipo.....	39
Tabla 3.5. Costos de la Mano de Obra para Fabricar un Equipo.....	40
Tabla 3.6. Costos Totales del Equipo	40
Tabla 3.7. Segmento de Mercado del Proyecto.....	40
Tabla 3.8. Extensión de fincas en la Provincia de Guayas	41
Tabla 3.9. Modelo de negocios para la venta de cacao por Quintal	41
Tabla 3.10. Registro de producción para 2021 de nuestro cliente agricultor	42
Tabla 3.11. Comparación de abastecimiento Registro-Equipo.....	42

ÍNDICE DE PLANOS

ENSAMBLE	1	Equipo Completo
ENSAMBLE	2	Techo de la Cámara
ENSAMBLE	3	Colector Solar
ENSAMBLE	4	Bancada del Colector
ENSAMBLE	5	Bancada de la Cámara
ENSAMBLE	6	Cámara de Secado
PLANO	1	Techo de la Cámara
PLANO	2	Colector Solar
PLANO	3	Bancada del Colector
PLANO	4	Bancada de la Cámara
PLANO	5	Cámara de Secado
PLANO	6	Soporte de las Bandejas
PLANO	7	Bandejas de Cacao
PLANO	8	Planchas Desviadoras de Aire

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Definición del Problema

Los pequeños agricultores de cacao del litoral ecuatoriano, especialmente en las comunidades agrícolas de la provincia del Guayas, aprovechan generalmente la alta incidencia de radiación solar para secar su producto. Sin embargo, el agricultor carece de infraestructura apropiada en el proceso de secado, recurriendo a métodos convencionales como el uso de tendales donde existe contaminación física y se descuidan parámetros de calidad técnicos propios del grano como humedad, plagas y deterioro, que llegan a ponerlo en desventaja al momento de vender a terceros como a mercados locales o empresas exportadoras.

1.2 Justificación del proyecto

El modelo de negocio de los pequeños agricultores es la venta de cacao seco por quintal ya sea a mercados locales o empresas exportadoras. Este quintal tiene un valor económico influenciado por el mercado extranjero, el cual tiende a disminuir por castigos como lo son la humedad, impurezas y moho.

El agricultor recurre al método convencional como es el uso de tendales debido a la limitación en adquisición de equipos que garantizan mejores resultados en cuestiones técnicas del grano y tiempo del proceso.

Por ello la unión de ciertas características de las soluciones existentes en el mercado se propone el uso de secadores solares con colector/almacenador donde se aproveche la radiación solar (energía limpia) y así cumplir con los parámetros que rigen en la venta del quintal de cacao seco.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un prototipo de secador solar indirecto con convección natural para el secado del cacao con colector/almacenador en lecho de rocas, con una capacidad de 40 kg.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Establecer la curva de velocidad de secado del cacao, la humedad inicial, la humedad de equilibrio, el tiempo mínimo de secado, la energía mínima requerida para satisfacer los requerimientos del proceso.
2. Establecer el comportamiento térmico del colector, tomando en cuenta las condiciones ambientales de la zona de implantación y el almacenamiento en la placa absorbedor.
3. Simular las diferentes variables que influyen en la eficiencia del colector y el almacenamiento de energía como también la obtención de las curvas que permitan la selección de una óptima geometría.
4. Realizar un estudio económico y factibilidad de construcción del secador en base a la disponibilidad local de insumos.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Cacao (*Theobroma Cacao* L.)

El cacao es un árbol tropical perenne perteneciente a la familia *Malvaceae sensu lato*. Es nativa de regiones húmedas neotropicales en las latitudes entre 20° S y 20° N, y su consumo ha ido en gran crecimiento en América Latina desde los tiempos de los Olmecas, Toltecas, Mayas y Aztecas [1], [2]. Es un árbol con flores pequeñas observables en sus ramas, los cuales producen mazorcas con granos internos cubiertos de pulpa rica en azúcar [2].

Es comúnmente conocido que la variación actual de esta planta resultó de la hibridación de diversas especies previas, y aún se sigue experimentando con la misma. En la región amazónica del continente es donde se encuentra más variabilidad del cacao, por lo que se considera al lugar como el centro de

mayor diversidad de esta especie. Algunos de los cambios presentes son grandes cambios morfológicos además de resistencia variada a plagas locales [1].

Las semillas de cacao se utilizan en la producción de una variedad de chocolates, además de que son fuente de carbohidratos, grasas, proteínas, minerales naturales, flavonoides, los cuales son materia prima para una industria multimillonaria altamente competitiva [1].

Las características más relevantes de este cacao se listan en la Tabla 1.1:

Tabla 1.1. Parámetros físicos y termodinámicos del grano de cacao [2]–[4]

Parámetro	Unidades	Valor
Humedad, recién cosechado	-	~ 85%
Densidad de grano seco	kg/m ³	635
Densidad de grano fermentado	kg/m ³	775
Densidad de grano húmedo	kg/m ³	900
Peso de Grano Seco	g	110 – 125
Capacidad Calorífica de grano seco	J/kg · K	1373
Conductividad Térmica de grano seco	W/m	0.2453

1.4.2 Cacaos Ecuatorianos

El cacao presenta 2 variedades principales en el país: el Cacao Nacional y el Cacao Trinitario. Sin embargo, existe una tercera variedad que es la más comercializada, la variedad Cacao CCN-51, la cual se introdujo al país como hibridación genética de otras variaciones naturales existentes. De los granos mencionados, los más comercializados son el Cacao Nacional y el 'CCN 51' (Colección Castro Naranjal #51) [1], [2].

El Cacao Nacional, también conocido como Fino de Aroma es el producto emblema de Ecuador, aquel que se procesa con altos estándares de calidad con el objetivo de exportarlo. Este cacao se lo categoriza también como Sabor 'Arriba' de acuerdo con estándares internacionales [1], [2]. Este grano es el de mayor calidad producido en el país y es el que se dedica exclusivamente para exportación, debido a los altos estándares de calidad requeridos por el mercado internacional. Sin embargo, es más difícil de cultivar y crecer efectivamente, por lo que, en volumen de ventas, no es el más comercializado a nivel nacional por agricultores pequeños o independientes.

El Cacao 'CCN 51' es la variedad de mayor comercialización nacional, debido principalmente a su alta productividad y resistencia a plagas, pero también es conocido por ser una semilla de menor calidad y sabor que el Fino de Aroma. Este cacao fue obtenido por H. Castro en los años 60 gracias al cruce experimental de diversas variantes conocidas previamente, buscando sus características principales descritas anteriormente [5]. Con los tratamientos adecuados, las semillas se fermentan y secan en menos tiempo (4 días) que otros granos (6 días o más), pero no llegan a satisfacer los requerimientos de acidez y sabor requeridos a nivel internacional. [1], [5].

Dado que el grano 'CCN 51' es la variedad más común, barata y fácil de producir, se consideró este como el producto manejado por este proyecto.

En la Figura 1.1 se muestran los dos tipos de granos mencionados, donde se puede apreciar las diferencias visuales entre ambas, como el color, el tamaño y la forma de las mazorcas.

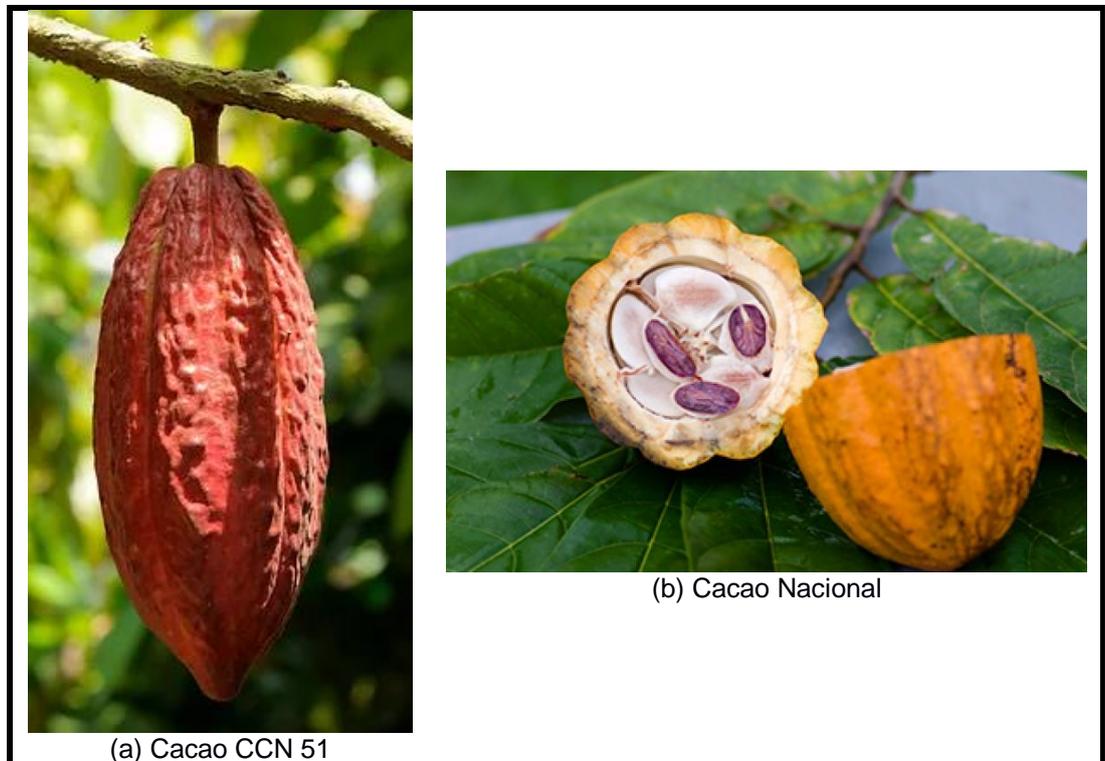


Figura 1.1. Mazorcas de Cacao. [2], [5]

1.4.3 Cultivo y Cosecha de Cacao en Ecuador

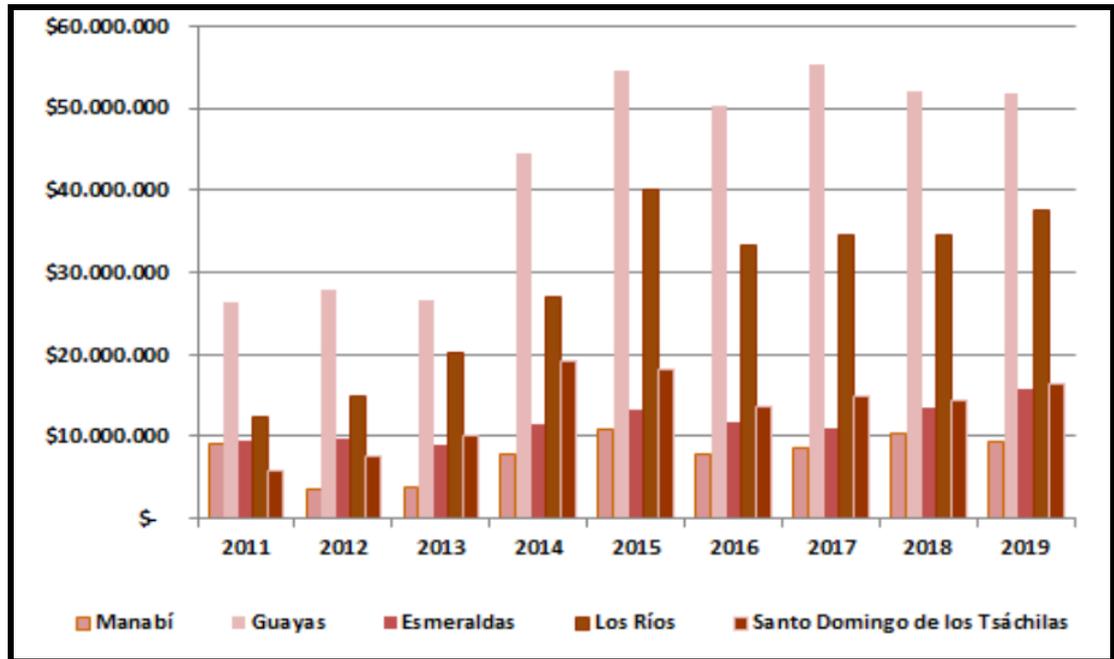


Figura 1.2. Provincias con mayor volumen de ventas de empresas dedicadas al cultivo de cacao (2010-2019). [6]

Tal como se aprecia en la Figura 1.2, la mayor producción de cacao se realiza principalmente en las provincias de Santo Domingo de los Tsáchilas, Los Ríos, Esmeraldas, Guayas y Manabí [2], [6].

1.4.4 Comercialización del Grano de Cacao Ecuatoriano

Según información de la International Cocoa Organization (ICCO), en el año 2018/2019 el Ecuador produjo un total de 322 mil toneladas de granos de cacao, nacional y CCN 51, representando el 7% de la producción mundial, ubicándose, así como el tercer mayor productor de cacao [7].

Para el 20 de noviembre del 2021, el precio del grano de cacao nacional en el mercado internacional es de \$2 580 por tonelada [7].

1.4.5 Entes Reguladores del Manejo de Cacao en Ecuador

En el país existen varios entes, agencias y asociaciones encargadas de establecer las normas a utilizar, además de brindar guías prácticas para realizar un buen cultivo y cosecha del cacao.

Agencia de Regulación y Control Fito y Zoosanitario (AGROCALIDAD):

Esta agencia gubernamental es la encargada del control y regulación para la protección y el mejoramiento de la sanidad animal, sanidad vegetal e inocuidad alimentaria. Las normas que establecen suelen ser adaptaciones o traducciones de las normas internacionales de la ISO, las cuales se registran en el Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN). Los reglamentos que involucran el manejo de cacao son las siguientes [8]:

- NTE INEN 173. Cacao en Grano. Determinación de la Humedad.
- NTE INEN 175. Cacao en Grano. Ensayo de Corte.
- NTE INEN 176. Granos de Cacao. Requisitos.
- NTE INEN 177. Cacao en Grano. Muestreo.
- Manual de Aplicabilidad de Buenas Prácticas Agrícolas para Cacao – 2018 [9].
- Guía de Buenas prácticas Agrícolas para Cacao. Resolución Técnica N° 0183. Inocuidad de Alimentos – 2012 [10].

Asociación Nacional de Exportadores de Cacao (ANECACAO)

Esta es una asociación sin fines de lucro de empresarios exportadores e industriales, la cual se encarga de trabajar por el bienestar del desarrollo del sector productor y exportador de cacao del Ecuador. Esta institución ofrece asistencia técnica, registro de estadísticas de exportaciones, precio del cacao en el mercado internacional, información legal como las normas de AGROCALIDAD, insumos agrícolas, entre otros. [2].

Unión de Organizaciones Campesinas Cacaoteras (UNOCACE)

Esta es una organización de asociaciones cacaoteras rurales, representativa de la economía popular y solidaria, orientada a albergar y comerciar con pequeños productores de cacao de diversas provincias del Litoral del Ecuador. Esta institución trabaja directamente con los agricultores independientes para asegurarse de comercializar producto de calidad y poder exportarlo con todas las certificaciones requeridas a nivel internacional. Se ofrecen servicios de asistencia técnica, fortalecimiento asociativo y, sobre todo, industrialización del procesamiento de cacao descrito por

AGROCALIDAD, por lo que ellos compran el grano recién cosechado a un precio razonable, para encargarse de tratarlo en instalaciones propias. Las certificaciones internacionales con las que cuentan son: Orgánica, Fairtrade y SPP [11].

1.4.6 Procesamiento del Cacao

Debido a la importancia del producto ecuatoriano para el mercado internacional, todos los pasos de la producción de cacao están regularizadas por AGROCALIDAD y supervisadas por asociaciones relevantes, con el fin de satisfacer los estándares de calidad de los compradores. Las instrucciones de procesamiento vienen desde la etapa de preparación de suelo y cultivo hasta el empaquetamiento y comercialización [9].

En la Figura 1.3 se muestra un diagrama de flujo del procesamiento del cacao luego de su cosecha. Principalmente, se pueden apreciar las siguientes etapas [9], [10]:

- Cosecha: recolección de las mazorcas en las plantaciones.
- Preparación de Mazorcas: clasificación visual de las mejores mazorcas y extracción de los granos correspondientes.
- Fermentación: fermentación de los granos de acuerdo con guías de AGROCALIDAD.
- Secado: secado de los granos de acuerdo con guías de AGROCALIDAD.
- Selección del Grano: limpieza y selección de granos enteros sin daño luego del secado.
- Almacenamiento: empaque y almacenamiento de los granos de acuerdo con guías de AGROCALIDAD.
- Comercialización: transporte inocuo, comercialización, y certificaciones de calidad en caso de ser producto orientado a exportación.

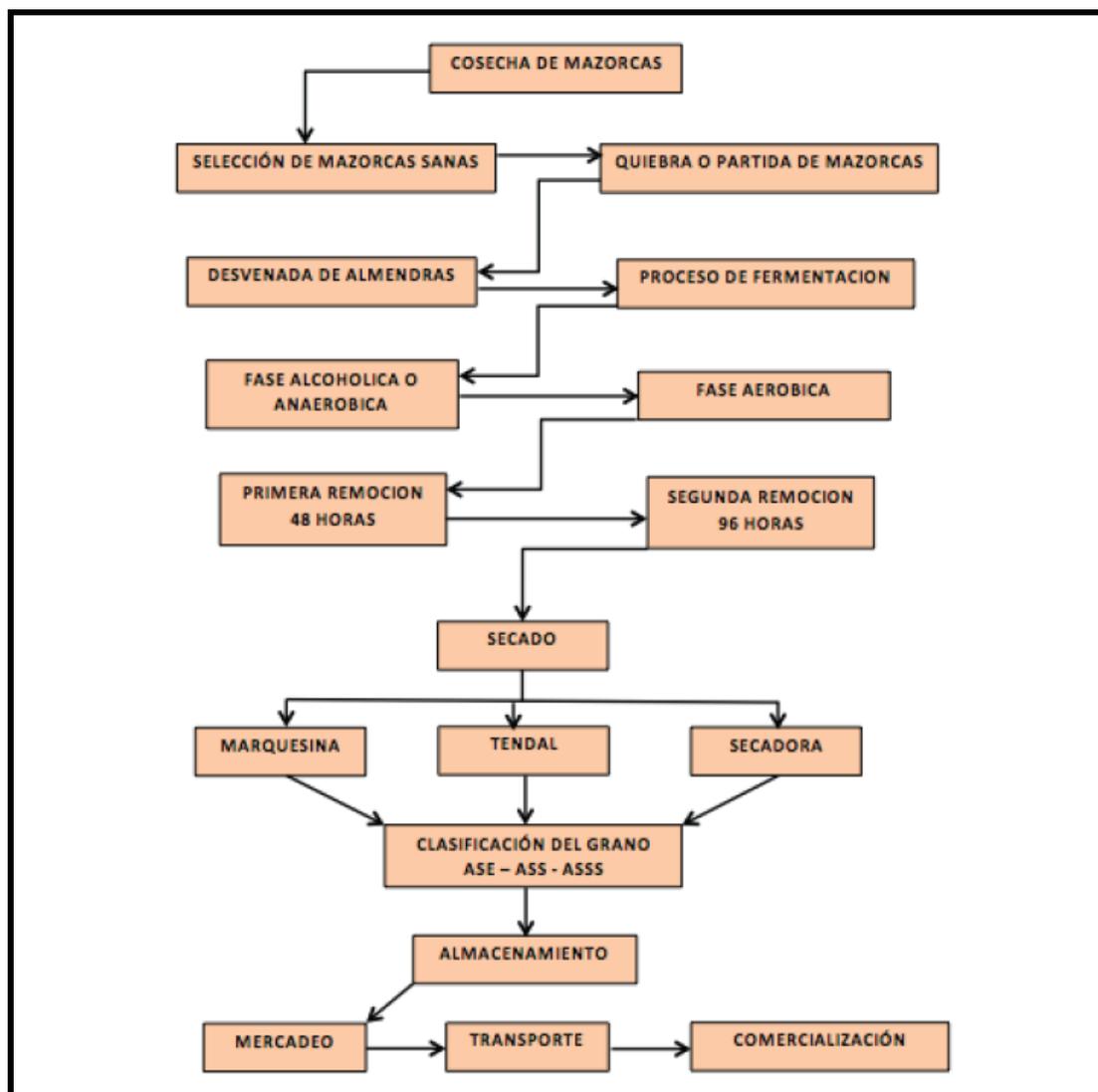


Figura 1.3. Flujo del Manejo Poscosecha del Cacao. [9]

1.4.7 Técnicas de Secado de Cacao Actuales en Ecuador

Luego de la fermentación, los cacaos son secados, preferiblemente al sol, durante cinco a siete días. Existen diferentes técnicas de secado, pero la más común es esparcir los granos en mantas, bandejas o pisos de concreto. El secado detiene el proceso de fermentación y mejora la capacidad de almacenar los granos. Durante el proceso, los granos se voltean o rastrillan para asegurar aireación y uniformidad del secado. La tasa de secado durante este proceso es importante para la calidad final de los granos. No debe ser muy rápido para evitar un sabor ácido, pero si es muy lento, resultará en poca acidez, un color pobre y una alta presencia de moho [12].

Las técnicas de secado que se utilizan, tanto a pequeña escala (agricultores independientes) como a gran escala (empresas comercializadoras y exportadoras), ilustradas en la Figura 1.4, son [9], [10]:

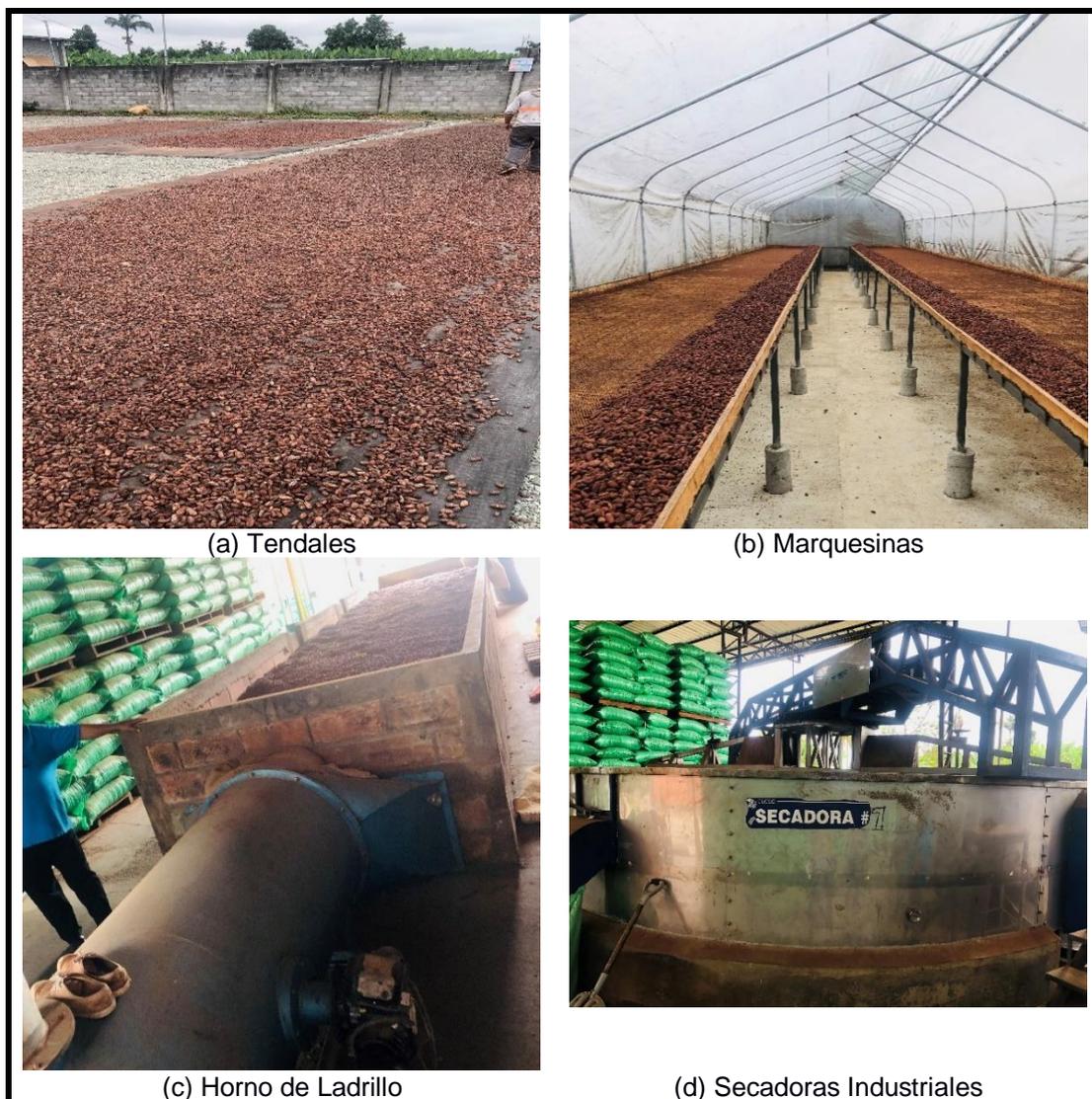


Figura 1.4. Cuatro métodos de secado comunes. [Elaboración Propia]

- Tendales: Plataformas de madera, cemento o caña de azúcar, cubiertas con plástico semi-térmico negro. Las semillas se colocan encima del plástico. El secado se realiza con luz solar y calor.
- Marquesina: Invernaderos pequeños hechos de acero, plástico y madera. Las semillas de cacao se apilan en bandejas largas de madera. El secado se realiza con la luz solar y calor encerrado.
- Secadoras Industriales: Tanque circular grande de aluminio con aspas en el centro para remoción de las semillas. El secado se realiza con aire calentado por gas en una caldera adjunta.

- Horno de Ladrillo: Horno semiabierto de ladrillo con espacio inferior para circulación de aire. El secado se realiza con aire calentado por Diesel.

1.4.8 Secador Solar

Un secador solar es un equipo que recibe radiación solar y lo transforma en energía térmica que se invierte en calentar un sólido y remover humedad de este. Esto se logra mediante la aplicación directa de la energía sobre el producto o mediante el intercambio indirecto a través de un fluido intermedio, como aire seco [13].

Existen tecnologías para el secado solar, pero considerando un método indirecto, lo más común es trabajar con un colector solar adjuntado a la cámara de secado. Este colector tiene un elemento absorbedor de energía, el cual es un material con una capacidad calorífica elevada, que funciona para aumentar la transferencia de calor al fluido involucrado, aún en momentos en los que haya poco sol [13].

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Alternativas de solución del problema

Mediante simple inspección, se propusieron cuatro alternativas para solucionar el problema de secado. En todos los casos se trató de tomar en cuenta la ubicación que tendrá el equipo, los materiales y fuentes de energía disponibles, así como la facilidad de uso para los agricultores.

