

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

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

Diseño de un secador con capacidad de 60 kg para el procesamiento de residuos agrícolas del banano.

INGE-2762

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Cobos Intriago Manuel Alonso  
Morales Chagerben Mario Fernando

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto lo dedicamos a nuestras familias, por su apoyo constante, su confianza en nuestro potencial y la paciencia que nos brindaron durante las largas horas de trabajo.

Este logro es también el resultado de su aliento incondicional en cada etapa del proceso.

Gracias por estar siempre presentes.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos profundamente a nuestros padres por su amor incansable, apoyo y enseñanzas, que fueron la base para alcanzar este logro.

A nuestros profesores, por guiarnos con sabiduría y paciencia, compartiendo conocimientos que enriquecieron esta investigación y nuestra formación.

Reconocemos a las instituciones y colegas que aportaron recursos y reflexiones clave para este trabajo.

Y, finalmente, a quienes nos acompañaron con amistad y comprensión en cada etapa. Este éxito es también suyo.

## DECLARACIÓN EXPRESA

Nosotros, Manuel Alonso Cobos Intriago y Mario Fernando Morales Chagerben 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, 11 de octubre del 2024.



Manuel Alonso Cobos  
Intriago



Mario Fernando Morales  
Chagerben

## **EVALUADORES**

---

**Miguel Quilambaqui Jara, PhD**

Profesor de Materia

---

**Ing. José Gabriel Martínez Barre**

Tutor de proyecto

---

**Ing. Galo Andrés Durazno**

**Palacios**

Tutor de proyecto

## **RESUMEN**

El proyecto presenta el diseño de un secador híbrido con capacidad para 60 kg, destinado al procesamiento de raquis de banano, que es un residuo agrícola común en Ecuador. El objetivo principal es de optimizar el secado de estos residuos mediante la integración de tecnologías eficientes y sostenibles. El sistema combina energía solar fotovoltaica, resistencias eléctricas y ventilación forzada para garantizar un secado uniforme y eficiente. Se justifica por su contribución a la valorización de subproductos agrícolas, promoviendo la economía circular y reduciendo el impacto ambiental.

El desarrollo incluyó el análisis de materiales como acero inoxidable y tubos galvanizados, el dimensionamiento de componentes clave, y simulaciones térmicas y aerodinámicas en ANSYS Fluent. Los resultados mostraron una distribución uniforme del flujo de aire y temperaturas adecuadas para un secado óptimo. Además, se determinó que el diseño es económica y técnicamente factible, con un costo total ajustado al presupuesto.

Se concluye que el secador híbrido diseñado es una solución viable y sostenible para el aprovechamiento de residuos agrícolas, alineado con prácticas agrícolas modernas y sostenibles. Se recomienda explorar futuras mejoras en automatización y optimización energética.

**Palabras clave:** Secador híbrido, residuos agrícolas, energía fotovoltaica, ventilación forzada, economía circular.

## **ABSTRACT**

The project presents the design of a hybrid dryer with a capacity of 60 kg, intended for the processing of banana rachis, a common agricultural waste in Ecuador. The main objective is to optimize the drying of this waste through the integration of efficient and sustainable technologies. The system combines photovoltaic solar energy, electric resistances and forced ventilation to guarantee uniform and efficient drying. It is justified by its contribution to the valorization of agricultural by-products, promoting the circular economy and reducing the environmental impact.

Development included analysis of materials such as stainless steel and galvanized tubing, sizing of key components, and thermal and aerodynamic simulations in ANSYS Fluent. The results showed a uniform distribution of air flow and adequate temperatures for optimal drying. Furthermore, the design is considered to be economical and technically feasible, with a total cost within budget.

It is concluded that the designed hybrid dryer is a viable and sustainable solution for the use of agricultural waste, aligned with modern and sustainable agricultural practices. It is recommended to explore future improvements in automation and energy optimization.

**Keywords:** Hybrid dryer, agricultural waste, photovoltaic energy, forced ventilation, circular economy.

## ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria .....	2
Agradecimientos.....	3
Declaración Expresa.....	4
Evaladores .....	5
Resumen .....	I
Abstract .....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
Abreviaturas .....	VI
Simbología .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	IX
ÍNDICE DE PLANOS .....	X
Capítulo 1 .....	1
1.1 Introducción .....	1
1.2 Descripción del Problema .....	1
1.3 Justificación del Problema .....	2
1.4 Objetivos .....	3
1.4.1 Objetivo general .....	3
1.4.2 Objetivos específicos.....	3
1.5 Marco teórico .....	3
1.5.1 Introducción al cultivo de banano y su importancia en el Ecuador.....	3
1.5.2 Generación de residuos agrícolas en el cultivo de banano .....	5
1.5.3 Tecnologías de secado para residuos agrícolas .....	5
Capítulo 2 .....	16
2 Metodología .....	16
2.1 Formulación de alternativas de solución.....	19

2.1.1 Secador Híbrido con Ventilación Forzada y sistema fotovoltaico .....	19
2.1.2 Secador por bomba de calor inversora con alimentación fotovoltaica.....	20
2.2 Selección de Materiales y Condiciones Operativas .....	21
2.2.1 Materiales estructurales .....	21
2.2.2 Sistema de calefacción y ventilación.....	22
2.2.3 Aislamiento térmico .....	22
2.2.4 Condiciones climáticas y operativas .....	22
2.2.5 Evaluación de sostenibilidad .....	23
2.3 Parámetros de Diseño y Cálculos .....	23
2.3.1 Fórmulas relacionadas al proceso de diseño. ....	23
2.3.2 Dimensionamiento Preliminar.....	27
2.3.3 Balance de Masa y Energía .....	30
2.4 Simulaciones del Modelo Propuesto.....	33
2.4.1 Herramientas y Parámetros de Simulación.....	33
2.4.2 Modelo Preliminar.....	37
2.5 Matriz de Decisión.....	38
2.5.1 Criterios de Comparación.....	38
2.5.2 Selección de la Mejor Alternativa .....	41
2.6 Perspectivas del Modelo Final .....	42
Capítulo 3 .....	45
<b>3 RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>	<b>45</b>
3.1 Transferencia de calor en un colector solar fotovoltaico .....	45
3.2 Distribución de temperatura y velocidad del flujo de aire: .....	47
3.3 Funcionamiento completo de la alternativa .....	50
3.3.1 Funcionamiento de bandejas de reposo .....	50
3.3.2 Captación de Energía Solar: Paneles Solares Fotovoltaicos .....	52
3.3.1 Funcionamiento de los Ventiladores .....	53

3.4 Análisis de factibilidad económica .....	56
Capítulo 4 .....	58
4.1 Conclusiones y recomendaciones.....	58
4.1.1 Conclusiones .....	58
4.1.2 Recomendaciones .....	59
5. Bibliografía.....	61
APENDICE .....	63

## **ABREVIATURAS**

**CFD** Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics).

**COP** Coeficiente de Desempeño (Coefficient of Performance).

**kWh** Kilovatio-Hora.

**m<sup>2</sup>** Metro Cuadrado.

**m<sup>3</sup>** Metro Cúbico.

**RH** Humedad Relativa (Relative Humidity).

**W/h** Vatios por Hora.

## SIMBOLOGÍA

A	Área de captación solar ( $m^2$ ).
Cp	Calor específico del aire ( $kJ/kg^{\circ}C$ ).
h	Fracción de humedad inicial del residuo (adimensional).
I	Irradiancia solar promedio ( $W/m^2$ ).
M	Masa de agua removida (kg).
m	Flujo de masa del aire (kg/s).
MT	Masa de agua removida total (kg).
Q	Energía necesaria para el secado (kJ).
$\rho_{hu}$	Densidad de residuos húmedos ( $kg/m^3$ ).
$\rho_{se}$	Densidad de residuos secos ( $kg/m^3$ ).
$\rho_{re}$	Densidad de residuos con humedad final ( $kg/m^3$ ).
V	Volumen interno del secador ( $m^3$ ).
v	Volumen ocupado por los residuos ( $m^3$ ).

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Deshidratador solar</i> .....	6
Figura 2. <i>Equipo de secador de aire caliente modelo AISI-316</i> .....	8
Figura 3. <i>Equipo utilizado en secado por convección modelo CE130</i> .....	9
Figura 4. <i>Equipo utilizado en el secado por microondas modelo GUOYU - GY2</i> .....	10
Figura 5. <i>Equipo utilizado en la liofilización modelo B0C6MNRR72</i> .....	11
Figura 6. <i>Proceso de secado por convección de aire caliente</i> .....	13
Figura 7. <i>Proceso de secado de tambor rotatorio</i> .....	14
Figura 8. <i>Diagrama de flujo del proceso general</i> .....	18
Figura 9. <i>Diseño del secador solar híbrido</i> .....	20
Figura 10. <i>Diseño por partes de un secador de bomba de calor</i> .....	21
Figura 11. <i>Diseño frontal</i> .....	42
Figura 12. <i>Diseño lateral</i> .....	43
Figura 13. <i>Vista espacial o isométrica</i> .....	44
Figura 14. <i>Distribución Térmica del Colector Solar</i> .....	46
Figura 15. <i>Distibución del aire en la bandeja</i> .....	48
Figura 16. <i>Dirección del flujo de aire</i> .....	49
Figura 17. <i>Funcionamiento bandejas de reposo</i> .....	51
Figura 18. <i>Captación de luz solar por los paneles</i> .....	53
Figura 19. <i>Funcionamiento del ventilador</i> .....	55

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Características más importantes del banano en Ecuador</i> .....	4
Tabla 2. <i>Matriz de decisión final</i> .....	41
Tabla 3. <i>Resumen de costo de materiales</i> .....	56

## ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1. <i>Panel fotovoltaico</i> .....	68
Plano 2. <i>Estructura secado</i> .....	69
Plano 3. <i>Ensamblado de secador hibrido</i> .....	70

# CAPÍTULO 1

## **1.1 *Introducción***

El cultivo del banano forma parte de la actividad agrícola más importante que existe en el Ecuador debido a los altos niveles de exportación a diversos países de la Unión Europea, USA, Rusia y el Cono Sur, siendo estos los más importantes (INIAP, 2024). A partir de estas cosechas se generan grandes cantidades de biomasa agrícola la cual se trata de aquella fuente de energía proveniente de residuos de materia orgánica, siendo para el presente caso del banano (Instituto Nacional de Preinversión, 2020). Entre estos residuos se encuentra el raquis, el cual contiene nutrientes que pueden llegar a ser utilizados como un tipo de fuente alternativa de alimentación para la ganadería, ayudando a contribuir de mejor manera al aprovechamiento sostenible de estos subproductos.

En base a lo indicado, surge la necesidad de diseñar diversos sistemas eficientes para el procesamiento de estos residuos, siendo así el secado como una de las etapas más importantes para poder garantizar la conservación y calidad nutricional.

A pesar de los beneficios potenciales, los métodos tradicionales de secado suelen ser ineficientes, costosos o dependientes de condiciones climáticas, lo que limita su adopción en comunidades agrícolas con recursos limitados o como el presente caso para el uso en una finca. Por ello, este trabajo se enfoca en el diseño de una máquina de secado adaptada específicamente a las características de los residuos agrícolas del banano. Este sistema busca optimizar el tiempo de secado, minimizar el consumo energético y mantener bajos costos de implementación, con el objetivo final de integrar la biomasa del banano en cadenas de valor sostenibles para la ganadería.

## **1.2 *Descripción del Problema***

El Ecuador es uno de los mayores productores de banano en el mundo habiendo exportado aproximadamente entre 6 a 7 millones de toneladas al año, generando así grandes volúmenes de residuos vegetales como raquis, fruta estropeada, pseudotallos, que usualmente no son

aprovechados. (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2023). Estos residuos vegetales podrían ser transformados en productos de valor agregado mediante procesos de secado, lo que permitiría obtener ingredientes para la industria alimenticia, agrícola o de energía (Manisha, 2023). Sin embargo, entre las principales dificultades está la falta de tecnologías adecuadas para secar estos residuos de manera eficiente, preservando sus propiedades y reduciendo costos. Esta necesidad de contar con una solución tecnológica eficiente para el secado de residuos de banano se ve incrementada por el interés en la sostenibilidad y la economía circular, proporcionando nuevas oportunidades para pequeños y medianos productores de la región.

