

Escuela Superior Politécnica Del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño de un secador solar para caña guadúa en la producción de pellets

INGE-2584

Proyecto Integrador

Previo a la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Eduardo José Aus Pereira

Eduardo Rafael Correa Mora

Guayaquil – Ecuador

Año 2024

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mi familia. Mis padres y hermana. Este escrito es un reflejo de su apoyo impoluto durante todos estos años de crecimiento profesional. Mi éxito académico es una repercusión de su presencia en mi vida.

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mis padres, Pedro Correa y Shirley Mora.

Mi familia y amigos, quienes me apoyaron y confiaron en mí para cumplir mis metas y llegar a ser profesional.

A una persona muy especial, Ana Paula Yagual, por acompañarme durante mi carrera universitaria y preocuparse día a día por los pequeños detalles de mi vida.

Agradecimientos

En profundo agradecimiento a mi familia. Mis padres, Diana y José, y mi hermana, Michelle, cuya admiración incondicional por mí ha superado mi propia autovaloración.

Agradezco al Ing. Freddy Jervis, por su continuo apoyo, que ha sido fundamental para la culminación exitosa de este proyecto.

Agradecimientos

Agradezco principalmente a la Escuela Superior Politécnica del Litoral, y todos los docentes que gracias a sus conocimientos me formaron como un profesional.

Agradezco a mi compañero Eduardo Aus, por haber confiado en mí para realizar este proyecto.

Finalmente, agradezco a nuestro tutor, el Ing. Freddy Jervis, por guiarnos durante todo este tiempo a realizar un excelente trabajo.

Declaración Expresa

Nosotros Eduardo Rafael Correa Mora, Eduardo José Aus Pereira acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 21 mayo del 2024.



Eduardo Rafael Correa Mora



Eduardo José Aus Pereira

Evaluadores

Miguel Ángel Quilambaqui Jara, PhD

Profesor de Materia

Freddy Xavier Jervis Calle, PhD

Tutor de Proyecto

Resumen

El proyecto se enfoca en diseñar un secador solar tipo Batch para reducir la humedad de la caña guadua, con el objetivo de optimizar el proceso de secado en la producción de pellets de biomasa, disminuyendo así el consumo energético asociado al uso de secadores industriales convencionales. Se justifica por la necesidad de implementar soluciones energéticamente eficientes y sostenibles en la industria de la biomasa, considerando la alta demanda de energía en los procesos de secado. Para el desarrollo del proyecto, se utilizaron materiales estándar como colectores solares de placa plana y técnicas de secado por convección, bajo normas de eficiencia energética. Se compararon distintos modelos de colectores solares y se optó por el colector de placa plana debido a su alta eficiencia y facilidad de construcción. Los resultados mostraron que se logró reducir el contenido de humedad de la caña guadua en un 50%, además de disminuir el tiempo de secado significativamente en comparación con métodos artesanales y secadores industriales. En conclusión, el uso de secadores solares en la producción de pellets de caña guadua es viable y permite una reducción notable del consumo energético, mejorando la eficiencia y sostenibilidad del proceso.

Palabras Clave: Contenido de humedad, secador solar, radiación solar, caña guadua.

Abstract

The project is focused on designing a Batch type solar dryer to reduce the humidity of Guagua cane, with the objective of optimizing the drying process in the production of biomass pellets, thus reducing the energy consumption associated with the use of conventional industrial dryers. It is justified by the need to implement energy efficient and sustainable solutions in the biomass industry, considering the high energy demand in the drying processes. For the development of the project, standard materials such as flat plate solar collectors and convection drying techniques were used, under energy efficiency standards. Different solar collector models were compared, and the flat plate collector was chosen because of its high efficiency and ease of construction. The results showed that the moisture content of the Guagua cane was reduced by 50%, and drying time was significantly reduced compared to artisanal methods and industrial dryers. In conclusion, the use of solar dryers in the production of Guagua cane pellets is feasible and allows a significant reduction in energy consumption, improving the efficiency and sustainability of the process.

Keywords: Moisture content, solar dryer, solar radiation, Guagua cane.

Índice General

Resumen	I
Abstract	II
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	VII
Índice de figuras.....	X
Índice de tablas.....	XI
Capítulo 1	1
1. Introducción	2
1.1. Definición del Problema	2
1.2. Justificación del Proyecto	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos Específicos	4
1.4. Marco Teórico	4
1.4.1. Caña Guadúa	4
1.4.2. Curva de Secado	5
1.4.3. Propiedades de la caña guadúa	6
1.4.4. Industria Bioenergética	7
1.4.5. Proceso de Secado	9
1.4.6. Factores en el Proceso de Secado	9
1.4.7. Secador solar	11
1.4.8. Colector Solar	12
Capítulo 2	15
2. Metodología	16
2.1. Proceso de Diseño	16
2.2. Requerimientos de Diseño	16
2.3. Especificaciones de diseño	17
2.4. Componentes para las Alternativas de Diseño	18
2.5. Alternativas de Diseño	19
2.5.1. Container con rieles interiores	19
2.5.2. Container con rampa y placa agujerada dentro	20
2.5.3. Container con base estructural y suelo agujerado	21
2.6. Selección de la Mejor Alternativa	22
2.6.1. Matriz de decisión	22

2.7.	Metodología para el Diseño de Forma.....	22
2.8.	Diseño de Unidad Transportadora.....	23
2.9.	Condiciones de Secado.	24
2.10.	Datos Psicrométricos para el Secado	25
2.11.	Diseño de la Cámara de Secado.....	26
2.11.1.	Calor requerido para calentar la caña guadúa	27
2.11.2.	Calor requerido para vaporización del agua.....	27
2.11.3.	Calor consumido por estructura de carros transportadores.....	28
2.11.4.	Calor de pérdidas dentro de la cámara.....	28
2.12.	Diseño del Colector Solar.....	29
2.12.1.	Radiación Solar.....	29
2.12.2.	Irradiación Solar.....	29
2.12.3.	Flujo Másico de Aire Requerido.....	30
2.12.4.	Calor Útil del Colector.....	30
2.12.5.	Energía Absorbida por la Placa.....	31
2.12.6.	Coefficiente Global de Pérdidas.....	31
2.12.7.	Coefficiente de Pérdidas Parte Superior.....	31
2.12.8.	Coefficiente de Pérdidas Parte Inferior	32
2.12.9.	Determinación de Coeficiente Convectivo	32
2.12.10.	Determinación del Coeficiente de Radiación.....	33
2.12.11.	Factor de Eficiencia del Colector.....	33
2.12.12.	Factor de Flujo	33
2.12.13.	Factor de Remoción de Calor	34
2.12.14.	Cálculo Temperatura Media del Fluido y la Temperatura Media de la Placa	34
2.12.15.	Temperatura Salida del Colector.....	34
2.12.16.	Eficiencia del Colector Solar.....	34
Capítulo 3.....		36
3.	Resultados y Análisis.....	37
3.1.	Resultados del Diseño de la Cámara de secado.....	37
3.2.	Resultados del Diseño del Colector Solar	37
3.3.	Estructuras de soporte	40
3.3.1.	Carros transportadores	40
3.3.2.	Base del colector solar.....	41
3.4.	Simulación del Flujo Dentro de la Cámara de Secado.....	41
3.5.	Análisis Costos	42
4.	Conclusiones y Recomendaciones.....	45

4.1. Conclusiones.....	45
4.2. Recomendaciones.....	45
Bibliografía	47
Apéndices	50

Abreviaturas

ASTM American Society for Testing and Materials

CAD Computer-aided design

CAE Computer-aided engineering

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

Simbología

A	Ancho carro transportador
A_c	Área del colector
α	Absortancia del material almacena energía solar
cm	Centímetro
CHI	Contenido de humedad inicial
CH	Contenido de humedad
CHF	Contenido de humedad final
Cp_{acero}	Calor específico del acero
Cp_{fib}	Calor específico de la caña guadúa
Dh	Diámetro hidráulico
e_{ais}	Espesor del aislante
E_{entra}	Energía entrante
E_{sale}	Energía saliente
F'	Factor de eficiencia del colector
F''	Factor de flujo
FR	Factor de remoción de calor
g	Gramo
Hel	Heliofanía
h	Hora
h	Coefficiente convectivo
h_{fg}	Calor latente de vaporización del agua
h_{rad}	Coefficiente de radiación
h_{rue}	Diámetro ruedas carro transportador
h_{sat}	Entalpía de saturación
H	Altura de carro transportador
HR	Humedad relativa
HT	Radiación solar global
η_c	Eficiencia del colector
IT	Irradiación solar
kJ	Kilojulios
kWh	Kilovatios-hora

kg	Kilogramo
km	Kilometro
L	Longitud carro transportador
L_C	Largo del colector
m	Metro
m_T	Masa de secado
m_{agua}	Masa de agua total contenida en la caña
m_{carros}	Masa de la estructura acerada
m_{evap}	Masa de agua a evaporar
m_{fib}	Masa seca de la fibra
\dot{m}_{as}	Flujo másico de aire
mm	Milímetro
m^2	Metros cuadrados
MJ	MegaJulios
Nu	Número de Nusselt
PSC	Peso seco calculado
Q_{carros}	Calor requerido para calentar unidad transportadora
Q_{evap}	Calor requerido para evaporación de agua
Q_{fib}	Calor requerido para calentar la fibra
Q_{perd}	Calor perdido en la cámara
Q_{secado}	Calor secado
Q_u	Calor útil
Q_{util_req}	Calor útil requerido según eficiencia
ρ_{aire}	Densidad del aire
Re_D	Número de Reynolds
S	Energía absorbida por la placa
s	Segundos
t_{sec}	Tiempo de secado
T_a	Temperatura ambiente
T_{fm}	Temperatura media del fluido
T_{pm}	Temperatura media de la placa
T_s	Temperatura de secado colector

τ	Transmitancia de la cubierta de vidrio
UL	Coefficiente de pérdidas globales
Ut	Coefficiente de pérdidas superiores
Ub	Coefficiente de pérdidas inferiores
Vv	Velocidad del viento
w_c	Ancho del colector
W	Vatios
ω_1	Humedad absoluta
δ_n	Separación entre filas
δ_c	Separación entre tiras
°C	Grados centígrados

Índice de figuras

<i>Figura 1</i> <i>Guadúa angustifolia</i> Kunth [11].....	5
<i>Figura 2</i> <i>Curvas típicas de secado: (a) Humedad libre dependiente del tiempo. (b) Velocidad de secado según el contenido de humedad libre. [15]</i>	6
<i>Figura 3</i> <i>Curva de secado para culmos de bambú guadúa [16].</i>	6
<i>Figura 4. Pellets elaborados con distintas biomásas [7].</i>	8
<i>Figura 5</i> <i>Secador solar directo [26]</i>	11
<i>Figura 6</i> <i>Secador solar indirecto, compuesto de un colector solar y cámara de secado</i>	12
<i>Figura 7</i> <i>Colector no poroso de una sola exposición [27].</i>	13
<i>Figura 8</i> <i>Colector no poroso de doble exposición [27]</i>	14
<i>Figura 9</i> <i>Colector no poroso de dos pasos [27].</i>	14
<i>Figura 10</i> <i>Diagrama de flujo para la obtención del diseño final.</i>	16
<i>Figura 11</i> <i>Componentes principales del diseño.</i>	18
<i>Figura 12. Dimensiones container 20 pies [30]</i>	19
<i>Figura 13</i> <i>Alternativa de solución - Container con rieles.</i>	20
<i>Figura 14</i> <i>Alternativa de solución - container con rampa</i>	21
<i>Figura 15</i> <i>Alternativa de solución - container con base estructural</i>	21
<i>Figura 16. Diagrama de flujo para diseño de forma</i>	23
<i>Figura 17. Distribución de tiras de caña guadúa y dimensiones</i>	24
<i>Figura 18. Puntos de trabajo en proceso de secado</i>	26
<i>Figura 19</i> <i>Eficiencia del colector en función del mes.</i>	38
<i>Figura 20</i> <i>Tiempo de secado en relación con el área del colector solar.</i>	39
<i>Figura 21. Curva de Secado de la Guadúa al aire libre [35].</i>	40
<i>Figura 22</i> <i>Análisis estructural y diseño final del carro transportador.</i>	41
<i>Figura 23</i> <i>Análisis estructural y diseño final del colector solar.</i>	41
<i>Figura 24</i> <i>Simulación del flujo dentro de la cámara de secado: a) vista frontal del modelo; b) vista lateral del modelo.</i>	42
<i>Figura 25</i> <i>Mallado del modelo para el carro transportador: a) cantidad de nodos y elementos; b) mallado.</i>	55
<i>Figura 26</i> <i>Condiciones de frontera para el modelo: a) configuración de las condiciones, b) aplicación de las condiciones en el modelo.</i>	55

<i>Figura 27 Resultados del modelo: a) deformación total, b) máximo esfuerzo combinado.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 28 Mallado del modelo para el soporte del colector solar: a) cantidad de nodos y elementos; b) mallado.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 29 Condiciones de frontera para el modelo: a) configuración de las condiciones, b) aplicación de las condiciones en el modelo.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 30 Resultados del modelo: a) deformación total, b) máximo esfuerzo combinado.....</i>	<i>57</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Propiedades termofísicas de la caña Guadua [17]</i>	<i>6</i>
<i>Tabla 2. Detalle de los Requerimientos del Diseño.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 3. Especificaciones de diseño propuestas</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 4. Matriz de Decisión para las Alternativas de Diseño</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 5. Especificaciones del carro transportador</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 6. Condiciones iniciales de diseño.</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 7. Condiciones psicrométricas resultantes del proceso de secado</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 8. Datos meteorológicos sobre Radiación solar según el INAMHI [31]</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 9 Calores Resultantes del Diseño</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 10 Resultados del diseño del colector solar</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 11 Resultados de la iteración del tiempo de secado</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 12 Costos Asociados a la Fabricación del Sistema de Secado para Caña. ...</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 13. Consumo de Energía Total para distinto %CH.....</i>	<i>43</i>

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Definición del Problema

El consumo energético para secar biomasa es muy significativo en la producción de pellets. La biomasa producida por cultivos energéticos puede ser significativo para diferentes procesos como creación de pellets [1]. Un secador industrial con capacidad para $80 \text{ m}^3/\text{día}$ en una jornada de 8 horas al día consume 480 kWh [2]. Con el impulso que ha tenido las energías renovables, este tipo de biomasa en forma de pellets se ha vuelto más deseado por la reducción de gases de efecto invernadero principalmente para generación termoeléctrica en lugares alejados de la red pública [3]. En estos lugares se recurre al secado artesanal de caña guadúa, exponiéndola al sol de manera vertical para escurrir su contenido de agua.

Por lo general, los secadores industriales se encuentran comercialmente disponibles, pero representan un consumo elevado de combustibles fósiles para su funcionamiento [1]. Por ende, en los procesos productivos se ha vuelto común la implementación de secadores solares [4].

Durante el secado solar, el reto es lograr una adecuada humedad final; principalmente porque el control de parámetros no es tan sencillo en comparación al industrial. Se debe conocer las propiedades de la materia en proceso. La presente investigación propone implementar un proceso de secado previo al uso de un secador industrial para reducir la humedad de la caña guadua y en consecuencia reducir el costo energético, así como el tiempo de secado.

1.2. Justificación del Proyecto.

El uso de caña Guadua *Angustifolia Kunth* en la producción de pellets como una fuente de biomasa sostenible ha ganado interés en los últimos años debido a su

potencial para reducir la dependencia de combustibles fósiles y disminuir las emisiones de carbono [1].

Para el año 2021 en Ecuador, las emisiones de CO₂ derivadas de la quema de combustibles fósiles fueron de 41,3 millones de toneladas, como consecuencia del inmenso número de industrias [5]. El proceso productivo de pellets no es complejo en términos de maquinaria industrial, aun así, el uso de secadores industriales genera un alto consumo energético [6].

La producción de pellets a base de biomasa se ha vuelto más atraíble por ser una fuente renovable de energía [4]. Sin embargo, durante el proceso es necesario reducir hasta un 10% la humedad presente en la biomasa [7]. Esto implica horas de secado industrial, lo que se traduce en altos costos energéticos operacionales. Para reducir estos costos se ha propuesto analizar sistemas alternativos de secado usando fuentes renovables. Una de las opciones más viable en la actualidad es la implementación de secadores solares, estos han demostrado un ahorro energético del 37% con respecto a los secadores industriales [1].

Por esta razón, se ha generado el incentivo de diseñar un secador solar por medio de la aplicación de colectores solares [8] como una etapa previa a secado industrial, buscando reducir el costo energético en combustibles fósiles y el tiempo de secado.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseñar un secador solar tipo batch para reducir la humedad de caña guadúa reduciendo el tiempo y costos en el proceso de secado durante la elaboración de pellets.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Comparar modelos de colectores solares identificando el más idóneo para el secado de caña guadúa según los parámetros de diseño; asegurando un fácil montaje y ensamblaje del equipo in situ.
- Determinar mediante la aplicación de modelos teóricos la máxima reducción posible del contenido de humedad en la caña guadúa para el análisis de la eficiencia del equipo.
- Dimensionar y simular un secador solar siguiendo las especificaciones de diseño, considerando un tamaño promedio de la caña guadúa, para mejorar la distribución de calor.
- Estimar los costos asociados en el proceso de producción de pellets, considerando los factores como tiempo, mano de obra y combustibles normalmente utilizados.

1.4. Marco Teórico.

1.4.1. Caña Guadúa.

La *Guadua Angustifolia Kunth*, se trata de un bambú leñoso conocido como caña guadúa o caña brava, se extiende principalmente en la zona tropical de América del Sur, endémico de Ecuador, Colombia y Perú [9].

La guadua proveniente de Ecuador se destaca como una de las mejores especies de bambú a nivel internacional debido a sus características físicas y botánicas, puesto que contribuye a la reserva ecológica ya que es un gran generador de oxígeno, el cultivo de la caña guadua se da en las provincias de El Oro, Guayas, Los Ríos, Santo Domingo, Pichincha y Manabí [10].