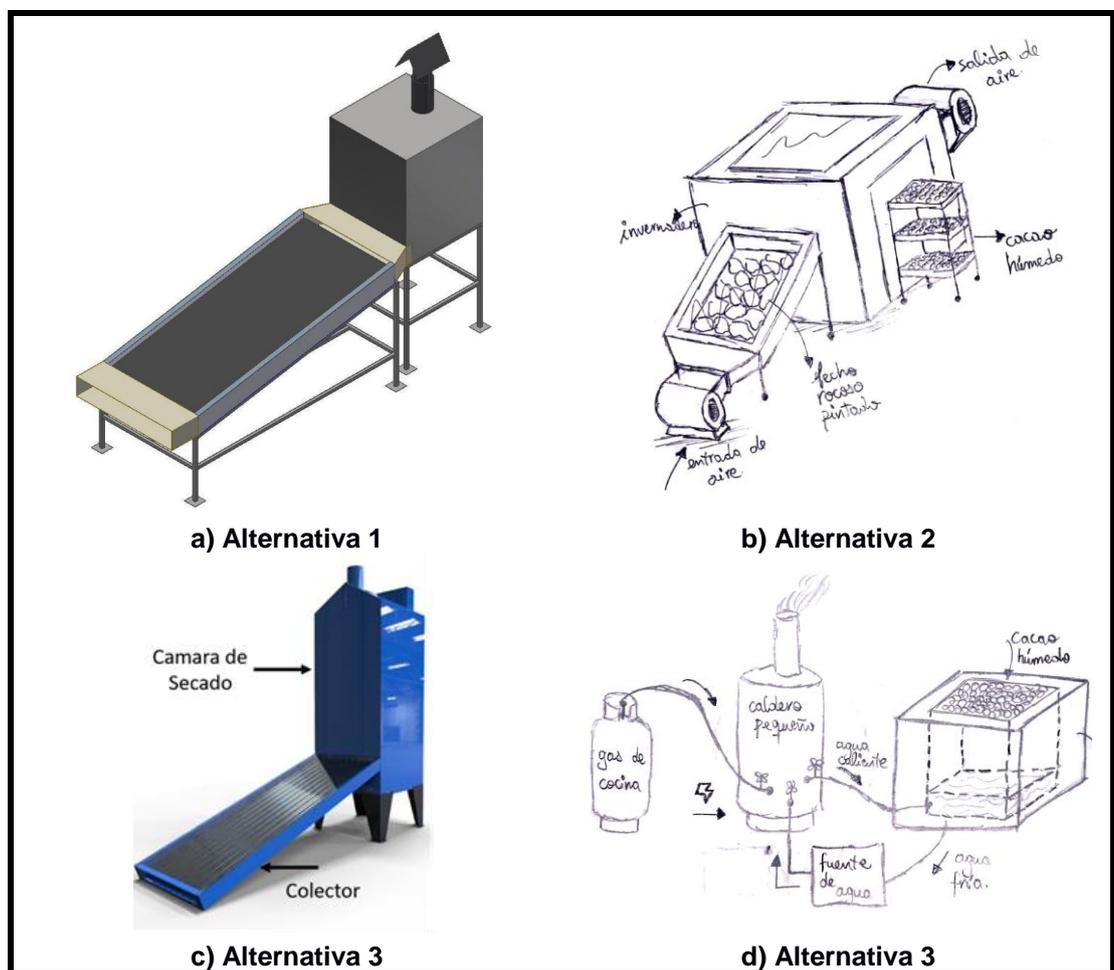


Figura 2.1. Diagramas de las Alternativas de Solución Propuestas.
[Elaboración Propia]

Las alternativas propuestas fueron las siguientes (ilustradas en la Figura 2.1, y con mayor detalle en el Apéndice F):

- Alternativa 1: Colector solar con lecho rocoso con capacidad para un quintal y secado indirecto mediante tiro natural de aire ambiente.

- Alternativa 2: Colector solar con lecho rocoso con capacidad para un quintal y secado indirecto mediante tiro forzado de aire ambiente.
- Alternativa 3: Colector solar con placa absorbadora corrugada con capacidad para un quintal y secado indirecto mediante tiro natural de aire ambiente
- Alternativa 4: Horno a gas escalable para capacidad de un quintal.

2.2 Selección de la mejor alternativa de solución

2.2.1 Requerimientos del Cliente

Tabla 2.1. Descripción de los Requerimientos del Cliente [Elaboración Propia]

Categoría	Requerimiento	Descripción	Pesos (%)	Importancia	
Cuidado del Cacao	1	Trabajo en condiciones climáticas adversas	Poder trabajar con variaciones de lluvia y de sol	7.60	2
	2	Manejo apropiado del cacao	Se debe tratar higiénicamente al cacao y no estropearlo	14.10	3
Facilidad de Uso	3	Facilidad de manejo del equipo	Debe ser fácil de usar por agricultores, además de limpiar	3.91	1
	4	Tiempo de Secado	Tratar de que seque rápido	1.85	1
Costos	5	Costo de mantenimiento del equipo	Tratar de que el costo de mantenimiento sea barato, la frecuencia baja y fácil de realizar	3.18	1
	6	Costo del equipo	Tratar de que el precio sea barato	13.96	3
	7	Accesibilidad de la fuente de energía	La fuente de energía debe estar disponible en su sector y ser barata	9.16	2
	8	Diseño innovador	Se necesita que el diseño sea nuevo (tesis)	9.51	2
Desempeño	9	Impacto ambiental	Debe tener el menor impacto ambiental posible	11.28	3
	10	Capacidad de trabajar a pequeña escala	Debe poder trabajar con 1 quintal a la vez	25.46	5

Basados en entrevistas con algunos clientes, detalladas en el Apéndice A, un agricultor independiente y una empresa comerciante de cacao, se definieron los requerimientos de cliente detallados en la Tabla 2.1 agrupados en 4 categorías con pesos relativos correspondientes. Basados en estos pesos, se

calculó la importancia en una escala del 1 al 5, cuyos valores fueron utilizados en la casa de Calidad. El detalle de estos cálculos se puede encontrar en el Apéndice B.

2.2.2 Especificaciones Técnicas

Al igual que los requerimientos de los clientes, las especificaciones técnicas necesarias para satisfacerlos se obtuvieron a través de las conversaciones con diversos clientes. Estas especificaciones se detallan en la Tabla 2.2. En esta lista se consideraron restricciones aplicadas por normativas, tecnologías aplicables, dimensiones y materiales, entre otros. El cálculo del orden de importancia se detalla en el Apéndice B.

Tabla 2.2. Detalle de las Especificaciones Técnicas [Elaboración Propia]

Número	Especificación Técnica	Orden de Importancia
1	Fuente de energía	1
2	Material de bandejas para cacao	11
3	Temperatura del aire caliente	9
4	Dimensiones del equipo	3
5	Radiación solar recibida	6
6	Velocidad de secado	7
7	Humedad Final del Cacao	4
8	Aislamiento térmico	10
9	Forma de calentamiento del aire	2
10	Sistema de control del equipo	8
11	Equipo impermeable	5

2.2.3 Matriz de decisión

Según [14], las especificaciones técnicas se utilizan como Criterios de Diseño en la matriz final de decisión para elegir entre las alternativas de solución propuestas. Dadas las 11 especificaciones definidas con sus pesos de importancia calculados, se procedió a elaborar la matriz de decisión descrita en la Tabla 2.3:

Tabla 2.3. Matriz de Decisión para las Alternativas de Diseño [Elaboración Propia]

Alternativas	Criterios de Diseño											Puntaje Neto
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	13.9 %	5.5 %	6.6 %	10.7 %	9.1 %	8.9 %	9.9 %	5.6 %	13.3 %	6.8 %	9.7 %	
1	10	6	6	4	10	6	8	10	10	8	10	8.18
2	6	6	8	6	10	8	8	8	8	4	6	7.11
3	8	6	6	4	10	4	4	8	8	8	8	6.76
4	6	8	10	8	4	8	6	6	6	4	6	6.45

2.3 Diseño de concepto

De la matriz de decisión, se aprecia que el diseño ganador es la Alternativa 1, el cual se ilustra en la Figura 2.2:

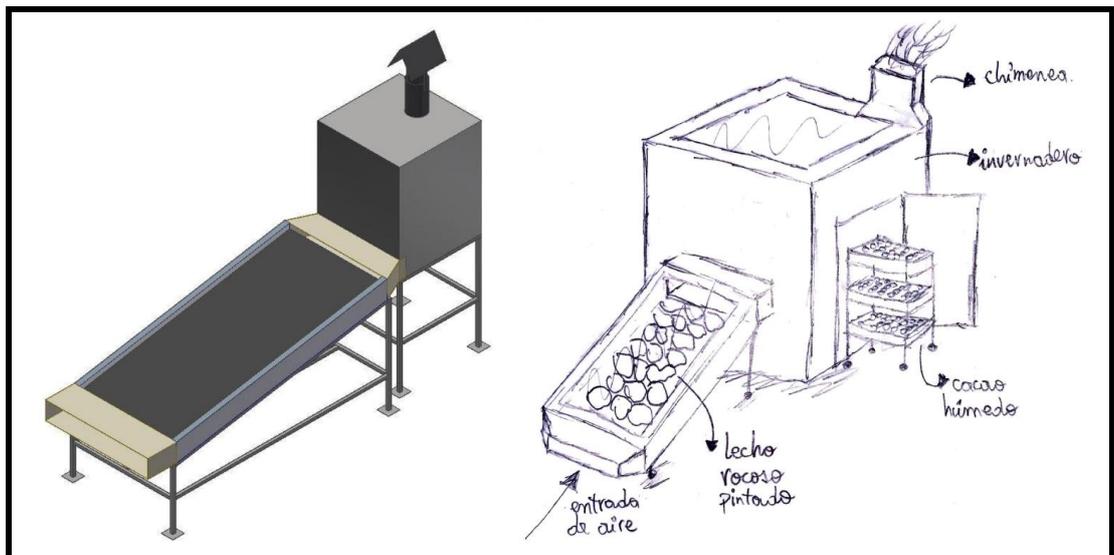


Figura 2.2. Diseño de Concepto de la Alternativa Seleccionada. [Elaboración Propia]

En el diseño del equipo se consideraron 5 componentes principales para su funcionamiento, los cuales son: la Cámara de Secado, el Colector Solar, las Bandejas con Cacao, la Chimenea y la Bancada, los cuales se presentan en la Figura 2.3. Sin embargo, el proceso de diseño se enfocó principalmente al aspecto termodinámico del mismo, por lo que se realizó un proceso detallado de los cuatro primeros elementos.

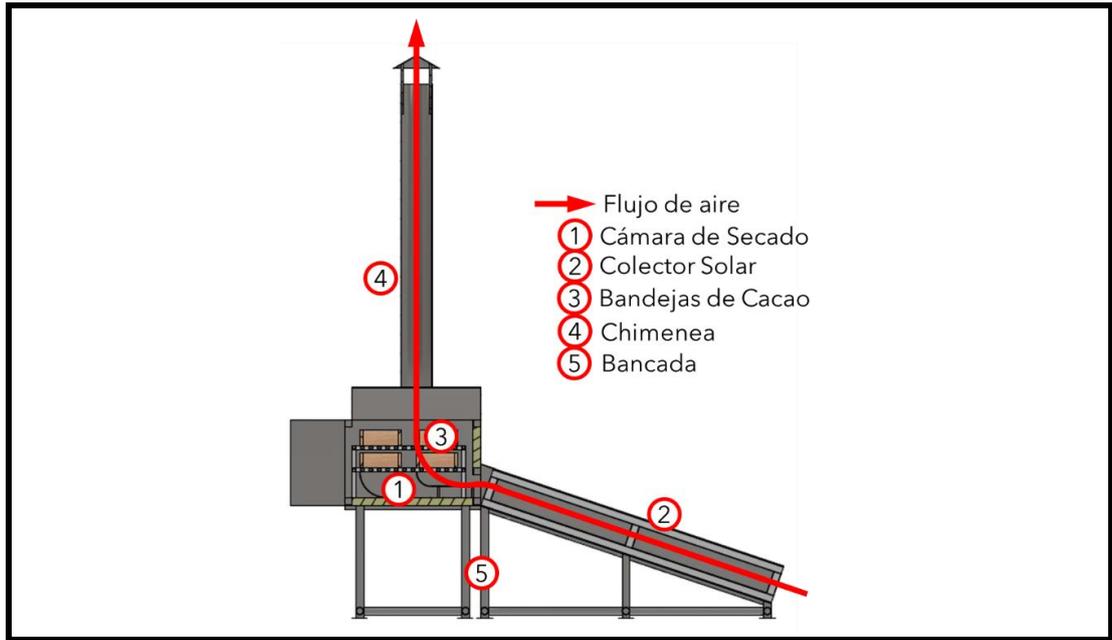


Figura 2.3. Esquema de las partes principales del equipo. [Elaboración Propia]

2.4 Metodología de Diseño del Equipo

Tal como se presenta en la Figura 2.4, primero fue necesario tomar decisiones de diseño, en las cuales estuvieron basadas en entrevistas con clientes y contactos externos descritas en el Apéndice A. Las decisiones que se debieron tomar fueron:

- Ubicación Geográfica
- Tiempo de Secado Deseado

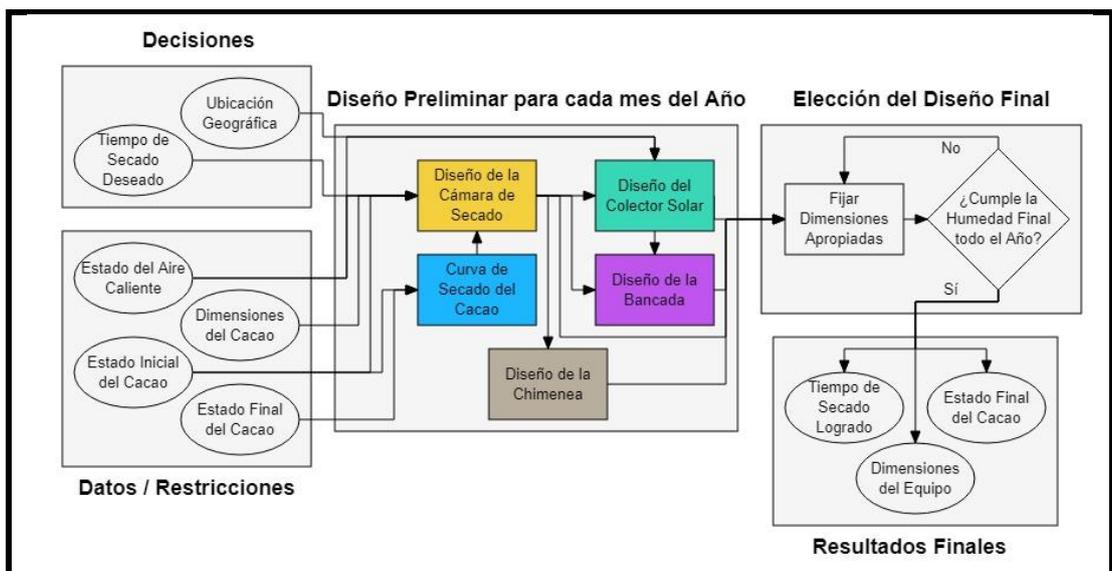


Figura 2.4. Diagrama de Flujo Completo del Proceso Diseño del Equipo. [Elaboración Propia]

En cuanto a restricciones, se tomó la retroalimentación obtenida de las entrevistas (Apéndice A) y los resultados de la investigación de normativas y se llegó a los siguientes parámetros:

- Estado del Aire Caliente: Temperatura de 50°C [9], [10]
- Dimensiones del Cacao: Se tomaron dimensiones promedio para granos de cacao. [11]
- Estado Inicial del Cacao: La humedad inicial del cacao se obtuvo de las prácticas comunes de agricultores y de las normas INEN: 65%. [2], [11]
- Estado Final del Cacao: La humedad final del cacao se obtuvo de las normas INEN: 7%. [9], [10]

2.5 Condiciones Geográficas y Ambientales de Operación del Equipo

Para generalizar la operación de cosecha y secado de cacao, se consideró la ubicación de la asociación UNOCACE, en la localidad de El Deseo, Guayas, debido a que en ese lugar se realiza un acopio de producto de diferentes sectores de la región Costa para su posterior procesamiento y comercialización. En la Figura 2.5 se muestra una vista satelital del lugar elegido. La ubicación geográfica de este lugar es la siguiente:

- Latitud (φ): -2.125°
- Longitud: -79.585°
- Elevación: 16 metros.

Para esta localidad, se buscaron las condiciones meteorológicas históricas en bases de datos. Existiendo un amplio rango temporal de esta información, se optó por usar el promedio de los últimos 5 años. Los resultados se ubicaron en la Tabla 2.4.

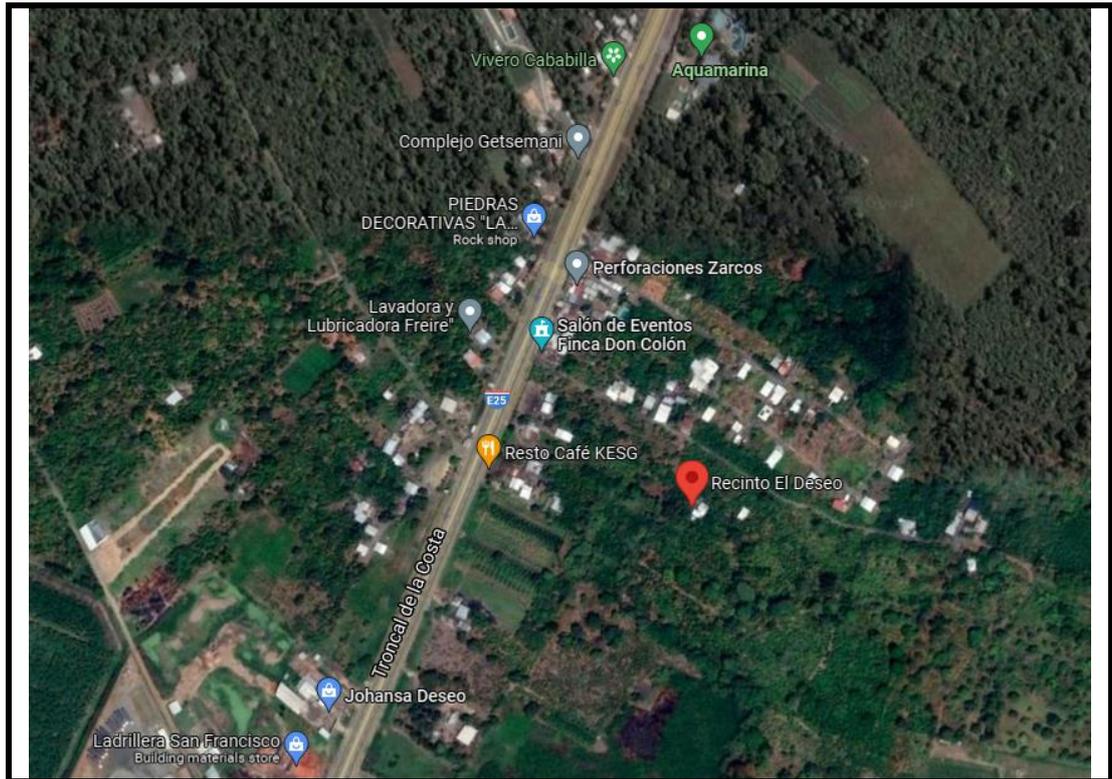


Figura 2.5. Ubicación Geográfica del lugar de operación del Equipo. [15]

Tabla 2.4. Condiciones Meteorológicas mensuales de “El Deseo” [16], [17]

Mes	Temperatura de Bulbo Seco T (°C)	Temperatura de Bulbo Húmedo T_w (°C)	Irradiación Solar Global Diaria I''_0 (MJ/m ² /día)	Horas de Heliofanía h_{hel} (h/mes)	Velocidad del Viento u_∞ (m/s)
Enero	23.2	20.7	14.0	28	2
Febrero	23.0	21.4	13.6	60.7	2.3
Marzo	22.6	21.2	10.0	47.8	2.0
Abril	22.9	21.1	15.0	80	2
Mayo	23.2	20.9	13.6	55.5	1.9
Junio	23.3	20	12.5	36.8	1.9
Julio	23.6	19.6	12.3	35.8	1.9
Agosto	24.0	19.3	14.5	70.7	2.1
Septiembre	24.2	19.5	15.0	58	2
Octubre	23.7	19.6	10.0	43.3	2.5
Noviembre	23.1	19.4	15.0	56	2
Diciembre	23.4	20.1	14.1	110.9	2.6

La irradiación solar cae perpendicularmente hacia el suelo. De acuerdo con los datos presentados, se puede estimar la cantidad de radiación por unidad de área promedio en cada mes de la siguiente forma:

$$I'' = \frac{I''_0}{h_{hel}} \quad (2.1)$$

Donde:

- I_0'' : Promedio de Irradiación Solar Global diaria [$J/m^2/dia$]
- I'' : Promedio de Irradiación Solar Global mensual [W/m^2]
- h_{hel} : Horas de Heliofanía al mes [h/mes]

2.6 Curva de Secado del Cacao

La curva de secado para este proceso se podía obtener de dos formas: el primer método, por experimentación directa con la utilización de espectrómetros, termómetros infrarrojos y medidores de humedad para construir una curva precisa; y el segundo método, simplemente utilizando los resultados más aproximados de algún estudio que ya haya realizado este experimento [18]. De esta curva, el parámetro más importante que se esperaba obtener era la Humedad Crítica del Cacao, la cual representa el punto en el que la velocidad de secado se vuelve constante debido a que la superficie del grano se está secando [18], [19]. En la **Figura 2.6** se resume este proceso:



Figura 2.6. Diagrama de Flujo para la Obtención de la Curva de Secado.
[Elaboración Propia]

2.7 Diseño de la cámara de secado

La metodología para el diseño de la Cámara de Secado fue dimensionar la cámara y las bandejas en función de la cantidad de cacao por secar, calculando el ritmo de evaporación de la humedad en los granos y, con esta información, estimar las condiciones de salida del aire húmedo, además del flujo másico requerido para secar el producto en un cierto tiempo establecido.

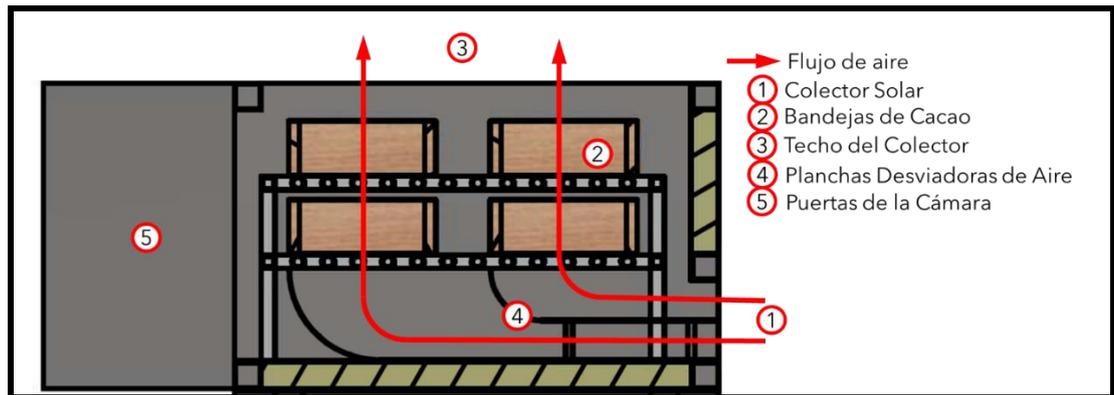


Figura 2.7. Esquema de las partes principales de la Cámara de Secado.
[Elaboración Propia]

En la Figura 2.7 se muestran los elementos principales de la cámara de secado, los cuales son: las bandejas, las placas desviadoras de aire, el soporte de las bandejas y las puertas de la cámara. En la Figura 2.8 se muestra el proceso de diseño de estos elementos.

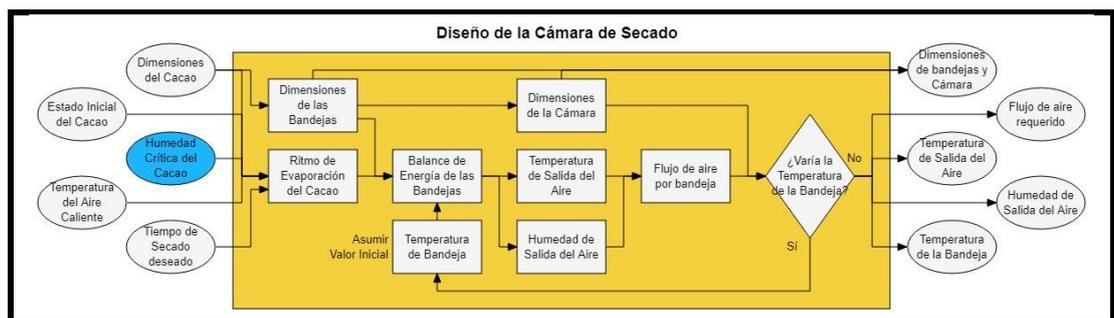


Figura 2.8. Diagrama de Flujo para el Diseño de la Cámara de Secado.
[Elaboración Propia]

2.7.1 Caracterización de la Carga de Trabajo (Granos de Cacao)

Los granos de cacao fueron asumidos como elipsoides con dimensiones promedio tomadas de UNOCACE listadas en la Tabla 2.5. Estas medidas se pueden apreciar en la Figura 2.9:

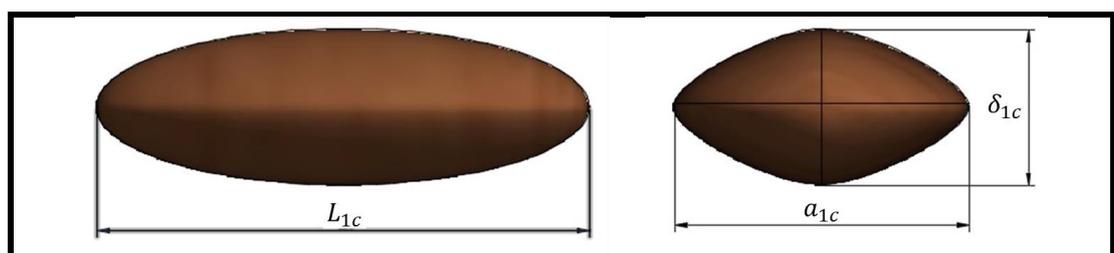


Figura 2.9. Dimensiones de un grano de Cacao. [Elaboración Propia]

Tabla 2.5. Dimensiones Promedio de un Grano de Cacao [11]

Parámetro	Unidades	Símbolo	Valor
Longitud de un Grano	[m]	L_{1c}	0.015
Ancho de un Grano	[m]	a_{1c}	0.025
Espesor de un Grano	[m]	δ_{1c}	0.008

2.7.2 Cinética de Secado del Cacao

Para la velocidad de secado, una práctica común es considerar 2 zonas de secado diferentes, la primera a un ritmo constante, y la segunda a un ritmo línea decreciente, en función de la humedad en base seca del sólido. Al realizar estas suposiciones, se define una velocidad crítica de secado, la cual se puede determinar a partir de la masa seca del sólido y las humedades iniciales y finales, y está dada por la siguiente ecuación [18]–[20]:

$$R_c = \frac{m_c}{A_{1sc} n_c t_s} \left[(X_{s0} - X_{cr}) - (X_{cr} - X_{sf}) \ln \left(\frac{X_{sf}}{X_{cr}} \right) \right] \quad (2.2)$$

Donde:

- R_c : Velocidad de Secado [kg/s · m²]
- m_c : Masa seca de cacao [kg]
- A_{1sc} : Área superficial de 1 grano de cacao [m²]
- n_c : Cantidad total de granos de cacao
- t_s : Tiempo de secado [s]
- X_{s0} : Humedad en base seca inicial del cacao.
- X_{cr} : Humedad en base seca crítica del cacao.
- X_{sf} : Humedad en base seca final del cacao.

Con esto se puede determinar el ritmo de evaporación de la humedad del cacao de la siguiente manera:

$$\dot{m}_v = R_c n_c A_{1sc} \quad (2.3)$$

2.7.3 Condiciones de Operación del Flujo de Aire dentro del Equipo

Las condiciones a las que se encontrará sometido el flujo de aire fueron las siguientes (descritos en puntos en la Figura 2.10):

- Estado 0: Condiciones Ambiente.

- Estado 1: Aire a la salida del colector solar, es decir, la entrada de la cámara de secado.
- Estado 2: Aire a la salida de la cámara de secado.

Estos estados se lograron a través de los siguientes procesos:

- Proceso 0-1: Calentamiento del aire a presión y humedad constante.
- Proceso 1-2: Saturación no adiabática del aire a presión constante.