### ***1.3 Justificación del Problema***

En la actualidad, los residuos como raquis generados por la producción de banano representan un desafío ambiental y económico para los productores, quienes carecen de alternativas eficientes para su manejo. Al no ser aprovechados, estos residuos contribuyen al aumento de desechos orgánicos que, de no gestionarse adecuadamente, pueden generar problemas ambientales como la emisión de gases de efecto invernadero y la contaminación del suelo y el agua (Lescot, 2021). El presente proyecto busca implementar una solución tecnológica asequible y sostenible para el secado de residuos de banano para los productores bananeros, transformándolos en productos útiles para la ganadería. Además, la adopción de esta tecnología puede mejorar la rentabilidad de los pequeños y medianos productores bananeros, quienes podrán aprovechar al máximo los subproductos derivados del banano, generando nuevas fuentes de ingreso y reduciendo el impacto ambiental. Este proyecto responde a la creciente necesidad de prácticas agrícolas más sostenibles y eficientes, en línea con los objetivos globales de economía circular y desarrollo sostenible.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Diseñar un secador de 60 kg para raquis de banano.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

1. Realizar el diseño y simulación del sistema de secado seleccionado en relación con el consumo de energía, temperatura y humedad.
2. Desarrollar el análisis de factibilidad económica de la instalación y construcción del diseño.
3. Crear un manual de operación destinado para el correcto uso de la máquina.

## **1.5 Marco teórico**

### **1.5.1 Introducción al cultivo de banano y su importancia en el Ecuador**

La producción del cultivo de banano es de vital importancia para el Ecuador, tanto económica como socialmente, al generar miles de empleos y ser una de las principales fuentes de divisas. En el año 2023, el Ecuador exportó aproximadamente 316 millones de cajas de banano, posicionándose como uno de los mayores exportadores de este producto a nivel mundial. Esta cifra representa un crecimiento del 6% con respecto al año anterior, marcando una recuperación para el sector luego de la disminución en las exportaciones causada por la pandemia y otros desafíos, como el cambio climático y problemas logísticos.

Las importaciones mundiales de banano para el año 2023 fueron de USD 15,991 millones, aproximadamente, siendo un 11% mayor que en 2022. Entre los principales países importadores se encuentran Estados Unidos con un 17%, Alemania con un 7% y China con un 7%. El Ecuador es considerado como el primer exportador de banano a nivel mundial con una participación del 26% según el mercado mundial del año 2023. Con respecto al peso neto de las exportaciones, la misma fue de alrededor de 6,586,032 toneladas, entre los cuales se

reparte Rusia en 21% siendo 1,383,066.72 toneladas y Estados Unidos en 11% siendo 724,463.52 toneladas. (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2023)

A continuación, se muestra en la Tabla 1 información más importante y detallada del banano en Ecuador.

**Tabla 1.**

*Características más importantes del banano en Ecuador*

<b>Producción</b>	<b>7.012.244 t/año de fruta fresca</b>
<b>Superficie sembrada total</b>	<b>221.775 ha</b>
<b>Tipo de Cultivo</b>	<b>Permanente</b>
<b>Provincias productoras importantes (Producen más del 70% de la producción total del país)</b>	<b>Los Ríos El Oro</b>
<b>Otras Provincias</b>	<b>Guayas</b>
<b>Período de Cosecha</b>	<b>Anual</b>
<b>Producto</b>	<b>Banana</b>
<b>Variedades</b>	<b><i>Musa Cavendish; Cavendish Enana; Gros Michel; Lacatán (Musa acuminata)</i></b>
<b>Residuo de campo</b>	<b>Hoja Pseudotallo</b>
<b>Residuo de procesamiento</b>	<b>Raquis Rechazo de producto</b>
<b>Utilización</b>	<b>Industria Alimenticia</b>
<b>Destino</b>	<b>Consumo interno Exportación</b>
<b>Tecnologías de aplicación</b>	<b>Combustión Gasificación Ciclos ORC (Ciclo Orgánico Rankine)</b>
<b>PCI - Residuos de campo</b>	<b>12,625 (MJ/kg)</b>
<b>PCI - Residuos de beneficio</b>	<b>4,180 (MJ/kg)</b>
<b>Producción de Energía Eléctrica</b>	<b>698,20 kWh/t (base seca)</b>

**Nota:** Datos obtenidos de (Instituto Nacional de Preinversión, 2020))

### ***1.5.2 Generación de residuos agrícolas en el cultivo de banano***

El cultivo de banano es intensivo en generación de residuos debido a la estructura de la planta y su ciclo productivo. El banano produce una gran cantidad de biomasa vegetal que, en su mayoría, no es aprovechada, generando volúmenes considerables de residuos agrícolas. Los principales componentes de estos residuos son los pseudotallos, hojas y raquis, que en su conjunto representan entre el 60% y el 80% del total de la planta, dado que solo el fruto es utilizado comercialmente (González, 2019).

Sin embargo, estos residuos también representan una oportunidad en términos de bioeconomía y economía circular. Estudios recientes han explorado la conversión de los desechos del banano en productos como biochar, abono orgánico y materiales para bioenergía (Castillo, 2021). La adecuada gestión de los residuos del banano, mediante tecnologías de secado y conversión en subproductos, no solo mejora la sostenibilidad de la producción, sino que también abre nuevas oportunidades económicas para los agricultores.

### ***1.5.3 Tecnologías de secado para residuos agrícolas***

#### **1. Secado natural**

El secado natural se fundamenta el uso de la energía solar para eliminar la humedad de los residuos agrícolas. La norma IEEE 1547.9-2022 se encuentra relacionada con el contexto de este tipo de máquina, ya que se basa en la integración de fuente de energía renovable como es el caso de los paneles solares en distintos tipos de sistemas que por lo general suelen ser eléctricos (Figura 1). Por lo tanto, ayuda a brindar guías para maximizar la eficiencia energética y asegurar la compatibilidad entre generadores solares y la red eléctrica (IEEE Standards Association, 2022). En esta tecnología se destaca el uso de secadores directos e indirectos. Los secadores directos exponen los residuos directamente al sol, mientras que

los indirectos utilizan colectores solares para calentar el aire, evitando la exposición directa al entorno y mejorando la eficiencia del proceso (Cengel, 2020).

**Ventajas:**

- Bajo costo y fácil implementación, adecuado para áreas rurales.
- Compatible con iniciativas de desarrollo sustentable.

**Desventajas:**

- Depende de la cantidad de horas e intensidad de la luz del sol, lo que limita su uso en climas lluviosos o nublados.
- Mala calidad del proceso de secado en los productos obtenidos por la presencia de organismos contaminantes.

**Figura 1.**

*Deshidratador solar*



**Fuente:** Tienda “IDE SOLAR”

**2. Secado con aire caliente**

El secado con aire caliente es una tecnología más controlada que utiliza una fuente de calor para generar aire caliente que se hace circular sobre los residuos, lo que acelera el proceso de evaporación de la humedad (Figura 2).

**Funcionamiento:** El aire caliente se transfiere de forma controlada al material a través de conductos o cámaras de secado, donde se monitorea la temperatura para evitar la degradación de los residuos. Es común en procesos industriales de gran escala que necesitan rapidez y eficiencia, especialmente cuando se busca reducir el contenido de humedad en productos como biomasa o fibras agrícolas (Romero-Sáez, 2022).

**Ventajas:**

- Procesos más rápidos y uniformes en comparación con el secado solar.
- Mayor control sobre las condiciones de secado (temperatura, humedad relativa, velocidad del aire).

**Desventajas:**

- Mayor consumo de energía y costos de operación.
- Necesita maquinaria específica y personal

**Figura 2.**

*Equipo de secador de aire caliente modelo AISI-316*



**Fuente.** Hermasa Canning Technology, empresa encargada de la venta y diseño de estas máquinas

### **3. Secado forzado o convectivo**

Este tipo de secado involucra la utilización de ventiladores para forzar la circulación del aire caliente sobre el material agrícola, mejorando la eficiencia. La norma IEEE 1547.9-2022 es relevante para este tipo de sistema si se llega a hacer uso de energía solar como es el caso de paneles solares para poder alimentar los ventiladores eléctricos que generan el flujo de aire forzado dentro del secador (Figura 3). El estándar de manera general ayuda a diseñar sistemas eficientes que aprovechen al máximo energía solar y garanticen la estabilidad operativa (IEEE Standards Association, 2022).

**Funcionamiento:** El uso de ventiladores incrementa la velocidad del aire, lo que acelera la transferencia de humedad del material al aire circundante. Este método es especialmente útil en climas húmedos donde el secado natural o solar sería ineficaz. Es muy utilizado para productos como granos y fibras vegetales que requieren un secado rápido (Blanco, 2019).

### **Ventajas:**

- Acelera el proceso de secado y permite un mayor control.
- Aumenta la uniformidad del secado en comparación con métodos pasivos.

### **Desventajas:**

- Requiere mayor energía eléctrica, aumentando los costos.
- Equipamiento adicional (ventiladores, controles) eleva los costos iniciales

### **Figura 3.**

*Equipo utilizado en secado por convección modelo CE130*



**Fuente.** Gunt Hamburg, empresa especializada en diseño y venta de las máquinas de secado agrícola

## **4. Otras tecnologías emergentes**

Además de los métodos convencionales, existen tecnologías emergentes como el secado por microondas y la liofilización, ambos respaldados por la norma IEEE 1100-2005 la cual aborda las prácticas recomendadas para el suministro y la puesta a tierra de equipos electrónicos en aplicaciones industriales y comerciales. Sin embargo, a pesar de que no se centre directamente con estos secadores, sirve como una base para el diseño de este tipo de sistemas (IEEE Standards Association, 2005). Estas tecnologías avanzadas permiten secar los

productos a nivel molecular y con un control mucho más preciso de la humedad (Romero-Sáez, 2022).

- **Secado por microondas:** Utiliza radiación para calentar y secar rápidamente los productos desde el interior hacia el exterior, acelerando el proceso (Figura 4).

**Figura 4.**

*Equipo utilizado en el secado por microondas modelo GUOYU - GY2*



**Fuente.** (Connecting Buyers Store, 2024)

- **Liofilización:** Elimina la humedad mediante sublimación, congelando primero el material y luego extrayendo el vapor directamente del hielo. Se utiliza en productos de alto valor añadido (Figura 5).

#### **Ventajas:**

- Mayor velocidad de secado y conservación de la calidad del producto.
- Alta precisión en el control de la humedad residual.

### **Desventajas:**

- Alto costo de implementación y operación.
- Requiere personal especializado para operar los equipos

**Figura 5.**

*Equipo utilizado en la liofilización modelo B0C6MNRR72*



**Fuente:** Kalstein, empresa encargada del diseño y venta de este tipo de máquinas.

Estas tecnologías ofrecen soluciones eficientes para la gestión de residuos agrícolas, transformando subproductos en recursos útiles, como alimentos para animales o insumos para biocombustibles, cumpliendo con normativas de eficiencia energética y sostenibilidad.

#### ***1.5.4 Eficiencias energéticas de los equipos***

La eficiencia energética de los equipos de secado es un aspecto crucial, especialmente en el contexto agrícola, donde el proceso de secado suele ser intensivo en consumo energético. Los secadores convencionales, que emplean combustibles fósiles o electricidad, presentan un

alto consumo energético y costos de operación elevados, lo cual los hace menos viables para su implementación en fincas pequeñas o medianas (Castro, 2020). Los desarrollos tecnológicos recientes han enfocado esfuerzos en reducir el consumo energético de los secadores mediante sistemas más eficientes, que incluyen la recuperación de calor, la variación de flujo de aire y el control automático de temperatura.

Por ejemplo, los secadores con intercambiadores de calor o los secadores solares pueden reducir el uso de energía hasta en un 50% en comparación con los modelos tradicionales. Estos sistemas permiten reutilizar el calor generado en el proceso, logrando así una mayor eficiencia y una reducción significativa en las emisiones de gases contaminantes. Además, el uso de energías renovables, como la solar, ofrece un enfoque más sostenible y menos dependiente de combustibles fósiles, lo cual es particularmente útil en regiones agrícolas donde el acceso a energía es limitado (Ramírez, 2018).