Esta caña es considerada como un material amigable tanto con el medio ambiente como con el usuario, porque es empleado en una gran variedad de usos, tales como artesanías, muebles, construcción e industria bioenergética [11].

El diámetro máximo reportado para la angustifolia es de 25 cm, pero su promedio ronda entre 5 a 13 cm [12]. Su crecimiento es acelerado, después del tercer año se obtienen entre 18 y 20 rebrotes, los cuales tiene una altura de entre 5 y 7 m, con diámetros de entre 4 y 6 cm, por ello es capaz de alcanzar una altura predominante que ronda los 15 a 30 metros, pero para su comercialización es de 6 m, durante los primeros seis meses de desarrollo, a pesar de que deba ser cosechada luego de 4 a 5 años [9], [11], [13], [14].



Figura 1 Guadúa angustifolia Kunth [11]

1.4.2. Curva de Secado

El proceso de disminución de la humedad no se comporta de manera lineal, existe una correlación entre la temperatura, el contenido de humedad del producto y el tiempo de secado que se determinada a través del método experimental. Los

resultados son graficados en las denominadas curvas de secado, que básicamente son las mismas para todo tipo de producto, pues su forma general es la siguiente.

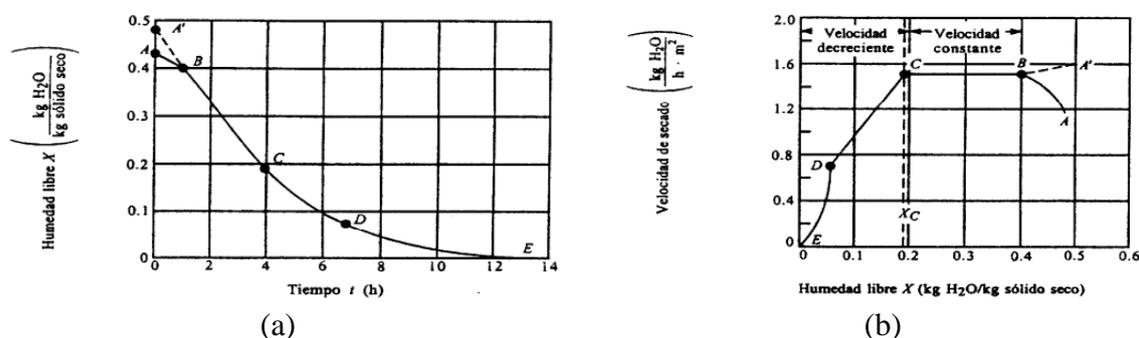


Figura 2 Curvas típicas de secado: (a) Humedad libre dependiente del tiempo. (b) Velocidad de secado según el contenido de humedad libre. [15]

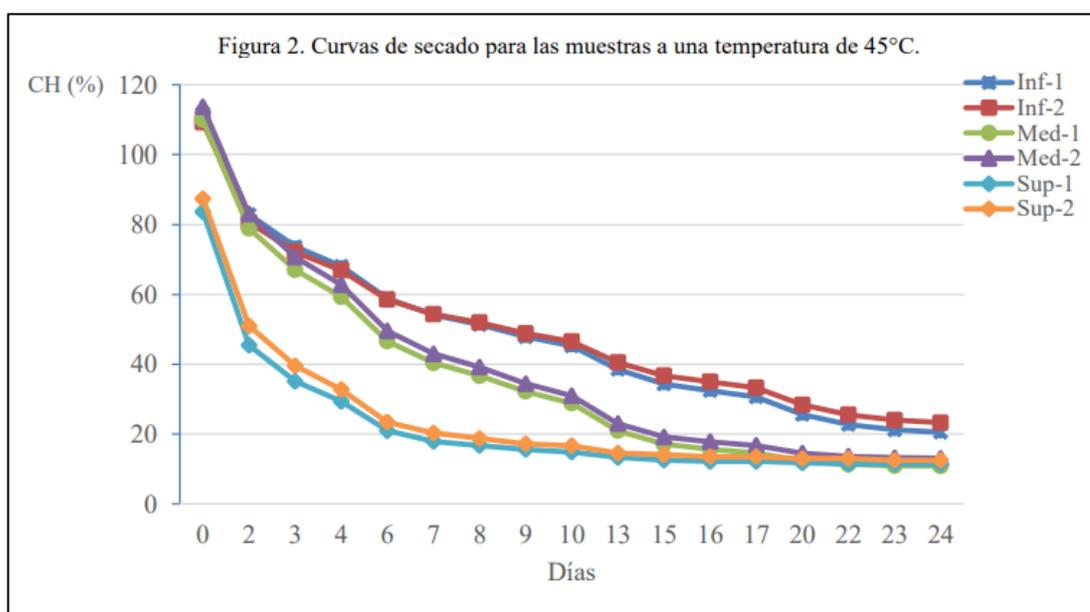


Figura 3 Curva de secado para culmos de bambú guadúa [16].

1.4.3. Propiedades de la caña guadúa

A continuación, se muestra la Tabla 1 donde se detallan algunas propiedades de la caña guadúa que serán de gran utilidad para los cálculos futuros.

Tabla 1. Propiedades termo físicas de la caña Guadua [17]

Parámetro	Unidades	Valor
Efusividad térmica	$W s^{\frac{1}{2}} m^{-2} K^{-1}$	1000

Difusividad térmica	m^2s^{-1}	$0.11 * 10^{-6}$
Densidad	kgm^{-3}	600
Calor específico	$Jkg^{-1}K^{-1}$	5000
Conductividad térmica	$wm^{-1}K^{-1}$	0.33

1.4.4. Industria Bioenergética.

1.4.4.1. Biomasa.

La biomasa es un compendio de materia orgánica que abarca muchos materiales cuyo origen biológico es variado, pueden ser productos de origen vegetal, animal microbiano, residuos forestales, residuos agrícolas, residuos biodegradables de industrias agroganaderas, lo cual lo hace utilizable como fuente de energía (biocombustible) [18].

1.4.4.2. Biocombustibles.

Los biocombustibles, son una alternativa renovable para los combustibles fósiles, producto de recursos naturales y biomasa, la cual puede ser derivada de animales o vegetales. Este tipo de combustibles pueden ser alcoholes, éteres, ésteres y demás productos químicos. Son utilizados como reemplazo de productos derivados del petróleo como la gasolina para el transporte o en la producción de energía eléctrica, porque actúan liberando la energía contenida en los componentes químicos por medio de la reacción de combustión. Se presenta en estado líquido, gaseoso o sólidos [4],[19].

1.4.4.3. Pellets.

Los pellets están compuestos de distintos tipos de biomasa que está comprimida en una forma cilíndrica [20]. La materia prima para su producción proviene en un 45% de las industrias de la primera transformación de la madera, otro 45% de la segunda transformación de la madera y el 10% restante de residuos forestales o agroindustriales [7]. Esta

materia prima suele utilizarse en forma de serrín o astilla para facilitar su procesamiento físico, así como disminuir los costes de secado [7].

Sus dimensiones tanto en diámetro como en longitud están estandarizadas por la norma ISO 17225-6. Esta norma expresa un rango de 6-8 mm para el diámetro, y en cuanto a las longitudes va de 3,15 -40 mm [21].



Figura 4. Pellets elaborados con distintas biomásas [7].

1.4.4.3.1. Pretratamiento.

Previo a la producción de pellets, la biomasa pasa por una etapa de pretratamiento con el objeto de optimizar el proceso. Esta etapa entra en vigor porque la biomasa generalmente se compone de residuos, desencadenando niveles de humedad y granulometría heterogéneos [22]. A continuación, se describe de manera breve los pretratamientos:

A. Astillado: con este tratamiento se pretende reducir el tamaño de las partículas, para facilitar actividades futuras de almacenamiento, carga y transporte [1]. El tamaño estandarizado está entre 25-50 mm [21].

B. Secado: las biomásas varían su contenido de humedad según la materia prima, un contenido superior al 30% bh es elevado [23]. Este proceso es altamente usado en la etapa productiva de pellets, a pesar de tener altos niveles de consumo energético, los

cuales se busca reducir [23]. Para el secado se pueden utilizar secadores industriales a base de quema de combustibles, o bien secadores solares con colectores solares [1].

C. Molienda: se precisa tener la biomasa seca con gran homogeneidad y características granulométricas estandarizadas. Con un molino de martillos, y aprovechando mallas dimensionadas específicamente para refinar aquellos elementos que no están dentro de los parámetros necesarios [7], [22].

1.4.5. Proceso de Secado

El proceso de secado, esencial en los pasos previos al tratamiento de biomasa para la fabricación de pellets, destaca por su importancia y exigencia. Mantener un nivel de humedad adecuado en la materia prima resulta crucial para asegurar una calidad íntegra del producto final [24].

A través del método de secado natural o al aire libre, se logra reducir el contenido de humedad de la biomasa hasta alcanzar un equilibrio con el ambiente. Sin embargo, este límite puede resultar insuficiente para cumplir con los requisitos del siguiente proceso (molienda, peletizado, entre otros) o puede tomar un tiempo considerable para lograrlo [1]. Por ello, se recurre al secado forzado, que permite disminuir el contenido de humedad de la biomasa hasta el nivel deseado en un periodo de tiempo significativamente más corto[23].

1.4.6. Factores en el Proceso de Secado

Existen tres factores principales en este proceso, los cuales son temperatura, humedad y velocidad del aire.

1.4.6.1. Temperatura.

La temperatura juega un papel crucial en los procedimientos de secado. En términos generales, a medida que la temperatura aumenta, se agiliza la remoción de la humedad. Durante el proceso de secado, se genera un gradiente de temperatura que se relaciona con la densidad del material, el cual tiende a disminuir a medida que se reduce el contenido de humedad [1].

1.4.6.2. Humedad.

La humedad relativa del aire se define como la proporción entre la presión de vapor de agua en un momento dado y la presión de saturación de vapor de agua a la misma temperatura [23]. Por lo general, se expresa en forma de porcentaje (%).

A medida que la temperatura del aire aumenta, su capacidad para absorber humedad también aumenta, y viceversa. Cuando el aire alcanza su capacidad máxima, se considera completamente saturado y no puede absorber más humedad. En cambio, el aire no saturado tiene la capacidad de absorber una cantidad específica de humedad hasta alcanzar la saturación [24].

1.4.6.3. Velocidad del aire.

La función principal de la velocidad del aire en el secador es, en primer lugar, proporcionar la energía necesaria para calentar el agua presente en el material, facilitando así su evaporación. En segundo lugar, la velocidad del aire tiene la tarea de llevar consigo la humedad liberada del material [24].

A mayor velocidad del aire, se logra una tasa de evaporación más alta, lo que resulta en un tiempo de secado más corto, y viceversa. Si la velocidad del aire disminuye, la tasa de evaporación también disminuye, lo

que conlleva a un aumento en el tiempo necesario para el secado. Por lo tanto, para garantizar un secado rápido y uniforme, es esencial contar con una circulación de aire robusta y constante [24], [25].

1.4.7. Secador solar

Un secador solar se refiere a un sistema que aprovecha la radiación solar para convertirla en energía térmica, utilizada para calentar un producto y eliminar la humedad presente en él. Esta transformación se logra mediante la exposición directa del producto a la energía solar o a través de un intercambio indirecto utilizando un fluido intermedio, como el aire seco [8], [25].

Se pueden diferenciar entre tres tipos de secadores solares, dependiendo de la configuración se distingue la transferencia de energía entre el producto y el entorno.

- Secadores directos: en este tipo de secadores la materia prima se encuentra en una cámara hermética, donde recibe la radiación solar directamente, produciendo así un aumento de la temperatura, del mismo modo la presión de vapor del producto logrando una remoción de la humedad.



Figura 5 Secador solar directo [26]

El inconveniente de esta configuración reside en el gran aumento de la temperatura lo cual provocaría un deterioro del producto final y en muchos casos quemándolo, además que la cantidad de materia a secar es muy poca.

- Secadores indirectos: se compone de un colector solar donde el aire a temperatura ambiente se calienta y se inyecta en la cámara de secado, este aire caliente transfiere calor al producto y por ende pierde humedad. Una de las ventajas de utilizar este tipo de secador radica en que la materia a secar está protegida de la radiación y se cuida de las altas temperaturas, logrando así una alta calidad.



Figura 6 Secador solar indirecto, compuesto de un colector solar y cámara de secado

Se emplean diversas tecnologías para el secado solar, y en el caso de un enfoque indirecto, es común utilizar un colector solar conectado a la cámara de secado. Este colector está equipado con un material absorbente de energía, caracterizado por su alta capacidad calorífica, que facilita una mayor transferencia de calor al fluido correspondiente. Este proceso es eficaz incluso en condiciones de baja radiación solar [8].

1.4.8. Colector Solar

Es un tipo especial de intercambiador de calor capaz de transformar la radiación de la energía solar en calor. Se pueden diseñar para aplicaciones que requieren un suministro de energía a temperaturas moderadas. Recurren al uso de

haz como de radiación solar difusa, pero su mantenimiento es sencillo y mecánica es simple [8].

Un colector solar está compuesto por dos placas, una absorbedora y una colectora, además de un sistema de aislamiento distribuido por los laterales y la parte posterior del colector.

Para clasificar los colectores existe una gran variedad de formas, pero en este proyecto nos concentraremos en los colectores de placa plana no porosos en los que el material absorbedor no permite el paso de aire, pero sin impedir la transferencia de calor [27].

1.4.8.1. Colector de una sola exposición

En esta configuración existe una sola placa expuesta a la radiación solar, mientras que la otra se encuentra aislada en el fondo, dentro de este tipo de colector se destacan dos en específico: de placa absorbedora aleteada y de placa corrugada dentada, una notable ventaja es que se aumenta la superficie de transmisión de calor [28].

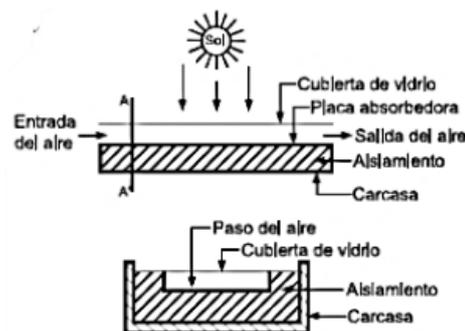


Figura 7 Colector no poroso de una sola exposición [27]

1.4.8.2. Colector de doble exposición

En este diseño, la placa que solía estar en la parte posterior se pinta de negro y se somete a irradiación adicional. Esto se logra eliminando el aislamiento térmico y utilizando reflectores para redirigir la radiación hacia

la superficie ennegrecida y añadiendo un vidrio para crear un conducto cerrado, aumentando su eficiencia significadamente [28].

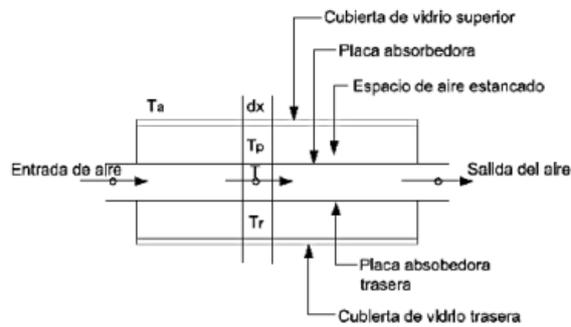


Figura 8 Colector no poroso de doble exposición [27]

1.4.8.3. Colector de dos pasos

Al colocar la placa absorbidora entre la cubierta de vidrio y el aislante, es decir, el aire circula entre dos placas, este diseño aumenta la eficiencia térmica mediante la captación y transferencia de energía solar en dos fases distintas, lo que permite alcanzar temperaturas más altas y mejorar el rendimiento global del sistema solar [8].

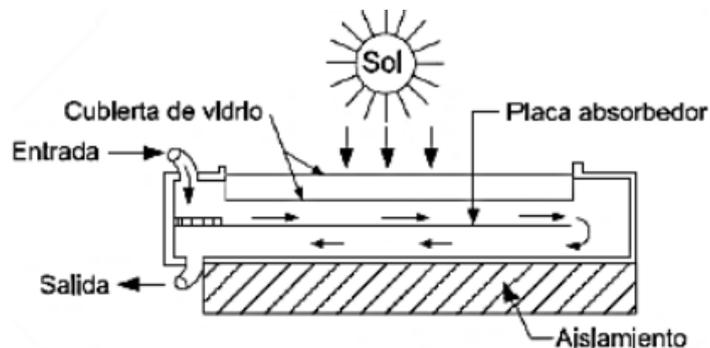


Figura 9 Colector no poroso de dos pasos [27]

Capítulo 2

2. Metodología

2.1. Proceso de Diseño

La Figura 10 representa el procedimiento de la metodología de diseño, que se llevó a cabo en la investigación. Luego de identificar claramente la problemática, por siempre inspección y como resulta de la ardua investigación bibliográfica se plantearon alternativas basadas en las especificaciones de diseño consideradas. Finalmente se generó en diseño CAD del secador solar propuesto para la etapa de pre secado en el ciclo productivo de pellets a base de caña guadua.

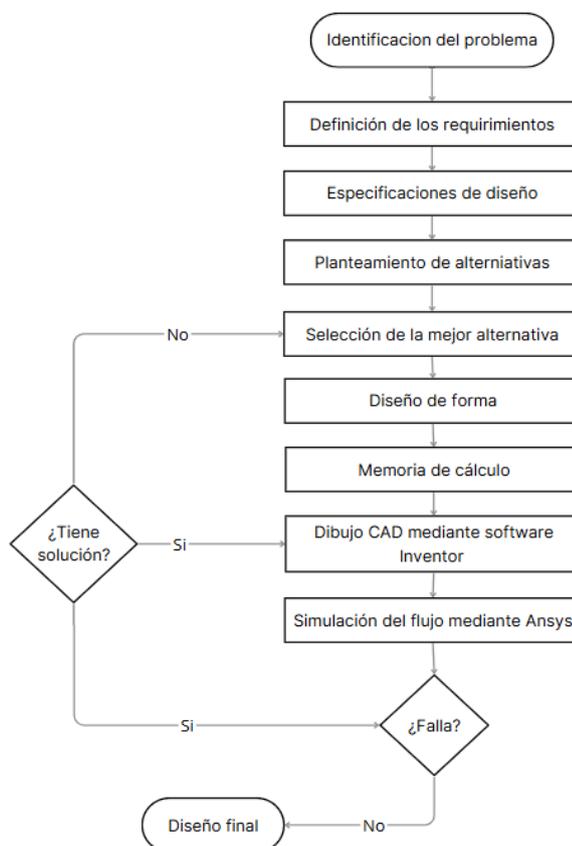


Figura 10 Diagrama de flujo para la obtención del diseño final.