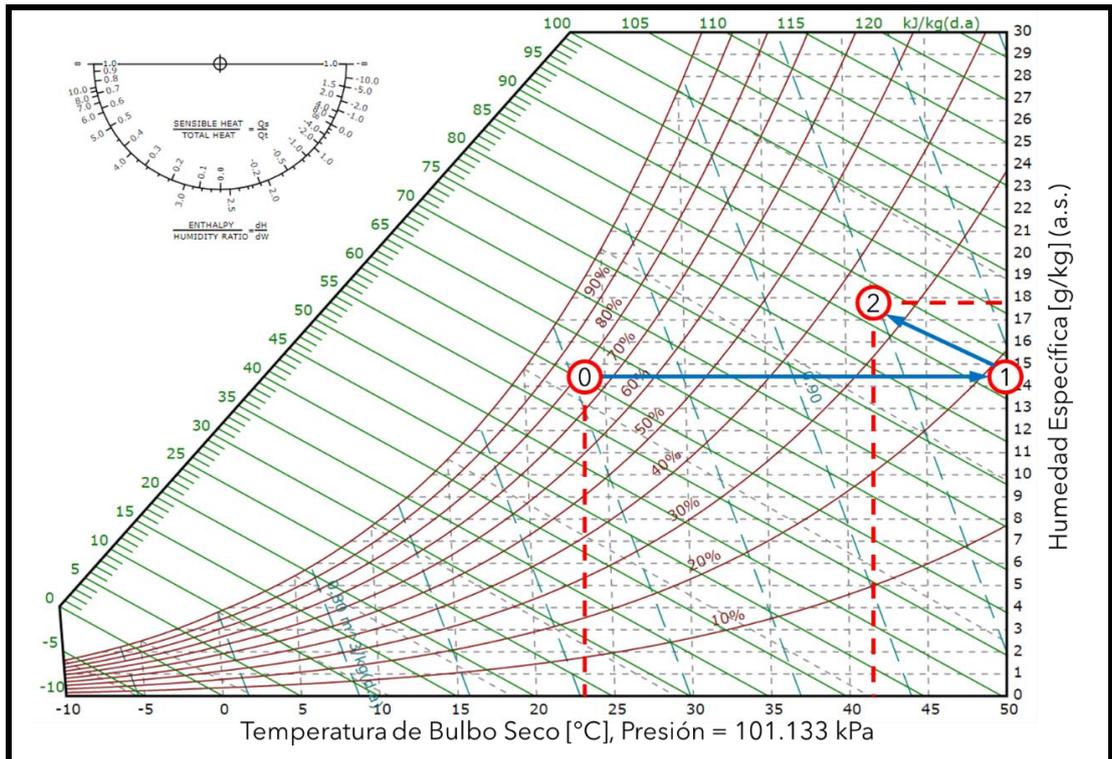


Figura 2.10. Comportamiento del Aire descrito en la Carta Psicrométrica.
[Elaboración Propia]

A partir del ritmo de evaporación de la humedad, se pudo calcular el flujo másico de aire requerido para satisfacer las condiciones de tiempo de secado establecidas en una bandeja:

$$\dot{m}_{a-ban} = \frac{\dot{m}_v}{\omega_2 - \omega_1} \quad (2.4)$$

Donde:

- ω_1 : Humedad Específica del Aire en el Estado 1 [g agua/kg aire]
- ω_2 : Humedad Específica del Aire en el Estado 2 [g agua/kg aire]

2.7.4 Análisis de las Bandejas de Cacao

Asumiendo inicialmente condiciones adiabáticas, se puede modelar el aire circulando a través de las bandejas como un flujo de aire a través de una cama porosa de partículas esféricas, tal como se muestra en la Figura 2.11. De acuerdo con [21], la temperatura del aire luego de atravesar la bandeja de granos de cacao se puede calcular de la siguiente manera:

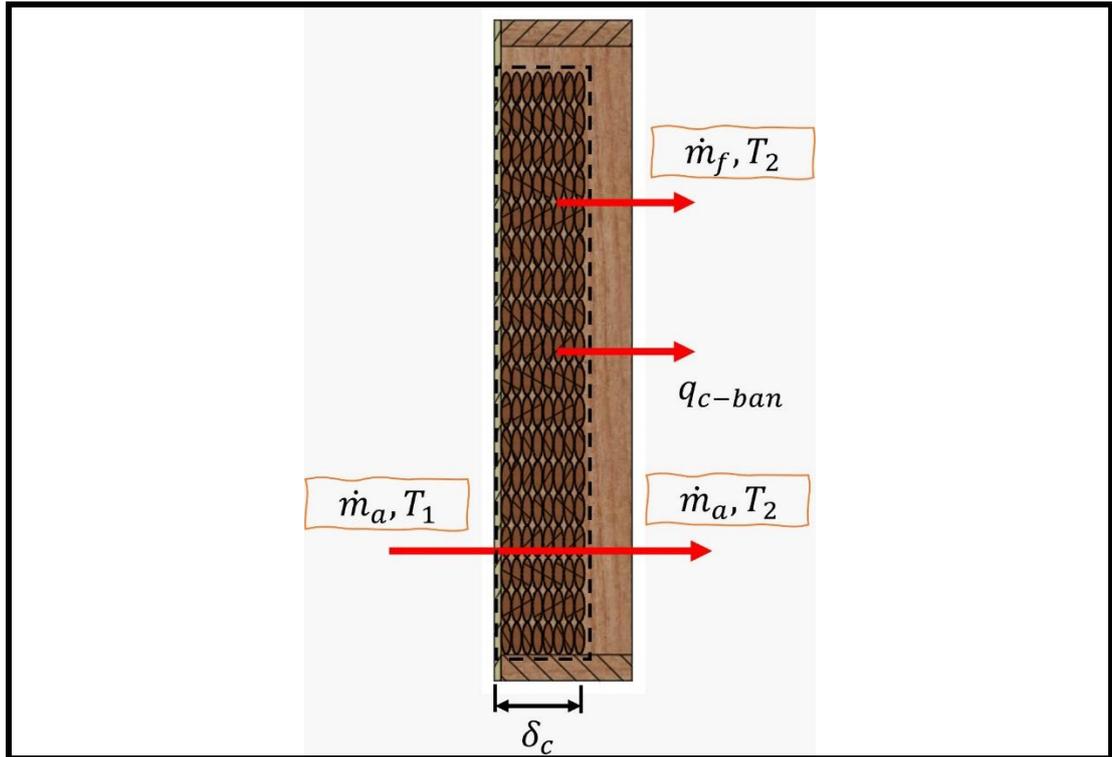


Figura 2.11. Modelo del flujo de aire a través de las bandejas. [Elaboración Propia]

$$\frac{T_{ban} - T_2}{T_{ban} - T_1} = \exp\left(-\frac{h_{c-ban}A_{sc}}{\dot{m}_{a-ban}A_{ban}c_a}\right) \quad (2.5)$$

Donde:

- T_2 : Temperatura del aire luego de atravesar la bandeja [°C]
- T_{ban} : Temperatura del cacao y la bandeja [°C]
- T_1 : Temperatura del aire a la entrada de la cámara de secado [°C]
- c_a : Calor específico del aire [J/kg · K]
- A_{sc} : Área superficial total de los granos de cacao en una bandeja [m²]
- A_{ban} : Área de la bandeja perpendicular al flujo del aire [m²]
- h_{c-ban} : Coeficiente de convección en la bandeja [W/m²K] (Detalle de cálculo en el Apéndice E)

El calor por convección que se entrega por el aire a las bandejas se puede calcular de la siguiente manera:

$$q_{c-ban} = h_{c-ban} A_{sc} \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{T_{ban} - T_1}{T_{ban} - T_2}\right)} \quad (2.6)$$

También fue necesario determinar la humedad del aire luego de remover el agua del cacao. Esto se logró al realizar un balance de energía del flujo de aire en las bandejas, con lo que se puede estimar este valor con la siguiente expresión:

$$\omega_2 = \frac{\omega_1 \left(h_{g1} - h_{f2} + \frac{q_{c-ban}}{\dot{m}_v} \right) - c_a (T_2 - T_1)}{h_{fg2} + \frac{q_{c-ban}}{\dot{m}_v}} \quad (2.7)$$

Donde:

- h_{g1} : Entalpía de vapor saturado del agua en el Estado 1 [J/kg].
- h_{f2} : Entalpía de líquido saturado del agua en el Estado 2 [J/kg].
- h_{fg2} : Entalpía de vaporización del agua en el Estado 2 [J/kg].

2.8 Diseño del Colector Solar

Para el análisis matemático del colector, se realizó un balance energético a los 3 elementos principales del colector: la cubierta de vidrio, el lecho de rocas y el flujo de aire circulando en su interior, como se describe en la Figura 2.12. En estos balances se despreciaron resistencias térmicas de contacto entre los elementos y conducción térmica a lo largo de las paredes. En la Figura 2.13 se muestra el diagrama de flujo del proceso de diseño de este componente, donde el análisis energético se describe en la Figura 2.14, Figura 2.15 y Figura 2.16, para la cubierta, el lecho de rocas y el flujo de aire, respectivamente.

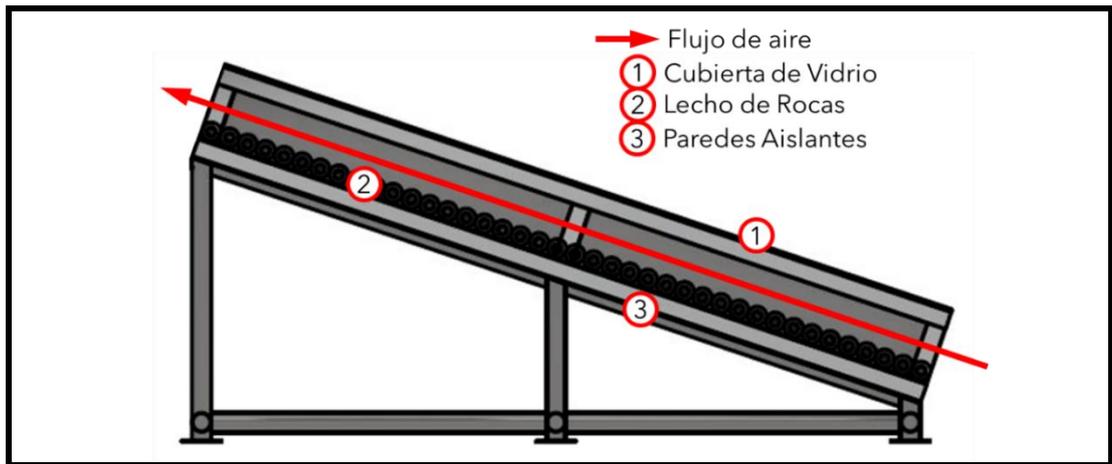


Figura 2.12. Esquema de las partes principales del colector solar. [Elaboración Propia]

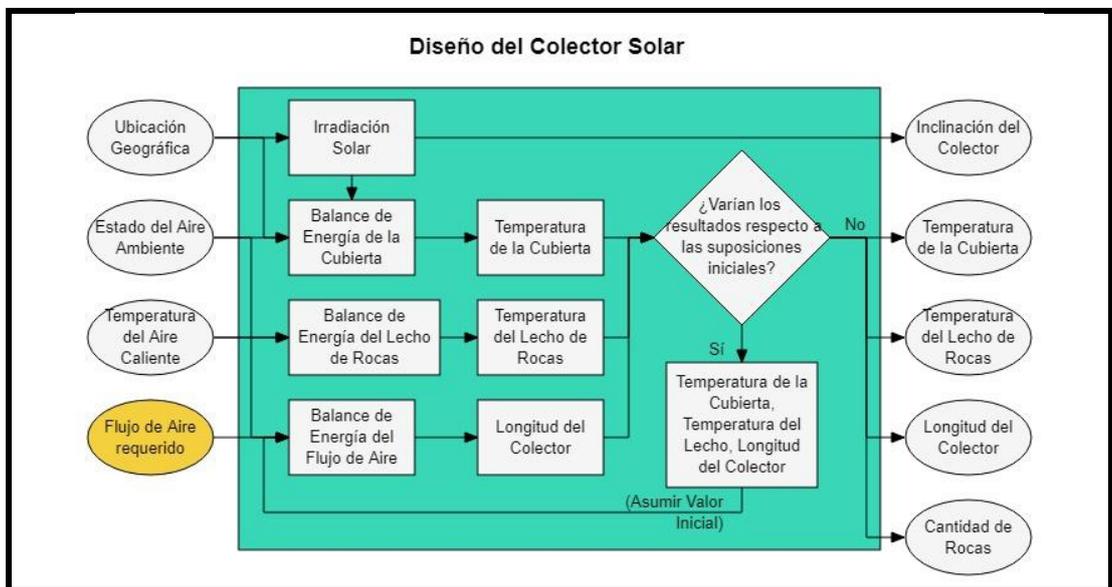


Figura 2.13. Diagrama de Flujo para el Diseño del Colector Solar. [Elaboración Propia]

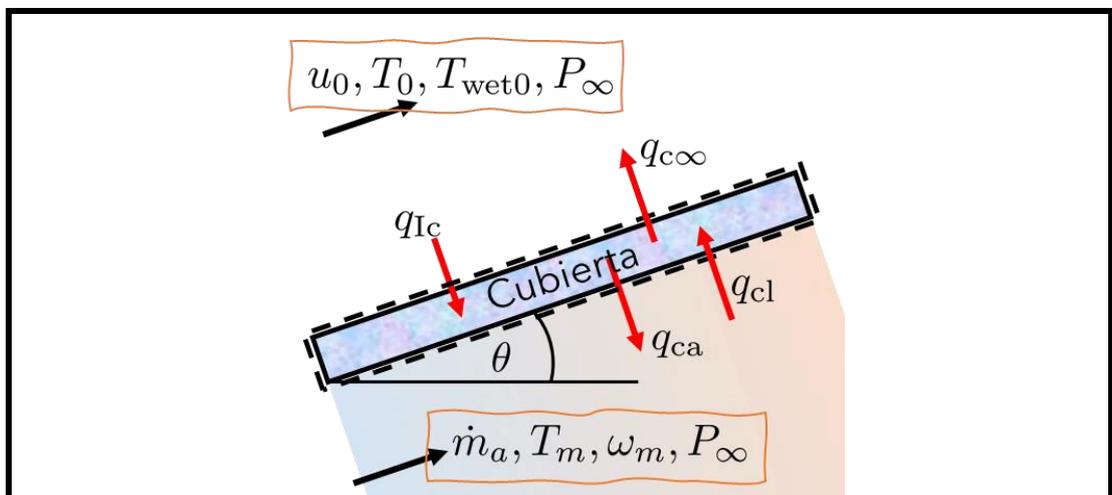


Figura 2.14. Balance de Energía de la Cubierta. [Elaboración Propia]

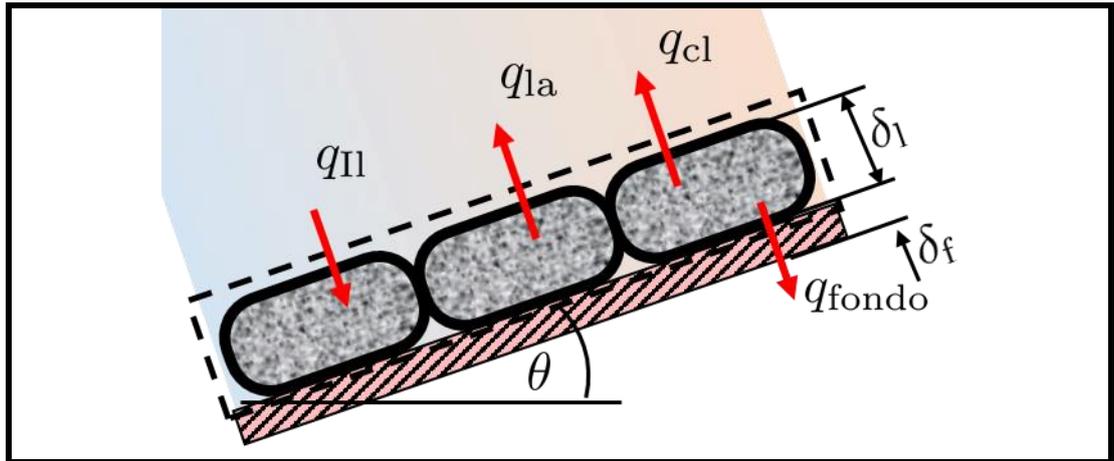


Figura 2.15. Balance de Energía del Lecho de Rocas. [Elaboración Propia]

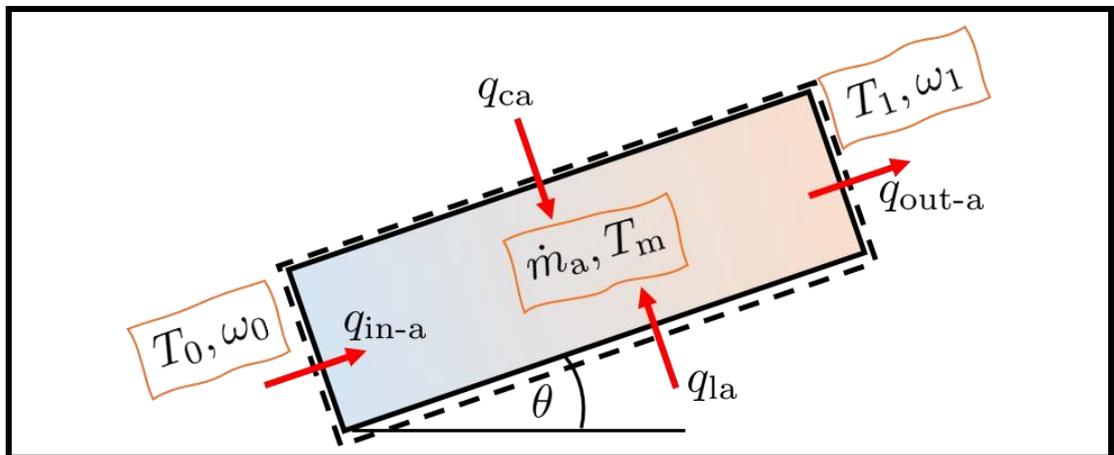


Figura 2.16. Balance de Energía del Flujo de Aire dentro del Colector. [Elaboración Propia]

En estos balances intervienen las siguientes transferencias de calor:

- q_{ca} : Calor entre la cubierta y el aire interior (convección y radiación). [W]
- q_{cl} : Calor entre la cubierta y el lecho (radiación). [W]
- q_{cco} : Calor entre la cubierta y aire exterior (convección y radiación). [W]
- q_{lc} : Fracción de la Irradiación solar absorbida por la cubierta. [W]
- q_{la} : Calor entre el lecho y el aire interior (convección y radiación). [W]
- q_{fondo} : Calor entre el lecho de rocas y el exterior a través del fondo del colector (convección y radiación). [W]
- q_{ll} : Fracción de la Irradiación solar absorbida por el lecho de rocas. [W]
- q_{in-a} : Calor total llevado por el flujo de aire a la entrada del colector [W]
- q_{out-a} : Calor total llevado por el flujo de aire a la salida del colector [W]

De la reducción del balance de la Figura 2.14 se obtuvo la siguiente expresión para la temperatura de la cubierta:

$$T_c = \frac{\alpha_c \cos(\theta) I'' + h_{r-cl} T_l + (h_{c-ca} + h_{r-ca}) T_m + (h_{c-c\infty} + h_{r-c\infty}) T_\infty}{h_{r-cl} + h_{c-ca} + h_{r-ca} + h_{c-c\infty} + h_{r-c\infty}} \quad (2.8)$$

Donde cada h_i representa el coeficiente de transferencia de calor, los cuales se detallan en el Apéndice E.

De la reducción del balance de la Figura 2.15 se obtuvo una expresión para la temperatura del lecho de rocas:

$$T_l = \frac{0.5\pi\alpha_i\tau_c \cos(\theta) I'' + \pi(h_{c-la-in} + 0.5h_{c-la-sup}) T_m + U_f T_\infty + h_{r-cl} T_c}{\pi(h_{c-la-in} + 0.5h_{c-la-sup}) + U_f + h_{r-cl}} \quad (2.9)$$

Donde U_f representa el coeficiente de transferencia global de calor con el fondo del colector, el cual se detalla en el Apéndice E.

De la reducción del balance de la Figura 2.16 se obtuvo una expresión para la longitud óptima del colector:

$$L = \frac{\dot{m}_a c_a (T_1 - T_0)}{a[(h_{c-ac} + h_{r-ac})(T_c - T_m) + \pi(h_{c-al} + h_{r-al})(T_l - T_m)]} \quad (2.10)$$

2.9 Diseño de la Chimenea

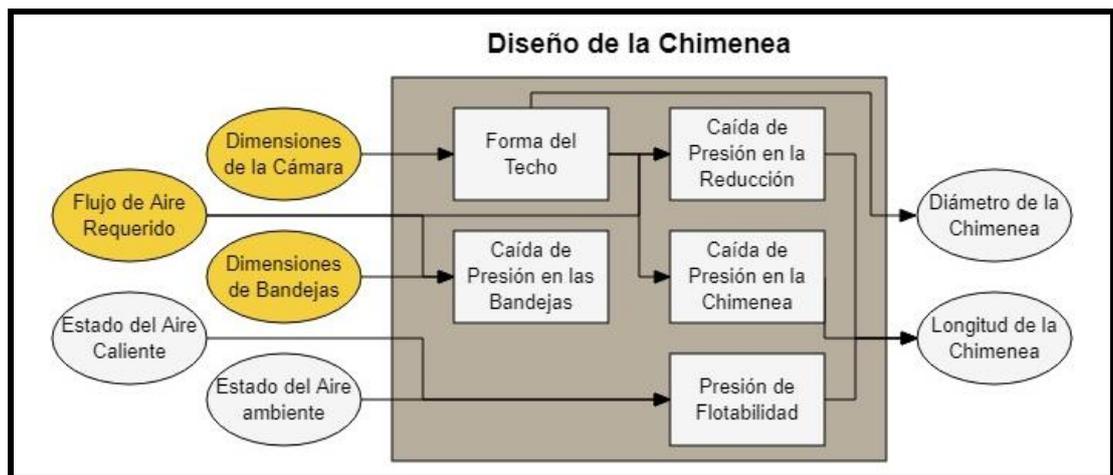


Figura 2.17. Diagrama de Flujo para el Diseño de la Chimenea. [Elaboración Propia]

El diseño del techo de la cámara requería que el área transversal de la misma se reduzca en forma de tobera para desembocar en la entrada de la chimenea, definiendo su diámetro, guiándose con dimensiones típicas de chimeneas [22]. En la Figura 2.17 se detalla el proceso seguido para este componente.

La diferencia de temperatura entre dos estados del aire genera una fuerza de succión que genera el flujo de aire requerido. Esta se llama Fuerza de flotabilidad por unidad de volumen y se define de la siguiente manera:

$$F_B = \rho_a g \beta_a (T_\infty - T_2) \quad (2.11)$$

El cambio de presión generado por esta fuerza de flotabilidad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta B = \frac{F_B V}{A_T} \quad (2.12)$$

La altura de la chimenea viene relacionada con las caídas de presión existentes en la cámara, al realizar un balance de energía del flujo de aire saliente, y teniendo en cuenta la presión por la fuerza de flotabilidad.

2.10 Diseño de la Bancada

Para la bancada, se utilizaron las dimensiones obtenidas de la cámara y del colector y se seleccionaron apoyos en diferentes puntos estratégicos para lograr un buen soporte. La selección de perfiles y materiales para los apoyos se hizo mediante la revisión de construcciones típicas de bancadas, teniendo en cuenta que no es necesario darle mucho mantenimiento al equipo y que en la parte externa no es necesario tener cuidado con la humedad del ambiente. En la Figura 2.18 se muestra el proceso seguido.

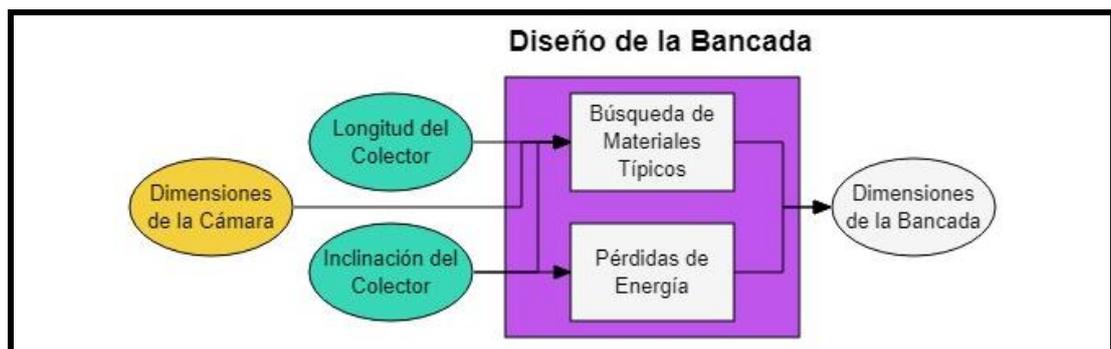


Figura 2.18. Diagrama de Flujo para el Diseño de la Bancada. [Elaboración Propia]

No se realizó ningún análisis de elementos finitos o de esfuerzos mecánicos para comprobar la resistencia de la bancada, sino que se basó en retroalimentación dada por fabricantes, detalladas en el Apéndice A. Debido a esto, se optó por un diseño sobredimensionado, abriendo una posibilidad para optimización.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Bandejas Propuestas

La masa total de trabajo fue repartida en 4 bandejas de madera iguales para facilidad de manejo, por lo que fue necesario dimensionar las bandejas en relación con el tamaño y cantidad de granos de cacao. El diseño propuesto se presenta en la Figura 3.1. Teniendo en cuenta la facilidad de manejo, las dimensiones y materiales propuestos se describen en la Tabla 3.1.

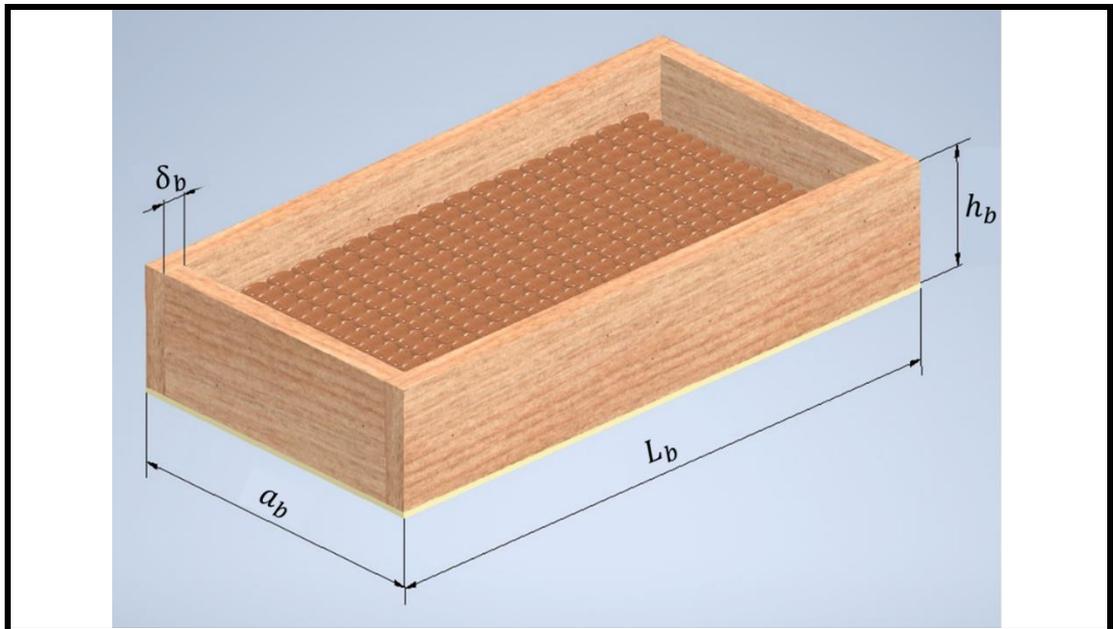


Figura 3.1. Dimensiones de las Bandejas de Cacao. [Elaboración Propia]

Tabla 3.1. Dimensiones Propuestas de las bandejas

Parámetro	Unidades	Símbolo	Valor	Fuente
Longitud	[m]	L_{ban}	0.47	Autores
Ancho	[m]	a_{ban}	0.23	Autores
Altura	[m]	H_{ban}	0.10	Autores
Espesor	[m]	δ_{ban}	0.02	Autores
Material de las Paredes	-	-	Laurel	[2]
Material del Fondo	-	-	Malla perforada de Aluminio	-

Finalmente, con las dimensiones propuestas, era necesario determinar la porosidad de estas bandejas, la cual se puede demostrar que presenta el siguiente valor [21]:

$$\varepsilon_b = \frac{\text{Volumen Vacío}}{\text{Volumen total}} = 1 - \frac{\pi}{6} = 0.48 \quad (3.1)$$

3.2 Selección de materiales

Para la selección de materiales, se buscó materiales típicos de fabricación de cámaras aislantes, esto con el fin de reducir al mínimo las pérdidas de calor al exterior. También se buscaron materiales resistentes a la humedad que permitan al equipo operar por más tiempo sin desgastarse.