Implementar estas tecnologías no solo permite optimizar el uso de energía, sino que también ayuda a reducir los costos operativos de las fincas, lo que resulta en un beneficio económico directo para los productores. Las eficiencias logradas en estos sistemas hacen que los secadores modernos puedan ser una opción atractiva en términos de ahorro de costos y menor impacto ambiental.

#### ***1.5.5 Secadores aplicados al procesamiento de residuos de banano***

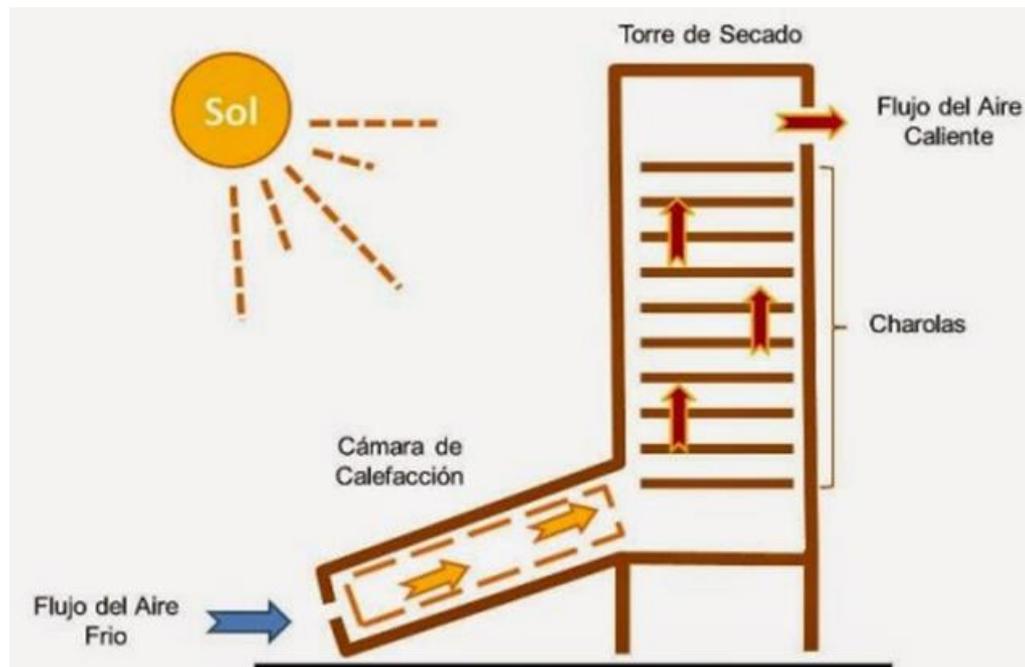
Para el secado de residuos del banano de exportación, existen cuatro tecnologías clave: secado por convección de aire caliente, secado solar, secado mediante microondas, y secado en tambor rotatorio. Cada uno tiene características específicas que afectan la eficiencia, la calidad del producto final y la adecuación al tipo de residuo.

1. **Secado por Convección de Aire Caliente:** Este método se aplica frecuentemente en la deshidratación de frutas como el banano, usando aire caliente que circula a través de bandejas de producto. Estudios muestran que, al emplear temperaturas

adecuadas, el secado por convección conserva nutrientes y proporciona una textura aceptable en productos como harina de cáscara de banano. Este proceso es económico y sencillo de implementar, aunque puede requerir altos consumos de energía dependiendo del volumen del residuo a secar (Sagastibelza, 2018)

**Figura 6.**

*Proceso de secado por convección de aire caliente*



**Nota:** Obtenido de Conservas Caseras, página relacionada con el proceso de secado.

2. **Secado Solar:** Este método puede ser directo (luz solar incide directamente sobre el producto) o indirecto (calor solar calentando el aire que luego seca el producto). El secado solar es una opción ecológica y económica, aunque se ve afectado por condiciones meteorológicas y requiere periodos largos de secado. Para superar estas limitaciones, los secadores híbridos combinan energía solar y otras fuentes (biomasa o electricidad) para permitir un secado continuo, incluso en climas variables (Camayo, 2020).

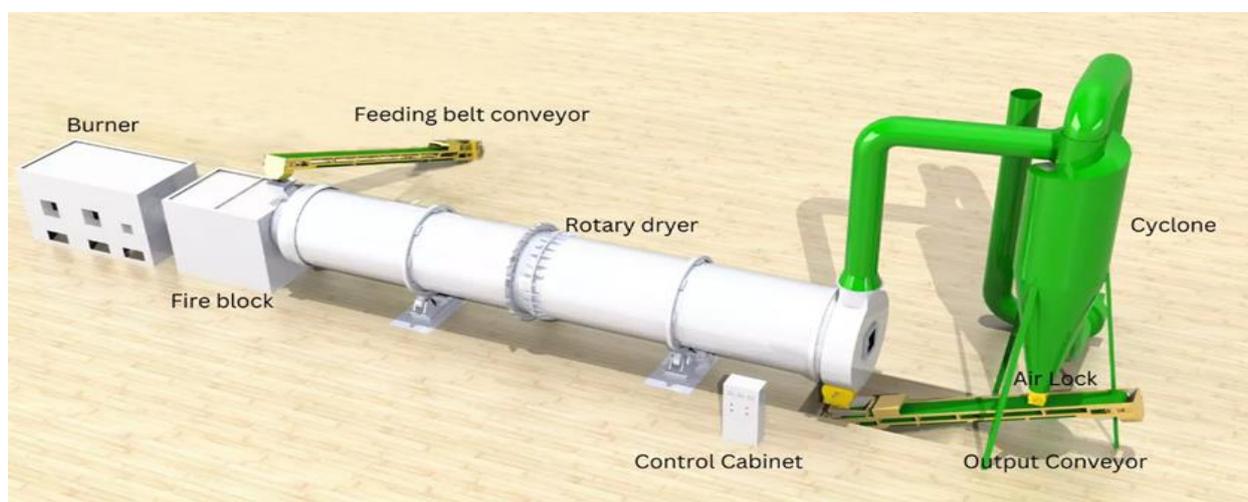
3. **Secado mediante Microondas:** Utiliza energía de microondas para calentar y secar rápidamente, eliminando la humedad interna y reduciendo el tiempo de secado significativamente. Este método conserva propiedades nutricionales y proporciona alta

eficiencia de secado, aunque puede tener altos costos iniciales en comparación con otros métodos. Su uso en subproductos del banano, como cáscaras, permite obtener productos con buena calidad en menor tiempo (Sagastibelza, 2018).

4. **Secado en Tambor Rotatorio:** Esta tecnología es especialmente útil para residuos de banano en grandes cantidades, usando un tambor que rota y calienta el producto mientras se mueve internamente (Figura 7). El diseño del tambor y el control del flujo de aire permiten un secado uniforme y rápido, optimizando el uso de energía y reduciendo el tiempo necesario para lograr la humedad deseada. En particular, estudios han demostrado que esta tecnología es eficaz para residuos del banano como la biomasa, favoreciendo su conversión en biocombustibles y otros productos de valor agregado (Torres, 2009).

**Figura 7.**

*Proceso de secado de tambor rotatorio*



**Nota:** Obtenido de TCPEL, en la cual se menciona un estudio realizado en base al secado de bambú con secador giratorio.

En conjunto, estas tecnologías ofrecen alternativas variadas para el procesamiento y valorización de residuos de banano, con aplicaciones desde la generación de productos alimenticios hasta el aprovechamiento de residuos para biocombustibles, contribuyendo a una gestión más sostenible de estos desechos.

### **1.5.6 Impacto ambiental y económico de los secadores**

El impacto ambiental y económico de los secadores es un aspecto crítico en su evaluación y adopción. En el ámbito agrícola, los secadores tradicionales suelen depender de fuentes de energía no renovables, como combustibles fósiles, lo que genera emisiones significativas de gases de efecto invernadero. Por otro lado, los modelos que utilizan energías renovables, como la solar o la biomasa, presentan un impacto ambiental considerablemente menor, lo que los hace más atractivos en contextos de producción sostenible (Santos, 2021).

Desde una perspectiva económica, el uso de secadores eficientes puede suponer una inversión inicial elevada, pero a largo plazo genera beneficios significativos. El ahorro en costos de energía, junto con el aumento en la rapidez del proceso de secado, mejora la rentabilidad del secado de residuos agrícolas. Además, el procesamiento rápido de los desechos permite su transformación en subproductos valiosos, como fertilizantes o bioenergía, que pueden representar una fuente adicional de ingresos para las fincas agrícolas (López, 2019). La capacidad de convertir los residuos en recursos productivos es un factor clave que justifica la inversión en tecnologías de secado, al tiempo que se contribuye a una reducción de la huella ambiental del cultivo.

Asimismo, varios estudios han demostrado que el uso de secadores eficientes en la agricultura puede mejorar la sostenibilidad de las prácticas de cultivo, promoviendo el uso de energías limpias y reduciendo los residuos en vertederos.

## **CAPÍTULO 2**

### **2 METODOLOGÍA**

El presente capítulo expone el proceso metodológico desarrollado para la selección y diseño teórico de un secador orientado al tratamiento de residuos agrícolas del cultivo de banano. Este proceso estuvo enfocado en lograr un equilibrio entre la optimización del tiempo de secado, la eficiencia energética y la reducción del impacto ambiental, teniendo en cuenta las condiciones específicas de las zonas rurales donde se implementará. La metodología establecida incluyó una combinación de análisis teóricos, simulaciones y evaluación de alternativas, orientadas a garantizar la viabilidad técnica, económica y ambiental del diseño propuesto.

Para alcanzar los objetivos planteados, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de las condiciones iniciales, como el tipo y cantidad de residuos a procesar, las características climáticas de la región y las restricciones presupuestarias. Este análisis permitió identificar las necesidades específicas de los usuarios y las limitaciones técnicas del entorno, estableciendo como punto de partida la capacidad del secador, fijada en 60 kg por lote. Adicionalmente, se consideró como prioridad el uso eficiente de energía, empleando una combinación de fuentes renovables y convencionales, y reduciendo el consumo energético a través de estrategias de diseño que aprovechen al máximo los recursos disponibles.

El diseño teórico del secador se desarrolló en torno a dos alternativas principales, formuladas con base en estudios previos y experiencias similares en el sector agrícola. La primera alternativa consistió en un secador híbrido con resistencias de aletas y ventilación forzada, diseñado para combinar la energía solar con resistencias eléctricas, logrando así un flujo de aire controlado y uniforme. Este diseño se caracterizó por su adaptabilidad a condiciones climáticas variables, lo que lo hace especialmente adecuado para regiones donde la radiación solar puede ser limitada. La segunda alternativa fue un secador con bomba de calor inversora alimentada por paneles fotovoltaicos, una tecnología que emplea ciclos de compresión de refrigerante para captar