2.2. Requerimientos de Diseño

En base al conversatorio con el tutor del proyecto sobre la necesidad de mejorar las condiciones de un secado artesanal de la caña guadúa en los agricultores que trabajan alejados de la red pública y con argumento en diseños de secadores solares

preexistentes se definieron los requerimientos detallados en la Tabla1[24], [29]. Estos han sido agrupados en 3 categorías con pesos porcentuales relativos correspondientes y etiquetado según el orden de importancia en una escala del 1 al 5. Los valores asignados serán de utilidad cuando se la matriz de decisión sea aplicada en la selección de la mejor alternativa de solución.

Tabla 2. Detalle de los Requerimientos del Diseño

Categoría	Requerimiento	Descripción	Peso (%)	Importancia	
Facilidad de uso	1	Manejo del equipo	El equipo debe ser de fácil de operar	10	3
	2	Tiempo de secado	Se busca optimizar el tiempo de secado artesanal	25	1
	3	Fácil desmontaje y movilidad	Se debe poder movilizar equipo con facilidad	30	1
Costos	4	Costo del equipo	El equipo debe ser de un costo bajo para los agricultores	15	5
	5	Costo de mantenimiento	Los mantenimientos con poca y de bajo costo	8	4
Desempeño	6	Maximizar espacio de trabajo	Se pretende usar el máximo espacio posible dentro del contenedor	12	2

2.3. Especificaciones de diseño.

Del mismo modo que los requerimientos propuestos, fue pertinente enlistar en la Tabla2 especificaciones técnicas de diseño considerando normativas, regulaciones, dimensiones, materiales para la validez ingenieril del diseño [25].

Tabla 3. Especificaciones de diseño propuestas

Numeración	Especificación	Importancia
1	Fuente suministro de calor	1
2	Dimensiones de los carros transportadores	7
3	Radicación solar diaria	5
4	Velocidad del flujo	3
5	Humedad final objetivo	2
6	Material absorbedor de calor	6

7	Dimensiones de colector solar	4
8	Flujo homogéneo en cámara	8

2.4. Componentes para las Alternativas de Diseño

El secador solar tipo batch estará compuesto de algunas partes para garantizar su correcto funcionamiento. Tales como: la cámara de secado, el colector solar y los carros transportadores, las cuales se detallan en la

Figura 11.

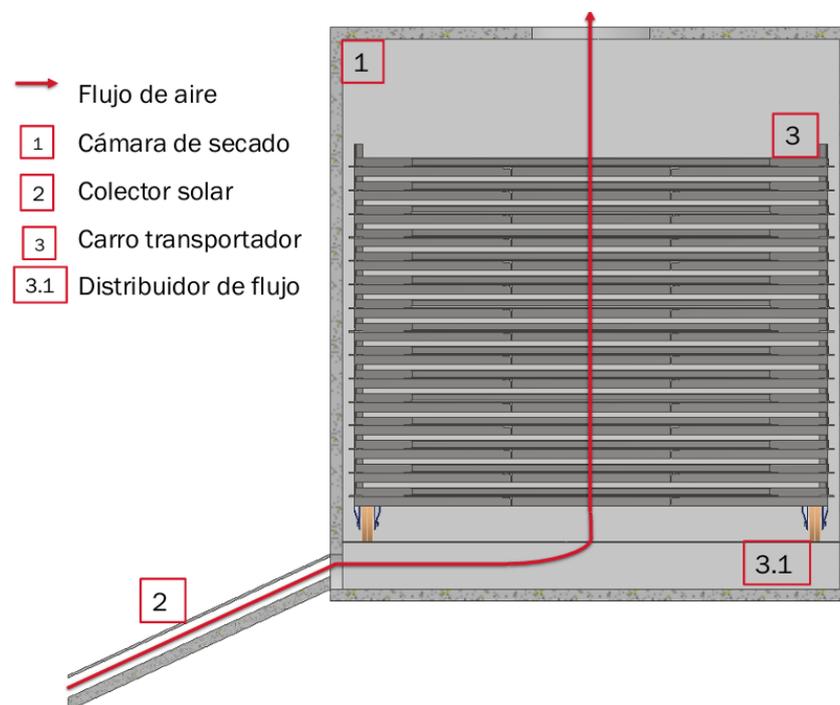


Figura 11 Componentes principales del diseño.

- I. Cámara de secado: la parte con mayor dimensión del diseño. Dado que la longitud comercial de la caña guadúa es de 6 metros fue posible usar un container de 20 pies (dimensiones en la Figura 12), evitando la construcción de la cámara para secado desde cero. Para la entrada de aire caliente proveniente del colector solar deberá existir al menos un ducto de entrada en la parte baja de una de las paredes laterales. Además, el respectivo aislamiento en sus paredes, al menos una salida de aire, un

sistema de rieles para una fácil movilización de los carros transportadores y una placa perforada para optimizar la distribución del flujo de aire.



Figura 12. Dimensiones container 20 pies [30]

- II. Colector solar: fuente que suministra el calor suficiente para introducir aire caliente a la cámara de secado. Estará compuesto por el material que almacena el calor, en nuestro caso rocas esféricas, una sola cubierta de vidrio para la transmisión de la radiación y aislamiento con su estructura base.
- III. Carros transportadores: necesarios para cumplir el requisito de un sistema tipo batch, deberá contar con al menos una estructura transportadora de la caña guadúa, de tal manera, que cuando se termine un lote, otro ya esté listo para ser secado.

2.5. Alternativas de Diseño

Teniendo como punto de partida los requerimientos, las especificaciones y los componentes de diseño, se han propuesto 3 alternativas de solución. Los diseños presentados aseguran una entrada de aire desde el colector solar al interior de la cámara, una placa con diseño Honeycomb para mejorar la distribución del flujo y unidades transportadoras de la caña para garantizar el secado por lotes.

2.5.1. Container con rieles interiores

La alternativa propuesta en la Figura6 presenta un su interior un sistema de rieles para la movilización de las unidades transportadoras con la caña guadúa,

además en la base del riel hay una placa con agujeros para que el aire caliente circule de mejor manera a través de la cámara de secado.

Los rieles tienen un bajo grado de inclinación, su posición final a 20 cm de altura desde la base del container y 1 m de distancia desde la puerta frontal, asegurando de esta manera un mínimo grado de inclinación para que el o los operados no se sobre esfuercen.

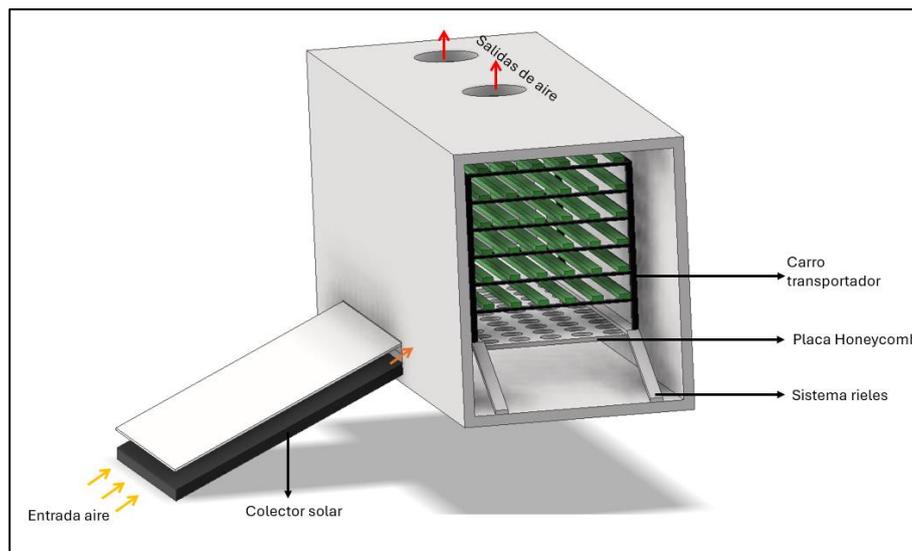


Figura 13 Alternativa de solución - Container con rieles.

2.5.2. Container con rampa y placa agujerada dentro

En esta alternativa se presentó una subida en rampa en la parte externa de la entrada del container, por donde ingresarán las unidades transportadoras. La rampa tendría una elevación de 20 cm desde el suelo del container, donde estará acoplada a la placa agujerada para la homogenización del flujo la cual será el nuevo piso para los carros con caña. Tal como se observa en la Figura7, la presencia de esta subida no permite cerrar las puertas del container, lo cual obligaría a realizar una modificación estructural de la cámara para garantizar su aislamiento con el exterior.

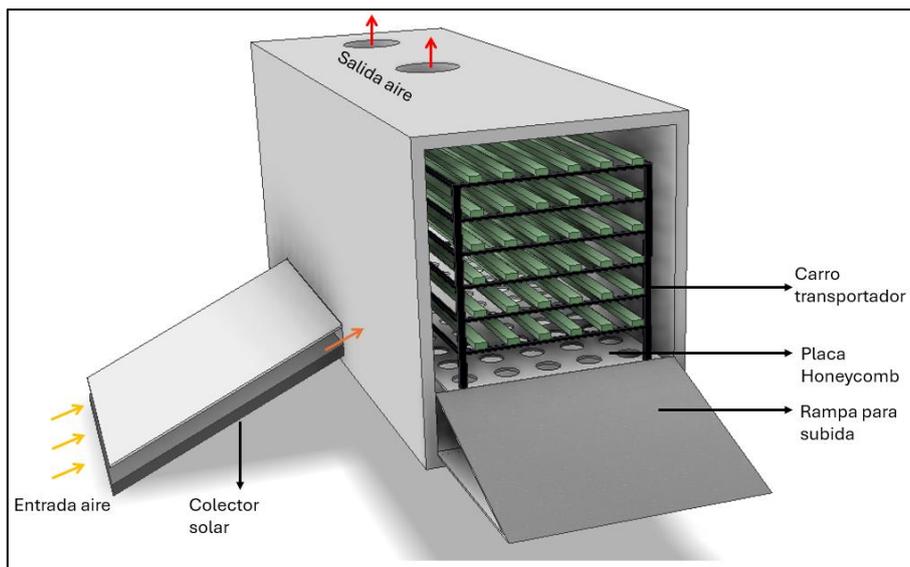


Figura 14 Alternativa de solución - container con rampa

2.5.3. Container con base estructural y suelo agujerado

En esta alternativa de diseño se pensó hacer agujeros en el suelo del container para mejorar la distribución del flujo. Por consiguiente, fue necesario diseñar una base estructural para asentar el contenedor, Figura 8. Una gran ventaja es que se tendría más espacio de secado dentro del container. No obstante, será más complicada su transportación y habrá exposición libre con el suelo, generando pérdidas de calor.

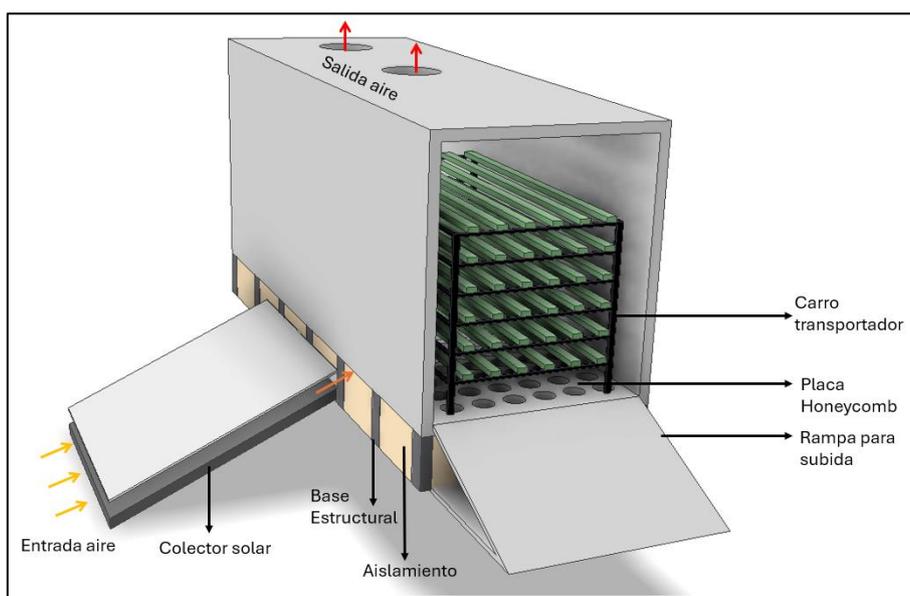


Figura 15 Alternativa de solución - container con base estructural

2.6. Selección de la Mejor Alternativa

2.6.1. Matriz de decisión.

Las alternativas de solución propuestas en base a los requerimientos y especificaciones de diseño se han evaluado por medio de una matriz de decisión. El propósito fue destacar la solución de diseño más apropiada, de modo que cumpla con requisitos mencionados previamente. En la Tabla 4 se detalla la matriz de decisión.

Tabla 4. Matriz de Decisión para las Alternativas de Diseño

Criterios de diseño		Alternativas		
		Container con rieles interiores.	Container con rampa	Container con base estructural
Manejo del equipo	10%	4	3	3
Tiempo de secado	25%	5	5	5
Fácil desmontaje y movilidad	30%	5	4	3
Costo del equipo	15%	4	4	5
Costo de mantenimiento	8%	5	4	3
Maximizar espacio de trabajo	12%	3	5	5
Puntaje		4.51	4.27	4.04

Como resultado de la matriz de decisión, la alternativa 1: container con rieles fue la seleccionada como el diseño ganador. Por lo tanto, se detallará su diseño de forma y se buscará optimizar el diseño.

2.7. Metodología para el Diseño de Forma

Para el diseño del sistema de secado solar tipo batch, primero se tomaron decisiones para declarar las condiciones iniciales de la caña guadúa. De la misma manera seleccionar el punto de partida para los cálculos de diseño en base a la data científica hallada sobre cámara de secado e ingeniería solar [8].

Para la cámara de secado se planteó un balance de energía, donde se analizó toda la energía saliente o requerida por el sistema, para así obtener el calor de trabajo

necesario. Con el valor del calor de secado obtenido se determinó el flujo másico de aire requerido a través del colector solar, permitiendo dimensionar este último en base a la irradiación promedio en la ciudad de Guayaquil, Ecuador y la eficiencia típica en colectores solares.

Para seguir el proceso de diseño mencionado fue indispensable conocer la masa total de secado. La cantidad de caña a secar fue establecida posterior al diseño propuesto de los carros transportadores.

Finalmente, obtenida la dimensión del área del colector solar se procedió a optimizar el diseño mediante simulaciones para asegurar tener una distribución uniforme del flujo de aire dentro de la cámara de secado. Las simulaciones CAE fueron realizadas en *ANSYS Fluent* [31].

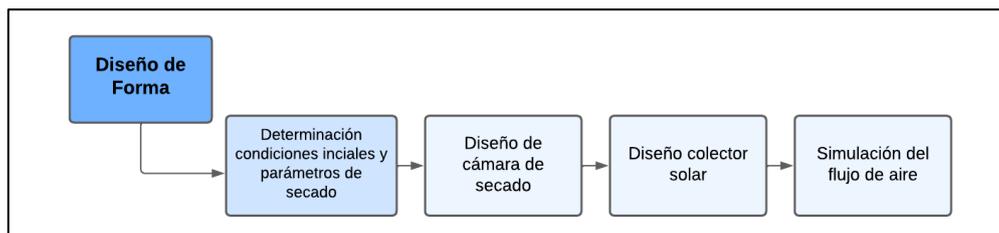


Figura 16. Diagrama de flujo para diseño de forma

2.8. Diseño de Unidad Transportadora.

El punto de partida se encuentra en las dimensiones predefinidas de la cámara de secado. Un container de 20 pies tiene dimensiones internas de 2.393(h)x2.35(a)x5.9(L) en metros [30]. Además, hay que recordar que los rieles están ubicados a 20 cm de altura. Entonces, se propuso el diseño de un carro transportador con 12 niveles y una separación de 15 cm entre sí. Claramente, diseñar una única unidad transportadora no era eficiente, porque sería muy pesada y difícil de movilizar, por ello, se argumentó hacer cuatro carros transportadores iguales, cuyas dimensiones se muestran en la *Tabla 5*.

Ahora bien, se acordó distribuir tiras de caña para hacer más eficiente el secado. En cada nivel, 20 tiras de un ancho de 2,5 y longitud 2,4 m con una separación de igual magnitud, resultando 240 tiras por carro. El diámetro promedio para la caña guadúa seleccionado fue 13 cm, arrojando según el ancho de tira de caña establecido 16 unidades, es decir, cada carro tendrá capacidad para secar 15 cañas divididas en tiras y por ende 60 cañas de secado por lote (*batch*). En la Figura 17 se muestra la distribución de las tiras de caña.