A continuación, en la Tabla 3.2 se presenta un listado con los materiales utilizados y el componente correspondiente:

Tabla 3.2. Materiales Utilizados en el Proyecto [Elaboración Propia]

Material	Forma	Propósito
Acero Galvanizado	Lámina	Capas Interna y Externa en Paredes
Aluminio	Perfil Cuadrado	Soporte del Colector y la Cámara
Poliestireno Expandido	Plancha	Aislamiento en Paredes
Acero AISI 1020	Perfil Redondo	Bancada
Acero AISI 1020	Ángulos	Bancada
Acero AISI 1020	Varillas	Chimenea
Rocas de Río Basálticas	Esferas	Lecho de Rocas
Madera	Perfil Rectangular	Paredes de las Bandejas
Aluminio	Lámina perforada	Fondo de las Bandejas

3.3 Curva de velocidad de secado del cacao

Dado que el trabajo a realizar fue completamente teórico, sin experimentación ni prototipado requerido, se optó por basarse en trabajos de secado de cacao publicados en bases de datos científicas. De acuerdo con [19], una curva típica de cacao es la que se muestra en la Figura 3.2, donde el parámetro más importante es la Humedad Crítica en base seca (X_{cr}). Los estudios indican que este parámetro es una propiedad intrínseca del material, teniendo el siguiente valor:

$$X_{cr} = 30\% \quad (3.2)$$

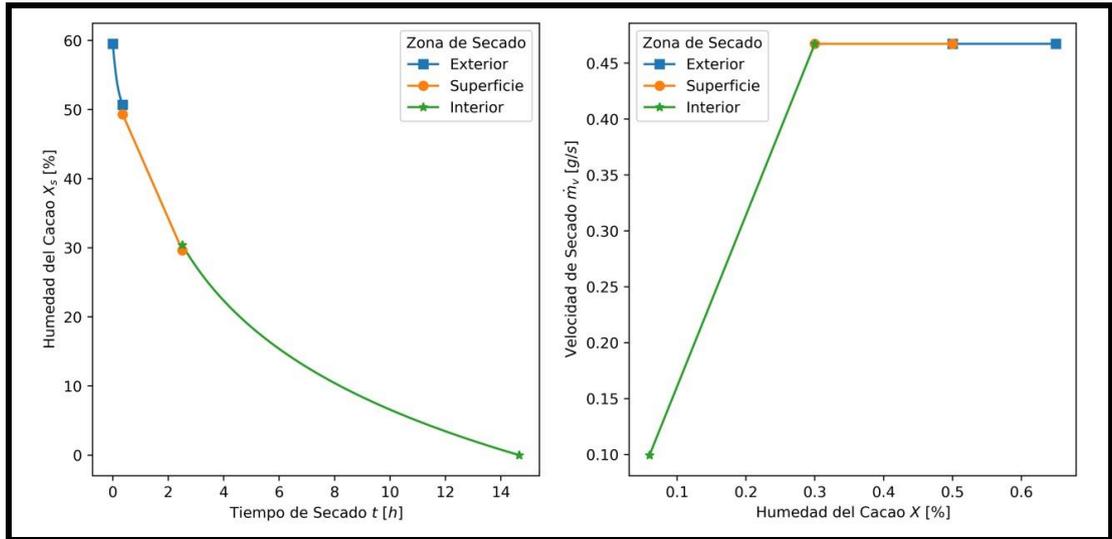


Figura 3.2. Curva de Secado Típica del Cacao. [19]

3.4 Ángulo de Inclinación del Colector

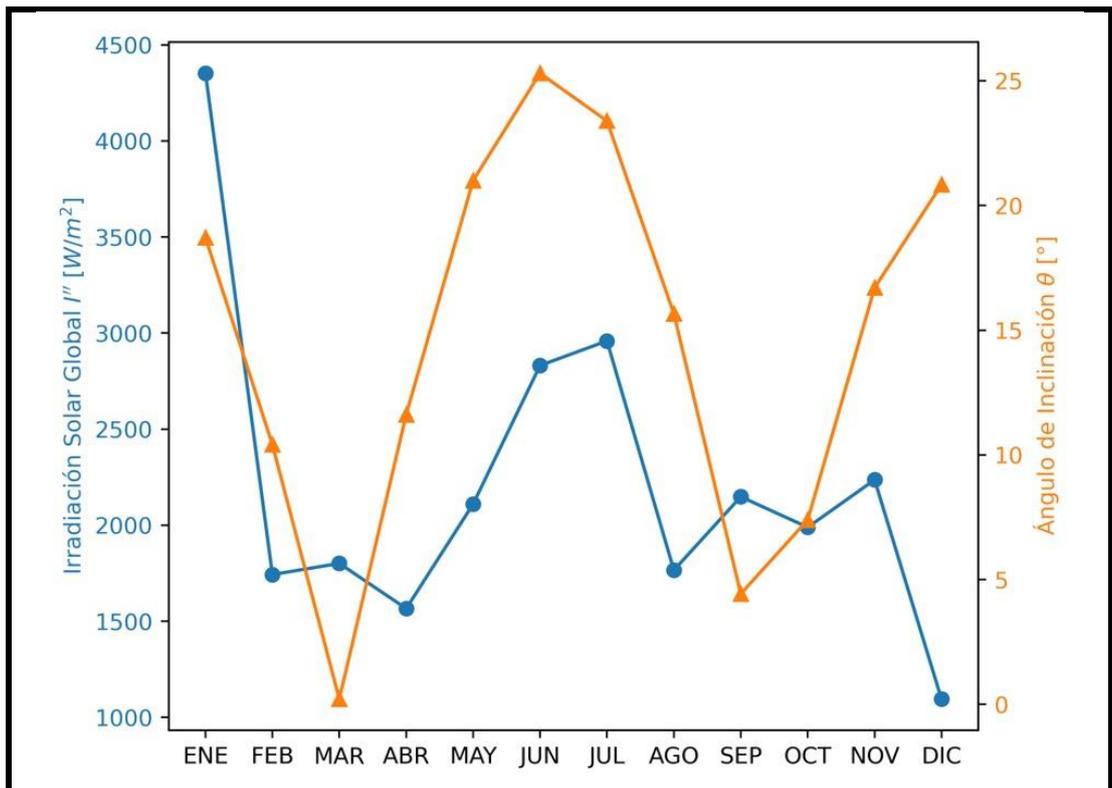


Figura 3.3. Irradiación Solar Global mensual y Ángulo de Inclinación Óptimo para cada mes. [Elaboración Propia]

En la Figura 3.3 se aprecia el ángulo óptimo de inclinación para cada mes, dando un rango posible entre 0° hasta 25° a lo largo del año. También se muestra el nivel de radiación por unidad de área incidente sobre la localidad

de trabajo, con lo que se aprecia que para diciembre hay bajas cantidad de energía incidente, lo cual concuerda con los datos tabulados en la Tabla 2.4.

3.5 Selección de las Dimensiones del Equipo

Existiendo un amplio rango de diseño para el equipo, se optó por variar el tiempo de secado y estimar las dimensiones mínimas para llegar la humedad final del cacao. Los cálculos, iteraciones y gráficas se realizaron escribiendo códigos de programación en Python 3.9 de uso libre y ejecutados en el IDE PyCharm 2021.3.1 con licencia estudiantil.

3.5.1 Dimensiones del Colector Solar

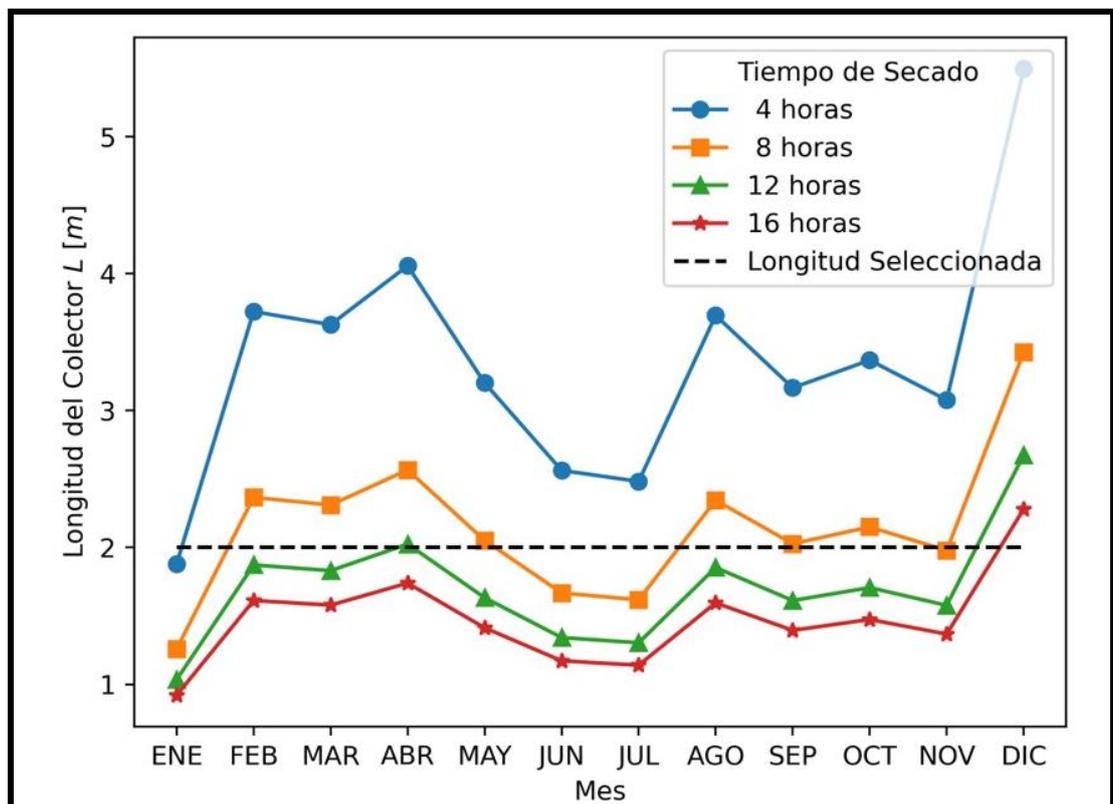


Figura 3.4. Longitud del Colector para diferentes Condiciones Meteorológicas. [Elaboración Propia]

En la Figura 3.4 se puede apreciar el cambio de la longitud mínima del colector para cada mes y para diferentes tiempos de secado. Se aprecia que tiempos menores, las longitudes requeridas pueden crecer considerablemente, lo cual encarece el equipo. Basado en esto, se eligió una longitud de 2 metros que

satisface las condiciones de secado la mayor parte del año con un tiempo de 12 horas, esto es:

$$L = 2 \text{ m} \quad (3.3)$$

$$t = 12 \text{ horas} \quad (3.4)$$

En la Figura 3.5 se muestra el efecto del ángulo de inclinación en la longitud del colector. Se aprecia que el cambio en la longitud mínima es prácticamente despreciable, por lo que se consideró un ángulo de la Figura 3.3 que cubra la mayor parte del año. Esto es:

$$\theta = 18.71^\circ \quad (3.5)$$

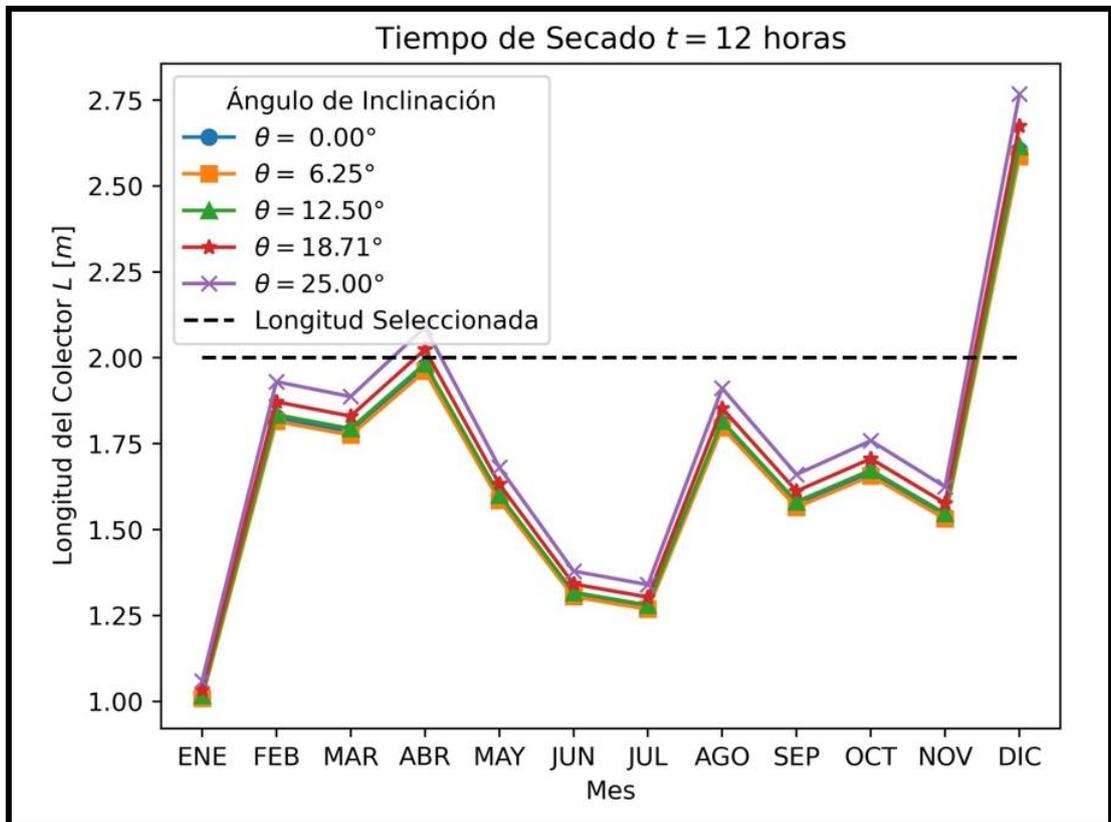


Figura 3.5. Efecto del Ángulo de Inclinación del Colector. [Elaboración Propia]

3.5.2 Dimensiones de la Chimenea

En la Figura 3.6 se aprecia la altura mínima de la chimenea para generar el flujo de aire necesario que mueva el aire y permita realizar el secado en los tiempos iterados. Se aprecia que, para un tiempo mínimo de 12 horas, la altura

de chimenea de 2 metros satisface las condiciones de secado la mayor parte del año, por lo que se escoge esta altura:

$$H_{chim} = 2 \text{ m} \quad (3.6)$$

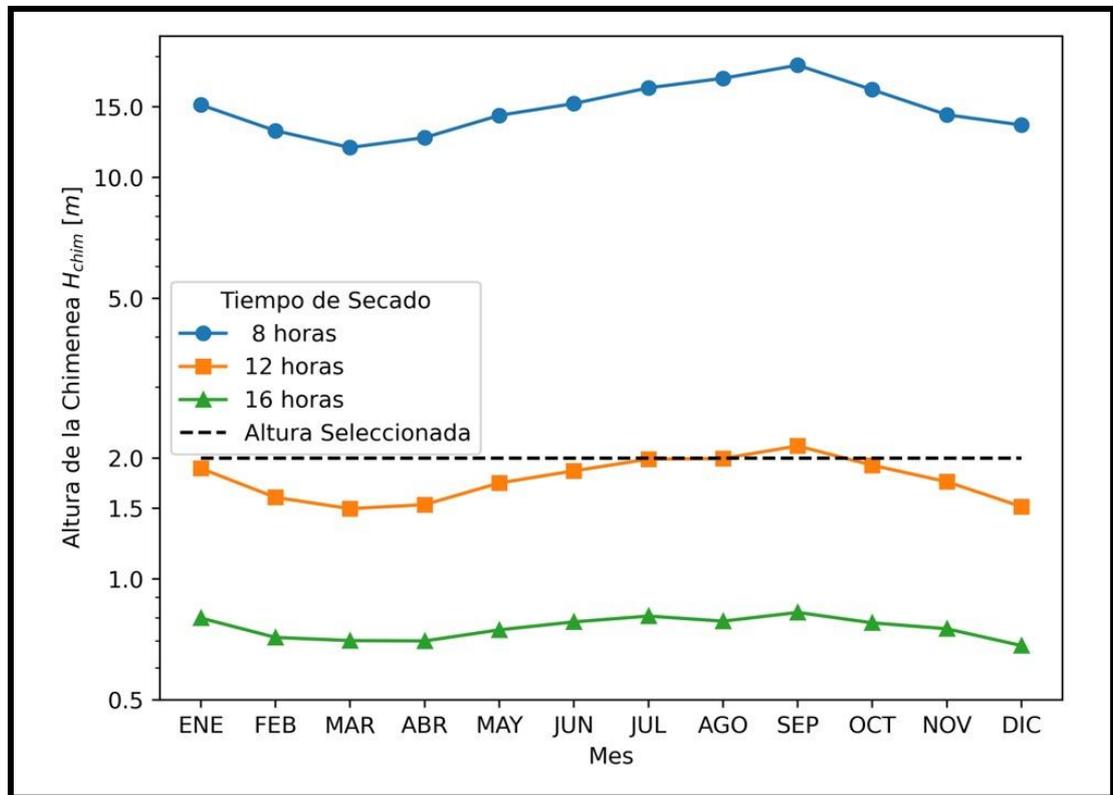


Figura 3.6. Altura Mínima de la Chimenea para cada Mes. [Elaboración Propia]

3.6 Comportamiento termodinámico del equipo

Con las dimensiones elegidas anteriormente, se procedió a modelar el equipo, cuyo diseño propuesto se muestra en la Figura 3.7. El modelo se realizó en Autodesk Inventor Professional 2021 con licencia estudiantil.

Una vez fijadas las dimensiones apropiadas del equipo, se procedió a simular las condiciones de operación a lo largo del año para comprobar que se siguen satisfaciendo las condiciones de secado solicitadas.

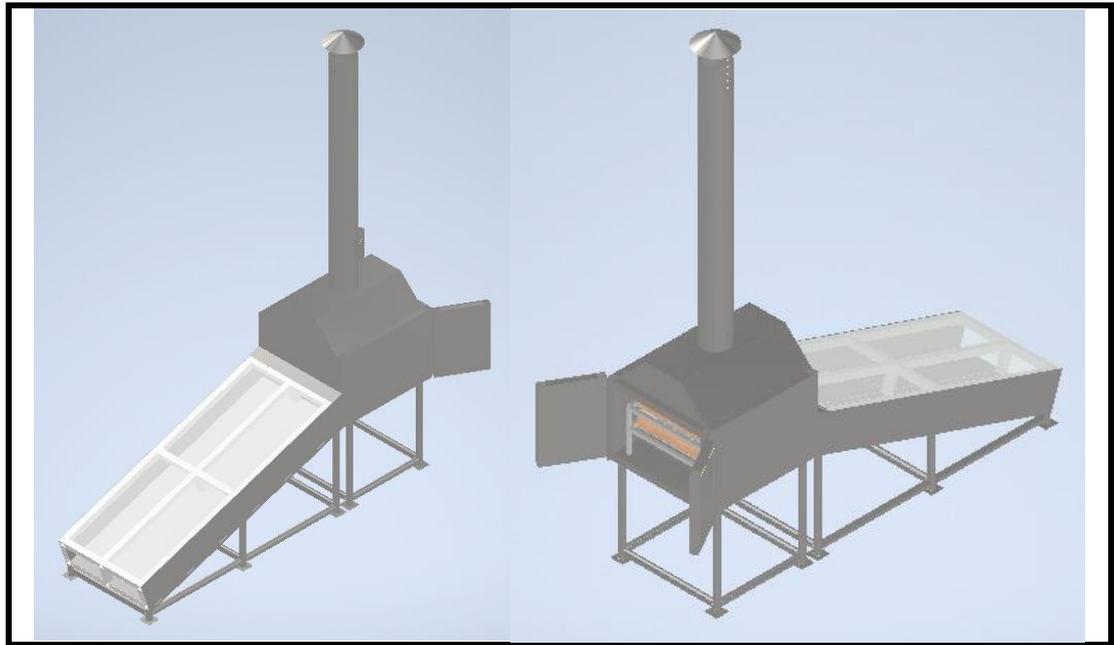


Figura 3.7. Diseño Propuesto para el equipo. [Elaboración Propia]

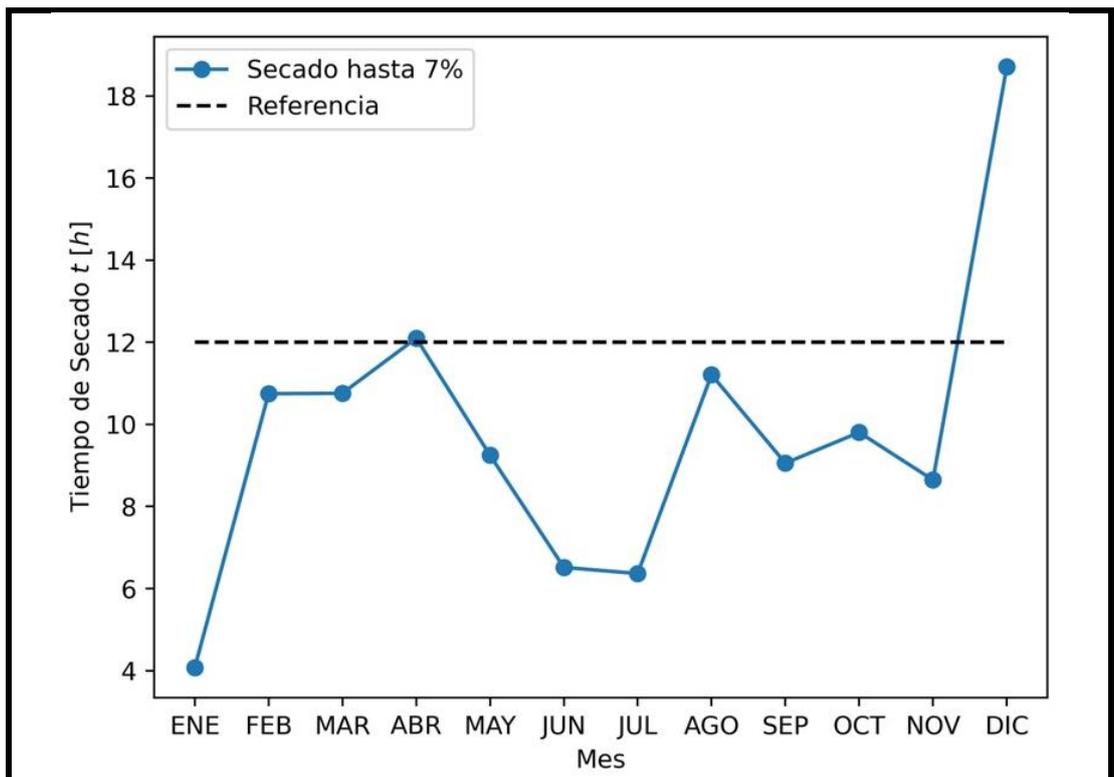


Figura 3.8. Tiempo de Secado para las Dimensiones Elegidas. [Elaboración Propia]

En la Figura 3.8 se muestra el tiempo para cumplir las condiciones de 7% de humedad en la pepa de cacao al fijar las dimensiones del equipo elegidas. Se aprecia que el tiempo es menor a las 12 horas la mayor parte del año, ya que el equipo está sobredimensionado a 2 metros. Sin embargo, para diciembre,

debido a la poca irradiación solar disponible, se aprecia que el secado tomará más tiempo, hasta un aproximado de 19 horas.

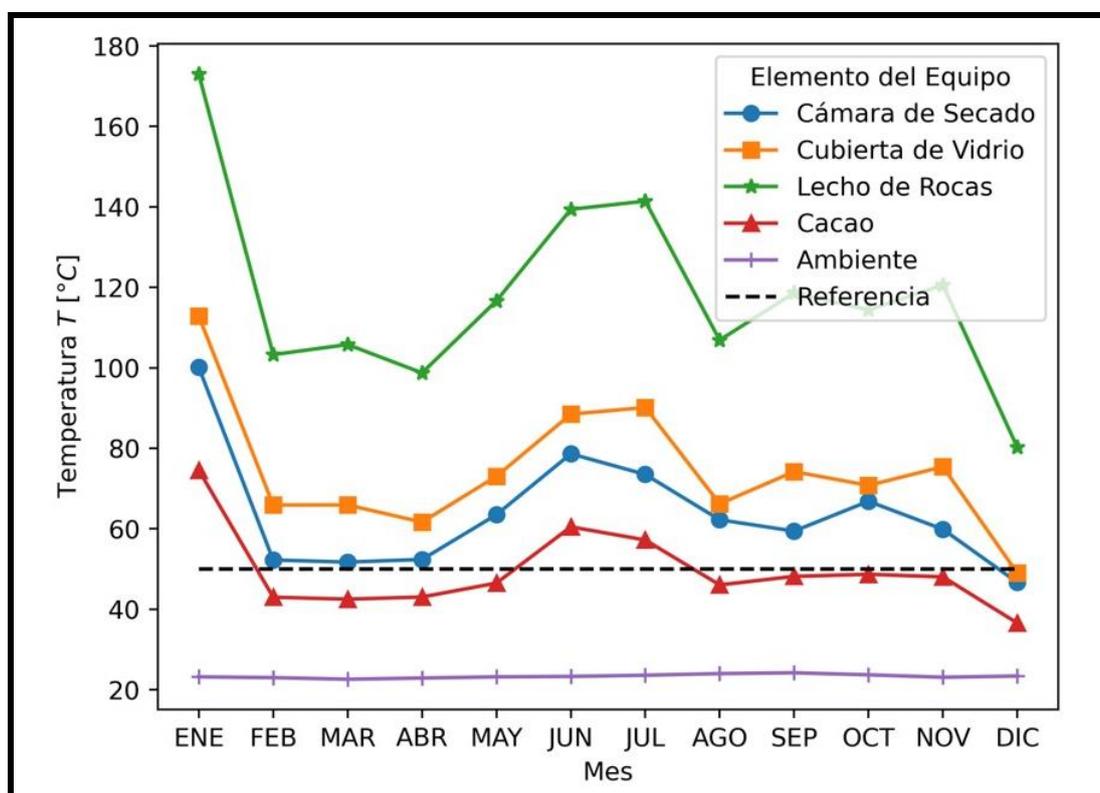


Figura 3.9. Temperaturas de varios Elementos del Equipo a lo largo del Año.
[Elaboración Propia]

En la Figura 3.9 se muestra la temperatura a la que llegan diferentes partes del equipo a lo largo del año, basándose en la longitud de colector, la altura de chimenea, el ángulo de inclinación y el tiempo de secado seleccionados. Se aprecia que el cacao sobrepasa los 50°C en algunos momentos del año, lo cual es peligroso porque puede tostar y dañar el grano.

En la Figura 3.10 se aprecia la velocidad del aire en diferentes zonas del equipo, siendo estas el colector, la cámara de secado y la chimenea. La velocidad a la salida de la chimenea es alta, y su diferencia con la cámara es lo que genera la fuerza de flotabilidad que mueve el aire. En el colector y la cámara se aprecia que no superan los 0.1 metros por segundo, lo cual concuerda con experimentación en donde se aprecia que no suele superarse esta cota [18].