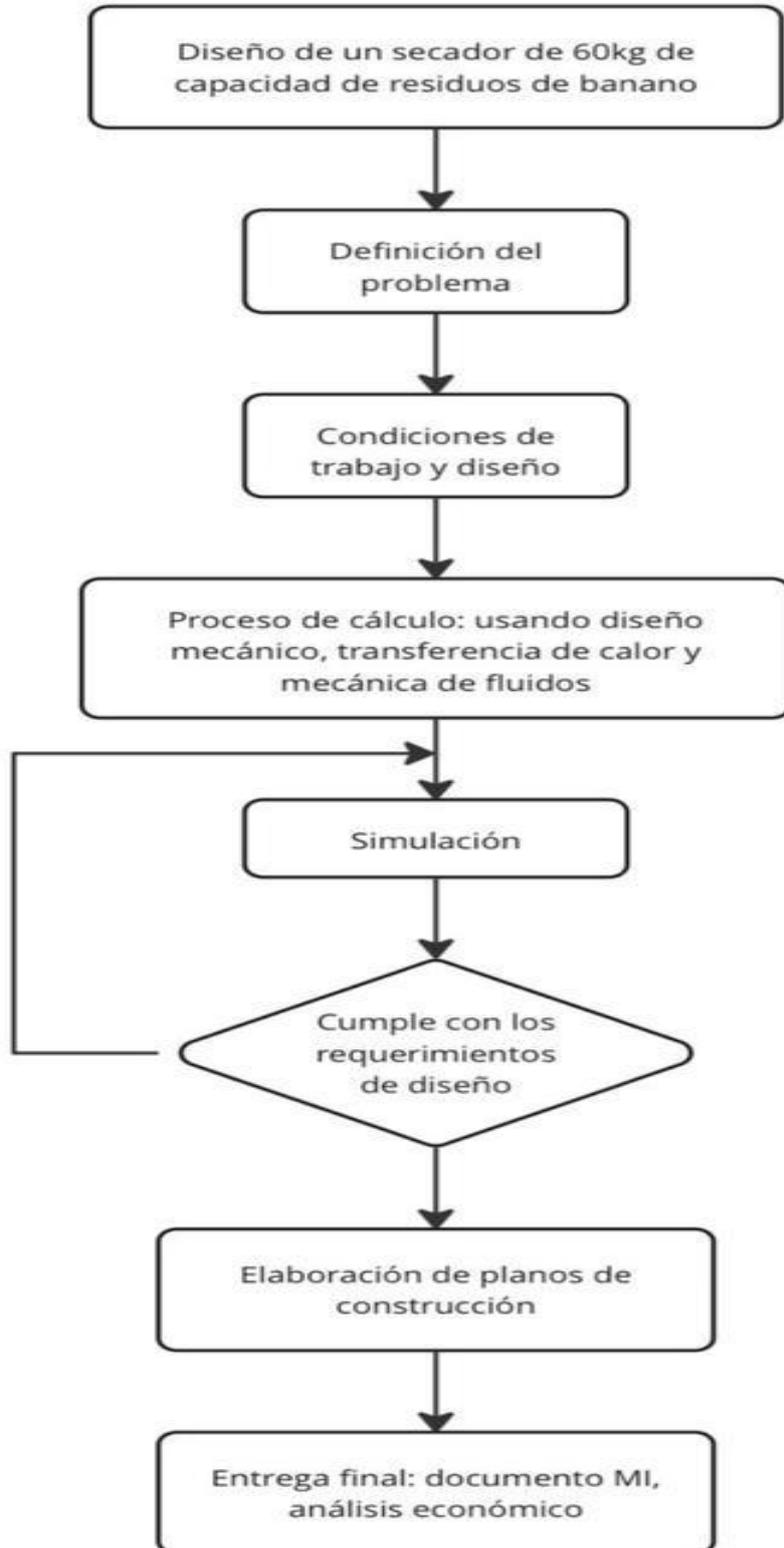
y transferir calor al aire, mejorando significativamente la eficiencia energética en climas moderados. Ambas alternativas fueron evaluadas bajo criterios técnicos y económicos, considerando factores como el consumo de energía, la rapidez del secado, los costos iniciales de implementación y las necesidades de mantenimiento.

Una vez definidas las alternativas, se diseñó un diagrama de flujo que detalla las etapas clave del proceso metodológico, desde la recolección de datos iniciales hasta la validación del diseño seleccionado. Este diagrama incluyó pasos como el cálculo de las necesidades energéticas, la estimación de los parámetros de operación del secador, y la evaluación del impacto ambiental y económico del proyecto. Para cada etapa, se identificaron herramientas y métodos específicos, como simulaciones computacionales, análisis psicrométricos y pruebas experimentales, que permitieron ajustar el diseño a las condiciones reales de operación.

A continuación, la Figura 8 muestra el diagrama de flujo del proceso general a realizar para la obtención de cada uno de los objetivos planteados.

**Figura 8.**

*Diagrama de flujo del proceso general*



## **2.1 *Formulación de alternativas de solución***

Para el diseño del secador, se plantearon dos alternativas principales, considerando las condiciones de zonas agrícolas y las necesidades de un secado eficiente y sostenible, además de las consideraciones iniciales dadas para el proyecto siendo:

- Capacidad del diseño de 60kg.
- Optimización del tiempo de secado.
- Controlar el consumo energético.
- Tener un control económico general del diseño seleccionado.
- Minimizar el impacto ambiental.

### **2.1.1 *Secador Híbrido con Ventilación Forzada y sistema fotovoltaico***

Este sistema combina energía solar con un sistema de ventilación mecánica controlada, permitiendo un flujo de aire constante y optimizado, lo que mejora la uniformidad del secado y reduce el tiempo total del proceso (Figura 9). Es especialmente útil en condiciones de baja radiación solar, dado que la ventilación forzada asegura la circulación continua del aire caliente (Condor, 2008). De manera general, entre las características más importantes de esta alternativa se encuentra el uso del sistema fotovoltaico ya que ayudará con una de las consideraciones del proyecto siendo el consumo energético ya que la fuente de la cual se obtendría energía sería mediante el sol. Adicionalmente, esto ayudaría a reducir el consumo de resistencias eléctricas a la mitad siendo de 1200 W/h a solamente 600W/h, aproximadamente.

**Figura 9.**

*Diseño del secador solar híbrido*



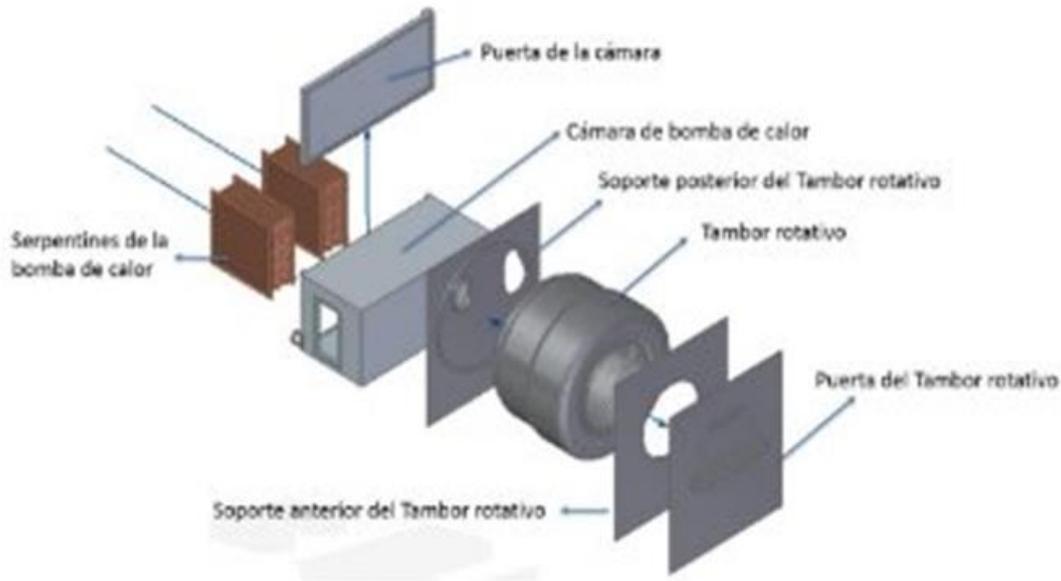
**Nota:** Obtenido de una página relacionada con la venta de estas máquinas Fialho Store

### ***2.1.2 Secador por bomba de calor inversora con alimentación fotovoltaica***

La función principal de este tipo de diseño es que utiliza un ciclo de compresión de refrigerante para poder capturar calor del ambiente y transferirlo al aire que realiza el secado (Figura 10). Por lo general, esta clase de diseños suele tener un alto nivel de coeficiente de desempeño siendo entre 3 a 5. Un factor clave de este tipo de diseño es que funcionan mejor en climas moderados, ya que el lugar se encuentra en la costa no existe peligro alguno con respecto a la eficiencia del equipo. (Ortiz, 2017)

**Figura 10.**

*Diseño por partes de un secador de bomba de calor*



**Nota:** Obtenido de un informe relacionado con el diseño y construcción de un secador con bomba de calor tipo invertir (Ortiz, 2017).

## **2.2 Selección de Materiales y Condiciones Operativas**

La selección de materiales y las consideraciones generales son aspectos fundamentales en el diseño del secador híbrido de residuos agrícolas de banano. Este proceso se desarrolló con el objetivo de garantizar la funcionalidad, sostenibilidad y durabilidad del sistema, además de optimizar su adaptabilidad a las condiciones rurales. La metodología para seleccionar los materiales implicó un análisis comparativo que priorizó criterios como resistencia, eficiencia térmica, costo, disponibilidad en el mercado local y bajo impacto ambiental.

### **2.2.1 Materiales estructurales**

Los materiales seleccionados para la estructura del secador debían ofrecer resistencia mecánica y durabilidad en ambientes expuestos a humedad elevada y temperaturas variables. El acero galvanizado fue elegido como el material principal para la estructura externa debido a su alta resistencia a la corrosión y bajo costo, lo que lo hace adecuado para operar en zonas rurales con condiciones ambientales adversas.

Este material también proporciona estabilidad estructural y facilidad en su mantenimiento. Para componentes internos como bandejas y conductos de aire, se consideró el aluminio, un material más ligero que facilita la manipulación y reduce la carga total del sistema, sin comprometer la resistencia a la deformación bajo calor.

### ***2.2.2 Sistema de calefacción y ventilación***

El sistema de resistencias de aletas y ventilación forzada requería materiales que garantizaran una transferencia de calor eficiente y un flujo de aire uniforme. Las resistencias se fabricaron con acero inoxidable, un material conocido por su excelente conductividad térmica y resistencia a la oxidación. Este material no solo asegura un calentamiento homogéneo del aire, sino que también prolonga la vida útil del sistema de calefacción, especialmente bajo condiciones de operación intensiva.

Los ventiladores seleccionados incorporaron palas de aluminio con carcasas metálicas, ideales para soportar altas temperaturas sin perder eficiencia. Los motores eléctricos utilizados fueron de corriente continua, optimizados para un bajo consumo energético y diseñados para funcionar parcialmente con energía solar, contribuyendo a la sostenibilidad del sistema.

### ***2.2.3 Aislamiento térmico***

La eficiencia energética del secador fue mejorada mediante la incorporación de un aislamiento térmico en las paredes y puertas del sistema. Se evaluaron diferentes materiales, optándose por lana de roca y paneles de poliuretano expandido debido a su capacidad para minimizar las pérdidas de calor y mantener una temperatura constante en el interior del secador. Estos materiales también presentan resistencia al fuego y son de fácil instalación, lo que los convierte en una opción eficiente para este tipo de equipos.

### ***2.2.4 Condiciones climáticas y operativas***

Se analizaron las características ambientales de las zonas rurales de operación, como niveles elevados de humedad, variabilidad en la radiación solar y posibles fluctuaciones en el

suministro eléctrico. Estas condiciones llevaron a incluir un sistema de drenaje integrado para manejar la condensación generada durante el proceso de secado, previniendo acumulaciones que podrían comprometer el funcionamiento o la higiene del equipo.

### **2.2.5 Evaluación de sostenibilidad**

En cada etapa de selección de materiales se priorizó el uso de opciones reciclables y de bajo impacto ambiental. El aluminio y el acero inoxidable, aunque tienen un costo inicial elevado, ofrecen una larga vida útil y son 100 % reciclables, reduciendo la huella ambiental del equipo. Así mismo, la implementación de energías renovables, como paneles fotovoltaicos para la alimentación de los motores, disminuye la dependencia de combustibles fósiles y promueve un enfoque sostenible en el diseño del secador.

## **2.3 Parámetros de Diseño y Cálculos**

### **2.3.1 Fórmulas relacionadas al proceso de diseño.**

Para el diseño del secador, se emplean fórmulas clave que permiten estimar las necesidades energéticas, térmicas y de masa. Estas fórmulas son fundamentales para dimensionar correctamente el sistema y garantizar su eficiencia.

#### **1. Energía solar recibida**

La energía solar disponible para alimentar el sistema fotovoltaico se calcula mediante:

$$Q = A * I * \eta \quad (1)$$

**Donde;**

Q= Energía solar recibida

A= Área de captación solar

I= Irradiancia solar promedio

$\eta$ = Eficiencia de captación

**Explicación:**

- La irradiancia solar promedio para zonas rurales del Ecuador, particularmente en la región de Guayas, varía entre 800 W/m<sup>2</sup> y 1000 W/m<sup>2</sup> según los registros climáticos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2024).
- La eficiencia de captación de los paneles solares fotovoltaicos comerciales se estima en un rango de 15% a 20% dependiendo del tipo de panel (Flores, 2022).