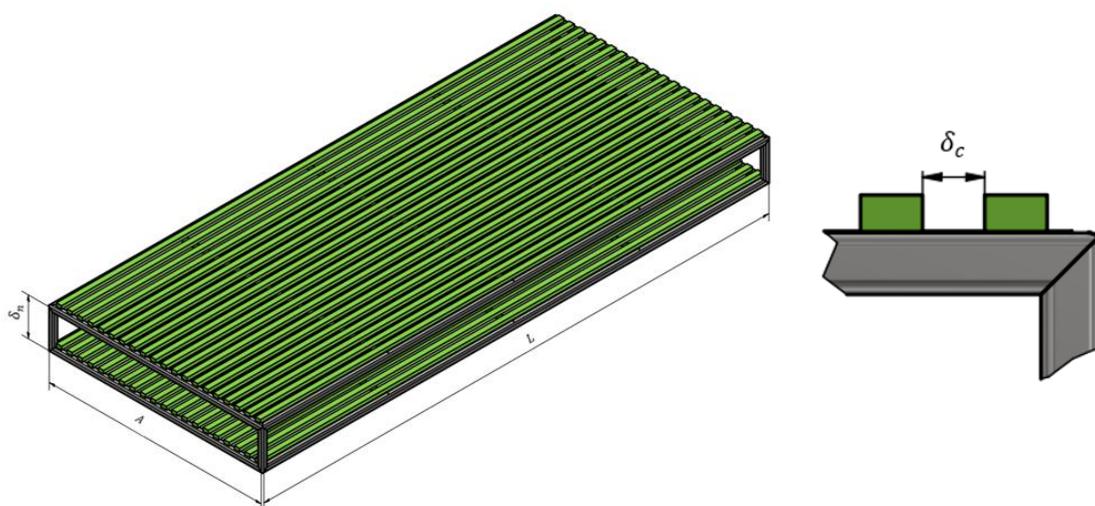


Figura 17. Distribución de tiras de caña guadúa y dimensiones

Tabla 5. Especificaciones del carro transportador

Parámetro	Unidad	Símbolo	Dimensión
Longitud	[m]	L	2.4
Ancho	[m]	A	1
Altura	[m]	H	1.8
Separación entre filas	[m]	δ_n	0.15
Separación entre tiras	[m]	δ_c	0.25
Perfil base NTE INEN 1623 ASTM A36	[mm]	-	25x25x2
Perfil lateral NTE INEN 1623 ASTM A36	[mm]	-	L20x20x2
Ruedas BH-ALBS 125K-1	[mm]	h_{rue}	165

2.9. Condiciones de Secado.

Para definir las condiciones de trabajo iniciales como temperatura ambiente, humedad relativa y demás se obtuvo información del anuario meteorológico del

INAMHI [32]. Los parámetros iniciales de la caña guadúa también fueron declarados para continuar con el proceso de diseño. Estos datos fueron agrupados en la Tabla 6 que se muestra a continuación.

Tabla 6. Condiciones iniciales de diseño.

Variable	Unidad	Símbolo	Dimensión
Temperatura ambiente	[°C]	T_a	26.2
Humedad relativa del aire	[%]	HR	76
Humedad absoluta	$\left[\frac{g_{agua}}{kg_{aireseco}}\right]$	ω_1	15
Radiación Solar global	$\left[\frac{kWh}{m^2 \text{ día}}\right]$	HT	4.0 – 4.5
Heliofanía anual	[h]	Hel	1311.8
Velocidad del viento	[km/h]	V_v	5
Masa de secado	[kg]	m_T	1935
Humedad inicial de la caña	[%]		95
Humedad final de la caña	[%]		50
Temperatura secado colector	[°C]	T_s	50

2.10. Datos Psicrométricos para el Secado

El proceso de secado consta de 3 puntos de trabajo en una carta psicrométrica. El primer punto fue con las condiciones iniciales de temperatura y humedad relativa ambiente. El segundo punto será la prolongación de la temperatura hasta la temperatura de secado en el colector. Finalmente, para el tercer punto se siguió la línea de entalpía de saturación constante hasta el porcentaje de saturación máximo al cual se comenzará a evaporar el agua. Estos puntos se detallaron en la Figura 18. Los datos psicrométricos correspondientes a los puntos trazados en la carta psicrométrica se resumieron en la Tabla 7.

Tabla 7. Condiciones psicrométricas resultantes del proceso de secado

Puntos	Estado	T_{BS} [°C]	HR [%]	$\frac{\omega}{g_{agua}}$ [$\frac{kg_{aireseco}}{kg}$]	h_{sat} [$\frac{kJ}{kg}$]
P1	Entrada del colector	26.2	76	15.5	66
P2	Salida del colector/ Entrada cámara	50	20	15.5	92
P3	Salida cámara	29	95	24.5	92

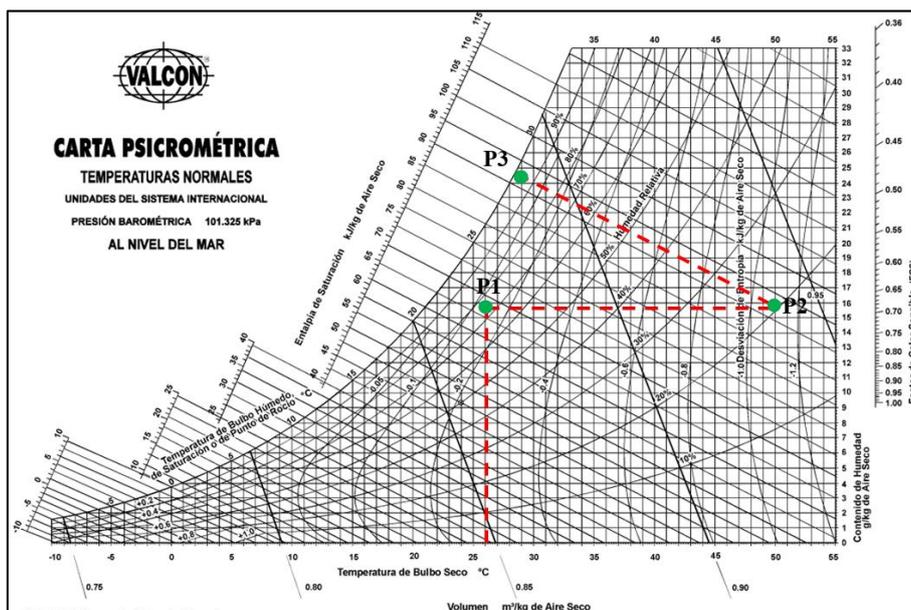


Figura 18. Puntos de trabajo en proceso de secado

2.11. Diseño de la Cámara de Secado

El calor de secado necesario se determinó a partir de un análisis energético. Un análisis energético no es más que establecer que entra al sistema y que sale. El funcionamiento de un sistema energético se fundamenta en la primera ley de la termodinámica, la cual indica que la energía no se crea ni se destruye, solo es capaz de transformarse [33].

$$E_{entra} = E_{sale}$$

$$Q_{secado} = Q_{fib} + Q_{evap} + Q_{carros} + Q_{perd}$$

- Q_{fib} : calor requerido para llevar la masa de la fibra a la temperatura de secado

- Q_{evap} : calor requerido para evaporar la cantidad de agua
- Q_{carros} : calor consumido al elevar los carros transportadores hasta la temperatura de secado
- Q_{perd} : calor perdido durante el proceso de secado

2.11.1. Calor requerido para calentar la caña guadúa

Para calentar la masa de fibra de caña hasta la temperatura de trabajo, se utilizó la siguiente expresión:

$$Q_{fib} = m_{fib} * Cp_{fib} * (T_s - T_a)$$

De la expresión planteada se conocen todos los valores, a excepción de la masa de fibra m_{fib} . Dicha masa corresponde al peso seco calculado (PSC) estimado, que fue obtenido con la siguiente fórmula que relaciona la masa total de secado y el contenido de humedad inicial (CHI):

$$PSC = \frac{m_T}{1 + CHI}$$

2.11.2. Calor requerido para vaporización del agua

Este valor corresponde a la energía requerida para lograr evaporar el agua contenida en la masa total de secado. La fórmula para hallar este calor fue:

$$Q_{evap} = m_{evap} * h_{fg}$$

La masa de agua total a evaporar se obtuvo mediante:

$$m_{agua} = m_T - PSC$$

Esta masa corresponde al contenido total de agua en la masa de secado, pero como nuestro objetivo es lograr un contenido de humedad final (CHF) de 50%. La cantidad de agua a evaporar fue:

$$m_{evap} = m_{agua} * \left(1 - \frac{CHF}{CHI}\right)$$

Para la obtención del calor latente de vaporización se empleó la siguiente relación planteada en el texto de *Termodinámica* [33] en base a la temperatura:

$$L_w = \frac{R}{M_w} * (6547.1 - 4.23 * (T_a + 273))$$

$$L_w = \text{calor latente de vaporización} \left[\frac{J}{kg} \right]$$

$$R: \text{constante de los gases} = 8314 \left[\frac{J}{kmol * K} \right]$$

$$M_w: \text{peso molar del agua} = 18.01 \left[\frac{kg}{kmol} \right]$$

2.11.3. Calor consumido por estructura de carros transportadores.

Para determinar el calor que se consume al elevar la temperatura de los carros hasta la temperatura de secado, se planteó la ecuación:

$$Q_{carros} = m_{carros} * C_{p_{acero}} * (T_s - T_a)$$

2.11.4. Calor de pérdidas dentro de la cámara

Para la obtención del calor perdido, fue necesario calcular el espesor del aislante para la cámara de secado mediante la expresión:

$$Q_{perd} = A_{TCS} * \left(\frac{T_s - T_a}{\frac{L_a}{k_a} + \frac{1}{he}} \right)$$

Donde:

- $he = h_{c,ext} + h_{rad}$
- $A_{TCS} = 2 * A_{lat1} + 2 * A_{lat2} + A_{sup}$
- L_a : espesor del aislante, [m]
- k_a : conductividad térmica del aislante, $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$

2.12. Diseño del Colector Solar

2.12.1. Radiación Solar

La radiación solar es una de las variables más importantes. Es la energía disponible para lograr que se cumpla el proceso de secado. Esta variable varía de acuerdo con su geolocalización. Para el caso se debe recurrir a los datos brindados por el INAMHI correspondientes a la provincia del Guayas, Ecuador. La heliofanía, es decir, las horas de brillo solar promedio y la cantidad de radiación diaria promedio, se presentan en la Tabla 8. según el anuario meteorológico No. 53-2013 [32].

2.12.2. Irradiación Solar.

La irradiación solar, IT , es la cantidad de energía solar recibida por cada m^2 en la tierra. Estos valores fueron obtenidos al dividir la radiación solar para la cantidad de horas de brillo solar al día. Estos datos se presentan en la Tabla 8.

$$IT = \frac{HT}{h_{sol}}$$

Tabla 8. Datos meteorológicos sobre Radiación solar según el INAMHI [32]

Meses	Radiación Solar, HT $\frac{Wh}{m^2 dia}$	Heliofanía	Brillo Solar día, h_{sol}	Irradiación Solar $\frac{W}{m^2}$
Enero	3900	88,6	3,7	1056,4
Febrero	3747	74,4	3,1	1208,7
Marzo	4310	104,7	4,4	987,9
Abril	4605	130,8	5,5	844,9
Mayo	4028	113,2	4,7	853,9
Junio	3715	103,7	4,3	859,7
Julio	3781	104,5	4,4	868,3
Agosto	4365	125,6	5,2	834,0
Septiembre	4510	121	5,0	894,5
Octubre	4364	109,7	4,6	954,7
Noviembre	4295	110,5	4,6	932,8
Diciembre	4148	106	4,4	939,1
Promedio	4147,333	107,7	4,89	936,3

2.12.3. Flujo Másico de Aire Requerido

El calor de secado obtenido anteriormente sirvió para hallar el flujo másico de aire requerido para secar la caña, mediante la expresión:

$$\dot{m}_{as} = \frac{Q_{secado}/t_{secado}}{(H_2 - H_1)}$$

$H_1 = \text{entalpía del aire del ambiente en Punto1} \left[\frac{kJ}{kg} \right]$

$H_2 = \text{entalpía del aire de secado en Punto2} \left[\frac{kJ}{kg} \right]$

2.12.4. Calor Útil del Colector

Según el texto de *Solar Engineering of Thermal Processes* [8]. La expresión para calcular el calor útil que brinda un colector fue:

$$Q_u = Ac(S - UL(T_{pm} - T_a))$$

Donde:

- Ac : área del colector solar
- S : energía absorbida por la placa
- UL : coeficiente de pérdidas globales
- T_{pm} : temperatura media de la placa

Puesto que, nuestro objetivo es hallar el área necesaria del colector solar para generar el calor de secado necesario, se fijó el calor de secado como punto de partida. No obstante, fue necesario tener en consideración que la eficiencia habitual para este tipo de sistema ronda entre 50-70%. Entonces, el calor útil real será:

$$Q_{util_req} = \frac{Q_{secado}}{\eta_c}$$

Continuando con el diseño de forma para el colector solar, es válido indicar que todas las ecuaciones siguientes fueron obtenidas del libro de *Solar Engineering of Thermal Processes* [8]. Pues los autores han desarrollado

modelos matemáticos que son aplicados hoy en día para el dimensionamiento de los sistemas solares.

2.12.5. Energía Absorbida por la Placa

La energía absorbida por la placa se obtuvo en base a la irradiación solar IT , la transmitancia de la cubierta de vidrio τ y la absorptancia del material que almacena la energía solar α .

$$S = IT * 1.02 * \tau * \alpha$$

2.12.6. Coeficiente Global de Pérdidas

Este coeficiente fue evaluado teniendo en consideración las pérdidas por todas las caras del colector solar, es decir, las pérdidas hacia arriba, abajo y laterales. Las dos primeras cuentan con sus expresiones matemáticas para ser calculados, pero las pérdidas laterales son despreciables según nos indica el texto de ingeniería solar[8]. La ecuación para el coeficiente global de pérdidas fue:

$$U_L = \frac{(U_b + U_t)(h_1 * h_{rad} + h_2 * h_{rad} + h_1 + h_2) + (U_b * U_t * (h_1 + h_2))}{h_1 * h_{rad} + U_t * h_2 + h_2 * h_{rad} + h_1 * h_2}$$

2.12.7. Coeficiente de Pérdidas Parte Superior

Para obtener este coeficiente se recurrió a la ecuación empírica propuesta por Klein en 1979, dado que ha sido planteado utilizando variables conocidas y/o estimables. La expresión fue la siguiente:

$$U_t = \frac{1}{\frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \left(\frac{T_{pm} - T_a}{N - f} \right)^e + h_{viento}} + \frac{1}{h_{viento}}} + \frac{\sigma(T_{pm} - T_a)(T_{pm}^2 + T_a^2)}{\frac{1}{\epsilon p + 0.00591 * N * h_{viento}} + \frac{2N + f - 1 + 0.133\epsilon p}{\epsilon c} - N}$$

$$f = (1 + 0.089 * h_{viento} - 0.1166 * h_{viento} * \epsilon p)(1 + 0.07866N)$$

$$C = 520(1 - 0.000051\theta^2)$$

$$e = 0.430 * \left(1 - \frac{100}{T_{pm}}\right)$$

N = número de cubiertas

T_{pm} = temperatura de la placa [K]

T_a = temperatura ambiente [K]

ϵ_p = emitancia de la placa

ϵ_c = emitancia de la cubierta de cristal

h_{viento} = velocidad del viento $\left[\frac{m}{s}\right]$

σ : coeficiente de radiación de Stefan – Boltzmann

$$= 5.67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K}\right]$$

θ : inclinacion del colector = 20°

2.12.8. Coeficiente de Pérdidas Parte Inferior

La expresión depende únicamente del aislante seleccionado. Siendo la expresión:

$$U_b = \frac{k_{ais}}{e_{ais}}$$

k_{ais} = conductividad del aislante

e_{ais} = longitud transversal del aislante

2.12.9. Determinación de Coeficiente Convectivo

El coeficiente de convección en el interior del colector se obtuvo al relacionar el número de Nusselt Nu , la conductividad térmica del aire ka y el diámetro hidráulico Dh representativo de la entrada de aire.

$$h = \frac{Nu * ka}{Dh}$$

Los coeficientes h_1 y h_2 que se observan en ecuación del coeficiente de pérdidas superiores, son iguales [8], [34]. Por ende, $h=h_1=h_2$. El número de Nusselt para estos sistemas se lo obtuvo con la expresión:

$$Nu = 0.0158 * Re_D^{0.8}$$

El número de Reynolds fue calculado mediante la relación entre la densidad del aire ρ , la viscosidad dinámica ν , velocidad del viento Vv y el diámetro hidráulico Dh :

$$Re_D = \frac{\rho_{aire} * Vv * Dh}{\nu}$$

2.12.10. Determinación del Coeficiente de Radiación

El coeficiente de radiación entre la cubierta y la placa se calculó en función del coeficiente Stefan-Boltzmann σ , la temperatura media del fluido Tfm , la emitancia de la placa ϵp y la emitancia de la cubierta de vidrio ϵc , siendo la expresión:

$$h_{rad} = \frac{4 * \sigma * Tfm^3}{\frac{1}{\epsilon p} + \frac{1}{\epsilon c} - 1}$$

2.12.11. Factor de Eficiencia del Colector

Este factor relaciona el coeficiente convectivo, coeficiente de radiación y los coeficientes de pérdidas de calor. Tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$F' = \frac{h1 * hrad + Ut * h2 + h2 * hrad + h1 * h2}{(Ut + hrad + h1)(Ub + h2 + hrad) - hrad^2}$$

2.12.12. Factor de Flujo

El factor de flujo fue obtenido mediante la relación entre el flujo másico, el calor específico del aire, área del colector, coeficiente total de pérdidas y el factor de eficiencia del colector, de tal manera que la expresión resultante fue:

$$F'' = \frac{m_a * Cp_a}{Ac * UL * F'} \left(1 - \exp \left(\frac{-(Ac * UL * F')}{m_a * Cp_a} \right) \right)$$

2.12.13. Factor de Remoción de Calor

Este factor fue el producto entre los factores recién mencionados, siendo la ecuación:

$$FR = F' * F''$$

2.12.14. Cálculo Temperatura Media del Fluido y la Temperatura Media de la Placa

La relevancia de estos factores previamente mencionados radica en que fueron muy útiles para calcular la temperatura media tanto de la placa como del flujo a través de las ecuaciones mostradas a continuación. Estas temperaturas fueron iteradas hasta que coincidieron con las asumidas al inicio de los cálculos.

$$T_{fm2} = T_a + \frac{Q_u}{A_c * FR * U_L} * (1 - F'')$$

$$T_{pm2} = T_a + \frac{Q_u}{A_c * FR * U_L} * (1 - FR)$$

2.12.15. Temperatura Salida del Colector

Para calcular esta temperatura se recurrió a la ecuación que relaciona el calor útil, el flujo másico, calor específico del aire y la temperatura de entrada. Siendo:

$$T_{sal} = T_a + \frac{Q_u}{m_a * Cp_a}$$

2.12.16. Eficiencia del Colector Solar

Cuando se mencionó el cálculo para el calor útil, se indicó el requerimiento de usar una eficiencia. Ahora bien, la eficiencia también logró ser calculada para verificar su valor, relacionando el área del colector solar, la irradiación solar y el calor útil:

$$\eta_c = \frac{Q_u}{Ac * IT}$$

Capítulo 3

3. Resultados y Análisis

3.1. Resultados del Diseño de la Cámara de secado.

Como se mencionó en la metodología las dimensiones de la cámara de secado corresponden a las de un contenedor de 20 pies. Por lo tanto, teniendo este dato en consideración y las condiciones iniciales previamente establecidas, los calores requeridos para realizar el proceso de secado de la caña se presentan en la *Tabla 9 Calores Resultantes del Diseño*Tabla 9.