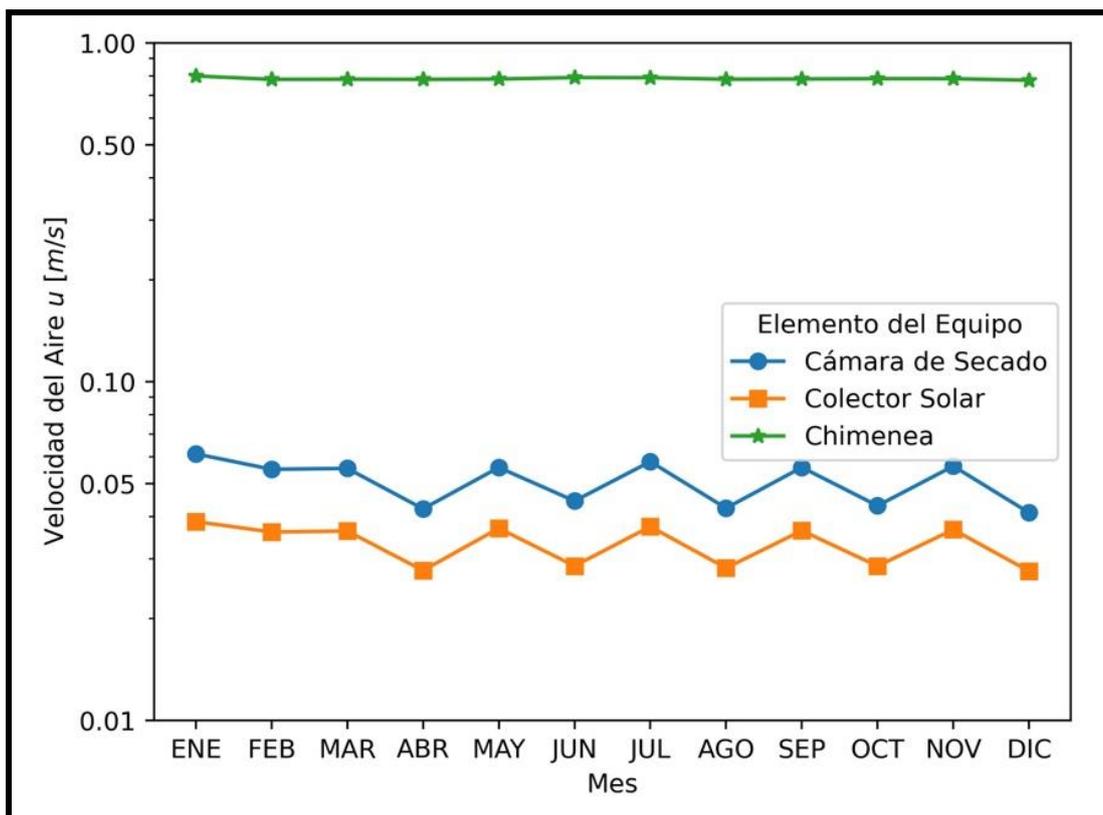


Figura 3.10. Velocidad del Aire en diferentes Tramos del Equipo. [Elaboración Propia]

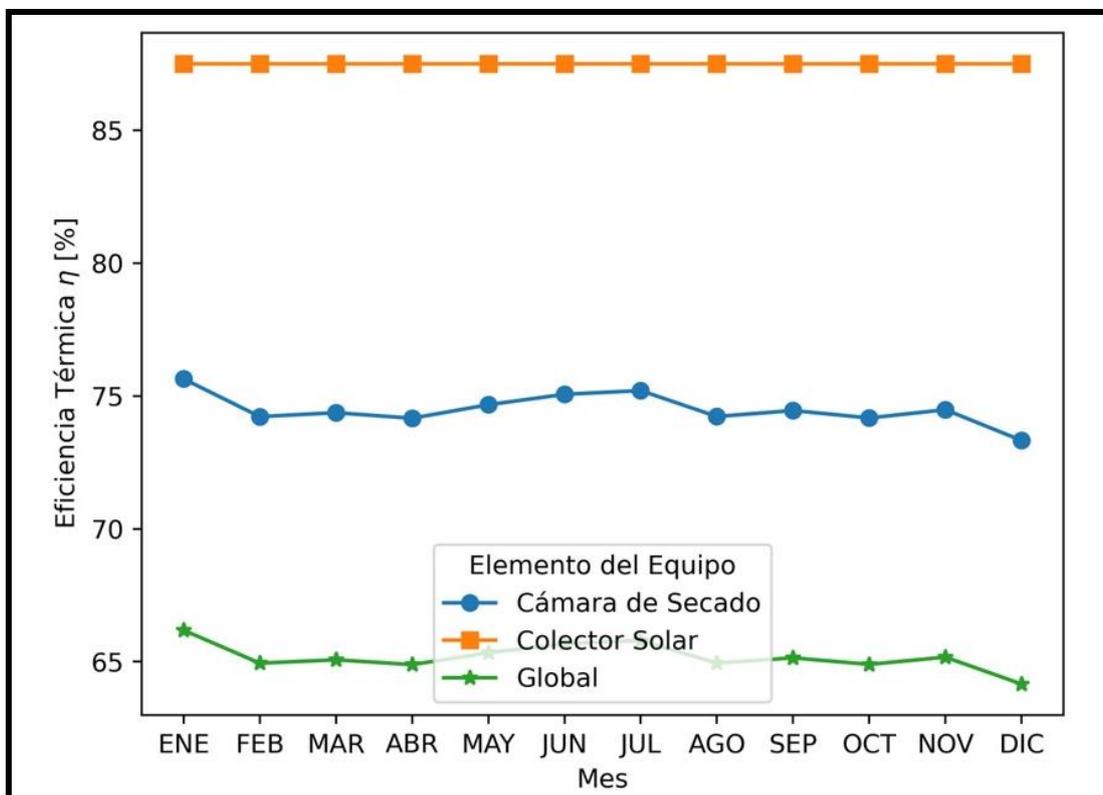


Figura 3.11. Eficiencias del Equipo. [Elaboración Propia]

En la Figura 3.11 se muestra las eficiencias de los dos componentes principales del equipo, la cámara de secado y el colector solar. Las paredes de todo el equipo fueron sobredimensionadas, es decir, se eligieron espesores de pared relativamente elevados, esto con el fin de disminuir las pérdidas aumentar la eficiencia. Esto se corrobora pues en el colector la eficiencia oscila alrededor de 87%, en la cámara de secado este valor está alrededor del 75%, y la eficiencia global se tiene alrededor del 65%.

3.7 Simulación Térmica del Equipo

La simulación térmica se realizó exclusivamente para la temperatura del flujo de aire en el interior de todo el equipo, para confirmar los modelos teóricos mostrados en las figuras anteriores. Esta simulación fue realizada en ANSYS 2021 R2 con licencia estudiantil.

Como se puede apreciar en la Figura 3.12 y Figura 3.13, existe la distribución de temperatura en el colector y cámara de secado. Partiendo por el colector solar, en la superficie de este se encuentra la capa de vidrio que está sometida a una temperatura aproximada de 87°C mientras que en la parte inferior que se encuentra el lecho de rocas está a una temperatura de 148°C. Si bien esto se debe a la capacidad calorífica que las rocas llegan almacenar y la absorptividad. A su vez la transmisividad de la capa de vidrio permite el flujo de la radiación a las rocas y someterlas a temperaturas elevadas.

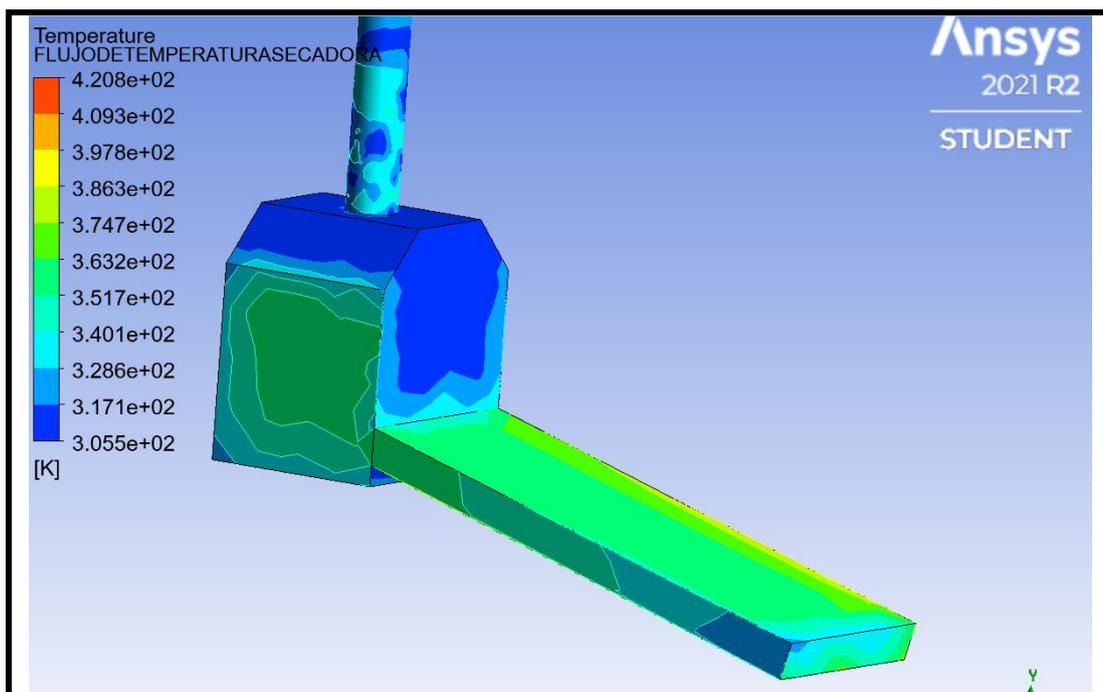


Figura 3.12. Vista superior de la Simulación Térmica del Flujo de Aire dentro del Equipo. [Elaboración Propia]

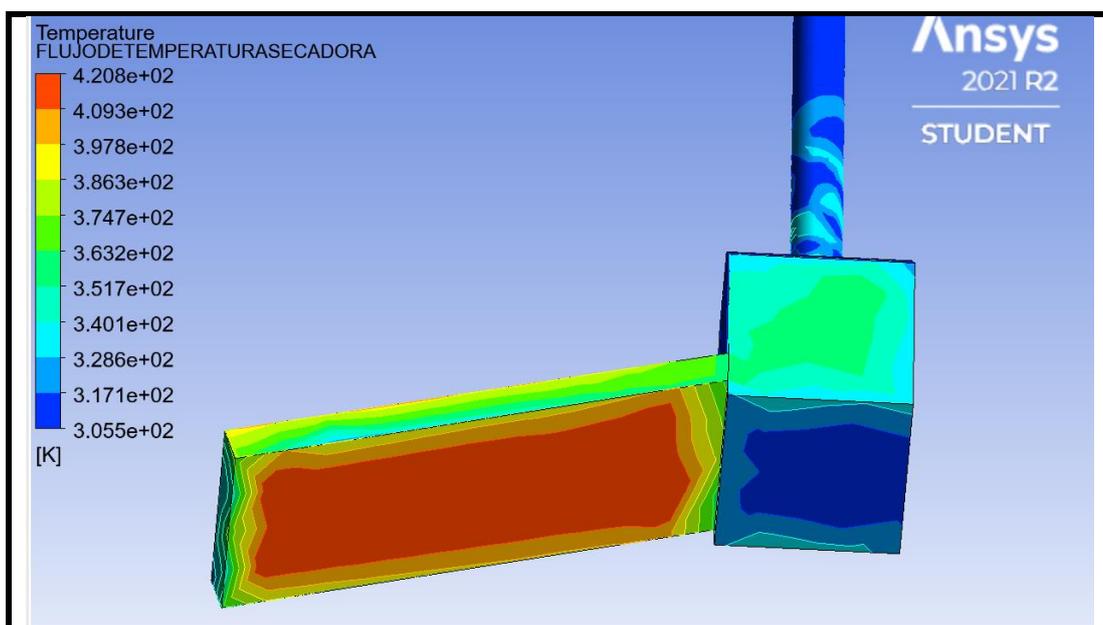


Figura 3.13. Vista Inferior de la Simulación Térmica del Flujo de Aire dentro del Equipo. [Elaboración Propia]

3.8 Análisis de Costos

3.8.1 Costos de inversión

A continuación, en la Tabla 3.3 se muestra a detalle los insumos a considerar para la fabricación partiendo de las medidas comerciales estándar:

Tabla 3.3. Costos de los Materiales del Equipo [Elaboración Propia]

Material	Presentación Comercial	Dimensiones Comerciales	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Aluminio	Perfil Circular	(25mmx2mmx6m)	3	\$13.73	\$41.19
	Perfil Cuadrado	(50mmx50mmx2mm x6m)	3	\$33.80	\$101.40
	Perfil Cuadrado	(25mmx25mmx2mm x6m)	2	\$16.19	\$32.38
Laurel	Tablas	(220mmx40mmx40 mmx2.2m)	3	\$15.00	\$45.00
Acero al Carbono AISI 1020	Perfil Cuadrado	(50mmx50mmx2mm x6m)	3	\$24.36	\$73.08
	Varillas	(1/2"mmx12m)	1	\$16.99	\$16.99
	Ángulos	(1/2"x1/2"x3/8"x6m)	1	\$26.79	\$26.79
	Perfil Circular	(50mmx2mmx6m)	3	\$38.19	\$114.57
	Plancha Cuadrada	(1220mmx2440mmx 2mm)	1	\$46.86	\$46.86
Acero Galvanizado	Plancha Rectangular	(1220mmx2440mmx 2mm)	5	\$97.95	\$489.75
Poliuretano Expandido	Plancha Rectangular	(1220mmx2440mmx 50mm)	2	\$10.74	\$21.48
Acero Inoxidable	Malla Perforada	(1220mmx1220mmx 2mm)	1	\$58.81	\$58.81
Vidrio Común	Plancha Rectangular	(1220mmx2000mmx 6mm)	1	\$5.60	\$5.60
Pintura Anticorrosiva Negra	Rendimiento (25 m ² /L)	(1 L)	1	\$5.00	\$5.00
Remaches Pop de Aluminio	Unidades	(2mm)	330	\$0.08	\$26.40
Soldadura (Electrodos)	E6061	(5kg)	1	\$5.99	\$5.99
Bisagras	Bisagra ancha	(3 1/2")	2	\$4.59	\$9.18
Picaporte	Picaporte Cromado	(3")	1	\$2.53	\$2.53
Caucho	Tacos	(50mmx50mm)	29	\$0.25	\$7.25
	Tiras	(25mmx10mmx6m)	1	\$1.00	\$1.00
TOTAL					\$1,131.25

Por otro lado, hay que considerar el diseño previo que tiene un rubro como diseñador mecánico, descrito en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Costos de Diseño del Equipo [Elaboración Propia]

Descripción	Cantidad	Valor Mensual	Meses	Total
Diseñador Mecánico	1	\$ 600.00	1	\$ 600.00

Así mismo, los costos de mano de obra directa para la construcción del primer prototipo que incluye a dos obreros y un soldador se listan en la Tabla 3.5:

Tabla 3.5. Costos de la Mano de Obra para Fabricar un Equipo [Elaboración Propia]

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor Diario	Días De Trabajo	Total
Soldador	Hombre/Día	1	\$ 30.00	2	\$ 60.00
Obrero 1	Hombre/Día	1	\$ 20.00	5	\$ 100.00
Obrero 2	Hombre/Día	1	\$ 20.00	3	\$ 60.00
TOTAL					\$ 220.00

Si bien el diseñador mecánico se considera como rubro, al momento de fabricar por volumen este puede ser considerado como parte de la inversión y determinar un valor de venta menor (\$1200). En la Tabla 3.6 se detalla el cálculo final del costo de una unidad considerando su diseño y fabricación:

Tabla 3.6. Costos Totales del Equipo [Elaboración Propia]

Descripción	Unidad	Precio Unitario	Valor
Mano de obra directa	1	\$ 220.00	\$ 220.00
Materiales	1	\$ 1,131.25	\$ 1,131.25
Diseñador Mecánico	1	\$ 600.00	\$ 600.00
TOTAL			\$ 1,951.25

3.8.2 Factibilidad Económica

Primero que todo, se debe definir a quien va dirigido nuestro producto, por ello se comienza estableciendo el mercado total de agricultores de cacao en Ecuador. Sin embargo, se necesita realizar la estratificación para limitar nuestro alcance de operación siendo los pequeños agricultores (mercado potencial). A su vez, para establecer nuestro mercado objetivo nos basamos en la variable provincia de mayor producción siendo Guayas donde el 45% llegan a tener un promedio de (3 - 5 ha) siendo nuestro mercado objetivo (ver Tabla 3.7).

Tabla 3.7. Segmento de Mercado del Proyecto [11]

Descripción	Valor	Unidad
Mercado total del Cacao en Ecuador	150000	Agricultores
Pequeños productores	70%	Estratificación
Mercado potencial	105000	Agricultores
Mercado objetivo	45%	Estratificación
Mercado objetivo	47250	Agricultores

Parte de la segmentación del mercado se basa en estudiar el tamaño de las fincas ubicadas en la provincia del Guayas, como se las lista en la Tabla 3.8. Una vez establecido nuestro mercado objetivo, hay que establecer el modelo

de negocios que nuestro agricultor maneja actualmente y que lo mantendrá cuando adquiera nuestro producto que es la venta de cacao seco por quintal.

Tabla 3.8. Extensión de fincas en la Provincia de Guayas [11]

Hectáreas promedio(ha)	Frecuencia absoluta
0.97	206
3.09	301
4.92	262
7.81	256
14.11	245

Como se puede ver en la Tabla 3.9, se ejemplifica un ejercicio de costos ya que todo comienza con el precio de la tonelada que se cotiza desde el mercado extranjero diariamente. Por otro lado, el mercado ecuatoriano usa un margen de seguridad como factor de protección de las fluctuaciones, ganancias, temporada de cosecha dando un precio de tonelada menor al original (Bolsa de Valores de New York). Por último, se divide la cantidad de quintales que tiene una tonelada y se obtiene el precio de quintal. Cabe destacar que este precio se determina diariamente. (ver Tabla 3.9). Hay que mencionar que para lograr este precio se tiene que cumplir un parámetro fundamental, que los quintales a vender deben cumplir con una humedad del 7% (cero relativo). En caso de presentar una humedad superior se comienza a castigar económicamente y por lo tanto el precio por quintal disminuye.

Tabla 3.9. Modelo de negocios para la venta de cacao por Quintal [11]

Descripción	Valor	Unidad
Precio de la tonelada	\$2,500.00	\$
1 tonelada	1000	kg
1 US quintal	45.359	kg
1 tonelada	22.046	q
Precio/quintal	\$100	\$
Margen de seguridad	\$300.00	\$
Precio con margen	\$2,200.00	\$
Hectáreas de terreno(promedio)	2-4	ha
Quintal promedio por hectárea año	22-40	qq

En la Tabla 3.10, se puede apreciar un registro de producción para 2021 de nuestro agricultor mostrando el rendimiento de quintales por hectárea año, precio promedio castigado y su ingreso bruto. Cabe destacar que la producción anual por hectárea es de cacao seco por quintales seco.

Tabla 3.10. Registro de producción para 2021 de nuestro cliente agricultor
[11]

Quintales hectárea año de cacao (qq)	Número de hectáreas (ha)	Quintales totales (qq)	Precio promedio castigado (\$)	Ingreso bruto (\$)	Mantenimiento por ha total (\$)	Ingreso neto (\$)
30	4	120	87	9720	4000	5720

Además, en la siguiente tabla muestra la eficiencia de abastecimiento de nuestro equipo tomando como base la producción en su último año. Si bien existe una limitación en el número de cargas, pero esto puede mejorar si se aumenta la capacidad para secar de nuestro equipo. Como se mencionó anteriormente que la producción era en base seca, en la Tabla 3.11 se muestra la capacidad de cacao húmedo que deben cumplirse.

Tabla 3.11. Comparación de abastecimiento Registro-Equipo [11]

Cacao seco (kg) / Registro	Cacao húmedo (kg) / Registro	Ciclos / Registro	Ciclos / Equipo	Cacao húmedo (kg) / Equipo	Cacao seco(kg) / Equipo	Eficiencia / Equipo
5443.08	12959.71	324	182	7279.83	3057.53	56

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

La Curva de Secado del Cacao se generó mediante una combinación de modelos teóricos y estudios previos realizados con cacao [19]. Esta curva puede mejorarse al acompañar el diseño con experimentación de secado controlado en laboratorio, donde se pueda medir la temperatura y la humedad del sólido en cualquier instante de tiempo.

Se pudo comprobar que el equipo diseñado puede secar el cacao en menos de 12 horas en cualquier mes del año, a excepción del mes de diciembre, donde se requiere hasta unas 18 horas. Se aprecia que el cacao puede llegar a exceder por mucho la temperatura límite (50 °C) durante el mes de enero, por lo que se puede sugerir al cliente que, durante ese mes, coloque una lona encima del colector durante ciertos momentos del día para evitar que se tueste el cacao. De manera general, se aprecia que presenta una eficiencia considerable (65%) a lo largo del año, lo cual indica un buen diseño, a pesar de haber espacio para optimización en ciertas dimensiones del equipo.

En cuanto a la simulación térmica, esta permitió comprobar el diseño teórico del equipo, apreciándose que el mayor flujo de energía proviene del lecho de rocas, y en menor medida proviene de la cubierta de vidrio, ya que ambos siempre se encuentran a mucha mayor temperatura que el flujo de aire al interior del colector.

El costo del equipo se estimó en alrededor de \$1 500.00. Puede considerarse como un precio ligeramente elevado para el poder adquisitivo de un agricultor independiente, pero el tiempo de recuperación de inversión se estimó en 1.25 años. Cabe recalcar que el cliente puede tener gastos de cultivo elevados que puedan complicar que efectúe esta adquisición. Sin embargo, existen las

asociaciones de agricultores en las cuales se pueden reunir y financiar en conjunto el equipo.

4.2 Recomendaciones

El diseño se puede mejorar y optimizar al realizar prototipos para corroborar las predicciones teóricas de las temperaturas y velocidades de aire. Esto puede significar una mejora en la eficiencia o en la reducción de las dimensiones del equipo

Se pueden tomar en consideración otros tipos y tamaños de rocas, y estudiar el comportamiento del equipo en respuesta a este cambio. Otros tipos de rocas pueden tener una diferente capacidad calorífica que permita optimizar el diseño.

Como se mencionó en el diseño de la bancada, esta se hizo de manera general en diálogos con fabricantes de cámaras térmicas. Se pueden variar los materiales y los tamaños usados, y comprobar sus resistencias, hasta obtener un diseño optimizado y, tal vez, más pequeño, abaratando así costos.

Al existir una disminución de humedad por debajo del 7% (cero relativo) aumenta la cantidad de impurezas siendo otro parámetro de castigo que afecta en el precio unitario del quintal. Por ello, la implementación de instrumentación como sensores de temperaturas para cumplir con la temperatura de diseño y así obtener la humedad final deseada.

La capacidad de 40 kg en el presente prototipo puede mejorar a un valor de 70 kg de cacao húmedo para abastecer la producción anualmente de acuerdo con el registro 2021 de nuestro cliente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. J. Boza *et al.*, “Genetic Characterization of the Cacao Cultivar CCN 51: Its Impact and Significance on Global Cacao Improvement and Production,” 2014.
- [2] ANECACAO, “Asociación Nacional de Exportadores de Cacao - Ecuador,” 2021. <http://www.anecacao.com/index.php/es/quienes-somos/historia-del-cacao.html> (accessed Oct. 19, 2021).
- [3] M. de Lucia and D. Assennato, *La ingeniería agraria en el desarrollo - Manejo y tratamiento de granos poscosecha*. Roma, Italia: Food and Agriculture Organization FAO, 1993. Accessed: Dec. 04, 2021. [Online]. Available: <https://www.fao.org/3/x5041s/x5041S00.htm#Contents>
- [4] E. Ortiz Daniela, B. Rodriguez Jhon Alexander, A. Martínez Julián Marcelo, and H. Ruales Carlos Frank, “Implementación de un Secador de Cacao a Pequeña Escala para Disminuir el Tiempo de Secado y conservar las Propiedades Organolépticas en el Consejo Comunitario Las Varas Tumaco (Nariño),” 2019. Accessed: Dec. 14, 2021. [Online]. Available: <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/187>
- [5] APROCAFA, “Asociación de Productores de Cacao Fino y de Aroma,” 2021. <https://www.aprocafa.net/homenaje-a-homero-castro> (accessed Oct. 19, 2021).
- [6] A. Sánchez, T. Vayas, F. Mayorga, and C. Freire, “Sector Cacaotero Ecuatoriano,” Ambato, Ecuador, 2020. Accessed: Dec. 04, 2021. [Online]. Available: <https://blogs.cedia.org.ec/obest/wp-content/uploads/sites/7/2020/07/Análisis-de-cacao-24-de-junio-2020-7.pdf>
- [7] ICCO Secretariat, “August 2021 Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics,” *ICCO Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics*, vol. 47, no. 3, Aug. 2021, Accessed: Dec. 04, 2021. [Online]. Available: https://www.icco.org/wp-content/uploads/Production_QBCS-XLVII-No.-3.pdf
- [8] AGROCALIDAD, “Agencia de Regulación y Control Flto y Zoosanitario,” *Gobierno del Encuentro*, 2021. <https://www.agrocalidad.gob.ec/direccion-de-inocuidad-de-alimentos/#> (accessed Dec. 04, 2021).
- [9] AGROCALIDAD and INTERCALIDAD CIA LTDA, “Manual de Aplicabilidad de Buenas Prácticas Agrícolas para Cacao,” Quito, 2018. Accessed: Nov. 22, 2021. [Online]. Available: <https://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2020/05/manu2.pdf>

- [10] AGROCALIDAD, "Guía de BPA para Cacao. Resolución Técnica N° 0183. Inocuidad de Alimentos.," Quito, Sep. 2012. Accessed: Oct. 19, 2021. [Online]. Available: <https://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2020/05/guia3.pdf>
- [11] UNOCACE, "Somos UNOCACE - Unión de Organizaciones Campesinas Cacaoteras," *UNOCACE Cocoa Bean & Chocolate*, 2020. <https://new.unocace.com> (accessed Dec. 04, 2021).
- [12] World Cocoa Foundation, "The Cocoa Supply Chain: From Farmer to Consumer," *World Cocoa Foundation*, 2021. <https://www.worldcocoafoundation.org/about-wcf/the-cocoa-supply-chain-from-farmer-to-consumer/> (accessed Dec. 04, 2021).
- [13] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, 4th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [14] G. E. Dieter and L. C. Schmidt, *Engineering design*, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2013.
- [15] Google, "Recinto El Deseo," *Google Maps*, 2021. <https://www.google.com/maps/place/Recinto+El+Deseo/@-2.209514,-79.6308686,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x902d446a6468abdf:0xa82e09ac4acc46c4!8m2!3d-2.2095033!4d-79.6287021> (accessed Dec. 14, 2021).
- [16] NASA, "POWER Data Acces Viewer," *Prediction of Worldwide Resource*, 2021. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (accessed Dec. 14, 2021).
- [17] INAMHI, "Anuario Meteorológico 2013," Quito, 2017. Accessed: Dec. 14, 2021. [Online]. Available: https://www.inamhi.gob.ec/docum_institucion/anuarios/meteorologicos/Am_2013.pdf
- [18] E. Delgado, "Diseño, Modelo Matemático y Construcción de un Secadero Optimizado con Energías Limpias," Doctorado en Energías Renovables y Sostenibilidad Energética, Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, 2014. Accessed: Dec. 14, 2021. [Online]. Available: <https://minerva.usc.es/xmlui/handle/10347/12299>
- [19] J. Alfonso and A. Parias, "Diseño de un Secador Convectivo para el Secado del Grano de Cacao," Trabajo de Investigación, Universidad de Antioquía, Medellín, 2020. Accessed: Dec. 14, 2021. [Online]. Available: http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/15719/1/AgamezJaith_2020_DiseñoSecadorConvectivo.pdf

- [20] J. de la Torre and M. Portilla, "Diseño y Contrucción de un Prototipo de Secador Solar para el Capsicum Annum (Ají) con Colector-Almacenador en Lecho de Rocas con una Capacidad de 25kg," Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, 2015. Accessed: Dec. 14, 2021. [Online]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/11459/1/T-ESPE-049184.pdf>
- [21] F. Incropera, T. L. Bergman, and Adrienne. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 8th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2017.
- [22] F. White, *Mecánica de Fluidos*, 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [23] Y. Cengel and M. Boles, *Termodinámica*, 8th ed., vol. 1. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, 2014.
- [24] F. Carmona, R. Rivas, and V. Caselles, "Estimation of daytime downward longwave radiation under clear and cloudy skies conditions over a sub-humid region," *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 115, no. 1–2, pp. 281–295, 2014, doi: 10.1007/s00704-013-0891-3.

APÉNDICES

Apéndice A.

Temas tratados en las Entrevistas con Clientes Potenciales y Contactos Externos

Entrevista con Agricultores:

- Métodos actuales de secado
- Tiempos de Secado
- Situación actual de los productores (económica, social, energética, tecnológica, relaciones con clientes, entre otros.)
- Requerimientos de compradores
- Normas y entes reguladores

Entrevista con Comerciantes de Cacao:

- Métodos actuales de secado (tiempo, mediciones, entre otros.)
- Materiales de los equipos de Secado
- Tiempos típicos de secado
- Situación actual de los productores (económica, social, energética, tecnológica, relaciones con clientes, entre otros.)
- Requerimientos de compradores
- Normas y entes reguladores
- Costos de mantenimiento y mano de obra.

Entrevista con Expertos en Secadoras Solares

- Fuentes de información apropiadas para datos meteorológicos.
- Cálculo apropiado para el ángulo de inclinación.
- Experimentación para obtener curva de secado del sólido en cuestión.

Entrevista con Fabricantes de Cámaras Térmicas (Frigoríficos)

- Materiales y espesores de paredes típicos.
- Eficiencias típicas de cámaras térmicas.

Apéndice B.

Cálculo de los Pesos de Importancia de los Requerimientos del Cliente

Para obtener la puntuación de la importancia en una escala de 1 a 5, se procedió con la metodología de Proceso de Jerarquía Analítica (AHP por sus siglas en inglés) descrito en el proceso de diseño por [14]. Este proceso utiliza una tabla de comparación por pares en una escala de 1 al 9, la cual se normaliza y se promedia por cada requerimiento, obteniendo así un porcentaje de importancia. Sin embargo, es necesario realizar un chequeo de consistencia en los resultados para asegurarse que sean confiables y proceder con dicha ponderación.