## 2. Balance de masa y energía

$$Q = m * C_p * \Delta T \quad (2)$$

**Donde;**

Q = Energía necesaria para calentar el aire (J)

m= Flujo de masa del aire

C<sub>p</sub>= Calor específico del aire

ΔT= Cambio de temperatura del aire entre entrada y salida

**Explicación:**

- Esta fórmula permite calcular la energía necesaria para alcanzar la temperatura de operación del secador  $T_{salida} = 60^{\circ}\text{C}$ . El flujo de masa del aire ( $m$ ) dependerá de la capacidad del ventilador y del volumen interno del secador.
- El valor de **C<sub>p</sub>** (calor específico del aire) se calcula mediante las de tablas termodinámicas estándar (Cengel, 2020).
- El flujo de masa del aire ( $m$ ) se calcula en función de la capacidad del ventilador y el volumen del secador, previamente dimensionado.
- El cambio de temperatura (ΔT) se establece en base en el objetivo del diseño, alcanzando una temperatura de salida de 60°C.

### 3. Psicrometría

El contenido de humedad en el aire se controla utilizando:

$$RH = \frac{\rho_V}{\rho_{VS}} \times 100 \quad (3)$$

$RH$  = Humedad relativa del aire (%)

$\rho_V$  = Presión parcial de vapor de agua

$\rho_{VS}$  = Presión de saturación

#### Explicación:

- El control de la humedad relativa del aire asegura un proceso de secado eficiente al mantener las condiciones ideales para la evaporación del agua de los residuos.
- Los valores de  $\rho_V$  y  $\rho_{VS}$  se obtienen utilizando tablas psicrométricas estándar para el aire húmedo a distintas temperaturas (Modern Engineering Thermodynamics, 2019).

### 4. Densidad del Raquis de Banano

Para el diseño del secador, es crucial determinar la densidad aparente del material húmedo.

Esta se calcula con la fórmula:

$$\rho_{hu} = \rho_{se} \times (1 + h) \quad (4)$$

#### Donde:

$\rho_{hu}$ : Densidad de los residuos húmedos ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$\rho_{se}$ : Densidad de los residuos secos.

$h$ : Fracción de humedad.

#### Explicación:

- La densidad seca de los residuos agrícolas del banano (raquis y pseudotallo) se obtiene de estudios previos realizados en materiales lignocelulósicos. Según (Orozco, 2020),

la densidad aparente del raquis seco oscila entre 250 y 300 kg/m<sup>3</sup>, dependiendo del grado de trituración.

- La humedad inicial del raquis, medida mediante pruebas experimentales, se estima en un 80% en peso, lo que corresponde a valores comunes en estudios agrícolas realizados en residuos de banano en Ecuador.

Siendo así, estas 4 fórmulas como las más importantes, destacando que para la radiación solar es necesario hallar dicho valor para poder dimensionar el área de captación solar y estimar así la energía disponible lo cual es esencial para este tipo de sistemas. Para el caso del balance de masa y energía, es necesario para poder calcular la energía necesaria y el flujo de aire requerido, de tal manera que así se pueda asegurar que la ventilación forzada remueva la humedad de manera eficiente. Finalmente, la psicrometría para poder medir y ajustar la humedad relativa del aire, siendo este un factor muy importante para controlar el tiempo de secado y la eficiencia del proceso.

De manera general, durante este proceso es muy importante el conocimiento del valor del porcentaje de humedad del banano ya que afecta directamente al tiempo y la energía requerida para el proceso de secado. El banano con el que se trabajará suele tener una humedad inicial alta la cual en ciertas ocasiones supera al 80%, lo que implica que es necesario un proceso de secado eficaz para poder reducir esta humedad a niveles muchos más seguros para el almacenamiento posterior.

Luego de analizar propuestas similares utilizadas para otras aplicaciones, como el secado de madera, se puede visualizar un enfoque adaptado al secado de residuos agrícolas, específicamente pseudotallos y raquis de banano. Estos procesos comparten principios fundamentales en términos de transferencia de calor y masa, lo que permite utilizar fórmulas generales para estimar los parámetros clave del secado, como el tiempo necesario, la cantidad de agua a remover, y la energía requerida.

En este caso, se considera un sistema de secado por convección forzada, donde el material se distribuye en bandejas para maximizar la exposición superficial al flujo de aire caliente. A partir de las condiciones iniciales, como la densidad aparente del material, su contenido de humedad y la radiación solar promedio en la zona rural de Guayas, se calculan los valores requeridos para dimensionar el proceso.

Para ello, se utilizan ecuaciones que abarcan:

- La determinación del volumen ocupado por el material húmedo.
- El cálculo del calor específico del material húmedo en función de su composición.
- La estimación del calor necesario para elevar la temperatura y evaporar la humedad.
- El tiempo neto requerido para completar el secado, considerando la radiación solar y las características del sistema.

Estas fórmulas permiten una evaluación técnica integral, ajustada a las propiedades específicas del material y a las condiciones operativas del secador, asegurando una implementación eficiente del proceso.

### **2.3.2 Dimensionamiento Preliminar**

El dimensionamiento preliminar del secador híbrido considera las condiciones iniciales del sistema, las características del material a procesar (raquis de banano) y los requerimientos del sistema fotovoltaico. A continuación, se justifica detalladamente el origen de los valores utilizados para el cálculo de las dimensiones, volumen y capacidad del secador.

#### **1. Área de Exposición Solar:**

##### **Cálculo de área de exposición solar**

$$A = a_1 * a_2 \quad (5)$$

**Donde:**

- A: área de exposición solar (m<sup>2</sup>)

- $a_1$ : cara del secador (m)
- $a_2$ : largo del secador (m)

**Cálculo:** Utilizando las dimensiones iniciales del secador:

$$A = 1.80 \times 4.5$$

$$A = 8.10 [m^2]$$

**Explicación:**

- **Base en un Contenedor Estándar:**
  - Las dimensiones seleccionadas (1.80 m x 4.5 m) corresponden a las de un contenedor estándar tipo ISO 20 pies, ampliamente utilizado en aplicaciones industriales y agrícolas (ISO 1161, 2020).
  - Esta elección proporciona una estructura robusta y económica, fácil de adquirir y adaptar para la instalación del secador.
- **Suficiente Superficie de Captación Solar:**
  - El área calculada de 8.10 m<sup>2</sup> permite instalar hasta tres paneles solares de 330 W cada uno, asegurando la captación necesaria de energía solar para alimentar el sistema fotovoltaico.

## 2. Volumen interno del secador

El volumen interno determina el espacio útil disponible para la distribución de las bandejas y el flujo uniforme del aire caliente. Se calcula mediante:

$$V = A * a_3 \tag{6}$$

**Donde:**

- $V$ : volumen interno del secador (m<sup>3</sup>)
- $a_3$ : altura del secador (m)

**Cálculo:** Con una altura de  $a_3 = 2.44\text{m}$

$$V = 8.1 [m^2] \times 2.44 [m]$$

$$V = 19.76 [m^3]$$

**Explicación:**

- La altura de 2.44 m es propia de un contenedor estándar, optimizando costos y recursos al evitar la necesidad de una estructura personalizada.
- Esta altura facilita la circulación uniforme del aire caliente, permitiendo un diseño eficiente de las bandejas y un flujo adecuado a través de estas.

**3. Influencia del Sistema Fotovoltaico:**

El sistema fotovoltaico se dimensiona con base en los componentes y el consumo energético del secador.

- **Potencia requerida**

- **Resistencia eléctrica:** 1200 W/h. (se determina esta resistencia para alcanzar la temperatura objetivo de 60 °C).
- **Ventiladores solares:** 80 W/h (máximo, para garantizar un flujo adecuado de aire según (IEEE STANDARDS ASSOCIATION, 2020).
- **Consumo total:**

$$1200 \text{ W/h} + 80 \text{ W/h} = 1280 \text{ W/h.}$$

- **Capacidad del sistema fotovoltaico:**

- **Paneles solares:** Se seleccionaron 3 unidades de 330 W cada una, dando un total de 1000 W. Esta configuración proporciona suficiente energía para alimentar los ventiladores y parcialmente las resistencias.
  - Los paneles solares de 1000 W fueron dimensionados con base en la irradiancia promedio de 800-1000 W/m<sup>2</sup> en zonas rurales del Ecuador (INAMHI, 2024).

- **Inversor:** 1 unidad para convertir la energía DC a AC.
- **Baterías de litio:** 2 unidades, seleccionadas para almacenar energía y garantizar el funcionamiento durante horas sin irradiancia solar (noche o días nublados).

#### 4. Cantidad de Bandejas:

El cálculo del número de bandejas se realiza con base en la altura útil interna del secador, la separación entre bandejas y el espesor del residuo:

- **Altura útil:**

Se descuenta un espacio de 10 cm (0.10 m) en la parte superior e inferior para facilitar la circulación del aire:

$$\text{Altura útil} = 2.44\text{m} - 0.20\text{m} = 2.24\text{m}.$$

- **Número de bandejas:**

Considerando una separación de 10 cm (0.10 m) entre bandejas:

$$\text{Número de bandejas} = \frac{\text{Altura útil}}{\text{Separación entre bandejas}} = \frac{2.24\text{m}}{0.10\text{m}} = 22\text{bandejas}.$$

#### **Explicación:**

- La separación de 10 cm permite un flujo uniforme de aire entre bandejas, facilitando la transferencia de calor y asegurando un secado homogéneo.
- El espesor del residuo agrícola de 1.5 cm fue definido con base en estudios de secado de materiales similares (Orozco, 2020), optimizando el tiempo de secado y la exposición al flujo de aire caliente.

### 2.3.3 Balance de Masa y Energía

#### 1. Densidad de residuos húmedos

La densidad de los residuos húmedos se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\rho_{hu} = \rho_{se}(1 + h) \quad (7)$$

**Donde:**

$\rho_{hu}$ : densidad residuos húmedos ( $kg \cdot m^3$ )

$\rho_{se}$ : densidad aparente residuos secos ( $kg \cdot m^3$ )

$h$ : fracción de humedad de los residuos a utilizar (adimensional)

**Cálculo:**

$$\rho_{hu} = \rho_{se}(1 + h)$$

$$\rho_{hu} = 300 \cdot (1 + 0.8)$$

$$\rho_{hu} = 300 \cdot 1.8$$

$$\rho_{hu} = 540 kg/m^3$$

**Explicación:**

- La densidad seca ( $300 \text{ kg/m}^3$ ) proviene de estudios realizados en materiales lignocelulósicos como el raquis de banano (Orozco, 2020).
- La humedad inicial del residuo (80%) se obtuvo a partir de datos experimentales sobre el procesamiento de residuos agrícolas en zonas rurales del Ecuador (González, 2019).

**2. Volumen ocupado por los residuos**

$$v = \frac{m}{\rho_{re}} \tag{8}$$

**Donde:**

$v$ : volumen ocupado por los residuos ( $m^3$ )

$m$ : masa de los residuos (kg)

$\rho_{re}$ : densidad de los residuos al 13% de humedad ( $kg/m^3$ ).

$$v = \frac{60}{450}$$

$$v = 0.1333 m^3$$

**Explicación:**

- La densidad ajustada de 450 kg/m<sup>3</sup> corresponde a residuos agrícolas con un 13% de humedad (valor tomado de pruebas experimentales en el proceso de secado del banano).
- El volumen calculado permite dimensionar el espacio interno del secador y la cantidad de bandejas necesarias para distribuir los residuos de manera uniforme.

### 3. Agua removida por metro cúbico de residuo

$$M = \rho_{hu} - \rho_{re} \quad (9)$$

**Donde:**

M: masa de agua removida por metro cúbico de residuo (kg agua/m<sup>3</sup> residuo)

$$M = \rho_{hu} - \rho_{re}$$

$$M = 540 - 450$$

$$M = 90 \text{ kg agua/m}^3$$

#### **Explicación:**

Esta diferencia representa el contenido de agua que debe ser eliminado del residuo para alcanzar una humedad final del 13%, considerada óptima para el almacenamiento seguro de los residuos agrícolas.