Se obtuvo el valor del flujo másico de aire necesario para reducir la humedad de la fibra hasta un 50%, también se determinó luego de varias iteraciones el tiempo de secado óptimo y el cual estuvo directamente relacionado con las dimensiones del colector solar.

Tabla 9 Calores Resultantes del Diseño

Variable	Unidades	Valor
Q_{fib}	<i>MJ</i>	122.21
Q_{evap}	<i>MJ</i>	980.72
Q_{carro}	<i>MJ</i>	20.97
Q_{perd}	<i>MJ</i>	10
Q_{secado}	<i>MJ</i>	1133.9
t_{sec}	<i>h</i>	35
\dot{m}_{aire}	$\frac{kg}{s}$	0.565
n	%	58.91
h_m	$\frac{m}{s}$	0.4

3.2. Resultados del Diseño del Colector Solar

Los resultados del colector solar se presentan en la Tabla 10. Para el tiempo de secado mostrado en la Tabla 9 *Calores Resultantes del Diseño* los cálculos arrojaron un área de colección de 27 m². Dado que se trata de un colector de grandes dimensiones y recordando que el modelo propuesto debe ser de fácil manejo y

movilización, fue necesario seccionar el colector. Se pensó dividirlo en 4 unidades de recolección de energía solar con dimensiones descrita en la Tabla 10.

Tabla 10 Resultados del diseño del colector solar

Variable	Unidades	Valor
Área de colección, A_c	m^2	27
Secciones de colección	-	4
Largo de colector, L_c	m	3.5
Ancho colector, w_c	m	2
Tipo de aislante, ais	-	Espuma Poliuretano
Espesor aislante, e_{ais}	mm	50
Coeficiente Global Pérdidas, U_L	$\frac{W}{m^2K}$	5.467
Temperatura media de la placa, T_{pm}	$K, (^{\circ}C)$	344.2, (71.2)
Temperatura media del fluido, T_{fm}	$K, (^{\circ}C)$	311.8, (38.8)
Temperatura a la salida del colector, T_s	$K, (^{\circ}C)$	323.7, (50.7)

En la Figura 19 se observa la eficiencia del colector en función de la irradiación solar promedio para todos los meses del año. El gráfico muestra que entre abril y agosto la eficiencia alcanza sus valores máximos, siendo un indicativo para un desempeño estable del colector en dicha temporada. Por otro lado, desde enero a marzo se tiene las eficiencias más bajas, indicando los peores meses en térmicos de rendimiento.

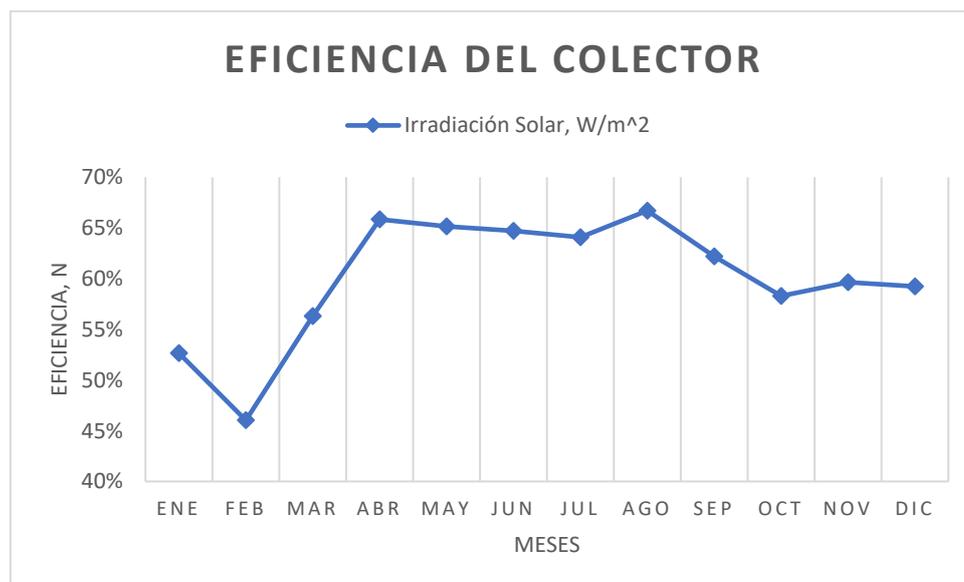


Figura 19 Eficiencia del colector en función del mes.

Debido a que las condiciones meteorológicas de cada mes varían. La heliofanía no es constante a lo largo del año, por ello se asumió un promedio de 5 horas de brillo solar diarias, que se convertirían en las horas de trabajo con más rendimiento al día para el colector. Este dato fue fundamental para realizar una iteración del tiempo de secado relacionando el área del colector solar presente en la Tabla 11.

Tabla 11 Resultados de la iteración del tiempo de secado

Tiempo de secado, h	5	10	15	20	25	30	35	40
Calor de secado, kW	63.0	31.5	21.0	15.7	12.6	10.5	9.0	7.87
Calor útil requerido del colector, kW	105	52.5	35.0	26.2	21.0	17.5	15.0	13.1
Área del colector, m ²	186,5	93,23	62,16	46,62	37,29	31,08	26,96	23,31

En la Figura 20 se muestra que, al incrementar el área del colector, se mejora la eficiencia del secado, ya que más área implica mayor captación de energía solar, lo que acelera el proceso de secado. Pero como se busca el diseño de un colector de fácil manejo se selecciona un tiempo de secado de 35 h, correspondiente a 7 días.

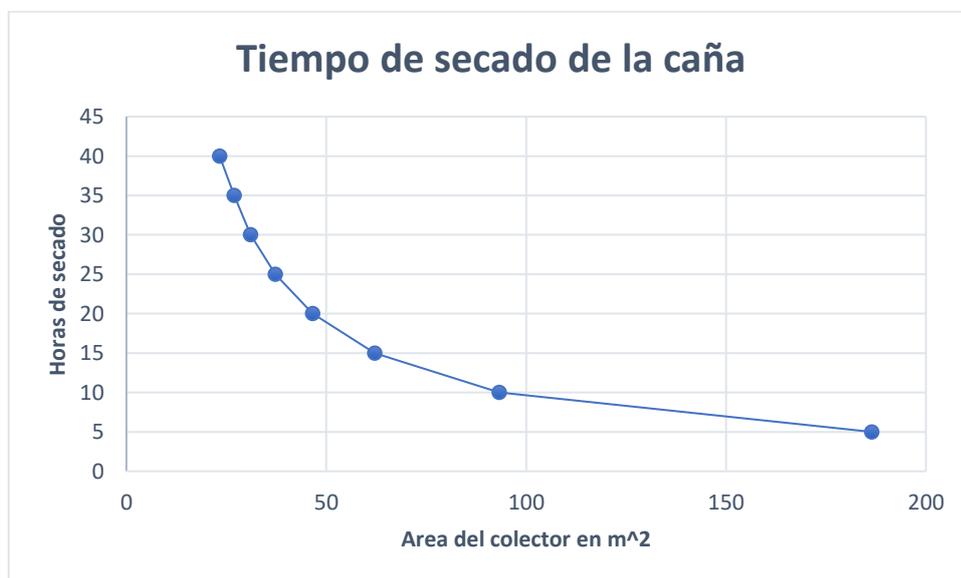


Figura 20 Tiempo de secado en relación con el área del colector solar.

Ahora bien, la Universidad Tecnológica de Pereira [35] ha realizado un estudio sobre el secado de la caña guadúa al aire libre. La Figura 21 muestra el modelo

matemático resultante que arroja la cantidad de días necesarios para reducir la humedad en la caña según el contenido de humedad inicial indicado. Este modelo es de gran útil para comparar la cantidad de días que tomaría secar la caña al aire libre y al usar el secador solar propuesto. Según el modelo tomando en consideración una reducción del 90 al 50% de humedad, a la caña le tomarían 27 días para secar al aire libre.

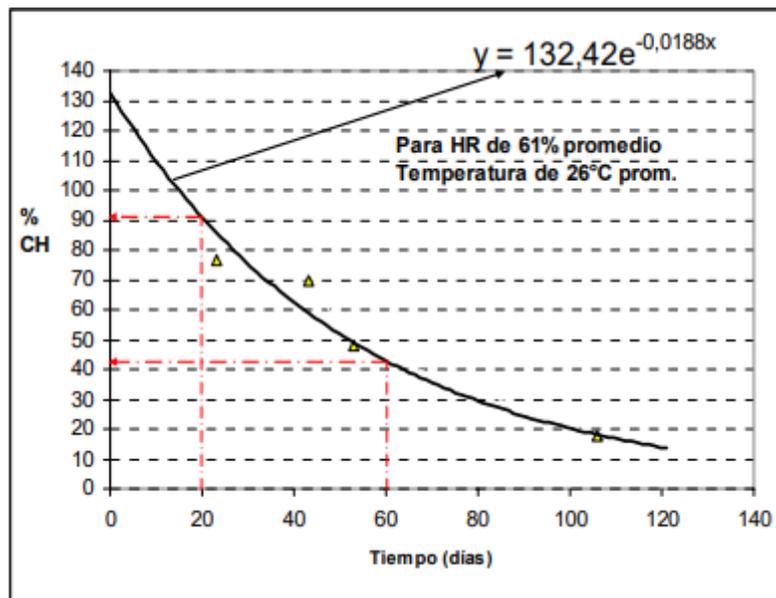


Figura 21. Curva de Secado de la Guadúa al aire libre [35].

3.3. Estructuras de soporte

Las simulaciones del comportamiento estático de las estructuras tanto para el colector como el carro transportador se realizaron en el *software ANSYS*. Los resultados obtenidos se presentan en el apéndice.

3.3.1. Carros transportadores

Los perfiles empleados para la elaboración de los carros transportadores se presentan en la Tabla 5, donde se seleccionó un perfil estructural cuadrado 20x20x2 mm como base y un ángulo doblado 20x20x2 mm como soporte para las tiras de caña.

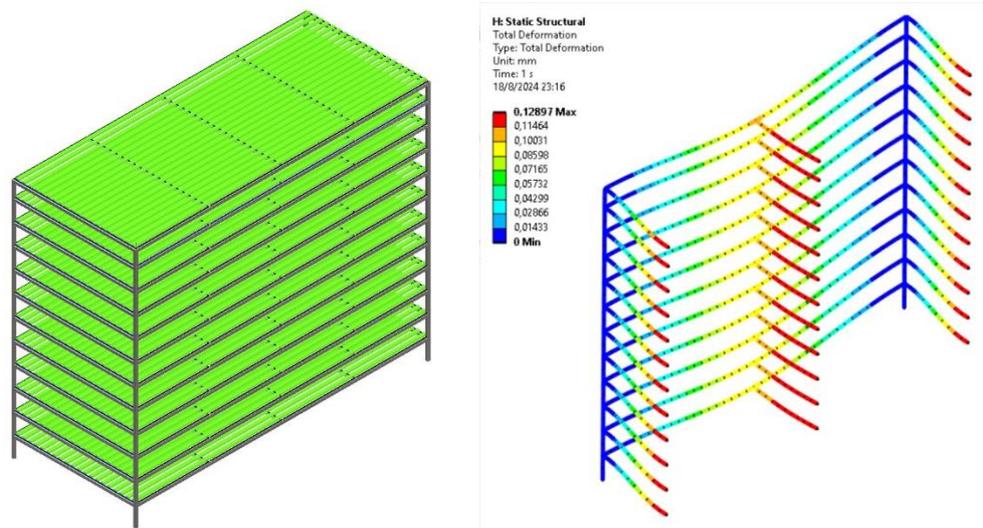


Figura 22 Análisis estructural y diseño final del carro transportador.

3.3.2. Base del colector solar

Con los resultados de la Tabla 10, la estructura empleada consta de dos secciones, para la base que soportará el peso del lecho rocoso está elaborado por perfiles IPN 80 y para la base de la estructura se emplean un perfil estructural cuadrado 40x40x3 mm que soportará la carga de diseño del colector solar.

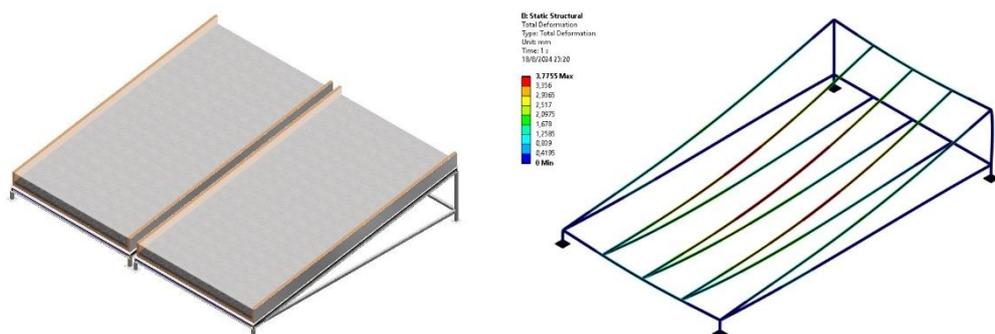
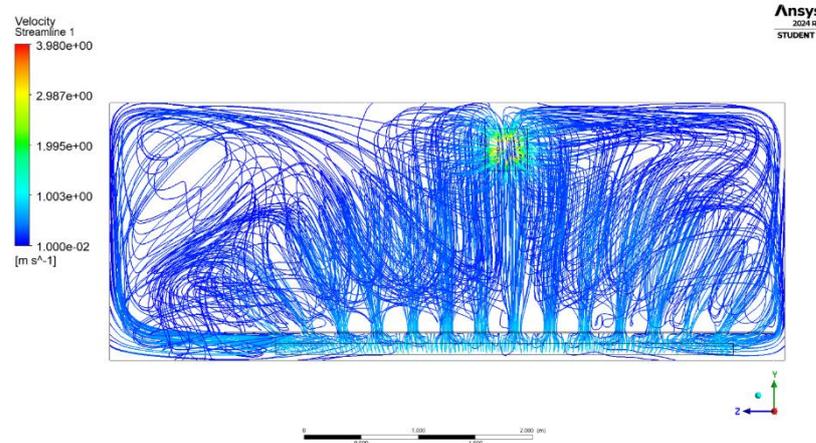


Figura 23 Análisis estructural y diseño final del colector solar.

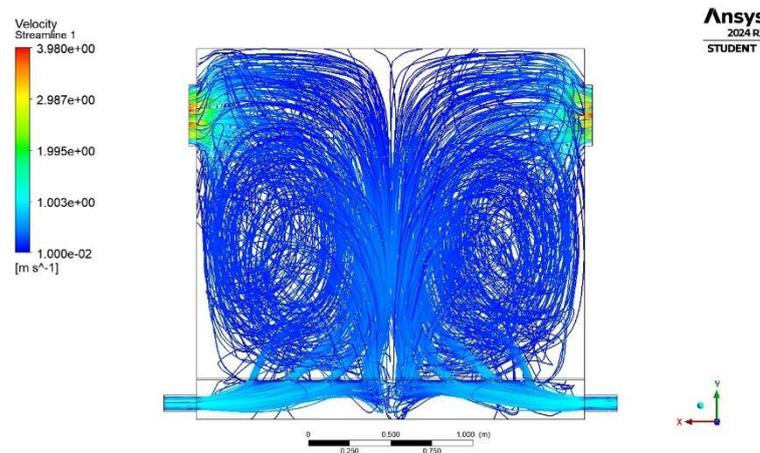
3.4. Simulación del Flujo Dentro de la Cámara de Secado

Del mismo modo para observar el flujo de aire dentro de la cámara de secado se empleó el software ANSYS, los resultados obtenidos se presentan en el apéndice.

Mediante la simulación se observa que, gracias a la placa distribuidora de flujo, el aire proveniente del colector solar entra con una velocidad de entre 1 m/s y 2 m/s y la velocidad de salida de aire de aproximadamente 4 m/s .



a)



b)

Figura 24 Simulación del flujo dentro de la cámara de secado: a) vista frontal del modelo; b) vista lateral del modelo.

3.5. Análisis Costos

Una vez obtenidas las dimensiones del colector solar y las secciones que se implementaran, además de conocer los perfiles asociados a las estructuras tanto del secador como el carro transportador, se realizó un análisis de los costos sobre el diseño del secador solar que comprende los materiales a utilizar.

Tabla 12 Costos Asociados a la Fabricación del Sistema de Secado para Caña.

MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio total
Colector Solar				
Perfil estructural cuadrado 40x40x3 mm	m	14,00	27,22	\$ 381,08
Plancha de aluminio 1220x2440x3 mm	m ²	12,00	164,79	\$ 1.977,48
Plancha de vidrio 10 mm	m ²	4,00	226,18	\$ 904,72
Plancha de poliuretano 1000x1000x40 mm	m ²	16,00	14,07	\$ 225,12
Perfil IPN 80	m	15,00	54,51	\$ 817,65
			Total	\$ 4.306,05
Carro Transportador				
Perfil estructural cuadrado 20x20x2 mm	m	44,00	8,53	\$ 375,32
Ángulo negro doblado 20x20x2 mm	m	40,00	6,86	\$ 274,40
			Total	\$ 649,72
			Subtotal	\$ 4.955,77

Un estudio sobre los costos y consumo energético para la producción de pellets de madera en diferentes condiciones de trabajo en el Noroeste de Argentina [36], muestra la diferencia del consumo energético de una producción anual de pellets de madera cuando la biomasa utilizada tiene un 100% de contenido de humedad y cuando tiene un 50% de contenido de humedad. La Tabla13 indica los valores de consumo energético y el porcentaje de reducción.