Tabla B. 1. Criterios de los Factores de Comparación de la Metodología AHP [14]

Factor de Comparación	Comparación Relativa de Importancia de dos Requerimientos A y B	Explicación de la Comparación
1 - 2	A y B tienen igual importancia	A y B contribuyen de igual manera al éxito global del producto
3 - 4	Se considera que A es moderadamente más importante que B	A es ligeramente más importante para el éxito del producto que B
5 - 6	Se considera que A es fuertemente más importante que B	A es fuertemente más importante para el éxito del producto que B
7 - 8	Se considera que A es mucho más importante que B, o se ha demostrado ser más importante que B	La dominancia de A sobre B ha sido demostrada
9	Se ha demostrado que A es mucho más importante que B	Toda la evidencia posible disponible prueba que A es mucho más importante que B para el éxito del producto

Según [14], el proceso AHP se puede describir paso a paso como sigue:

1. Construir la matriz de comparación [C] usando la escala 1-9 de comparación descrita en la Tabla B. 1.
2. Normalizar la matriz [C] para obtener [NormC].
3. Promediar los valores por filas. Estos resultados conforman el vector de pesos {W}.
4. Realizar el chequeo de consistencia en [C]:
 - 4.1. Calcular el vector de pesos sumados, $\{Ws\} = [C] \times \{W\}$.
 - 4.2. Calcular el vector de consistencia, $\{Cons\} = \{Ws\}/\{W\}$.
 - 4.3. Estimar λ como el promedio de valores en el vector {Cons}.
 - 4.4. Evaluar el índice de consistencia, $CI = (\lambda - n)/(n - 1)$.
 - 4.5. Calcular la relación de consistencia, $CR = CI/RI$, donde el índice de aleatoriedad se describe en la Tabla B. 2.

4.6. Si CR es menor que el 10%, entonces la matriz [C] es consistente y se puede proceder con los pesos {W}. Caso contrario, es necesario ajustar la matriz [C] y repetir el proceso.

Tabla B. 2. Valores del Índice de Aleatoriedad [14]

n	R(n)	n	R(n)	n	R(n)
1	0	6	1.25	11	1.51
2	0	7	1.35	12	1.54
3	0.52	8	1.40	13	1.56
4	0.89	9	1.45	14	1.57
5	1.11	10	1.49	15	1.58

La matriz de comparación por pares [C] se muestra en la Tabla B. 3. Se puede demostrar que esta tabla posee una Relación de Consistencia CR del 8%, con lo cual, los pesos de importancia descritos en la Tabla 2.1 son confiables y serán utilizados en este proceso de diseño. Para calcular la importancia, se realizó una equivalencia entre los pesos (%) y una escala del 1 al 5, asignando al requerimiento con el mayor peso un valor de 5, y el resto se estimó aplicando una regla de tres simple. Los resultados de estos cálculos se detallan en la Tabla 2.1.

Tabla B. 3. Matriz de Comparación por Pares [C] [Elaboración Propia]

Requerimientos		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trabajo en condiciones climáticas adversas	1	1.00	0.33	3.00	5.00	3.00	1.00	1.00	1.00	0.33	0.14
Manejo apropiado del cacao	2	3.00	1.00	5.00	5.00	7.00	1.00	1.00	3.00	1.00	0.33
Facilidad de manejo del equipo	3	0.33	0.20	1.00	5.00	1.00	0.20	0.20	1.00	0.20	0.14
Tiempo de Secado	4	0.20	0.20	0.20	1.00	0.33	0.14	0.20	0.33	0.20	0.11
Costo de mantenimiento del equipo	5	0.33	0.14	1.00	3.00	1.00	0.33	0.33	0.33	0.20	0.14
Costo del equipo	6	1.00	1.00	5.00	7.00	3.00	1.00	3.00	1.00	1.00	1.00
Accesibilidad de la fuente de energía	7	1.00	1.00	5.00	5.00	3.00	0.33	1.00	1.00	1.00	0.33
Diseño innovador	8	1.00	0.33	1.00	3.00	3.00	1.00	1.00	1.00	3.00	0.33
Impacto ambiental	9	3.00	1.00	5.00	5.00	5.00	1.00	1.00	0.33	1.00	0.33
Capacidad de trabajar a pequeña escala	10	7.00	3.00	7.00	9.00	7.00	1.00	3.00	3.00	3.00	1.00

Apéndice C.

Detalle de la Casa de la Calidad

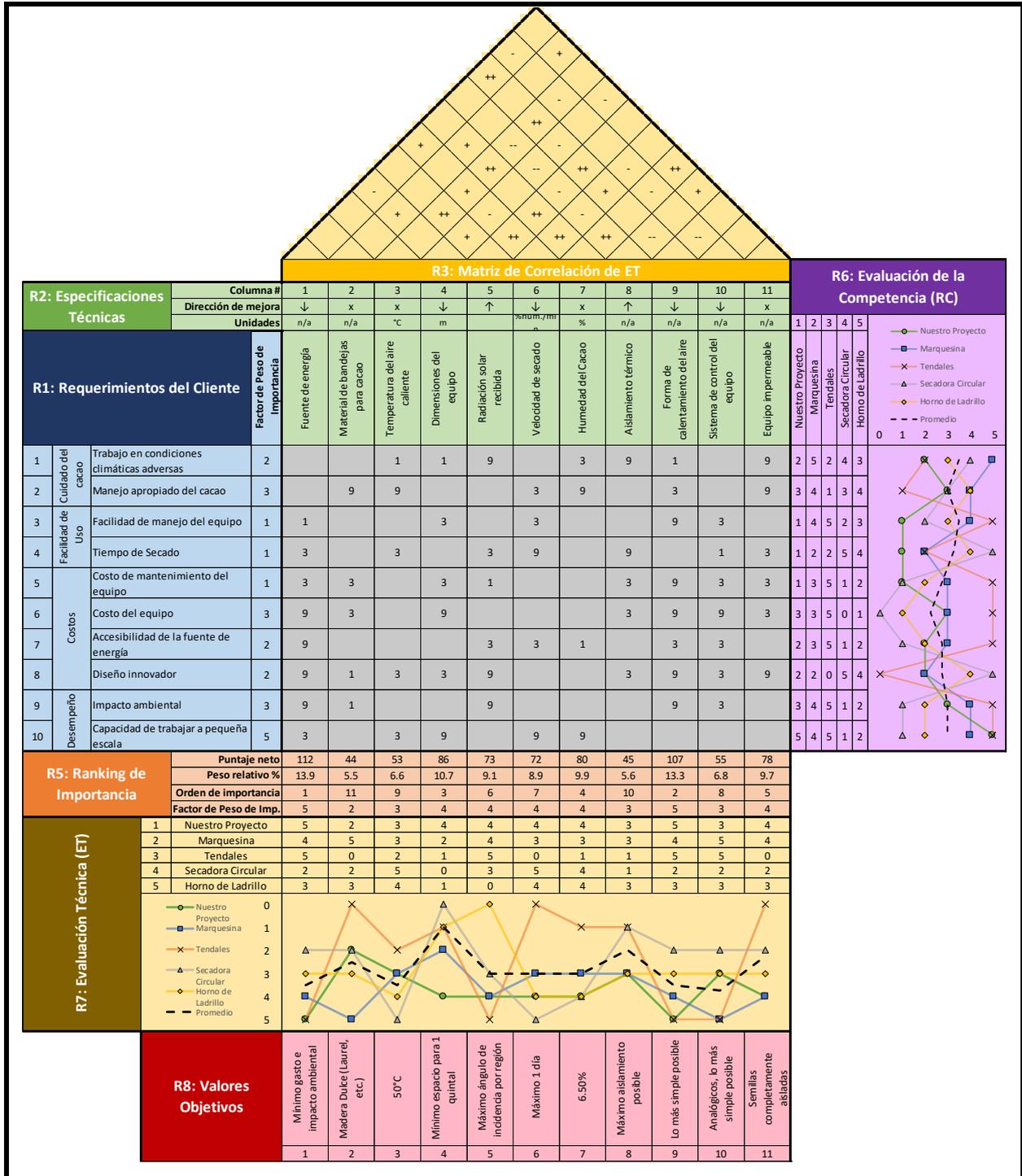


Figura C. 1. Casa de la Calidad Completa [Elaboración Propia]

La casa de calidad implementada en este proyecto se utilizó con el fin de traducir las necesidades de los clientes y convertirlas en parámetros técnicos que sirvieran para el

orientar el diseño y permitir seleccionar entre las alternativas de solución propuestas [14].

Esta matriz constó con las siguientes sub-matrices (cuartos de la casa):

- Cuarto 1: Requerimientos del Cliente. (Tabla 2.1)
- Cuarto 2: Especificaciones Técnicas.
- Cuarto 3: Matriz de Correlación de las Especificaciones.
- Cuarto 4: Matriz de Relación entre los Requerimientos y las Especificaciones.
- Cuarto 5: Importancia de las Especificaciones.
- Cuarto 6: Evaluación de la Competencia en satisfacer los Requerimientos.
- Cuarto 7: Evaluación de la Competencia en su desempeño contra las Especificaciones.
- Cuarto 8: Valores Objetivos de cada Especificación.

Especificaciones Técnicas

En la Tabla C.1 se listan las especificaciones técnicas que se obtuvieron de los diálogos con los clientes, además de una breve descripción de las mismas, sus unidades y la dirección en la que se desea mejorar dicho parámetro.

Tabla C. 1. Detalle de las especificaciones Técnicas [Elaboración Propia]

Especificación		Descripción	Dirección de Mejora	Unidades
1	Fuente de energía	El tipo de fuente, teniendo en cuenta su accesibilidad, precio, poder calorífico, etc.	↓	
2	Material de bandejas para cacao	Madera dulce (laurel, etc.) para no contaminar el cacao.	x	
3	Temperatura del aire caliente	Debe ser 50°C máximo.	x	°C
4	Dimensiones del equipo	No hay restricciones, pero se debe tratar de que sea lo más pequeño posible.	↓	m
5	Radiación solar recibida	El calor y la radiación solar recibida debe controlarse o aprovecharse para el calentamiento del aire.	↑	W/m ²
6	Velocidad de secado	Debe minimizarse o ser comparable a los demás métodos disponibles (un par de horas hasta 3 días máx.)	↓	%hum/min
7	Humedad Final del Cacao	Debe ser 7%.	x	%hum
8	Aislamiento térmico	Debe contribuir a la eficiencia del equipo en los diseños donde se requiera, teniendo en cuenta el costo total.	↑	
9	Forma de calentamiento del aire	Se debe tener en cuenta si usar una caldera, convección natural o forzada, radiación solar, etc., con sus costos.	↓	
10	Sistema de control del equipo	No debe ser complicado de manejar ni regular los parámetros de desempeño requeridos por las normas.	↓	

Cálculo de los Pesos de Importancia de las Especificaciones

El cuarto 4 (Tabla C. 3) es la matriz de relación en comparación por pares entre los requerimientos del cliente y las especificaciones técnicas definidas anteriormente. Este proceso se realiza aplicando una escala del 0-9 de acuerdo con la importancia relativa que se considera que tienen entre sí. El cuarto 5 (Tabla C. 3) es el resultado de los pesos de importancia de cada especificación técnica. Estos se calculan mediante el uso de la matriz de relación (cuarto 4), en la que cada puntuación se multiplica por la importancia de cada requerimiento y se suman todos esos resultados por cada especificación. Al final, solo se ponderan todos esos resultados en porcentajes para obtener así los pesos (%). El cálculo final de los pesos se resume en la Tabla C.4.

Tabla C. 3. Matriz de Relación de Requerimientos y Especificaciones [Elaboración Propia]

Requerimientos vs. Especificaciones		Especificaciones Técnicas										
		Fuente de energía	Material de bandejas para cacao	Temperatura del aire caliente	Dimensiones del equipo	Radiación solar recibida	Velocidad de secado	Humedad del Cacao	Aislamiento térmico	Forma de calentamiento del aire	Sistema de control del equipo	Equipo impermeable
Requerimientos		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Trabajo en condiciones climáticas adversas			1	1	9		3	9	1		9
2	Manejo apropiado del cacao		9	9			3	9		3		9
3	Facilidad de manejo del equipo	1			3		3			9	3	
4	Tiempo de Secado	3		3		3	9		9		1	3
5	Costo de mantenimiento del equipo	3	3		3	1			3	9	3	3
6	Costo del equipo	9	3		9				3	9	9	3
7	Accesibilidad de la fuente de energía	9				3	3	1		3	3	
8	Diseño innovador	9	1	3	3	9			3	9	3	9
9	Impacto ambiental	9	1			9				9	3	
10	Capacidad de trabajar a pequeña escala	3		3	9		9	9				

Tabla C. 4. Pesos de Importancia de las Especificaciones Técnicas [Elaboración Propia]

	Especificación	Puntaje Neto	Peso (%)	Orden de Importancia	Factor de Peso de Importancia
1	Fuente de energía	112	13.9	1	5
2	Material de bandejas para cacao	44	5.5	11	2
3	Temperatura del aire caliente	53	6.6	9	3
4	Dimensiones del equipo	86	10.7	3	4
5	Radiación solar recibida	73	9.1	6	4
6	Velocidad de secado	72	8.9	7	4
7	Humedad Final del Cacao	80	9.9	4	4
8	Aislamiento térmico	45	5.6	10	3
9	Forma de calentamiento del aire	107	13.3	2	5
10	Sistema de control del equipo	55	6.8	8	3
11	Equipo impermeable	78	9.7	5	4

Evaluación de la Competencia contra los Requerimientos y las Especificaciones

Es necesario comparar el desempeño del proyecto contra la competencia, para así poder evaluar si el diseño es óptimo y factible al competir en el mercado de las soluciones disponibles actualmente. La competencia descrita son las soluciones existentes al problema en cuestión, descritas en el Capítulo 1. La comparación se describe en la Figura C.2.

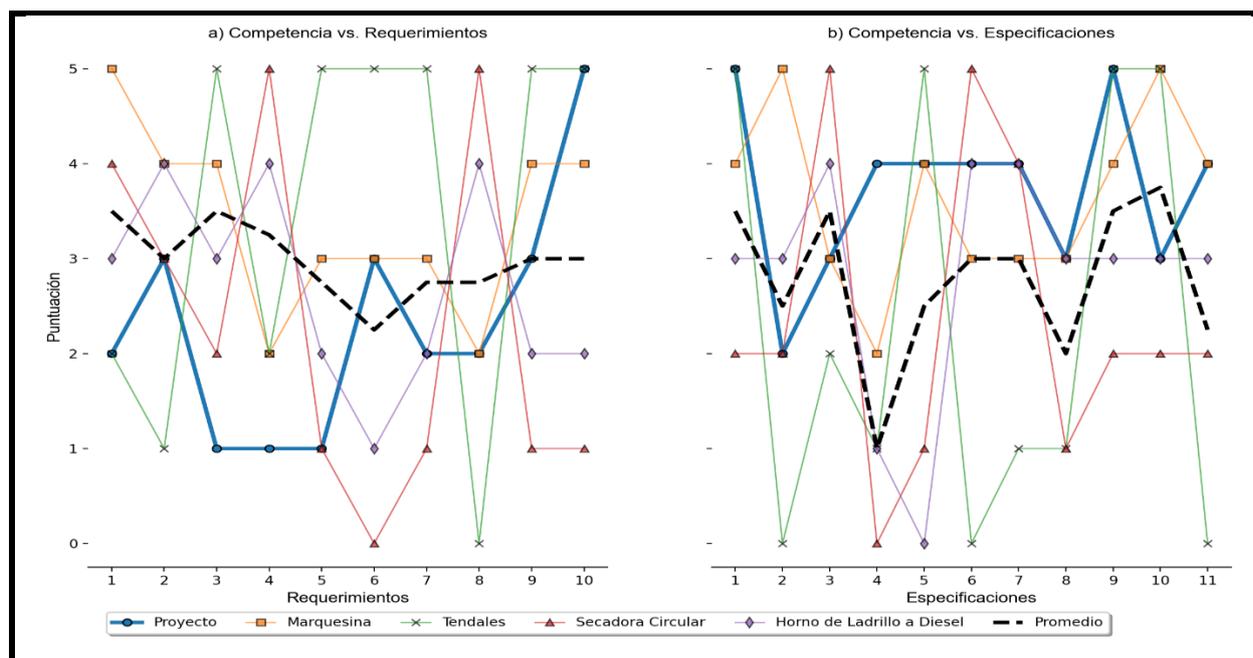


Figura C. 2. Comparación del presente Proyecto con la Competencia [Elaboración Propia]

Apéndice D.

Propiedades Físicas y Termodinámicas de los Materiales Involucrados en el Diseño

Materiales de Construcción del Equipo

A continuación, en la Tabla D.1, se listan los materiales que fueron utilizados a lo largo del proyecto con sus propiedades físicas y termodinámicas más relevantes. En el Capítulo 3 se detalla donde fueron utilizadas cada uno de estos materiales.

Tabla D. 4. Propiedades de Materiales Sólidos y Líquidos utilizados en el Diseño [21]

Material	Propiedad	Unidades	Valor
Cacao	Densidad	kg/m ³	775
	Calor Específico	J/kg*K	1373.27
	Conductividad Térmica	W/m*K	0.2453
	Ancho	m	0.015
	Largo	m	0.025
Vidrio de Ventana Común	Densidad	kg/m ³	2500
	Calor Específico	J/kg*K	750
	Emisividad	-	0.9
	Transmisividad	-	0.79
	Absortividad	-	0.13
	Espesor	m	0.006
Rocas de Río Basálticas	Densidad	kg/m ³	2320
	Calor Específico	J/kg*K	810
	Emisividad	-	0.98
	Absortividad	-	0.98
	Conductividad Térmica	W/m*K	2.15
	Diámetro	m	0.05
Acero Galvanizado	Conductividad Térmica	W/m*K	15.1
Poliestireno Expandido (PTE)	Conductividad Térmica	W/m*K	0.04
Madera / Laurel	Densidad	kg/m ³	510
	Calor Específico	J/kg*K	1383
Agua Líquida	Densidad	Kg/m ³	1000
	Calor Específico	J/kg*K	4184

Flujo de Aire

Las siguientes ecuaciones fueron obtenidas mediante ajustes de mínimos cuadrados de los datos tabulados en la Tabla A.4 del libro de [21]. Todos los modelos tienen un ajuste de al menos $R^2 = 0.999$. El rango de validez de estas ecuaciones es entre 200K a 400K.

Densidad del Aire:

$$\rho(T) = 360.77 T^{-1.0055}$$
$$\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right], T[\text{K}] \quad (\text{D.1})$$

Calor Específico:

$$10^{-3}c(T) = 1.0722 - 5.6534E^{-4}T + 1.4438E^{-6}T^2 - 1.1132E^{-9}T^3$$
$$+ 3.0372E^{-13}T^4$$
$$c \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right], T[\text{K}] \quad (\text{D.2})$$

Viscosidad Dinámica

$$10^7\mu(T) = -1.8504 + 7.9781E^{-1}T - 7.2457E^{-4}T^2 + 5.1150E^{-7}T^3$$
$$- 1.5858E^{-10}T^4$$
$$\mu[\text{Pa} \cdot \text{s}], T[\text{K}] \quad (\text{D.3})$$

Viscosidad Cinemática

$$10^6\nu(T, 1\text{atm})$$
$$= -7.6110E^{-1} + 1.0637E^{-2}T + 1.7267E^{-4}T^2 - 8.3209E^{-8}T^3$$
$$+ 2.2585E^{-11}T^4$$
$$\nu \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right], T[\text{K}] \quad (\text{D.4})$$

La viscosidad cinemática presenta una variación considerable con la presión a la que se encuentra el gas [21]. La ecuación presentada sólo es válida para presión de 1atm. Para presiones diferentes, se puede aproximar la viscosidad de la siguiente manera:

$$\nu@P = \frac{P}{1 \text{ atm}} * \nu@(1 \text{ atm}) \quad (\text{D.5})$$

Conductividad Térmica

$$10^3k(T) = -1.6840E^{-1} + 9.9581E^{-2}T - 5.0195E^{-5}T^2 + 6.1985E^{-8}T^3$$
$$- 8.8020E^{-11}T^4 + 4.3541E^{-14}T^5$$
$$k \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right], T[\text{K}] \quad (\text{D.6})$$

Número de Prandtl

$$Pr(T) = 8.5990E^{-1} - 9.1386E^{-4}T + 1.9217E^{-6}T^2 - 2.4938E^{-9}T^3$$
$$+ 2.2421E^{-12}T^4 - 8.9110E^{-16}T^5$$
$$Pr[-], T[\text{K}] \quad (\text{D.7})$$

Agua

Las siguientes ecuaciones fueron obtenidas mediante ajustes de mínimos cuadrados de los datos tabulados en la Tabla A-4 del libro de [23]. Todos los modelos tienen un ajuste de al menos $R^2 = 0.999$. El rango de validez de estas ecuaciones es entre 0.01°C a 200°C .

Entalpía de Líquido Saturado

$$h_f(T) = 4.2446 T - 2.9511$$
$$h_f \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right], T [^\circ\text{C}] \quad \text{(D.8)}$$

Entalpía de Vapor Saturado

$$h_g(T) = -0.0029 T^2 + 2.0798 T + 2496.7497$$
$$h_g \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right], T [^\circ\text{C}] \quad \text{(D.9)}$$

Entalpía de Vaporización

$$h_{fg}(T) = -0.0036 T^2 - 2.0272 T + 2495.2351$$
$$h_{fg} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right], T [^\circ\text{C}] \quad \text{(D.10)}$$

Apéndice E.

Cálculo de Coeficientes de Transferencia de Calor

Todas las ecuaciones que se presentan a continuación fueron obtenidas del libro de [21], a menos que se indique lo contrario.

Convección en las Bandejas

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{u_a D_{1c}}{\nu_a} \quad (\text{E.1})$$

Número de Nusselt:

$$Nu = \frac{2.06}{\varepsilon_{ban}} Re^{0.425} \quad (\text{E.2})$$

Coeficiente de Transferencia:

$$h_{c-ban} = \frac{Nu \cdot k_a}{H_{ban}} \quad (\text{E.3})$$

Convección entre la Cubierta y el Ambiente Exterior

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{u_\infty L}{T_m} \quad (\text{E.4})$$

Número de Nusselt:

$$Nu = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (\text{E.5})$$

Coeficiente de Transferencia:

$$h_{c-cub-\infty} = \frac{Nu \cdot k_a}{L} \quad (\text{E.6})$$

Convección entre la Cubierta y el Aire Interior

Número de Grashoff:

$$Gr = \frac{g \sin(\theta) \beta_a (T_m - T_\infty) L^3}{\nu_a^2} \quad (\text{E.7})$$

Número de Raleigh:

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (\text{E.8})$$

Número de Nusselt:

$$Nu = 0.069 Ra^{1/3} Pr^{0.074} \quad (\text{E.9})$$

Coeficiente de Transferencia:

$$h_{c-cub-a} = \frac{Nu \cdot k_a}{L} \quad (\text{E.10})$$

Radiación entre la Cubierta y el Lecho de Rocas

Coeficiente de Transferencia:

$$h_{r-cub-l} = \frac{4 \sigma \left(\frac{T_{cub} + T_l}{2} \right)^3}{\frac{1}{\varepsilon_{cub}} + \frac{1}{\varepsilon_l} - 1} \quad (\text{E.11})$$

Radiación entre la Cubierta y el Aire Exterior [24]

Emisividad del Aire Exterior como cuerpo negro:

$$\varepsilon_{sky} = -0.34 + 0.00336 T_\infty + 0.14\phi_\infty \quad (\text{E.12})$$

Temperatura de Cielo del Aire Exterior:

$$T_{sky-\infty} = T_\infty \varepsilon_{sky}^{0.25} \quad (\text{E.13})$$

Coeficiente de Transferencia:

$$h_{r-cub-a} = \sigma \varepsilon_{sky} \frac{(T_{cub}^4 - T_{sky-\infty}^4)}{T_{cub} - T_{sky-\infty}} \quad (\text{E.14})$$

Radiación entre la Cubierta y el Aire Interior [24]

Emisividad del Aire Interior como cuerpo negro:

$$\varepsilon_{sky} = -0.34 + 0.00336 T_m + 0.14\phi_m \quad (\text{E.15})$$

Temperatura del Cielo del Aire Interior

$$T_{sky-a} = T_m \varepsilon_{sky}^{0.25} \quad (\text{E.16})$$

Coeficiente de Transferencia:

$$h_{r-cub-a} = \sigma \varepsilon_{sky} \frac{(T_{cub}^4 - T_{sky-a}^4)}{T_{cub} - T_{sky-a}} \quad (\text{E.17})$$

Convección entre el Lecho de Rocas y el Aire Interior a través de las rocas

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{u_a D_l}{\nu_a} \quad (\text{E.18})$$

Número de Nusselt:

$$Nu = \frac{2.06}{\varepsilon_l} Re^{0.425} \quad (\text{E.19})$$

Coefficiente de Transferencia:

$$h_{c-l-a-in} = \frac{Nu \cdot k_a}{L} \quad (\text{E.20})$$

Convección entre el Lecho de Rocas y el Aire Interior en la superficie del Lecho

Número de Grashoff:

$$Gr = \frac{g \sin(\theta) \beta_a (T_l - T_{cub}) L^3}{\nu_a^2} \quad (\text{E.21})$$

Número de Raleigh:

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (\text{E.22})$$

Número de Nusselt:

$$Nu = 0.069 Ra^{1/3} Pr^{0.074} \quad (\text{E.23})$$

Coefficiente de Transferencia:

$$h_{c-l-a-sup} = \frac{Nu \cdot k_a}{L} \quad (\text{E.24})$$

Convección entre el Lecho de Rocas y el Exterior

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{u_a L}{\nu_a} \quad (\text{E.25})$$

Número de Nusselt:

$$Nu = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (\text{E.26})$$

Coefficiente de Transferencia:

$$h_{c-l-\infty} = \frac{Nu \cdot k_a}{L} \quad (\text{E.27})$$

Transferencia Global con el Exterior

Coeficiente de Transferencia:

$$U_f = \frac{1}{2 \frac{\delta_{ace}}{k_{ace}} + \frac{\delta_{pte}}{k_{pte}} + \frac{1}{h_{c-l-\infty}}} \quad (\text{E.28})$$

Radiación entre el Lecho de Rocas y el Aire Interior [24]

Emisividad del Aire Interior como Cuerpo Negro:

$$\varepsilon_{sky} = -0.34 + 0.00336 T_m + 0.14 \phi_m \quad (\text{E.29})$$

Temperatura de Cielo del Aire Interior:

$$T_{sky-a} = T_m \varepsilon_{sky}^{0.25} \quad (\text{E.30})$$

Coeficiente de Transferencia:

$$h_{r-l-a} = \sigma \varepsilon_{sky} \frac{(T_l^4 - T_{sky-a}^4)}{T_l - T_{sky-a}} \quad (\text{E.31})$$

Apéndice F.

Descripción de las Alternativas de Solución Consideradas

Alternativa 1:

Colector solar con lecho rocoso con capacidad para un quintal y secado indirecto mediante tiro natural de aire ambiente (Figura 2.1a).

Ventajas

- Amigable con el ambiente.
- No electrónicos ni partes de difícil manejo.
- Fuente de energía gratis.

Desventajas

- Tiempo de secado incierto (probablemente lento).
- Requiere bastante espacio físico.
- Puede bajar su eficiencia en épocas de poco sol.

Alternativa 2:

Colector solar con lecho rocoso con capacidad para un quintal y secado indirecto mediante tiro forzado de aire ambiente (Figura 2.1b).

Ventajas

- Secado rápido (3~6 horas).

Desventajas

- Requiere electricidad.
- Contiene componentes electrónicos que pueden ser de difícil manejo para el agricultor.
- No puede trabajar indefinidamente.
- Puede bajar su eficiencia en épocas de poco sol.

Alternativa 3:

Colector solar con placa absorbadora corrugada con capacidad para un quintal y secado indirecto mediante tiro natural de aire ambiente (Figura 2.1c).

Ventajas

- Amigable con el ambiente.
- No electrónicos ni partes de difícil manejo.
- Fuente de energía gratis.

Desventajas

- Tiempo de secado incierto (probablemente lento).
- Requiere bastante espacio físico.
- Puede bajar su eficiencia en épocas de poco sol.