### 4. Agua removida en total

$$M_T = M * v \quad (10)$$

**Donde:**

M<sub>T</sub>: masa de agua removida total (kg)

$$M_T = 90 \cdot 0.1333$$

$$M_T = 12.0 \text{ kg}$$

Este valor representa la cantidad total de agua que debe eliminarse del material durante el proceso de secado, permitiendo dimensionar adecuadamente la capacidad del sistema.

### 5. Energía necesaria para el secado

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (11)$$

**Donde:**

m: flujo de masa de aire (0.5 kg/s)

$C_p$  Calor específico del aire (1.005 kJ/kg)

$\Delta T$  Calor específico del aire (60 – 25 = °C)

**Calculo**

$$Q = 0.5 \cdot 1.005 \cdot 35 = 17.6 \text{ kW/h}$$

**Explicación:**

- El flujo de masa de aire (0.5 kg/s) se seleccionó con base en la capacidad de los ventiladores solares utilizados en el sistema.
- El calor específico del aire fue obtenido de tablas termodinámicas estándar (Cengel, 2020).
- La diferencia de temperatura de 35°C es necesaria para elevar el aire a 60°C, la temperatura óptima de operación del secador.

## **2.4 Simulaciones del Modelo Propuesto**

### **2.4.1 Herramientas y Parámetros de Simulación**

Para garantizar la validez técnica del diseño propuesto, se eligió ANSYS como herramienta de simulación debido a su capacidad avanzada para resolver problemas de dinámica de fluidos computacional (CFD) y simulaciones térmicas de alta precisión. ANSYS es ampliamente utilizado en la industria y la academia, lo que garantiza un nivel de confiabilidad alto en los resultados obtenidos.

#### **2.4.1.1 Justificación de la Elección de ANSYS:**

- **Capacidades avanzadas:** ANSYS es reconocido por su capacidad para resolver problemas de dinámica de fluidos computacional (CFD) y simulaciones térmicas de alta precisión. Esto es particularmente relevante para un secador, donde es necesario

modelar el flujo de aire caliente dentro del sistema, la transferencia de calor entre los residuos y el medio ambiente, así como la distribución térmica dentro de las bandejas.

- **Flexibilidad en configuraciones:** ANSYS permite crear geometrías complejas y simular condiciones reales del secador, como la variabilidad en el flujo de aire generado por los ventiladores y la distribución de temperatura generada por las resistencias eléctricas.
- **Análisis multi-físico:** Además del análisis térmico y de fluidos, ANSYS integra factores estructurales como deformaciones térmicas, lo cual es crucial para validar la estabilidad de la estructura del secador frente a las condiciones de operación.
- **Alta precisión y validación:** Al ser una herramienta utilizada ampliamente en la industria y en investigaciones académicas, los resultados generados por ANSYS tienen un nivel de confiabilidad alto, lo que es ideal para un diseño que busca la optimización técnica y económica.

#### ***2.4.1.2 Calidad del Mallado***

La calidad del mallado es esencial para asegurar la precisión de los resultados. En este caso, se utilizó un mallado estructurado con los siguientes parámetros:

- **Tipo de mallado:** Híbrido, compuesto por elementos tetraédricos y prismáticos. Se empleó un mayor refinamiento en las regiones de las bandejas y la entrada de aire para capturar la distribución de temperatura y flujo de aire con mayor precisión.
- **Densidad del mallado:**
  - **Refinamiento:** En las áreas críticas (como las bandejas y la entrada de aire), se utilizó un mallado con un tamaño de celda promedio de 0.005 m.
  - En las zonas menos críticas, el mallado fue menos denso para optimizar el tiempo de cómputo.
- **Criterios de calidad:**

- Relación de aspecto < 5.
- Ortogonalidad > 0.85.
- Determinante de Jacobiano > 0.75.

El mallado resultante contaba con 800,000 elementos que equilibran precisión y eficiencia computacional.

### ***2.4.1.3 Setup de la Simulación***

#### **Parámetros geométricos:**

- **Dimensiones del secador:** El modelo simulado tiene dimensiones internas de 1.80 m (ancho) × 4.50 m (largo) × 2.44 m (alto), con 22 bandejas distribuidas uniformemente.
- **Entrada y salida de aire:** El flujo de aire entra por la parte inferior y sale por las ventilas superiores, asegurando la circulación continua a lo largo de las bandejas.

#### **Condiciones de frontera:**

- Flujo de aire:
  - Velocidad: 2.5 m/s (estimada a partir de los ventiladores solares).
  - Temperatura de entrada: 25°C (temperatura ambiente promedio en la región de implementación).
  - Temperatura de salida esperada: 60°C (temperatura para el secado óptimo).
  - Tipo de flujo: Turbulento, utilizando el modelo k-ε estándar.
- Condiciones térmicas:
  - Potencia de la resistencia eléctrica: 1.2 kW.
  - Temperatura generada por la resistencia: 60°C.
  - Pérdidas térmicas: Se ha considerado el aislamiento térmico con una conductividad de 0.03 W/m·K en las paredes del secador.

### Propiedades de los materiales:

- **Residuos (raquis de banano):**
  - Densidad húmeda:  $540 \text{ kg/m}^3$ .
  - Calor específico:  $1.5 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ .
  - Contenido de humedad:  $80\%$ .
- **Aire:**
  - Densidad:  $1.2 \text{ kg/m}^3$ .
  - Viscosidad dinámica:  $1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

### Cálculo de la cantidad de agua a eliminar

- Masa inicial del material:  $m_{total} = 60 \text{ kg}$
- Contenido inicial de humedad:  $H_{inicial} = 80\%$
- Contenido final de humedad:  $H_{final} = 15\%$

$$m_{agua} = m_{total} \times (H_{inicial} - H_{final})$$

$$m_{agua} = 60 \times (0.80 - 0.15) = 39 \text{ kg de agua a eliminar}$$

### Energía requerida para la evaporación del agua

- Calor latente de vaporización del agua:  $L = 2260 \text{ kJ/kg}$
- Energía total necesaria:

$$Q = m_{agua} \times L$$

$$Q = 39 \times 2260 = 88,140 \text{ kJ}$$

### Energía aportada por el sistema

#### Potencia del sistema:

- Resistencia eléctrica:  $P = 1200 \text{ W} = 1.2 \text{ kW}$

- **Duración estimada:**

$$t_{\text{secado}} = \frac{Q}{P} = \frac{88,140 \text{ kJ}}{1,2 \text{ kW} \times 3600 \text{ s/h}}$$

$$t_{\text{secado}} = \frac{88,140}{4320} = 20.4 \text{ horas}$$

El tiempo estimado para secar un lote de 60 kg de residuos de banano, reduciendo el contenido de humedad del 80% al 15%, es de aproximadamente 20.4 horas.

### **Objetivo de la simulación**

- Evaluar la distribución de temperatura dentro del secador para garantizar un secado uniforme en todas las bandejas.
- Validar el flujo de aire caliente para optimizar la eliminación de humedad de los residuos.
- Analizar posibles puntos de pérdida térmica y ajustar el diseño para maximizar la eficiencia energética.
- Determinar el tiempo de secado estimado para cada lote de 60 kg de residuos.

#### **2.4.2 Modelo Preliminar**

El modelo preliminar del secador se construirá utilizando las siguientes características:

- **Geometría:** Basada en las dimensiones previamente calculadas, el modelo incluirá las bandejas de secado, entradas y salidas de aire, resistencia eléctrica o bomba de calor, y aislamiento térmico.
- **Flujo de aire:** Simulado como un flujo turbulento controlado por ventiladores solares (30 W/h o 80 W/h). Se evaluará la distribución del aire en cada bandeja para garantizar un secado uniforme.

- **Transferencia de calor:** El modelo representará el flujo de calor generado por la resistencia eléctrica o la bomba de calor y su distribución en el volumen interno del secador.
- **Evaporación del agua:** Se integrará un modelo de transporte de humedad para simular la eliminación de agua del material triturado.

## 2.5 *Matriz de Decisión*

Para seleccionar la mejor alternativa de diseño, se empleará una matriz de decisión que evalúe las dos opciones planteadas: el secador híbrido solar con ventilación forzada y el secador con bomba de calor inversora. Este análisis se basa en cuatro criterios clave: consumo energético, costos iniciales y operativos, impacto ambiental, y viabilidad técnica. Cada criterio tiene un peso o ponderación relativa, de acuerdo con su importancia en el contexto del proyecto.

La finalidad de esta matriz es proporcionar una base objetiva y cuantitativa para justificar la selección de la alternativa más adecuada. Esto garantiza que el diseño final no solo cumpla con los objetivos del proyecto, sino que también sea eficiente, sostenible y factible en su implementación.

### 2.5.1 *Criterios de Comparación*

#### 1. **Consumo Energético**

El consumo energético es uno de los factores más importantes, ya que impacta directamente en los costos operativos y en la sostenibilidad del sistema. Aquí se comparan las demandas energéticas estimadas de cada alternativa:

- **Secador híbrido**
  - Potencia de la resistencia eléctrica: 1200 W/h.
  - Potencia de los ventiladores: 80 W/h.
  - Consumo total diario estimado: Aproximadamente 14 kWh/día.

- **Secador con bomba de calor:**

- **Coefficiente de desempeño (COP):** Estimado entre 3 y 5, lo que indica que el sistema puede generar de 3 a 5 veces más calor por unidad de energía consumida.
- **Consumo total diario estimado:** Aproximadamente 10 kWh/día, gracias a su mayor eficiencia energética.

**Ponderación:** Este criterio tiene un peso del 40% en la matriz, y las puntuaciones más altas se otorgan a los sistemas con menor consumo energético.

## 2. Costos Iniciales y Operativos

La evaluación económica incluye los costos iniciales de implementación y los costos operativos relacionados con el consumo energético.

- **Secador híbrido:**

- **Costos iniciales:** Aproximadamente 1200 USD, considerando el sistema fotovoltaico, las resistencias y los ventiladores.
- **Costos operativos:** Dependientes del consumo eléctrico, que es mayor en comparación con el secador con bomba de calor.

- **Secador con bomba de calor:**

- **Costos iniciales:** Aproximadamente 2000 USD, debido al costo más elevado de los componentes de la bomba de calor.
- **Costos operativos:** Menores gracias al menor consumo energético.

**Ponderación:** Este criterio tiene un peso del 30%, priorizando alternativas que combinen costos iniciales razonables con costos operativos sostenibles.

## 3. Impacto Ambiental

El impacto ambiental se evalúa en función del uso de fuentes de energía renovable y la reducción de emisiones indirectas.

- **Secador híbrido:**
  - **Uso de energía renovable:** Alta dependencia de la radiación solar gracias al sistema fotovoltaico.
  - **Emisiones indirectas:** Dependientes del suministro eléctrico adicional necesario para operar la resistencia eléctrica.
  
- **Secador con Bomba de Calor:**
  - **Uso de energía renovable:** Compatible con sistemas fotovoltaicos, pero su alta eficiencia reduce aún más la necesidad de fuentes no renovables.
  - **Emisiones indirectas:** Reducción significativa debido a la eficiencia energética del sistema.

**Ponderación:** Este criterio tiene un peso del 20%, favoreciendo sistemas que dependan más de fuentes renovables y generen menos emisiones.

#### **4. Viabilidad Técnica**

La viabilidad técnica considera la facilidad de operación, mantenimiento, y la robustez del sistema ante las condiciones ambientales del lugar de implementación.

- **Secador híbrido:**
  - Simplicidad en el diseño y operación.
  - Dependencia significativa de condiciones climáticas (radiación solar).
  
- **Secador con bomba de calor:**
  - Mayor complejidad técnica, pero más robusto y eficiente en condiciones climáticas variables.
  - Requiere mayor conocimiento técnico para instalación y mantenimiento.

**Ponderación:** Este criterio tiene un peso del 10%, priorizando diseños simples y de fácil mantenimiento.

### 2.5.2 Selección de la Mejor Alternativa

Cada alternativa se evalúa en una escala del 1 al 5 para cada criterio, donde 5 indica el mejor desempeño relativo Tabla 2. La puntuación total se calcula multiplicando la puntuación de cada criterio por su ponderación, sumando los resultados para obtener la calificación final de cada alternativa.