Tabla 13. Consumo de Energía Total para distinto %CH

Recurso Energético	100% CH	50% CH
Energía eléctrica	14.810	14.104
Energía de Calor	80.417	40.208
Energía Diesel	4.311	4.311
Total, GJ/año	99.538	58.623
Disminución Consumo, %		41.10

Capítulo 4.

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

- Se logró reducir significativamente el tiempo de secado de la caña guadua en comparación con métodos artesanales, y además se optimizó el tiempo de operación en comparación con secadores industriales, mejorando la eficiencia general del proceso.
- Tras evaluar diferentes tipos de colectores solares, se eligió un colector de placa plana debido a su alta eficiencia energética y su simplicidad en la construcción, lo que lo convierte en una opción práctica y efectiva para este proyecto, debido a que el colector resultante fue de grandes dimensiones.
- Mediante un balance de energía se logró dimensionar el colector solar capaz de reducir el contenido de humedad de la caña guadua hasta en un 50% en el tiempo de secado estimado, demostrando la efectividad del sistema de secado diseñado con una eficiencia del 60%.
- Al comparar el consumo energético total anual en la producción de pellets utilizando biomasa con diferentes niveles de humedad de entrada, se logró una disminución del 41% en el consumo energético, lo que subraya la eficiencia del proceso de secado y su impacto positivo en la sostenibilidad energética.

4.2. Recomendaciones.

- Es aconsejable la instalación de baterías solares y resistencias eléctricas para garantizar el calentamiento del aire en días con baja radiación solar. Esta medida asegura que el proceso de secado continúe de manera eficiente incluso en condiciones meteorológicas adversas.
- En periodos con alta humedad relativa, especialmente fuera de las horas de brillo solar, es aconsejable abrir el contenedor para evitar que la materia prima absorba

humedad adicional. Esta práctica ayuda a mantener la calidad del secado y prevenir la rehidratación del material.

- Para instalaciones con colectores solares de gran tamaño, se sugiere dividirlos en secciones modulares. Esto facilitará su traslado, manejo y permitirá un análisis estructural más preciso, además de simplificar posibles reparaciones o ajustes en el sistema.

Bibliografía

- [1] J. Ortega, “ESTUDIO DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN LAS FASES DE PRODUCCIÓN DE PÉLETS EN UNA INSTALACIÓN PILOTO: APLICACIÓN A DISTINTAS BIOMASAS LIGNOCELULÓSICAS,” Universidad de Valladolid, Valladolid, 2015.
- [2] “Finding Solutions for your automated wood veneer production! price_inquiry_detail-Shandong Shine Machinery Co.,Ltd.” Accessed: Jun. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.topveneerdryer.com/solution-your-wood>
- [3] A. R. Magne, “USO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIALES EN FORMA DE PELLETS PARA FINES ENERGÉTICOS EN ZONAS RURALES DE BOLIVIA,” Universidad Pública de Navarra, Pamplona, 2018.
- [4] A. Romero Salvador, “APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA ALTERNATIVA A LOS COMBUSTIBLES FÓSILES,” *Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp)*, vol. 104, no. 2, pp. 331–345, 2010.
- [5] H. Ritchie, M. Roser, and P. Rosado, “CO2 and Greenhouse Gas Emissions,” *Our World in Data*, 2020.
- [6] C. A. Forero Nuñez, C. A. Guerrero Fajardo, and F. E. Sierra Vargas, “Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación,” *ITECKNE: Innovación e Investigación en Ingeniería*, ISSN-e 2339-3483, ISSN 1692-1798, Vol. 9, N°. 1, 2012, págs. 21-30, vol. 9, no. 1, pp. 21–30, 2012, Accessed: Jun. 13, 2024. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4991583&info=resumen&idioma=SPA>
- [7] BioPlat, “Pélets de biomasa en España,” Madrid, 2013.
- [8] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed. New York, 2013.
- [9] EcoCiencia - INBAR, “COSECHA Y PRESERVADO DE LA CAÑA GUADÚA,” Quito, 2021.
- [10] L. B. Tapia, S. S. Solórzano, and H. B. Obaco, “Producción y comercialización de la caña guadua en la provincia de el oro,” *Conference Proceedings (Machala)*, vol. 1, no. 1, Jun. 2017, Accessed: Jun. 02, 2024. [Online]. Available: <https://investigacion.utmachala.edu.ec/proceedings/index.php/utmach/article/view/194>
- [11] S. Schröder, “¿Qué es la Guadua angustifolia?,” Guadua Bamboo SAS.
- [12] BambúEXPORT, “BAMBÚ GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH,” Bambú Ecuatoriano de Exportación.
- [13] M. Duarte, “ESTRUCTURAS DE GUADÚA (GaK),” Quito, 2016.
- [14] F. J. Macías Tachong, “Fertilización de Guadua angustifolia Kunth, durante su primera fase de desarrollo en el Recinto ‘Pice’ de la parroquia ‘El Vergel’, cantón Valencia”.,” 2005, *Quevedo : UTEQ*. Accessed: Jun. 02, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/2146>
- [15] A. Restrepo and J. Burbano, “DISPONIBILIDAD TÉRMICA SOLAR Y SU APLICACIÓN EN EL SECADO DE GRANOS,” *Scientia Et Technica*, vol. XI, no. 27, pp. 127–132, 2005, Accessed: Jul. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84911698024>

- [16] J. Olgúin and M. López, "Evaluación del secado de muestras de culmos de bambú *Guadua aculeata* Rupr. En horno a temperatura constante," *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, vol. 7, no. 1, pp. 520–530, Mar. 2024, doi: 10.34188/bjaerv7n1-039.
- [17] F. G. Delgado, D. M. Cortés Hernández, C. Mejía Morales, and H. A. Calderón, "Comportamiento de los parámetros termofísicos de la *Guadua angustifolia*-Kunth medidos con la técnica fotoacústica Behavior of *Guadua angustifolia*-Kunth Thermophysical Parameters Measured by Photoacoustic Technique," 2012.
- [18] D. Arias Aguilar and C. Augusto Alvarado Farah Marcela Girón, "TECNOLOGÍAS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE LA BIOMASA FORESTAL AUTOR: RECONOCIMIENTO TÉCNICO: DICIEMBRE 2017."
- [19] "El Cotidiano", Accessed: Jun. 13, 2024. [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=32512739009>
- [20] I. Luzardo-Ocampo, J. Santos, and C. Gutiérrez-Antonio, "Biocombustibles sólidos: una alternativa económica y sostenible para la generación de energía eléctrica en México," 2019. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/340754910>
- [21] International Organization for Standardization, "ISO 17225-6:2014. Solid biofuels-Fuel specifications and classes - Part 6: Graded non-woody pellets," 2019.
- [22] G. J. Mucha Aviles, "EVALUACIÓN DE PELLETS PRODUCIDOS CON RESIDUOS DE *Guadua angustifolia* Kunth," UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA, Lima, 2020.
- [23] N. J. Soto Rojas, "GENERACIÓN DE PELLETS Y COMPOST A PARTIR DE RESIDUOS AGRÍCOLAS," UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA, Valparaíso, 2017.
- [24] J. C. Tamarit-Urias, J. Quintanar Olguin, C. Ordóñez-Prado, M. Rodríguez-Acosta, and M. E. Fuentes-López, "Evaluación del proceso de secado solar de los culmos de *Guadua aculeata* Rupr. ex E. Fourn.," *Rev Mex Cienc For*, vol. 14, no. 78, pp. 141–164, Jul. 2023, doi: 10.29298/rmcf.v14i78.1384.
- [25] A. G. M. B. Mustayen, S. Mekhilef, and R. Saidur, "Performance study of different solar dryers: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 463–470, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.03.020.
- [26] R. Román, A. Marconi, and J. Reyes, "Manual de construcción y uso: Secador Solar".
- [27] R. Raposo Cabello, "DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN COLECTOR SOLAR DE AIRE CON MATERIALES RECICLADOS".
- [28] T. Rony, L. Chambergo, R. Celia, S. Huamanyalli, and M. Z. Mamani, "Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental," 2020.
- [29] R. Castro and K. Pincay, "Diseño, simulación y evaluación energética de un prototipo de secador solar para el cacao con colector en lechos de rocas," Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2021.
- [30] ROSCONTAINER, "Contenedores marítimos en alquiler y venta MEDIDAS DE LOS CONTENEDORES MARÍTIMOS."

- [31] "Ansys | Engineering Simulation Software." Accessed: Aug. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/>
- [32] INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA, "ANUARIO METEOROLÓGICO Nro. 53-2013," Quito, 2017.
- [33] Y. Cengel, M. Boles, and M. Kanoglu, *TERMODINÁMICA*, NOVENA. Mexico, 2019.
- [34] "Modelación de un colector solar para calentamiento de aire." Accessed: Aug. 05, 2024. [Online]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012015000300007#e12
- [35] J. A. MONTOYA ARANGO and E. JIMENEZ ARIAS, "Determinación de la curva de secado al aire libre, mediante modelación matemática y experimental de la Guadua angustifolia Kunth," *Scientia Et Technica*, vol. XII, pp. 415–419, May 2006.
- [36] "Sci-Hub | Wood pellets production costs and energy consumption under different framework conditions in Northeast Argentina. *Biomass and Bioenergy*, 35(3), 1357–1366 | 10.1016/j.biombioe.2010.12.029." Accessed: Aug. 22, 2024. [Online]. Available: <https://sci-hub.se/10.1016/j.biombioe.2010.12.029>

Apéndices

Apéndice A

Tabla de materiales considerados en el diseño del secador solar

- Perfil IPN 80

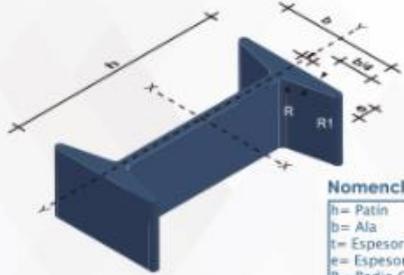
PERFILES LAMINADOS IPN



Especificaciones Generales:

Norma:	RTE INEN 018
Calidad:	ASTM A36 / ENS 235 JR / EN10025 / ASTM A 572 GR 50 / ENS 355 J2
Largo Normal:	6.00mts y 12mts
Acabado:	Acero negro

*Otras calidades, otros largos y otros acabados previa consulta



Nomenclatura

- h= Patin
- b= Ala
- t= Espesor Alma
- e= Espesor Ala
- R= Radio Giro Alma
- R1= Radio Giro Ala



PROPIEDADES MECÁNICAS

RESISTENCIA MECÁNICA		PUNTO FLUENCIA	
Kg/mm ²	Mpa	Kg/mm ²	Mpa
37 - 52	370 - 520	24	235

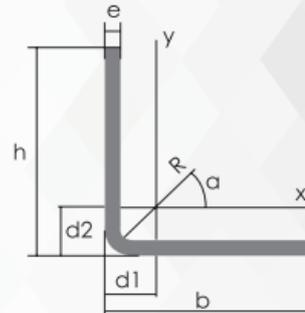
DENOMINACIÓN	DIMENSIONES						PROPIEDADES					
	h mm	b mm	t mm	e mm	R mm	R1 mm	ÁREA SECCIÓN cm ²	PESOS kg/mt	INERCIA (cm ⁴)		MOMENTO DE RESISTENCIA (cm ³)	
	Eje x-x	Eje y-y	Eje x-x	Eje y-y								
IPN 80	80	42	3.90	5.90	30.90	2.30	7.58	5.95	77	6.29	19.50	3.00
IPN 100	100	50	4.30	6.30	4.50	2.70	10.60	8.32	111	12.20	34.20	4.55
IPN 120	120	64	4.40	6.30	4.50	3.00	13.20	10.40	318	27.70	53.00	8.65
IPN 140	140	66	5.70	8.60	5.70	3.40	18.30	14.40	573	35.20	81.90	10.70
IPN 160	160	74	6.30	9.50	6.30	3.80	22.60	17.90	935	54.70	117.00	14.80
IPN 200	200	90	7.50	11.30	7.50	4.50	33.50	26.30	2140	117.00	214.00	26.00
IPN 240	240	106	8.70	13.10	8.70	5.20	46.10	36.20	4250	221.00	354.00	41.70
IPN 300	300	125	10.80	16.20	10.80	6.50	69.10	54.20	9800	451.00	653.00	72.20
IPN 400	400	155	14.40	21.60	14.40	8.80	118.00	92.60	29210	1160.00	1460.00	148.00
IPN 450	450	170	16.20	24.30	16.20	9.70	147.00	115.00	45850	1730.00	2040.00	203.00

- **Ángulo doblado.**

PERFILES ESTRUCTURALES ÁNGULOS "L" DOBLADO

Especificaciones Generales:

Norma:	NTE INEN 1623
Calidad:	ASTM A36
Largo Normal:	6,00m y medidas especiales
Espesores:	Desde 2.00mm - 12mm
Acabado:	Acero Negro



Descripción	Ángulos de alas iguales																			
	b	h	e	Masa	Área	d1	d2	Ángulo a	Eje X - X			Eje Y - Y			Eje U - U			Eje V - V		
									lx	Wx	rx	ly	Wy	ry	lu	Wu	ru	lv	Wv	rv
mm	mm	mm	Kg/m	cm ²	cm	cm	(°)	cm4	cm3	cm	cm4	cm3	cm	cm4	cm3	cm	cm4	cm3	cm	
L 20x 2	20	20	2	0,57	0,73	0,60	0,60	45,00	0,28	0,20	0,62	0,28	0,20	0,62	0,46	0,32	0,79	0,10	0,14	0,37
L 20x 3	20	20	3	0,81	1,03	0,65	0,65	45,00	0,38	0,28	0,60	0,38	0,28	0,60	0,63	0,45	0,78	0,12	0,17	0,34
L 25x 2	25	25	2	0,73	0,93	0,72	0,72	45,00	0,56	0,32	0,78	0,56	0,32	0,78	0,92	0,52	1,00	0,20	0,23	0,47
L 25x 3	25	25	3	1,05	1,33	0,78	0,78	45,00	0,78	0,45	0,77	0,78	0,45	0,77	1,30	0,74	0,99	0,26	0,30	0,45
L 30 x 2	30	30	2	0,88	1,13	0,85	0,85	45,00	1,00	0,46	0,94	1,00	0,46	0,94	1,63	0,77	1,20	0,37	0,35	0,57
L 30x 3	30	30	3	1,28	1,63	0,90	0,90	45,00	1,40	0,67	0,93	1,40	0,67	0,93	2,32	1,09	1,19	0,49	0,46	0,55
L 30x 4	30	30	4	1,65	2,10	0,95	0,95	45,00	1,76	0,86	0,91	1,76	0,86	0,91	2,93	1,38	1,18	0,58	0,55	0,52
L 40x 2	40	40	2	1,20	1,33	1,10	1,10	45,00	2,44	0,84	1,26	2,44	0,84	1,26	3,96	1,40	1,61	0,92	0,65	0,78
L 40x 3	40	40	3	1,75	2,23	1,15	1,15	45,00	3,49	1,22	1,25	3,49	1,22	1,25	5,71	2,02	1,60	1,27	0,90	0,75
L 40x 4	40	40	4	2,28	2,90	1,20	1,20	45,00	4,44	1,59	1,24	4,44	1,59	1,24	7,23	2,59	1,59	1,55	1,10	0,73
L 40x 5	40	40	5	2,77	3,54	1,25	1,25	45,00	5,29	1,92	1,22	5,29	1,92	1,22	8,80	3,11	1,58	1,77	1,25	0,71
L 50x 2	50	50	2	1,51	1,93	1,35	1,35	45,00	4,85	1,33	1,59	4,85	1,33	1,59	7,85	2,22	2,02	1,85	1,05	0,98
L 50x 3	50	50	3	2,22	2,83	1,40	1,40	45,00	7,01	1,95	1,57	7,01	1,95	1,57	11,42	3,23	2,01	2,61	1,47	0,96
L 50x 4	50	50	4	2,90	3,70	1,45	1,45	45,00	9,01	2,54	1,56	9,01	2,54	1,56	14,76	4,18	2,00	3,25	1,84	0,94
L 50x 5	50	50	5	3,56	4,54	1,50	1,50	45,00	10,84	3,10	1,55	10,84	3,10	1,55	17,89	5,06	1,99	3,79	2,14	0,91
L 60x 3	60	60	3	2,69	3,43	1,65	1,65	45,00	12,34	2,84	1,90	12,34	2,84	1,90	20,03	4,72	2,42	4,65	2,19	1,16
L 60x 4	60	60	4	3,53	4,50	1,70	1,70	45,00	15,96	3,71	1,70	15,96	3,71	1,70	26,04	6,14	2,40	5,88	2,77	1,14
L 60x 5	60	60	5	4,34	5,54	1,75	1,75	45,00	19,33	4,55	1,87	19,33	4,55	1,87	31,72	7,48	2,39	6,95	3,27	1,12
L 75x 3	75	75	3	3,40	4,33	2,02	2,02	45,00	24,55	4,48	2,38	24,55	4,48	2,38	39,72	7,49	3,03	9,38	3,53	1,47
L 75x 4	75	75	4	4,47	5,70	2,07	2,07	45,00	31,94	5,88	2,37	31,94	5,88	2,37	51,90	9,79	3,02	11,99	4,51	1,45
L 75x 5	75	75	5	5,52	7,04	2,12	2,12	45,00	38,96	7,24	2,35	38,96	7,24	2,35	63,56	11,99	3,01	14,35	5,40	1,43
L 75x 6	75	75	6	6,53	8,33	2,17	2,17	45,00	45,60	8,56	2,34	45,60	8,56	2,34	74,73	14,09	2,99	16,46	6,20	1,41
L 80x 4	80	80	4	4,79	6,10	2,20	2,20	45,00	39,00	6,72	2,53	39,00	6,72	2,53	63,30	11,19	3,22	14,70	5,19	1,55
L 80x 5	80	80	5	5,91	7,54	2,25	2,25	45,00	47,65	8,28	2,51	47,65	8,28	2,51	77,64	13,72	3,21	17,65	6,23	1,53
L 80x 6	80	80	6	7,00	8,93	2,30	2,30	45,00	55,86	9,79	2,50	55,86	9,79	2,50	91,39	16,16	3,20	20,32	7,17	1,51
L 80x 8	80	80	8	9,11	11,61	2,40	2,40	45,00	71,03	12,68	2,47	71,03	12,68	2,47	117,22	20,72	3,18	24,85	8,78	1,46
L 80x 10	80	80	10	11,09	14,14	2,50	2,50	45,00	94,59	15,39	2,45	94,59	15,39	2,45	140,84	24,90	3,16	28,34	10,04	1,42
L100x 5	100	100	5	7,48	9,54	2,75	2,75	45,00	95,23	13,13	3,16	95,23	13,13	3,16	154,55	21,86	4,03	35,90	10,13	1,94

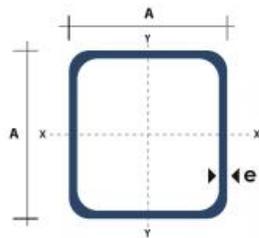
*Otras calidades, largos y acabados: previa consulta

- Perfil estructural cuadrado.