Alternativa 4

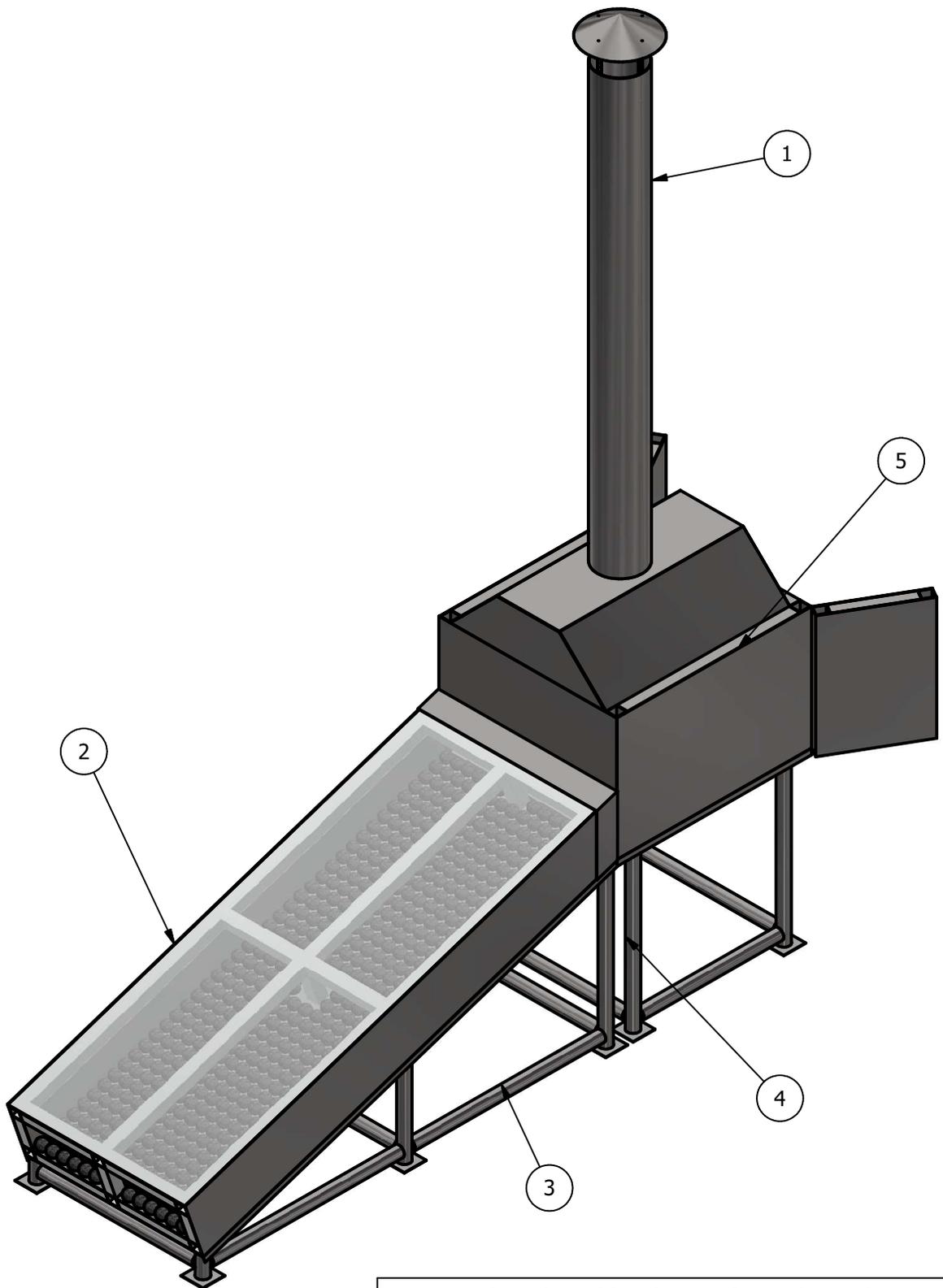
Horno a gas escalable para capacidad de un quintal (Figura 2.1d).

Ventajas

- Secado rápido (2~4 horas).
- Requiere poco espacio físico.
- El agua empleada en el caldero se puede reutilizar.
- Trabaja independiente del clima.

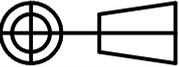
Desventajas

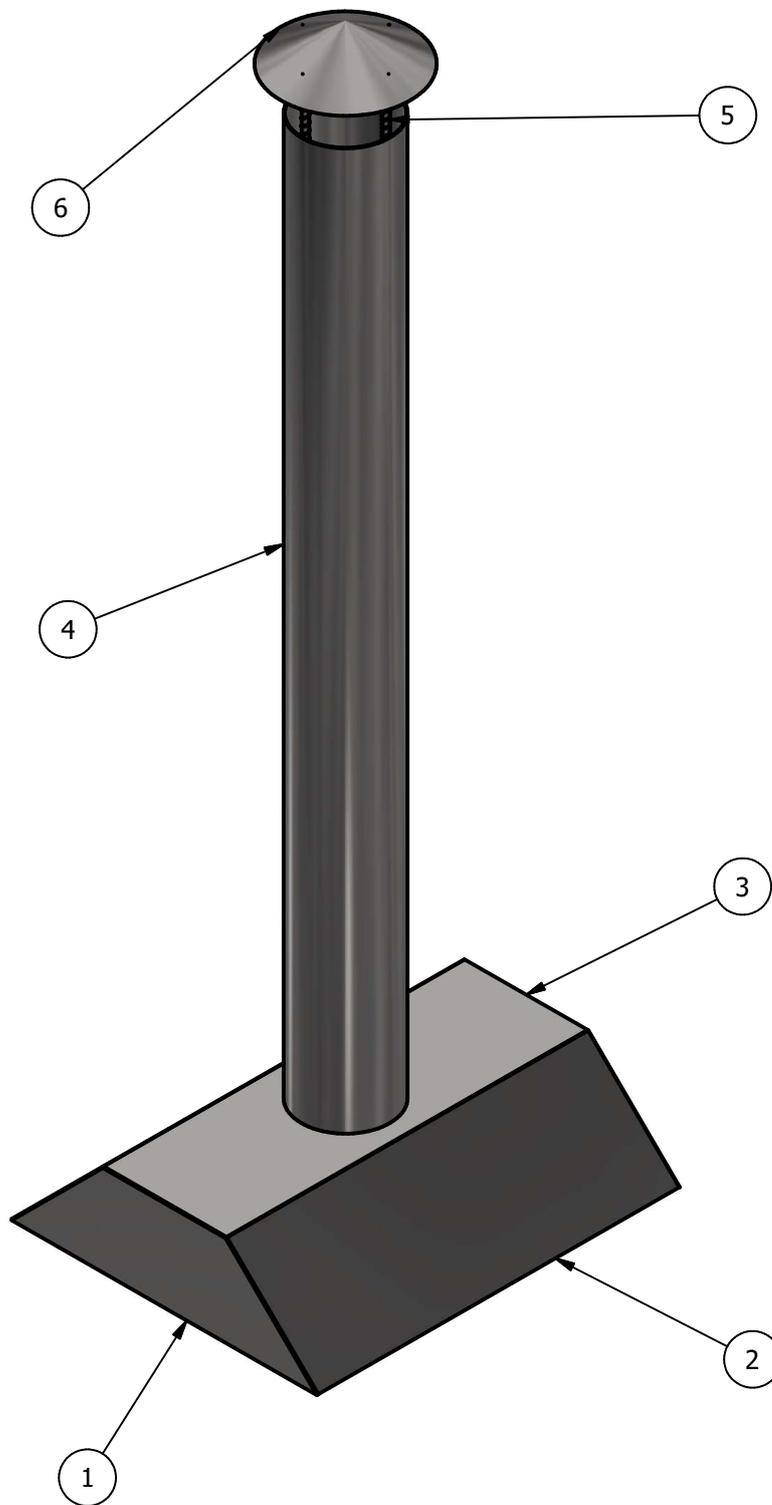
- Requiere electricidad y gas para funcionar.
- Puede contener partes complicadas de manejar para los agricultores.



LISTADO DE COMPONENTES PRINCIPALES

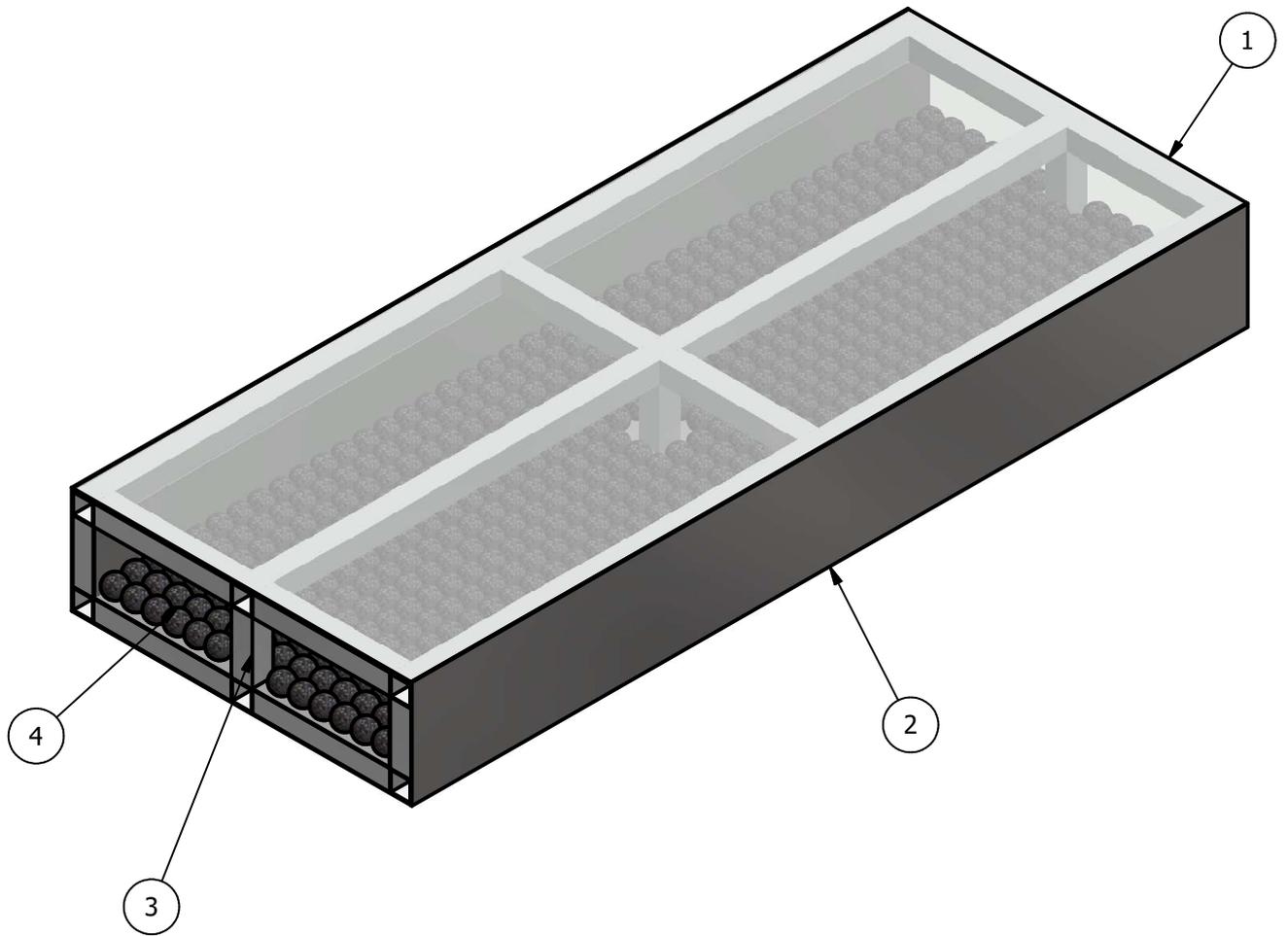
Número	Componentes	Plano
1	Techo de la Cámara	Ensamble 2
2	Colector Solar	Ensamble 3
3	Bancada del Colector	Ensamble 4
4	Bancada de la Cámara	Ensamble 5
5	Cámara de Secado	Ensamble 6

Diseño de: Castro R., Pincay K.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Diseñadores: <i>Karin Pincay Arantes</i>	Aprobado por: Ing. Zabala G.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Aprobación:
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL - FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			Proyecto de Materia Integradora: Secador para Cacao		
			Ensamble 1: Equipo Completo		Escala 0.05:1
					Hoja 1 / 6



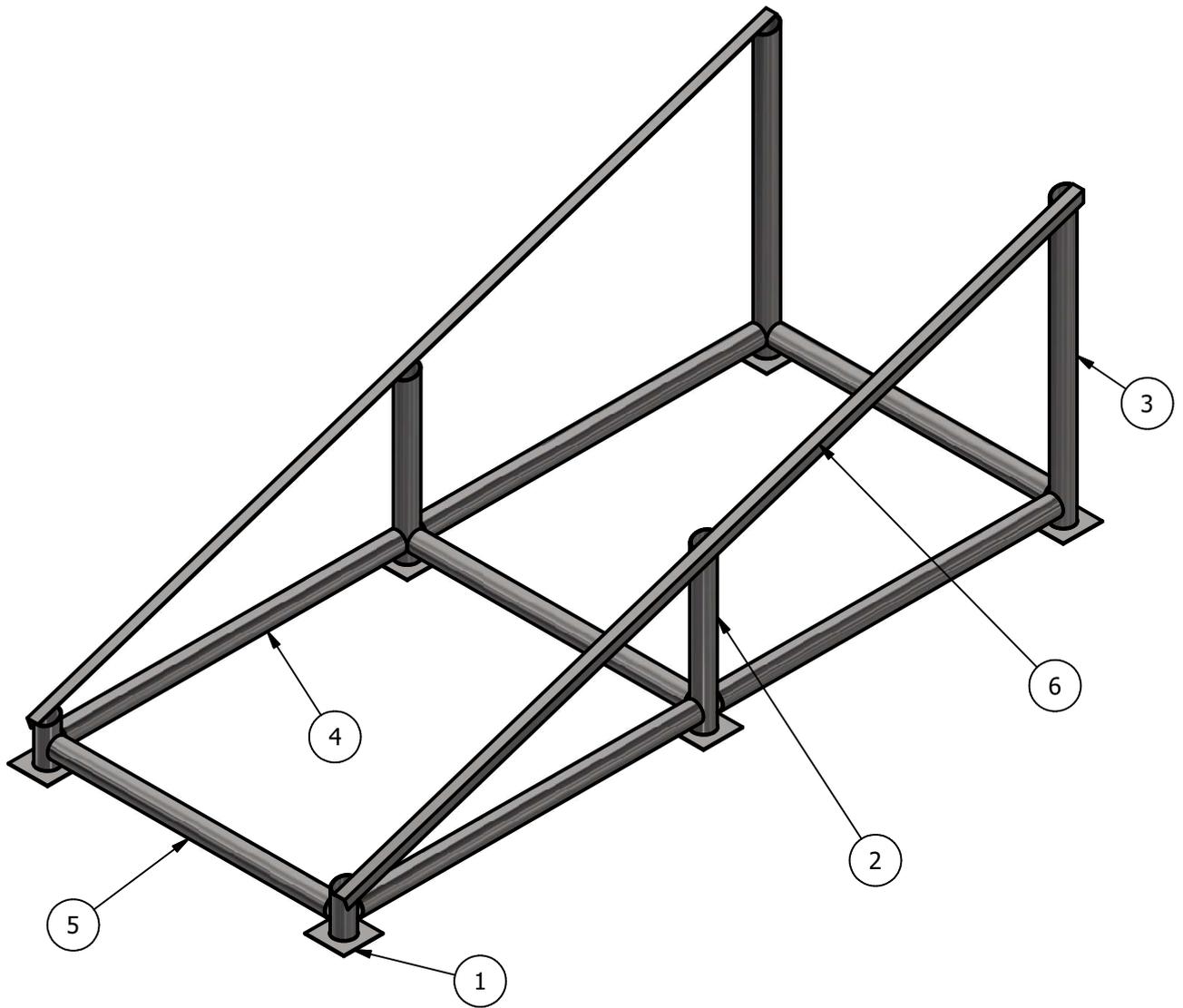
ELEMENTOS DEL TECHO DE LA CÁMARA DE SECADO					
Número	Elemento	Cantidad	Material	Espesor	Plano
1	Pared del Techo Vertical	2	Acero Galvanizado	2 mm	Plano 1
2	Pared del Techo Inclinada	2	Acero Galvanizado	2 mm	Plano 1
3	Pared del Techo Horizontal	1	Acero Galvanizado	2 mm	Plano 1
4	Chimenea	1	Acero Galvanizado	2 mm	Plano 1
5	Soporte del Sombrerete	4	Acero AISI 1020	-	Plano 1
6	Sombrerete	1	Acero Galvanizado	2 mm	Plano 1

Diseño de: Castro R., Pincay K.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Diseñadores: <i>Karin Pincay Arantes</i>	Aprobado por: Ing. Zabala G.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Aprobación:
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL - FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			Proyecto de Materia Integradora: Secador para Cacao		
			Ensamble 2: Techo de la Cámara		



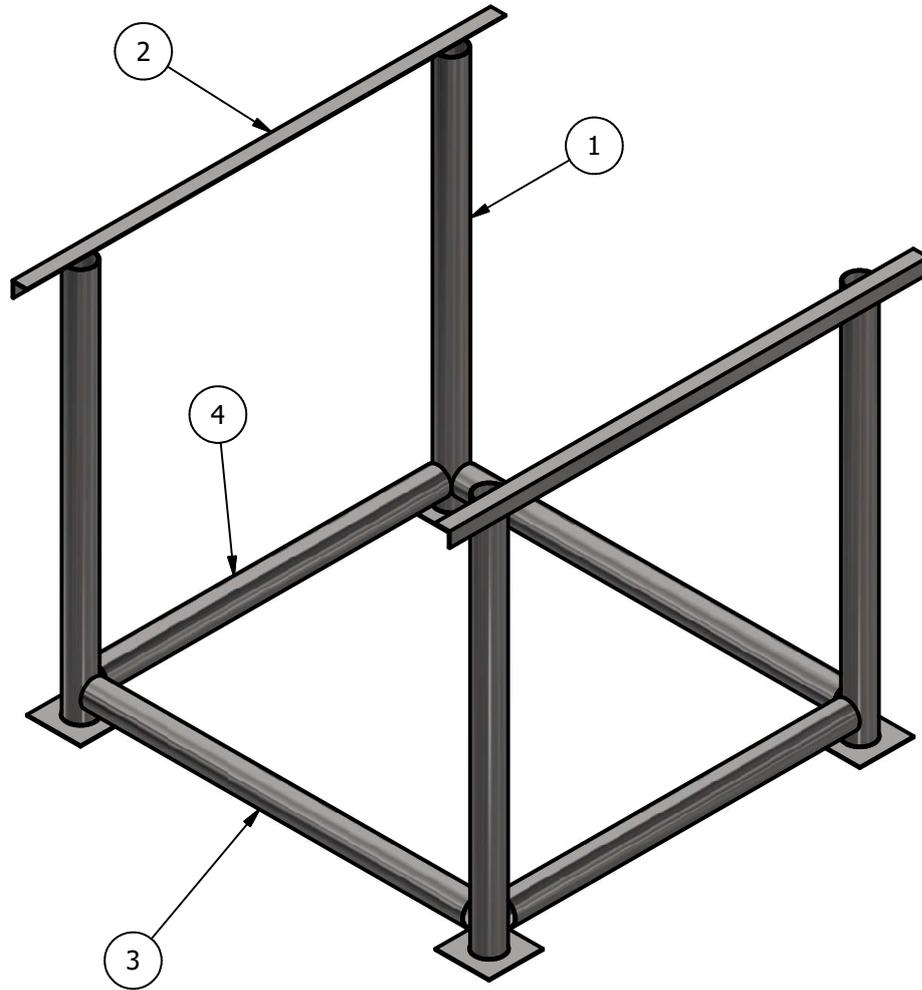
ELEMENTOS DEL COLECTOR SOLAR					
Número	Elementos	Cantidad	Material	Espesor	Plano
1	Cubierta de Vidrio	1	Vidrio Común	6 mm	Plano 2
2	Paredes Aisladas	3	Acero Galvanizado + PTE	54 mm	Plano 2
3	Armazón del Colector	1	Aluminio	2 mm	Plano 2
4	Lecho de Rocas	560	Rocas de Río Basálticas	-	Plano 2

Diseño de: Castro R., Pincay K.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Diseñadores: <i>Karin Pincay Arantes</i>	Aprobado por: Ing. Zabala G.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Aprobación:
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL - FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			Proyecto de Materia Integradora: Secador para Cacao		
			Ensamble 3: Colector Solar		



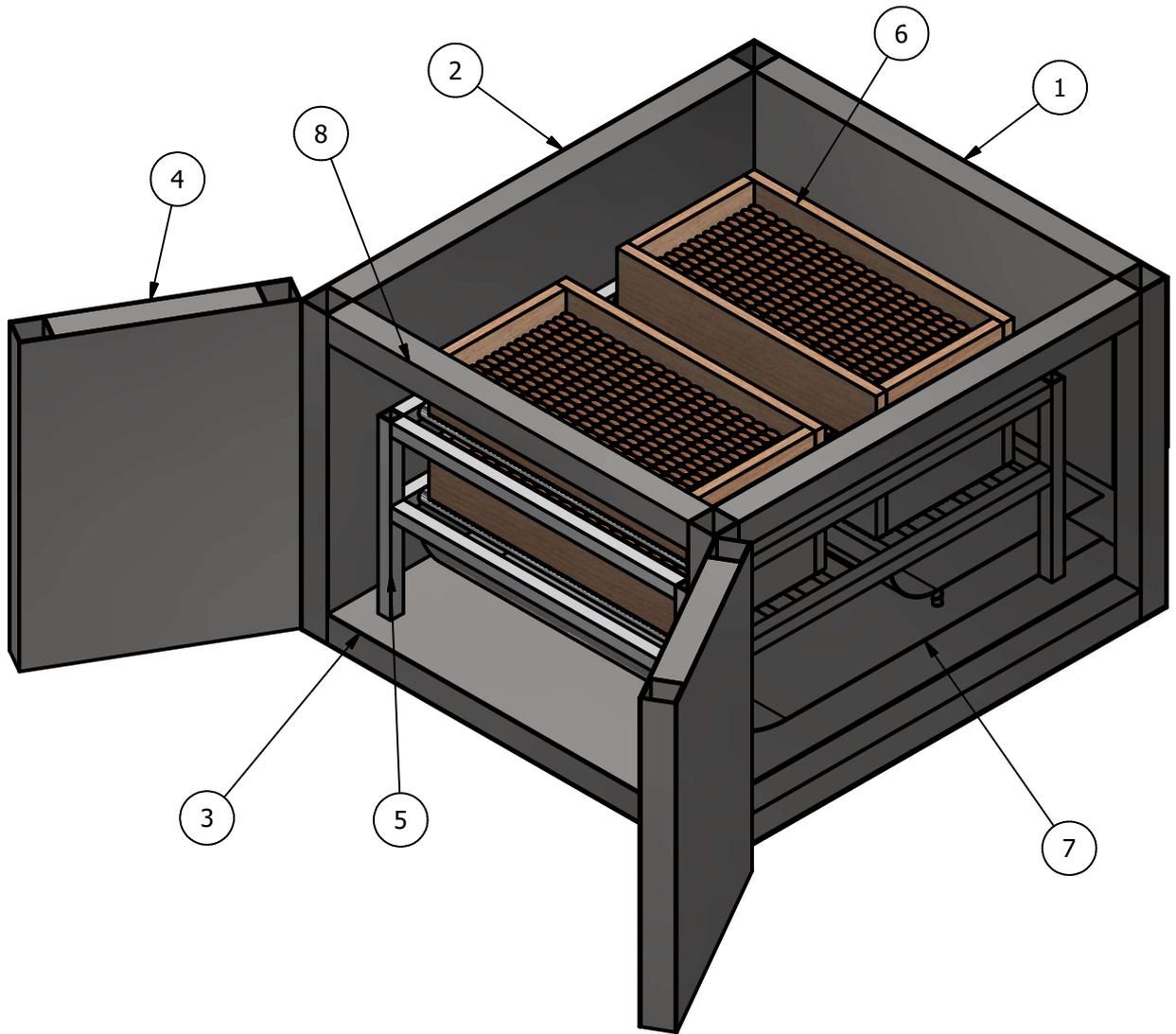
ELEMENTOS DE LA BANCADA DEL COLECTOR					
Número	Elemento	Cantidad	Material	Espesor	Plano
1	Viga Vertical 1	2	Acero AISI 1020	2 mm	Plano3
2	Viga Vertical 2	2	Acero AISI 1020	2 mm	Plano 3
3	Viga Vertical 3	2	Acero AISI 1020	2 mm	Plano 3
4	Viga Longitudinal	4	Acero AISI 1020	2 mm	Plano 3
5	Viga Transversal	3	Acero AISI 1020	2 mm	Plano 3
6	Ángulos Longitudinales	2	Acero AISI 1020	3/8"	Plano 3

Diseño de: Castro R., Pincay K.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Diseñadores: <i>Karin Pincay Arantes</i>	Aprobado por: Ing. Zabala G.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Aprobación:
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL - FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			Proyecto de Materia Integradora: Secador para Cacao		
			Ensamble 4: Bancada del Colector		

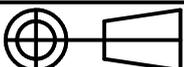


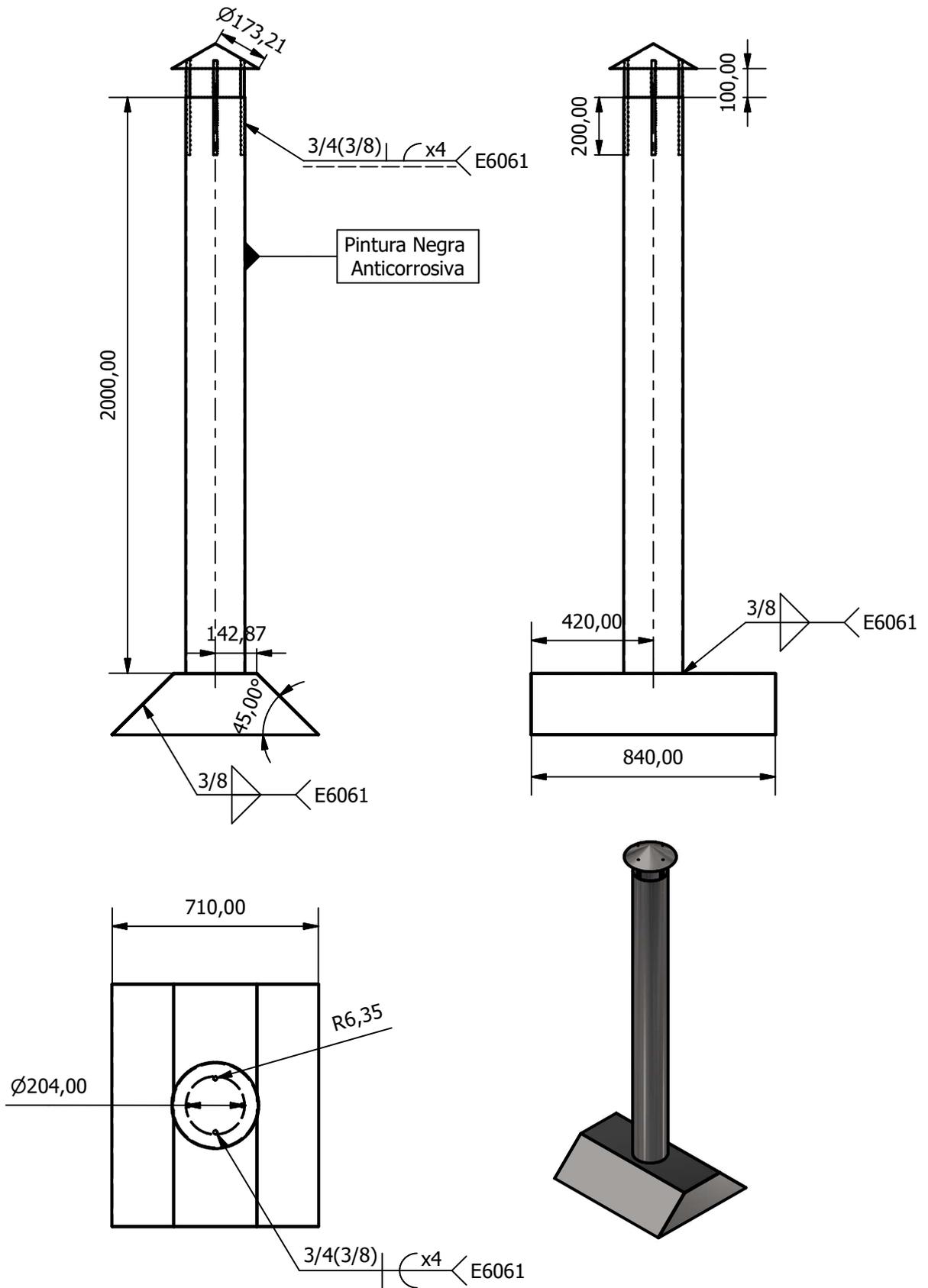
ELEMENTOS DE LA BANCADA DE LA CÁMARA					
Número	Elemento	Cantidad	Material	Espesor	Plano
1	Viga Vertical	4	Acero AISI 1020	2 mm	Plano 4
2	Ángulo Longitudinal	2	Acero AISI 1020	3/8"	Plano 4
3	Viga Transversal	2	Acero AISI 1020	2 mm	Plano 4
4	Viga Longitudinal	2	Acero AISI 1020	2 mm	Plano 4