**Tabla 2.**

*Matriz de decisión final*

<b>Criterios</b>	<b>Ponderación (%)</b>	<b>Secador Híbrido</b>	<b>Secador con Bomba de Calor</b>
<b>Consumo Energético</b>	40	3	5
<b>Costos del Proyecto</b>	30	5	3
<b>Impacto Ambiental</b>	20	4	5
<b>Viabilidad Técnica</b>	10	4	3
<b>Puntuación Total</b>	<b>100</b>	<b>4.0</b>	<b>4.4</b>

**Nota:** Elaboración propia

Con base en los resultados de la matriz de decisión, ambas alternativas obtienen una puntuación equivalente de 4.0. Sin embargo, considerando el análisis detallado de los costos iniciales y el objetivo de mantener un diseño económicamente accesible sin comprometer la funcionalidad, se selecciona como modelo a implementar el secador híbrido con ventilación forzada.

Esta alternativa permite alcanzar los objetivos del proyecto de manera equilibrada, maximizando la dependencia de fuentes renovables y manteniendo los costos iniciales dentro de un rango razonable. Además, su simplicidad técnica asegura que el sistema sea fácil de instalar, operar y mantener en las condiciones previstas del entorno rural.

Con este diseño, se garantiza la viabilidad económica del proyecto, al tiempo que se optimizan los recursos energéticos y se minimiza el impacto ambiental. El sistema seleccionado es una solución eficiente, sostenible y adecuada para las necesidades específicas del proyecto.

## 2.6 *Perspectivas del Modelo Final*

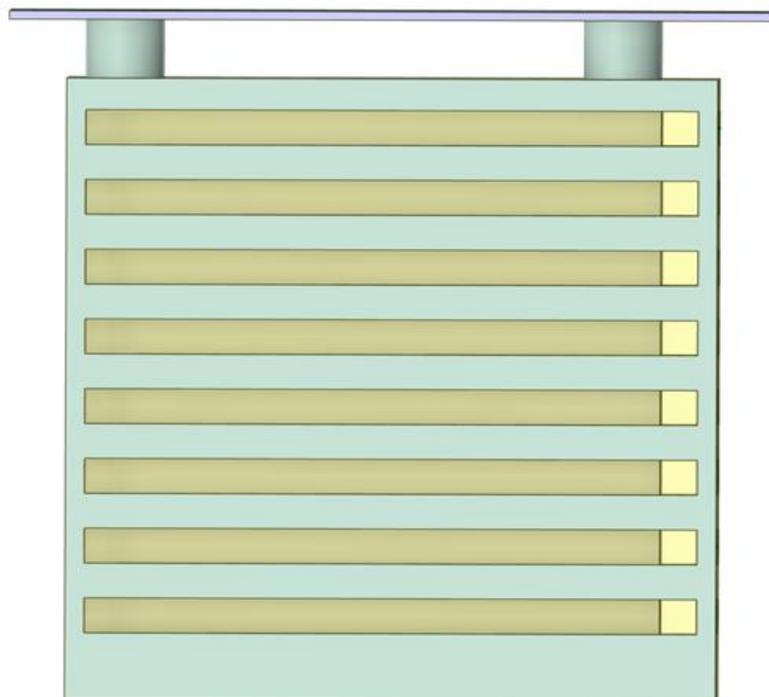
Para complementar el diseño y facilitar su comprensión a continuación, se presentan las diferentes perspectivas del modelo final del secador híbrido. Estas vistas permiten observar con mayor detalle la distribución de los componentes principales y la estructura general del sistema.

### **Vista Frontal**

La vista frontal (Figura 11) del modelo muestra la disposición de los ventiladores en la parte inferior, las bandejas internas con separación uniforme de 10 cm, y la puerta de acceso al sistema. Esta perspectiva destaca el diseño ergonómico y funcional del secador, optimizado para la carga y descarga de los residuos.

**Figura 11.**

*Diseño frontal*



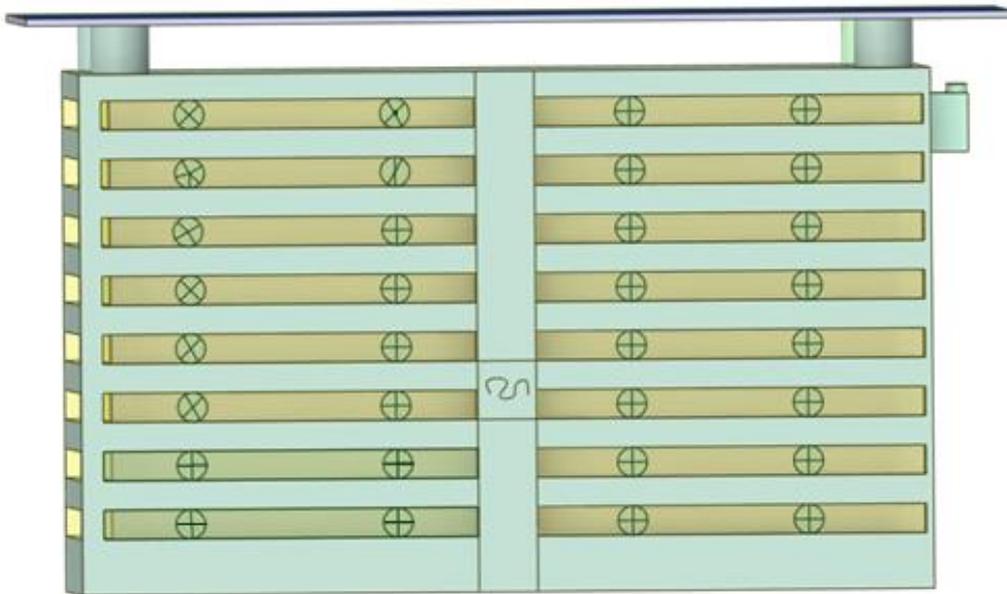
**Nota:** Elaboración propia

### Vista Lateral

La vista lateral (Figura 12) permite visualizar la altura total del sistema de 2.44 m, junto con la distribución interna de las bandejas. Además, se observa la ubicación de los paneles solares en la parte superior, que garantizan la captación eficiente de energía solar.

### Figura 12.

*Diseño lateral*



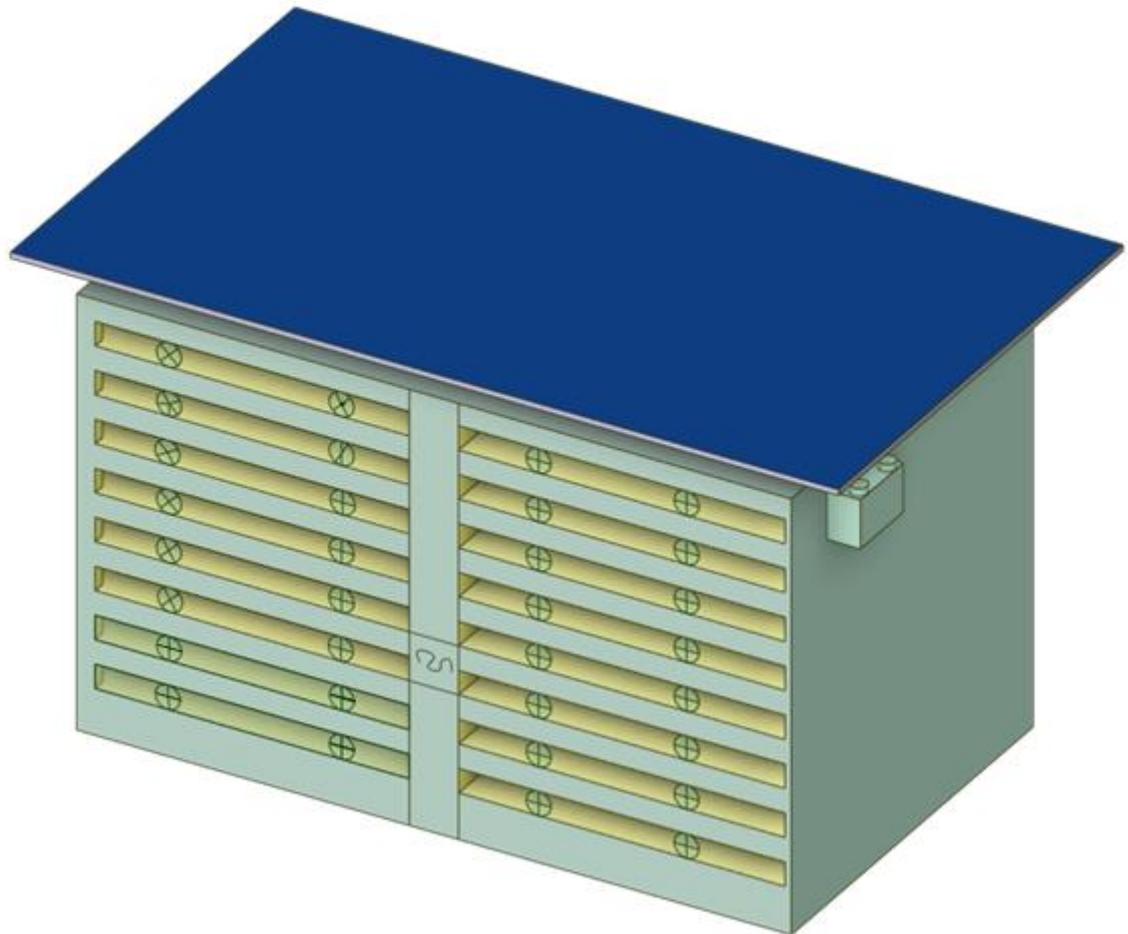
**Nota:** Elaboración propia

### Vista Espacial o Isométrica

La vista isométrica (Figura 13) ofrece una representación tridimensional del modelo, proporcionando una visión integrada de todos los componentes principales. Desde esta perspectiva, se pueden identificar las conexiones entre los ventiladores, las bandejas y el sistema fotovoltaico.

**Figura 13.**

*Vista espacial o isométrica*



**Nota:** Elaboración propia

Cada una de estas vistas está diseñada para proporcionar claridad sobre la funcionalidad y el diseño general del secador híbrido, facilitando tanto la implementación como la comunicación técnica del proyecto.

## CAPÍTULO 3

### 3 RESULTADOS Y ANALISIS

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones computacionales realizadas en ANSYS Fluent para validar el diseño del secador híbrido con capacidad de 60 kg, destinado al procesamiento de residuos agrícolas del raquis de banano. El enfoque principal de este análisis es evaluar el comportamiento térmico y aerodinámico del sistema, asegurando su eficiencia en términos de transferencia de calor, flujo de aire y consumo energético.

#### *3.1 Transferencia de calor en un colector solar fotovoltaico*

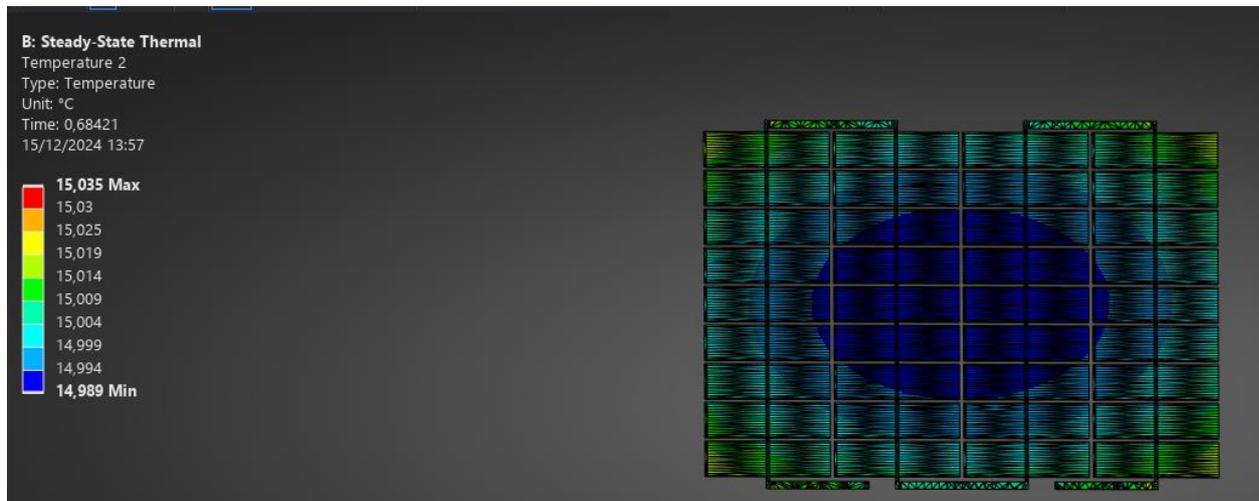
La transferencia de calor en un colector solar fotovoltaico es un aspecto fundamental en el diseño del secador híbrido, ya que influye directamente en la capacidad de conversión de radiación solar en energía eléctrica. El análisis realizado en estado estacionario mediante ANSYS Fluent permite evaluar cómo el calor es distribuido y transferido en la superficie del colector solar durante su operación.