TUBO ESTRUCTURAL CUADRADO

Especificaciones Generales:

Norma:	NTE INEN 2415
Calidad:	SAE J 403 1008
Acabado:	Acero negro o Galvanizado
Largo Normal:	6.00m y medidas especiales
Dimensiones:	Desde 20mm a 100mm
Espesores:	Desde 1,20mm a 5,00mm



Dimensiones			Área	Ejes X-Xe Y-Y		
A mm	Espesor mm (e)	Peso Kg/m	Área cm ²	I cm ⁴	W cm ³	i cm ³
20	1.2	0.72	0.90	0.53	0.53	0.77
20	1.5	0.88	1.05	0.58	0.58	0.74
20	2.0	1.15	1.34	0.69	0.69	0.72
25	1.2	0.90	1.14	1.08	0.87	0.97
25	1.5	1.12	1.35	1.21	0.97	0.95
25	2.0	1.47	1.74	1.48	1.18	0.92
30	1.2	1.09	1.38	1.91	1.28	1.18
30	1.5	1.35	1.85	2.19	1.46	1.15
30	2.0	1.78	2.14	2.71	1.81	1.13
40	1.2	1.47	1.80	4.38	2.19	1.25
40	1.5	1.82	2.25	5.48	2.74	1.56
40	2.0	2.41	2.94	6.93	3.46	1.54
40	3.0	3.54	4.44	10.20	5.10	1.52
50	1.5	2.29	2.85	11.06	4.42	1.97
50	2.0	3.03	3.74	14.13	5.65	1.94
50	3.0	4.48	5.61	21.20	4.48	1.91
60	2.0	3.66	3.74	21.26	7.09	2.39
60	3.0	5.42	6.61	35.06	11.69	2.34
75	2.0	4.52	5.74	50.47	13.46	2.97
75	3.0	6.71	8.41	71.54	19.08	2.92
75	4.0	8.59	10.95	89.98	24.00	2.87
100	2.0	6.17	7.74	122.99	24.60	3.99
100	3.0	9.17	11.41	176.95	35.39	3.94
100	4.0	12.13	14.95	226.09	45.22	3.89
100	5.0	14.40	18.36	270.57	54.11	3.84

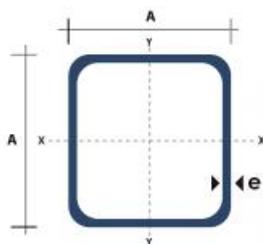


- Perfil estructural cuadrado.

TUBO ESTRUCTURAL CUADRADO

Especificaciones Generales:

Norma:	NTE INEN 2415
Calidad:	SAE J 403 1008
Acabado:	Acero negro o Galvanizado
Largo Normal:	6.00m y medidas especiales
Dimensiones:	Desde 20mm a 100mm
Espesores:	Desde 1,20mm a 5,00mm



Dimensiones			Área	Ejes X-Xe Y-Y		
A mm	Espesor mm (e)	Peso Kg/m	Área cm ²	I cm ⁴	W cm ³	i cm ³
20	1.2	0.72	0.90	0.53	0.53	0.77
20	1.5	0.88	1.05	0.58	0.58	0.74
20	2.0	1.15	1.34	0.69	0.69	0.72
25	1.2	0.90	1.14	1.08	0.87	0.97
25	1.5	1.12	1.35	1.21	0.97	0.95
25	2.0	1.47	1.74	1.48	1.18	0.92
30	1.2	1.09	1.38	1.91	1.28	1.18
30	1.5	1.35	1.65	2.19	1.46	1.15
30	2.0	1.78	2.14	2.71	1.81	1.13
40	1.2	1.47	1.80	4.38	2.19	1.25
40	1.5	1.82	2.25	5.48	2.74	1.56
40	2.0	2.41	2.94	6.93	3.46	1.54
40	3.0	3.54	4.44	10.20	5.10	1.52
50	1.5	2.29	2.85	11.06	4.42	1.97
50	2.0	3.03	3.74	14.13	5.65	1.94
50	3.0	4.48	5.61	21.20	4.48	1.91
60	2.0	3.66	3.74	21.26	7.09	2.39
60	3.0	5.42	6.61	35.06	11.69	2.34
75	2.0	4.52	5.74	50.47	13.46	2.97
75	3.0	6.71	8.41	71.54	19.08	2.92
75	4.0	8.59	10.95	89.98	24.00	2.87
100	2.0	6.17	7.74	122.99	24.60	3.99
100	3.0	9.17	11.41	176.95	35.39	3.94
100	4.0	12.13	14.95	226.09	45.22	3.89
100	5.0	14.40	18.36	270.57	54.11	3.84

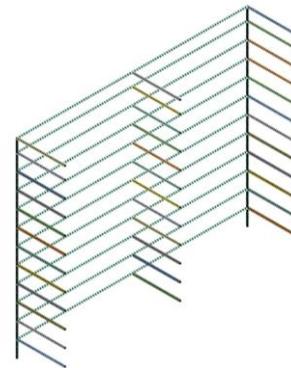


Apéndice B

Análisis estructural del carro transportador y soporte del colector solar.

- Carro transportador.

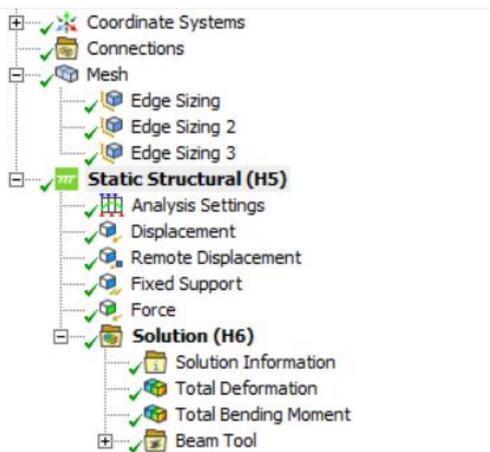
Details of "Mesh"	
<input type="checkbox"/> Display	
Display Style	Use Geometry Setting
<input type="checkbox"/> Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
<input type="checkbox"/> Element Size	1,e-002 mm
<input type="checkbox"/> Sizing	
<input type="checkbox"/> Quality	
<input type="checkbox"/> Inflation	
<input type="checkbox"/> Batch Connections	
<input type="checkbox"/> Advanced	
<input type="checkbox"/> Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	5990
<input type="checkbox"/> Elements	3000
Show Detailed Statistics	No



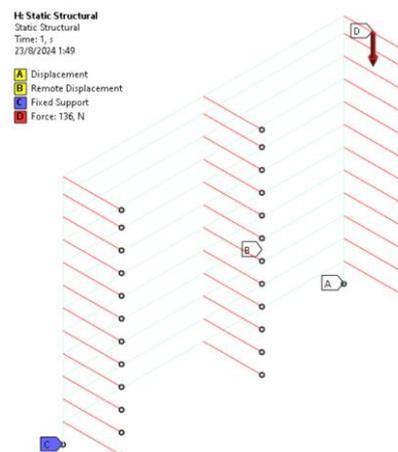
a)

b)

Figura 25 Mallado del modelo para el carro transportador: a) cantidad de nodos y elementos; b) mallado.



a)



b)

Figura 26 Condiciones de frontera para el modelo: a) configuración de las condiciones, b) aplicación de las condiciones en el modelo.

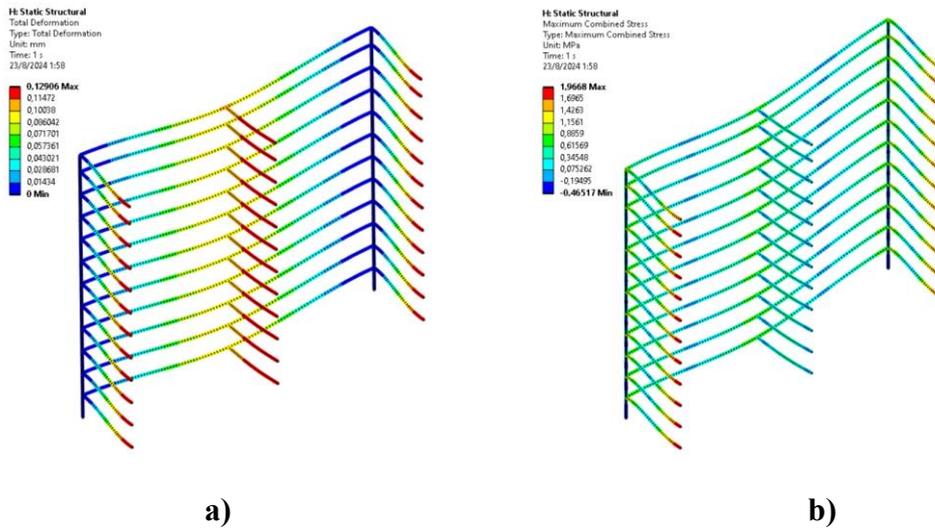


Figura 27 Resultados del modelo: a) deformación total, b) máximo esfuerzo combinado.

- Soporte del colector solar.

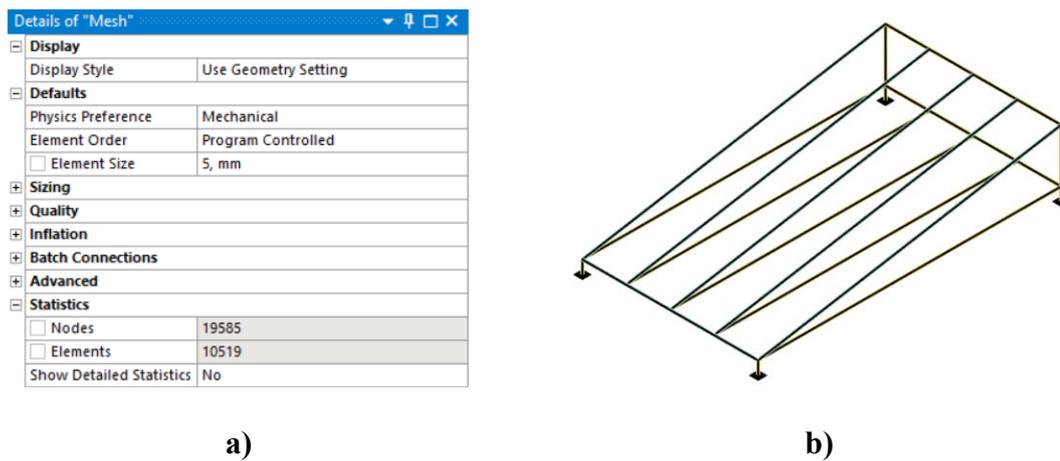


Figura 28 Mallado del modelo para el soporte del colector solar: a) cantidad de nodos y elementos; b) mallado.

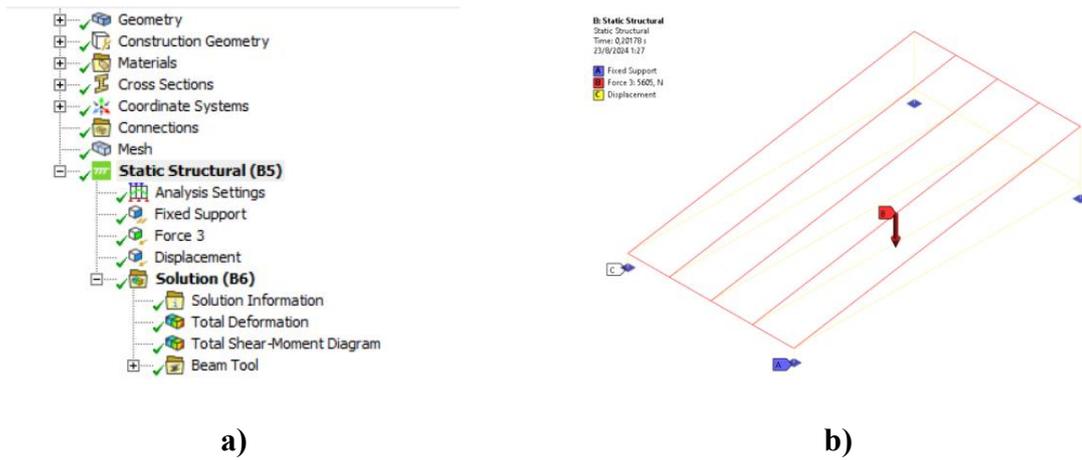


Figura 29 Condiciones de frontera para el modelo: a) configuración de las condiciones, b) aplicación de las condiciones en el modelo.

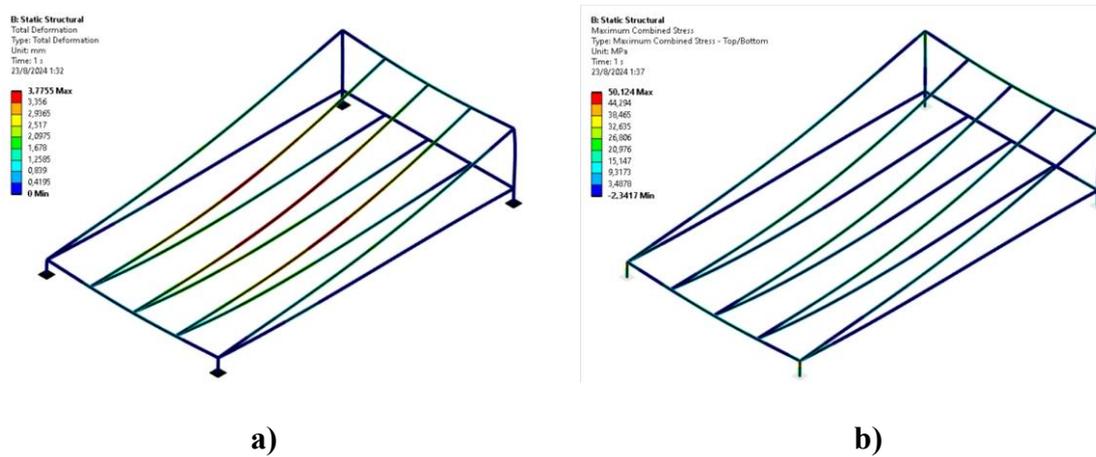
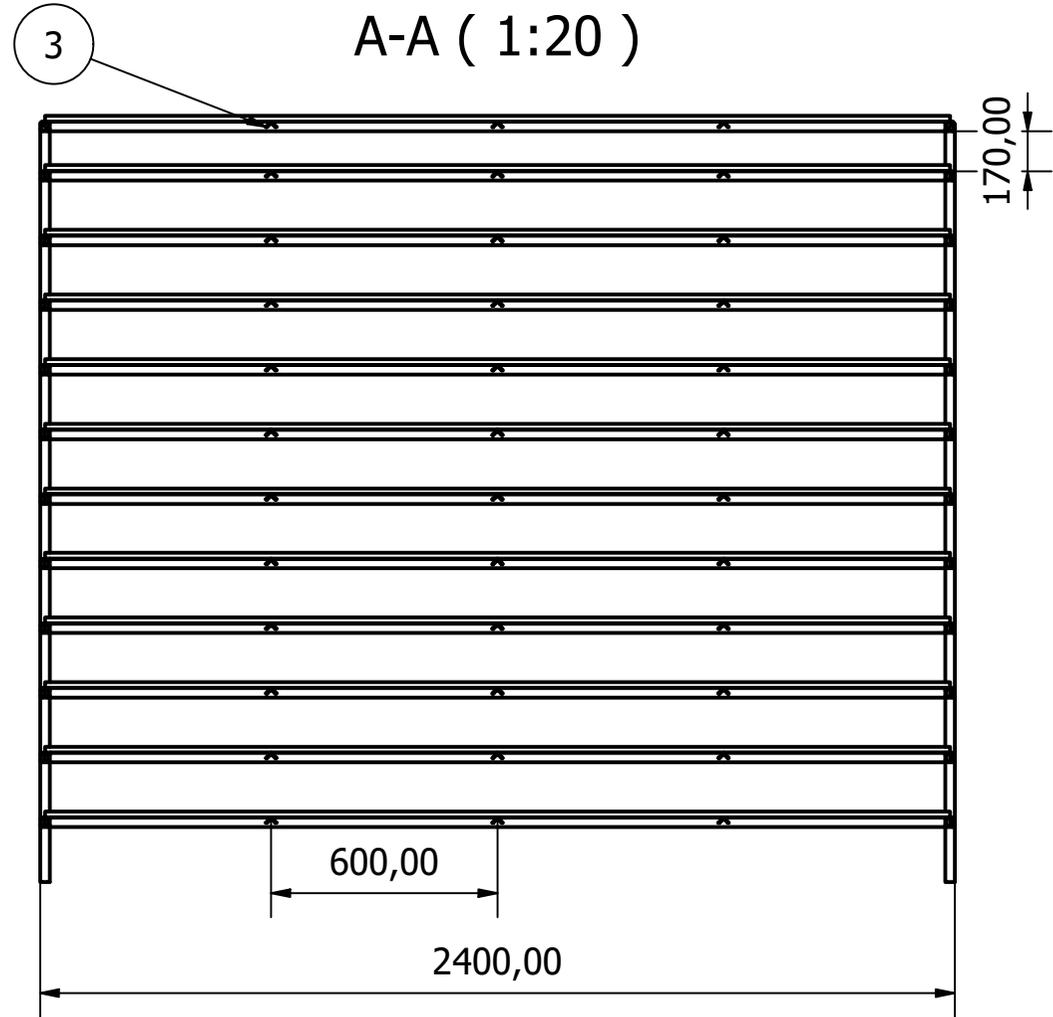
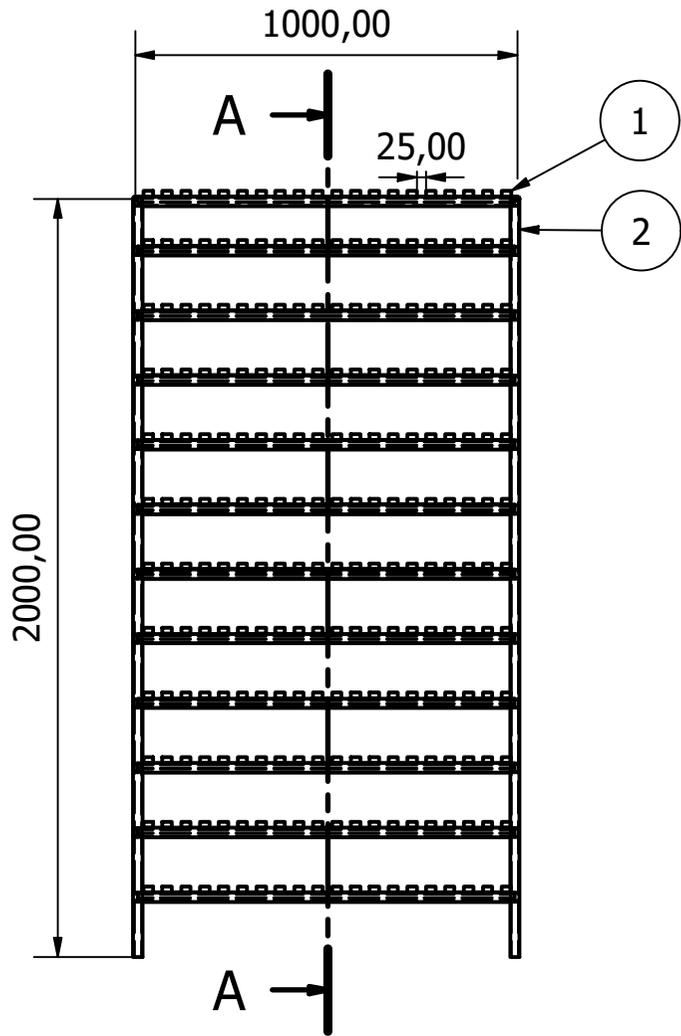