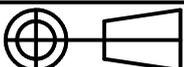
Diseño de: Castro R., Pincay K.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Diseñadores: <i>Karin Pincay Arantes</i>	Aprobado por: Ing. Zabala G.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Aprobación:
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL - FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			Proyecto de Materia Integradora: Secador para Cacao		
			Ensamble 5: Bancada de la Cámara		



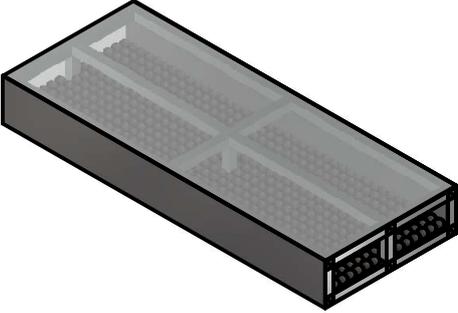
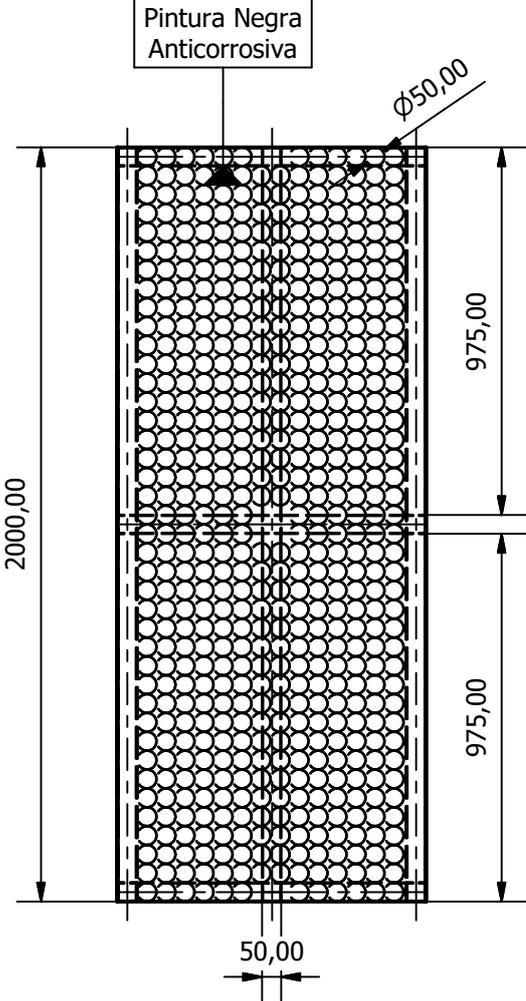
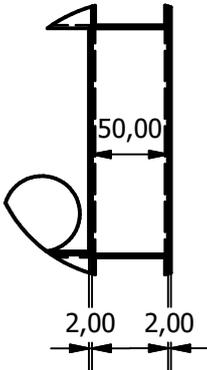
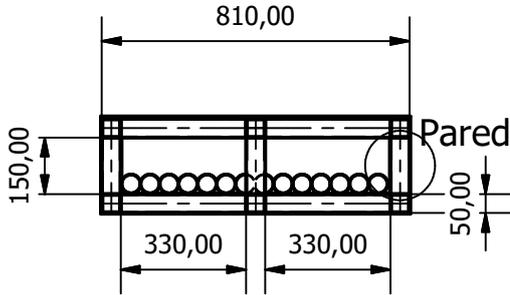
ELEMENTOS DE LA CÁMARA DE SECADO					
Número	Elementos	Cantidad	Material	Espesor	Plano
1	Pared Transversal	1	Acero Galvanizado + PTE	54 mm	Plano 5
2	Pared Lateral	2	Acero Galvanizado + PTE	54 mm	Plano 5
3	Fondo	1	Acero Galvanizado + PTE	54 mm	Plano 5
4	Puertas	2	Acero Galvanizado + PTE	54 mm	Plano 5
5	Soporte de las Bandejas	1	Aluminio	2 mm	Plano 6
6	Bandejas	4	Laurel	20 mm	Plano 7
7	Planchas Desviadoras del Aire	1	Acero Galvanizado	2 mm	Plano 8
8	Armazón de la Cámara	1	Acero AISI 1020	2 mm	Plano 5

Diseño de: Castro R., Pincay K.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Diseñadores: <i>Karin Pincay Castro</i>	Aprobado por: Ing. Zabala G.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Aprobación:
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL - FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			Proyecto de Materia Integradora: Secador para Cacao		
			Ensamble 6: Cámara de Secado		

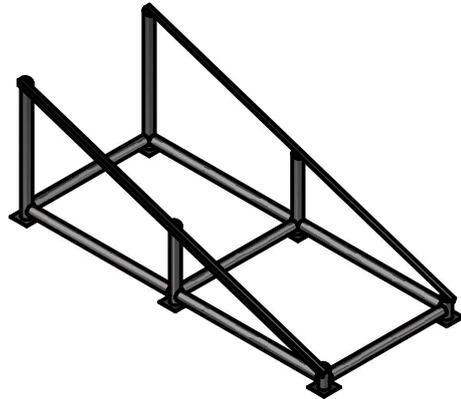
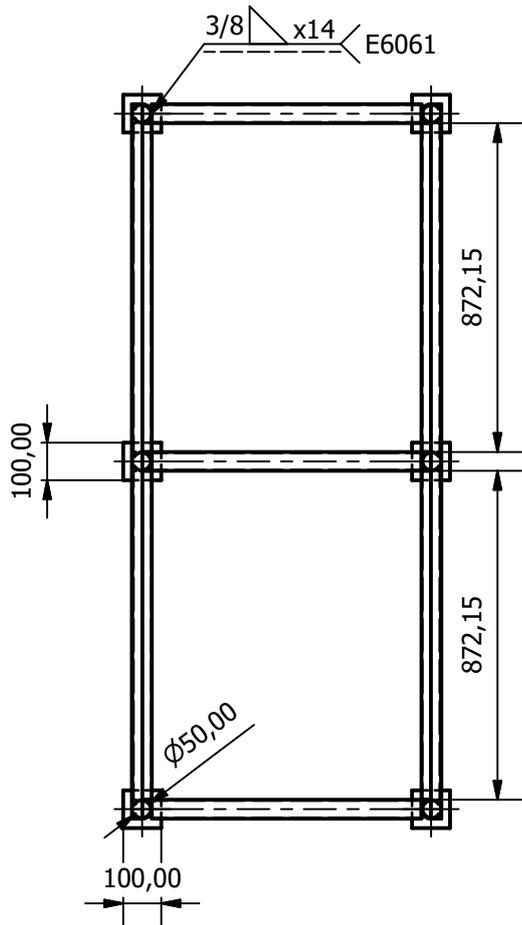
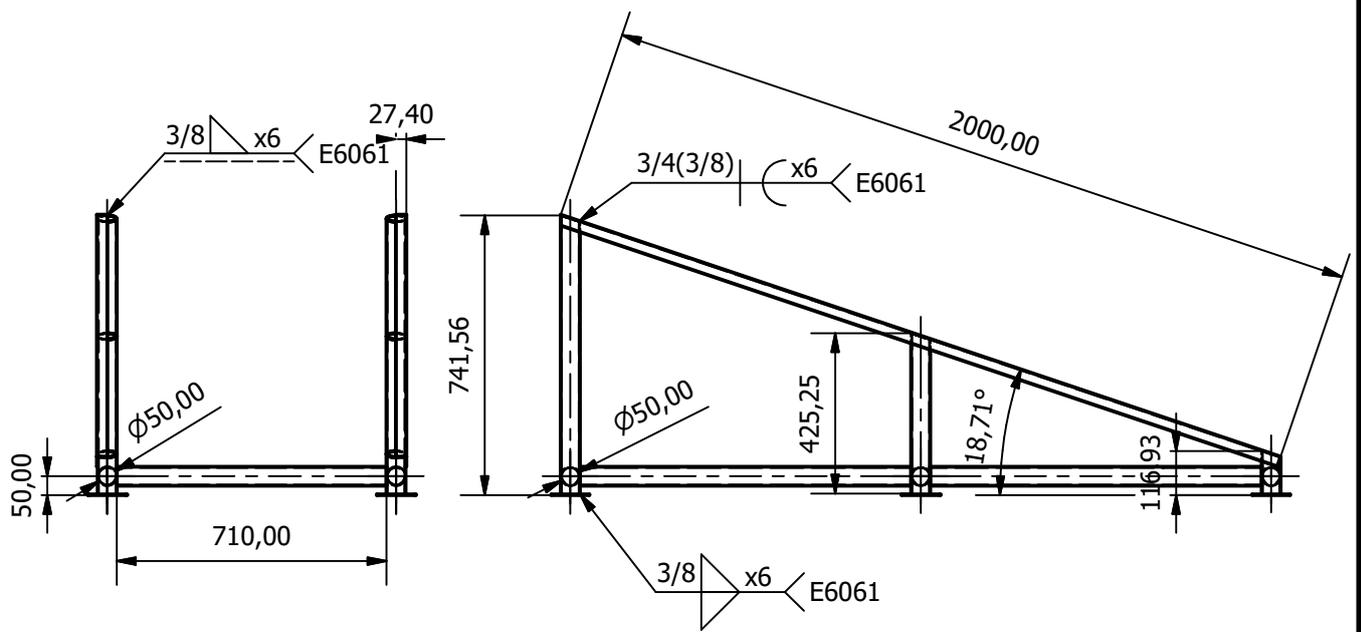


Diseño de: Castro R., Pincay K.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Diseñadores: <i>Karin Pincay Arantes</i>	Aprobado por: Ing. Zabala G.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Aprobación:
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL - FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			Proyecto de Materia Integradora: Secador para Cacao		
			Plano 1: Techo de la Cámara	Escala 0.05 : 1	

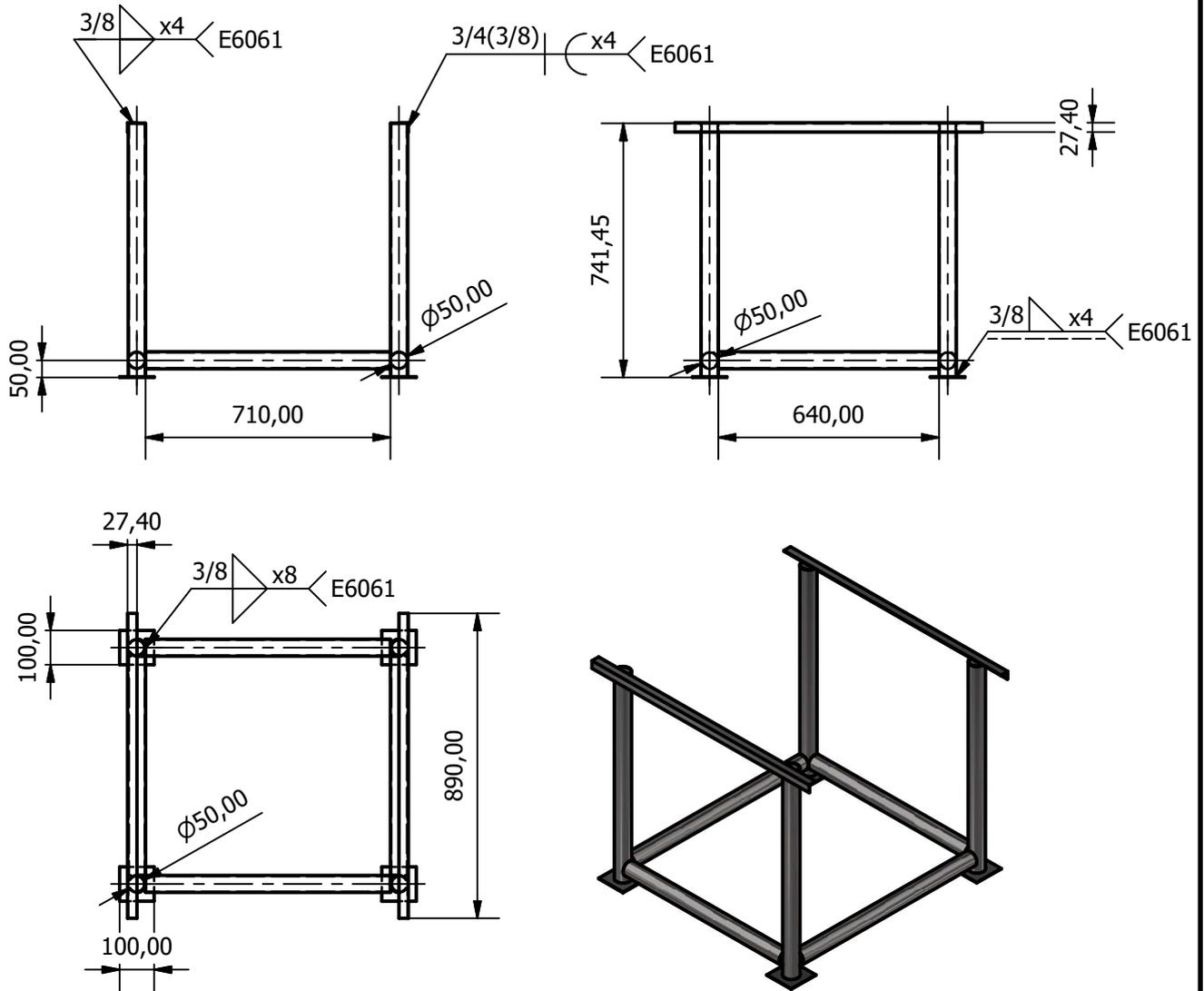
Pared (1 : 5)

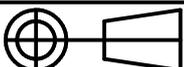


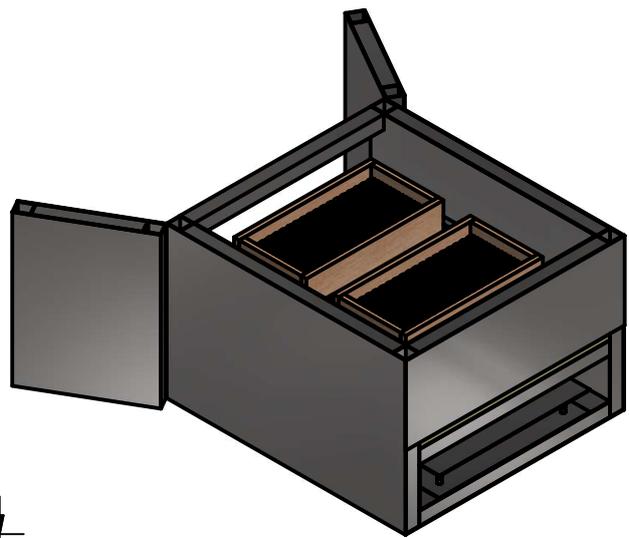
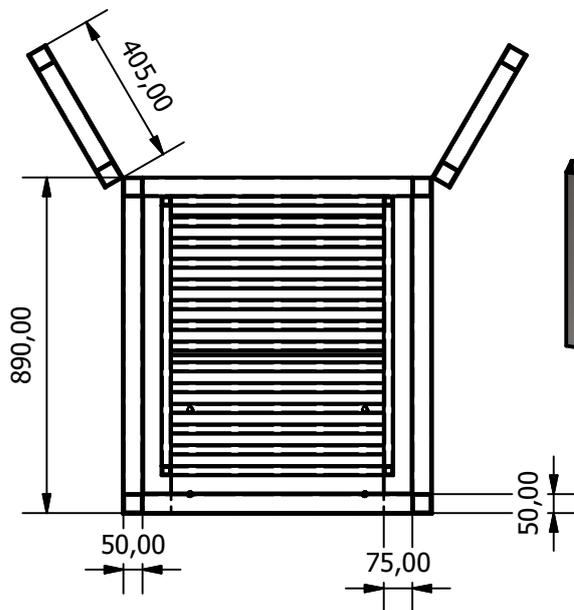
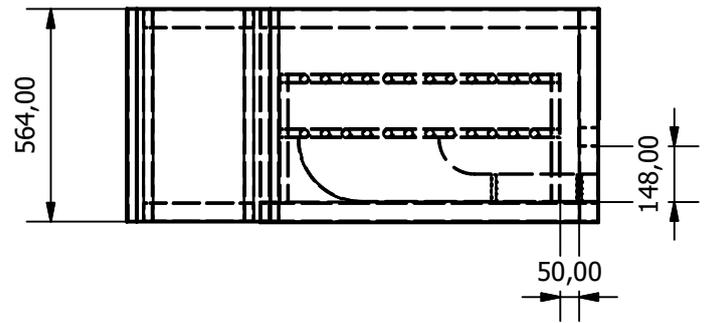
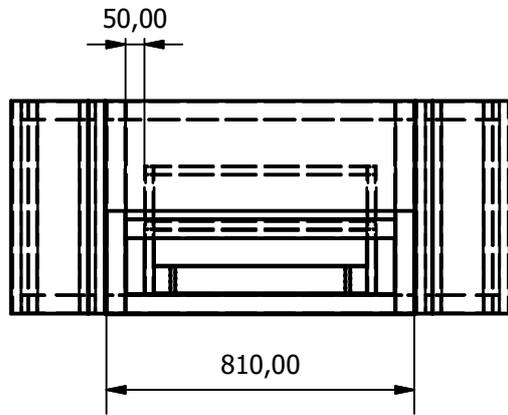
Diseño de: Castro R., Pincay K.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Diseñadores: <i>Karin Pincay Arantes</i>	Aprobado por: Ing. Zabala G.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Aprobación:
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL - FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			Proyecto de Materia Integradora: Secador para Cacao		
			Plano 2: Colector Solar		



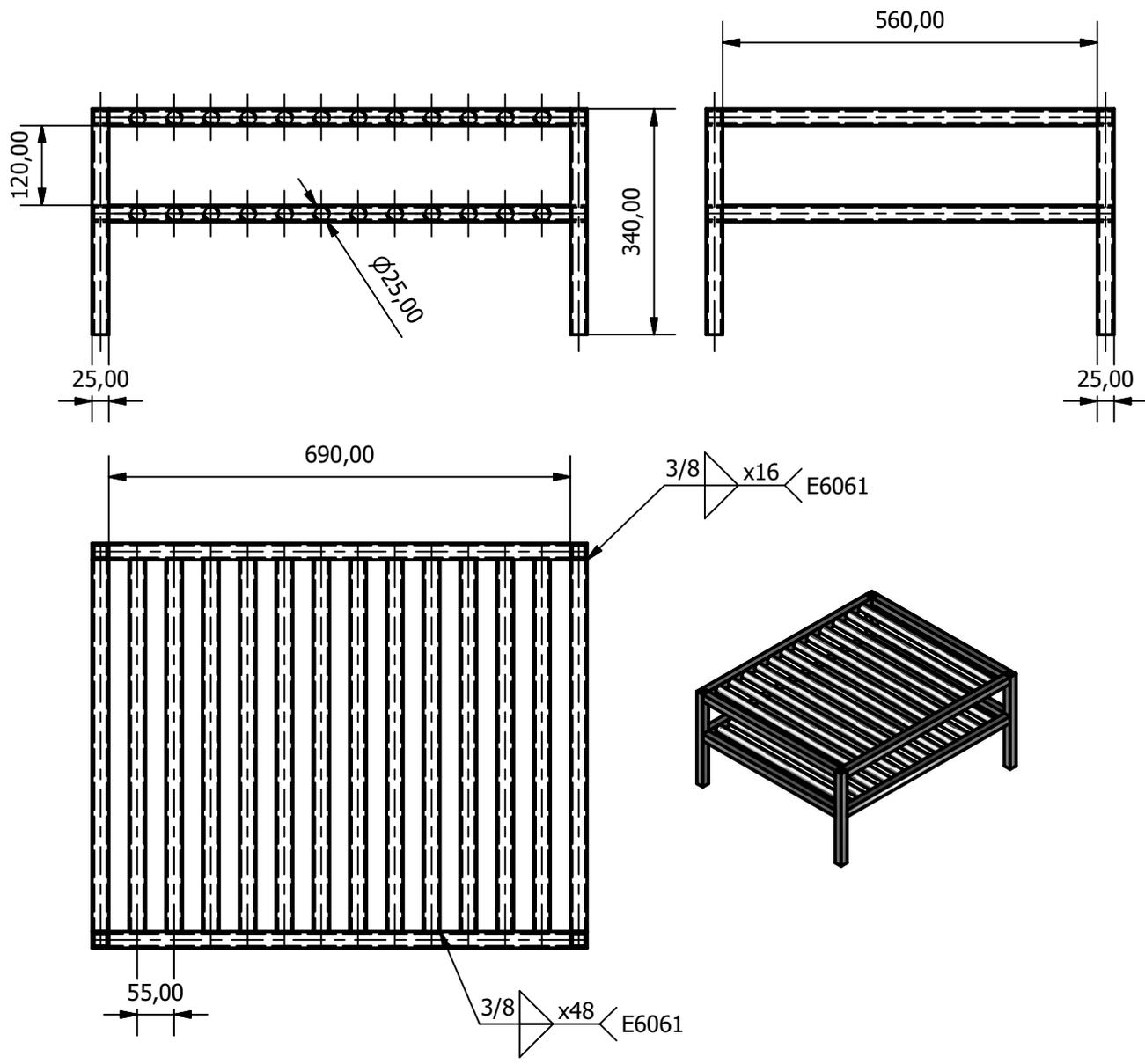
Diseño de: Castro R., Pincay K.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Diseñadores: <i>Karin Pincay</i>	Aprobado por: Ing. Zabala G.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Aprobación:
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL - FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			Proyecto de Materia Integradora: Secador para Cacao		
			Plano 3: Bancada del Colector		Escala 0.05 : 1
					Hoja 3 / 8



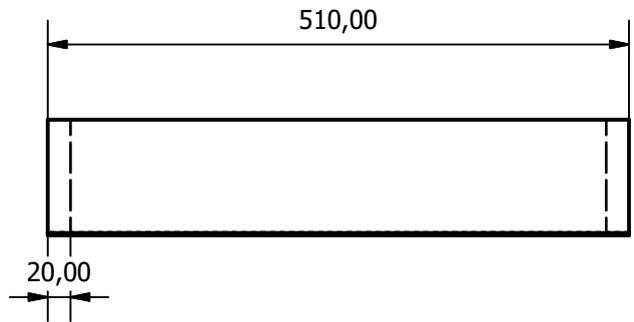
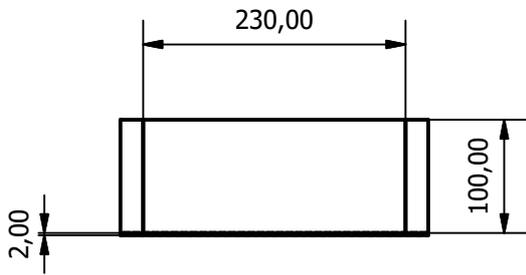
Diseño de: Castro R., Pincay K.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Diseñadores: <i>Karin Pincay Arantes</i>	Aprobado por: Ing. Zabala G.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Aprobación:
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL - FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			Proyecto de Materia Integradora: Secador para Cacao		
			Plano 4: Bancada de la Cámara		



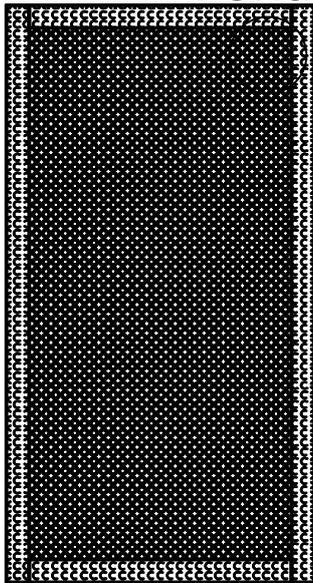
Diseño de: Castro R., Pincay K.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Diseñadores: <i>Karin Pincay Arantes</i>	Aprobado por: Ing. Zabala G.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Aprobación:
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL - FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			Proyecto de Materia Integradora: Secador para Cacao		
			Plano 5: Cámara de Secado		



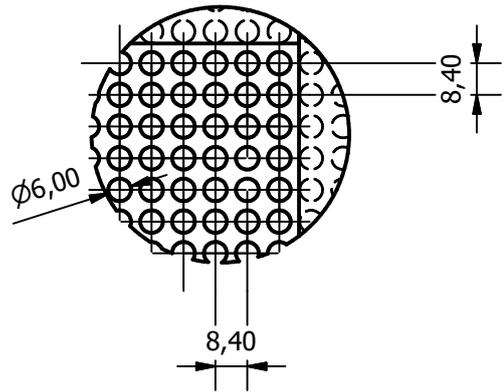
Diseño de: Castro R., Pincay K.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Diseñadores: <i>Karin Pincay Arantes</i>	Aprobado por: Ing. Zabala G.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Aprobación:
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL - FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			Proyecto de Materia Integradora: Secador para Cacao		
			Plano 6: Soporte de las Bandejas		Escala 0.1 : 1
					Hoja 6 / 8



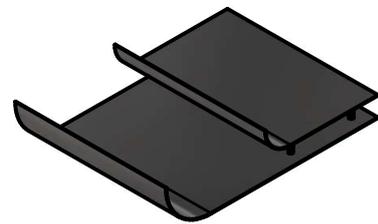
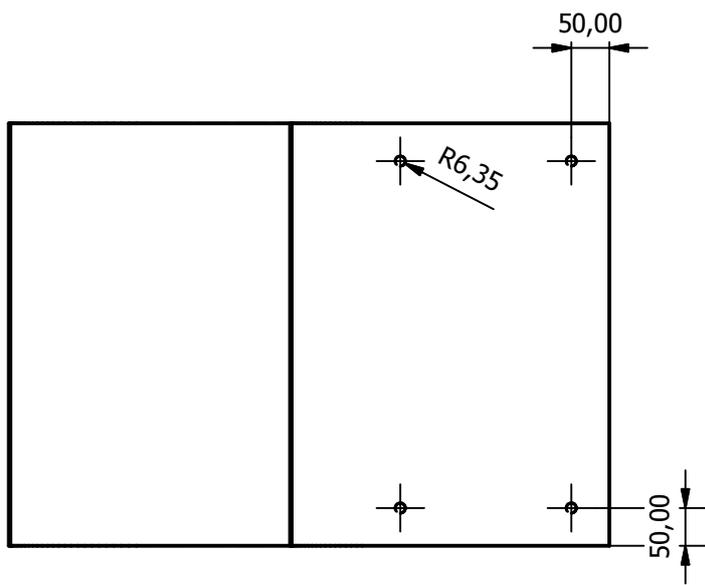
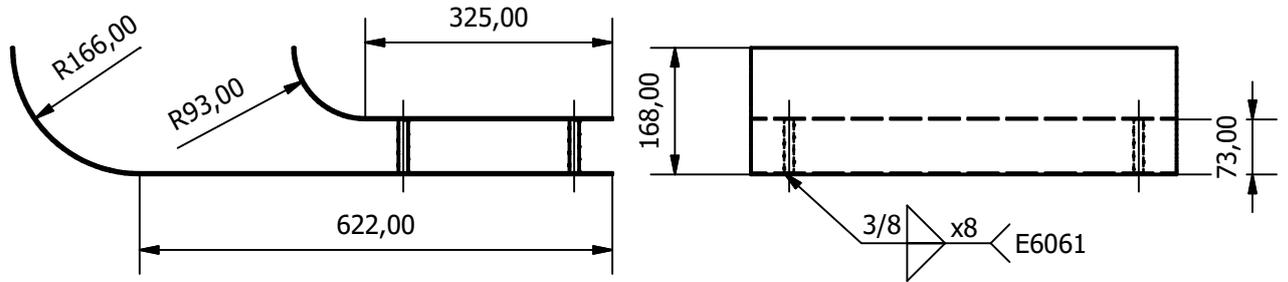
Fondo



Fondo (0.50 : 1)



Diseño de: Castro R., Pincay K.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Diseñadores: <i>Karin Pincay</i>	Aprobado por: Ing. Zabala G.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Aprobación:
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL - FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			Proyecto de Materia Integradora: Secador para Cacao		
Plano 7: Bandejas de Cacao			Escala 0.15 : 1	Hoja 7 / 8	



Diseño de: Castro R., Pincay K.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Diseñadores: <i>Karin Pincay</i>	Aprobado por: Ing. Zabala G.	Fecha: 5/2/2022	Firma de Aprobación:
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL - FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			Proyecto de Materia Integradora: Secador para Cacao		
			Plano 8: Planchas Desviadoras de Aire	Escala 0.1 : 1	Hoja 8 / 8