Figura 30 Resultados del modelo: a) deformación total, b) máximo esfuerzo combinado.

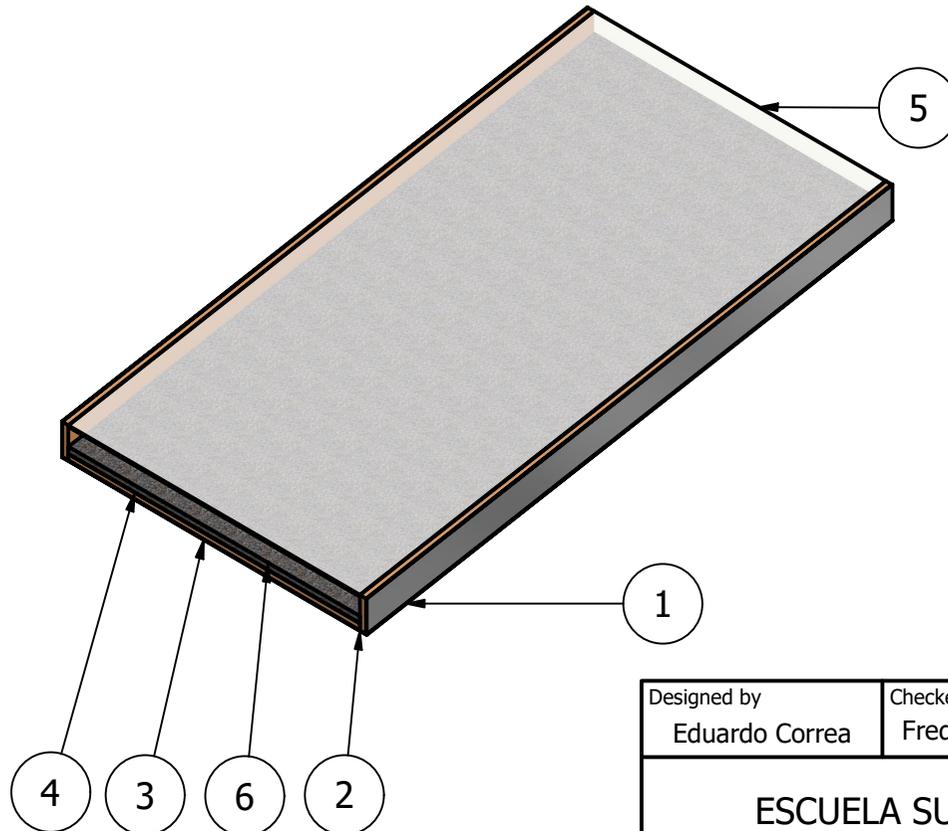
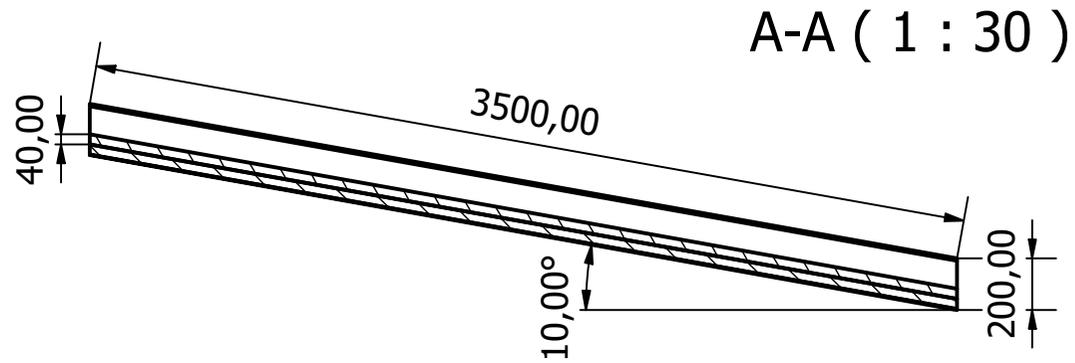
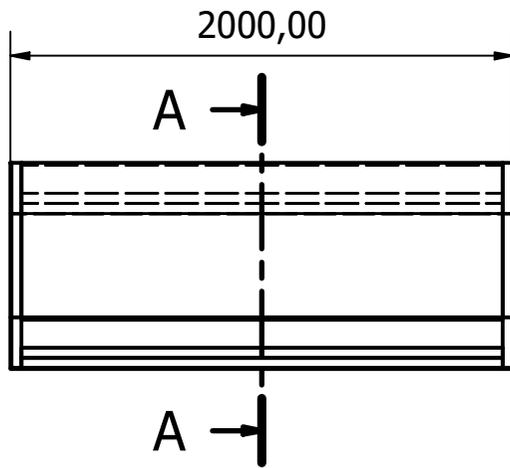
Apéndice C

Planos de construcción del secador solar



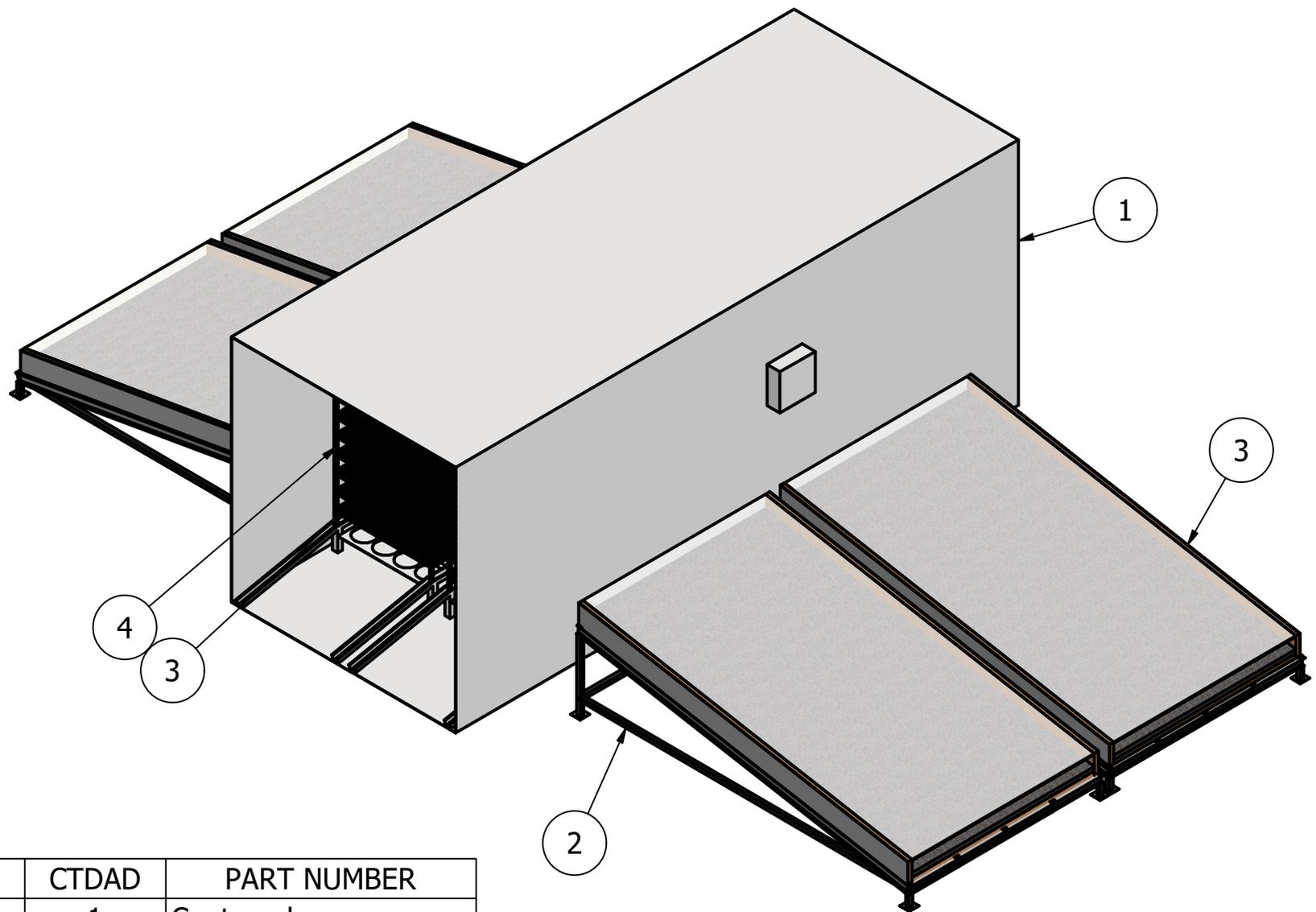
ELEMENTO	CTDAD	PART NUMBER
1	240	Tiras de caño
2	28	Perfil estructural cuadrado 20x20x2 mm
3	36	Ángulo doblado 20x20x2 mm

Designed by Eduardo Correa	Checked by Freddy Jervis	Approved by Freddy Jervis	Date 23/08/2024	Date 18/08/2024	
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL			Carro Transportador		
				Edition	Sheet



ELEMENTO	CTDAD	PART NUMBER
1	2	recubrimiento de aluminio
2	2	cubierta lateral de aislamiento
3	1	cubierta inferior de aluminiu
4	1	cubierta inferior de aislamineto
5	1	vidrio
6	1	lecho de rocas

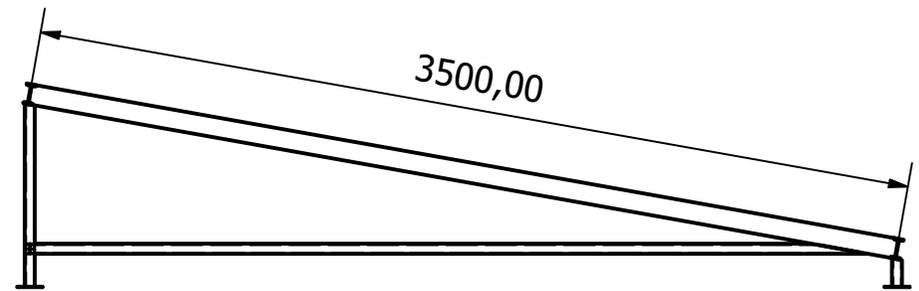
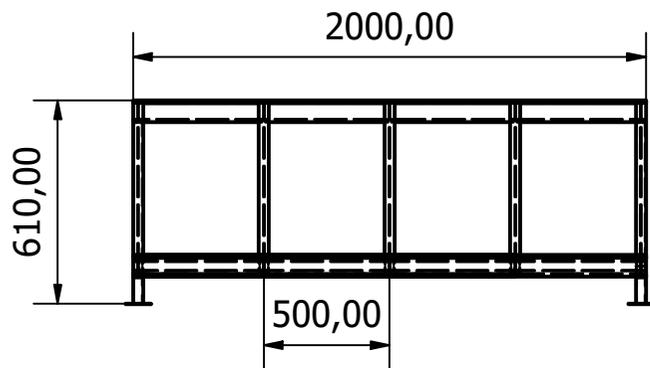
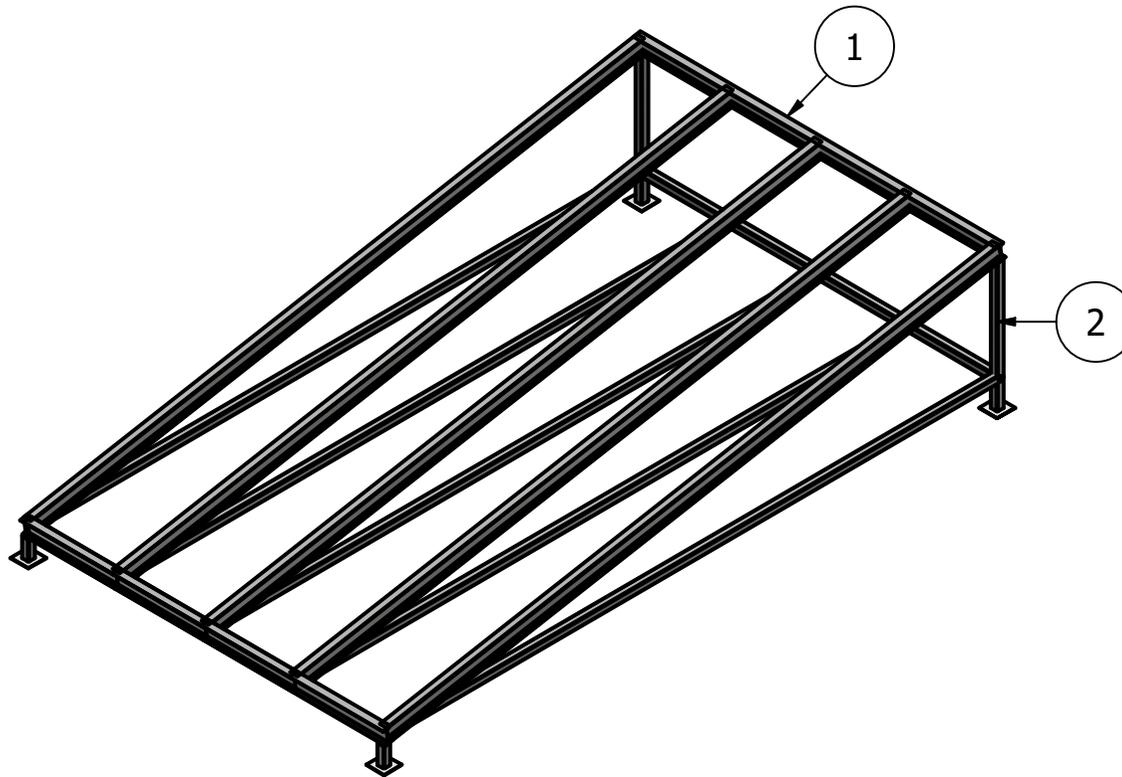
Designed by Eduardo Correa	Checked by Freddy Jervis	Approved by Freddy Jervis	Date 23/08/2024	Date 18/08/2024
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL		Colector Solar		
			Edition	Sheet



ELEMENTO	CTDAD	PART NUMBER
1	1	Contenedor
2	4	Soporte de colector solar
3	4	Colector solar
3	240	Tiras de caña
4	4	Carro Transportador

Designed by Eduardo Correa	Checked by Freddy Jervis	Approved by Freddy Jervis	Date 23/08/2024	Date 18/08/2024
-------------------------------	-----------------------------	------------------------------	--------------------	--------------------

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL	SECADOR SOLAR PARA CAÑA GUADUA		
		<table border="1"> <tr> <td>Edition</td> <td>Sheet</td> </tr> </table>	Edition
Edition	Sheet		



			Designed by Eduardo Correa	Checked by Freddy Jervis	Approved by Freddy Jervis	Date 23/08/2024	Date 18/08/2024	
ELEMENTO	CTDAD	PART NUMBER	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL			SOPORTE DEL COLECTOR SOLAR		
1	7	Perfil IPN 80						
2	12	Perfil estructural cuadrado 40x40x3			Edition		Sheet	