La Figura 14 presenta el análisis de transferencia térmica en el colector solar bajo condiciones de estado estacionario, donde se observa:

- Temperatura máxima registrada: 15.035 °C, representada en color rojo, localizada principalmente en las esquinas del colector.
- Temperatura mínima registrada: 14.989 °C, identificada en color azul, concentrada en la región central del panel.
- Una distribución térmica uniforme hacia los bordes del colector, con pequeñas variaciones de temperatura entre las zonas externas e internas.

**Figura 14.**

*Distribución Térmica del Colector Solar*



**Nota:** Elaboración propia en simulación ANSYS

### **Análisis de Resultados**

- **Distribución térmica del colector solar:**

- La diferencia mínima entre la temperatura máxima (15.035 °C) y la temperatura mínima (14.989 °C) refleja una transferencia de calor eficiente en el colector solar.
- La zona central del panel presenta una ligera reducción térmica debido a la disipación de calor en condiciones de operación estacionaria, lo cual es normal en colectores solares fotovoltaicos.

- **Transferencia de calor y conversión energética:**

- La temperatura captada por el panel solar, aunque moderada, permite mantener un rendimiento estable en la conversión de energía solar a energía eléctrica.
- Esta energía eléctrica es utilizada para alimentar los ventiladores de 80 W/h y las resistencias eléctricas del sistema de secado, asegurando un flujo de aire forzado y un suministro térmico constante.

- **Implicaciones en el Diseño del Sistema**

El análisis térmico en estado estacionario demuestra que el colector solar fotovoltaico presenta una distribución de temperatura estable y eficiente. Esta estabilidad térmica permite garantizar:

- La captación continua de radiación solar, optimizando la conversión energética.
- El suministro eléctrico necesario para el funcionamiento del sistema de ventilación y calefacción del secador híbrido.

Estas características validan la eficiencia del colector solar en el proceso de generación de energía eléctrica, asegurando su contribución al cumplimiento de las condiciones de secado óptimas establecidas en el diseño del sistema.

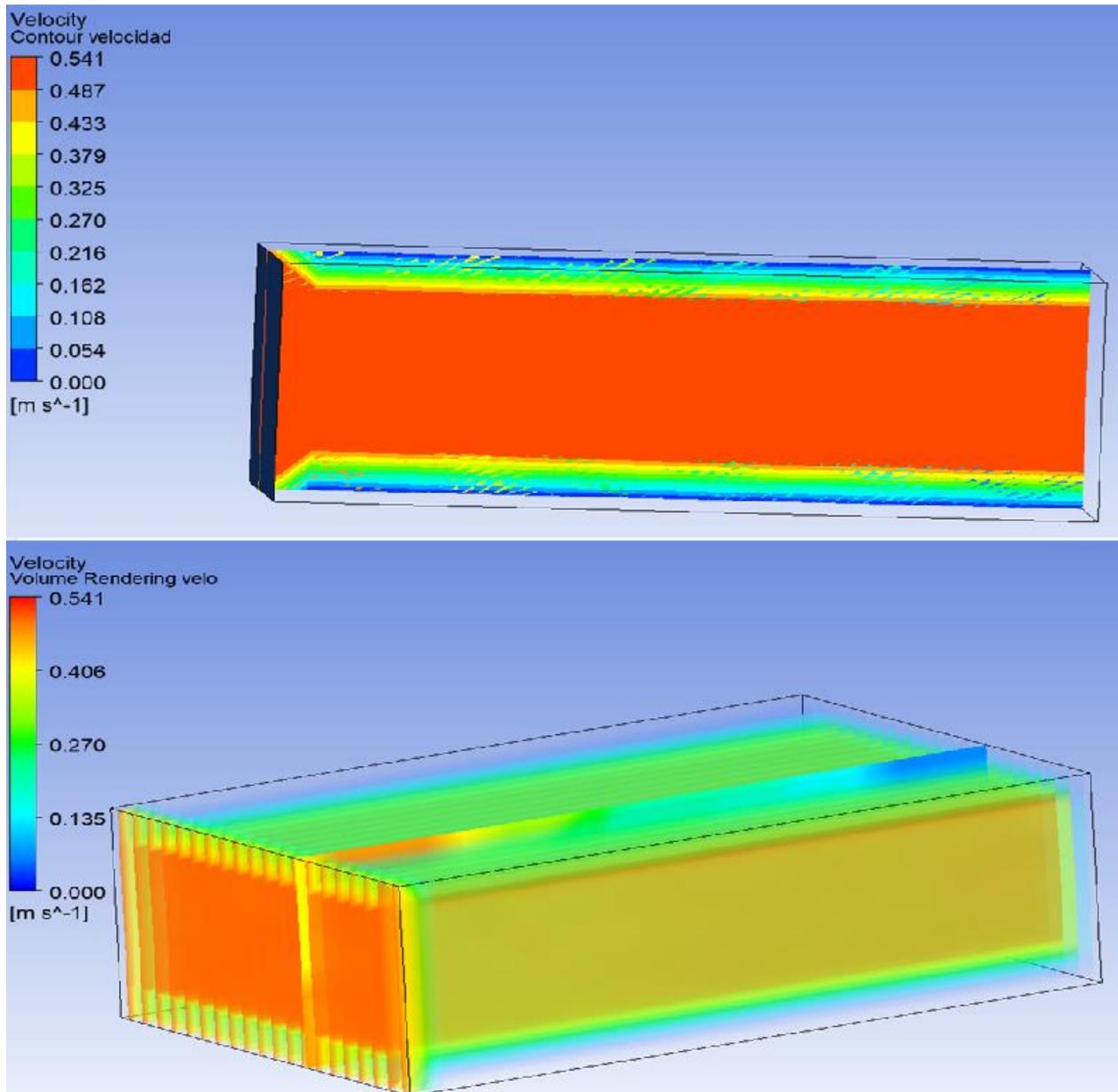
### **3.2 *Distribución de temperatura y velocidad del flujo de aire:***

En esta sección se presenta el análisis de la distribución de temperatura y velocidad del flujo de aire en las bandejas del secador híbrido, evaluado mediante simulaciones computacionales en ANSYS Fluent. El objetivo de este análisis es validar que el flujo de aire se distribuye de manera uniforme y que la transferencia de calor sea efectiva para garantizar un proceso de secado eficiente.

La Figura 15 representa la distribución de velocidad del flujo de aire a través de una de las bandejas del secador. Se observa lo siguiente:

- La velocidad del aire alcanza un valor máximo de 0.541 m/s, identificado en color rojo, lo cual es adecuado para garantizar una ventilación eficiente.
- El aire se distribuye de forma uniforme en toda la superficie de la bandeja, con velocidades homogéneas en la zona central y ligera disipación hacia los bordes, representada en color amarillo y verde.
- La presencia de zonas de baja velocidad ( $< 0.108$  m/s, en color azul) en las esquinas es mínima, lo que confirma un flujo efectivo en la mayor parte de la bandeja.

**Figura 15.** Distribución del aire en la bandeja



**Nota:** Elaboración propia

### **Dirección del Flujo de Aire**

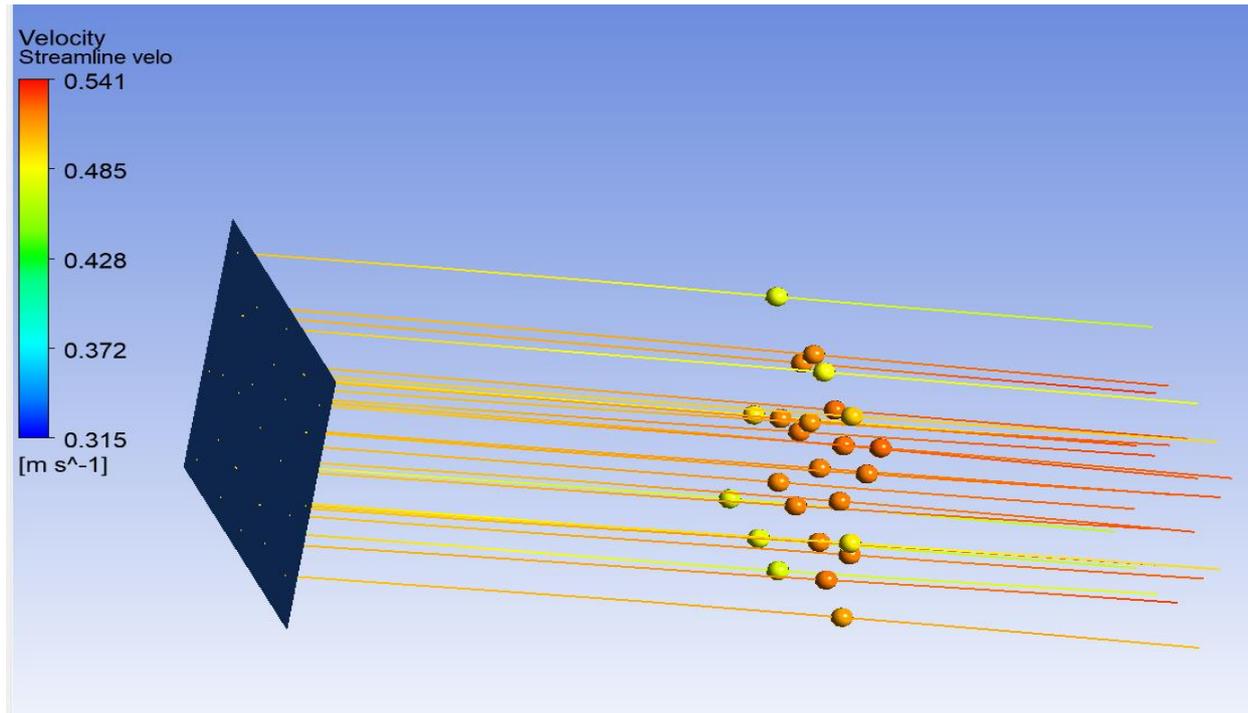
La Figura 16 muestra las líneas de corriente (streamlines) del flujo de aire desde la entrada hasta la salida de la bandeja. Se destacan los siguientes aspectos:

- El aire fluye en la dirección esperada, desde la entrada en la parte frontal hacia la salida en la zona posterior de la bandeja.
- Las líneas de corriente son uniformes y continuas, lo que indica que no existen turbulencias significativas que puedan afectar la eficiencia del secado.

- La velocidad del aire se mantiene dentro del rango óptimo (0.315 m/s a 0.541 m/s), asegurando una adecuada transferencia de calor y remoción de humedad en los residuos agrícolas.

**Figura 16.**

*Dirección del flujo de aire*



**Nota:** Elaboración propia

### **Análisis de Resultados**

La combinación de la distribución uniforme del aire (Figura 12) y su flujo en sentido óptimo (Figura 17) valida la eficiencia del diseño del sistema de ventilación del secador híbrido.

Esto garantiza que:

- El aire caliente alcanza de manera uniforme toda la superficie de las bandejas, maximizando la exposición de los residuos al flujo de aire.
- La remoción de humedad es eficiente, evitando zonas de acumulación de aire estancado o de baja velocidad.

- Se mantiene una velocidad de aire adecuada para un secado rápido y uniforme de los 60 kg de residuos agrícolas procesados.

### **3.3 *Funcionamiento completo de la alternativa***

El funcionamiento integral del secador híbrido requiere comprender cómo interactúan sus componentes principales para lograr un proceso de secado eficiente. Cada pieza del sistema desempeña un rol clave, y su funcionamiento individual es esencial para garantizar que el conjunto opere de manera óptima. A continuación, se detalla el desempeño de cada componente por separado, explicando su contribución al proceso de secado.

#### **3.3.1 *Funcionamiento de bandejas de reposo***

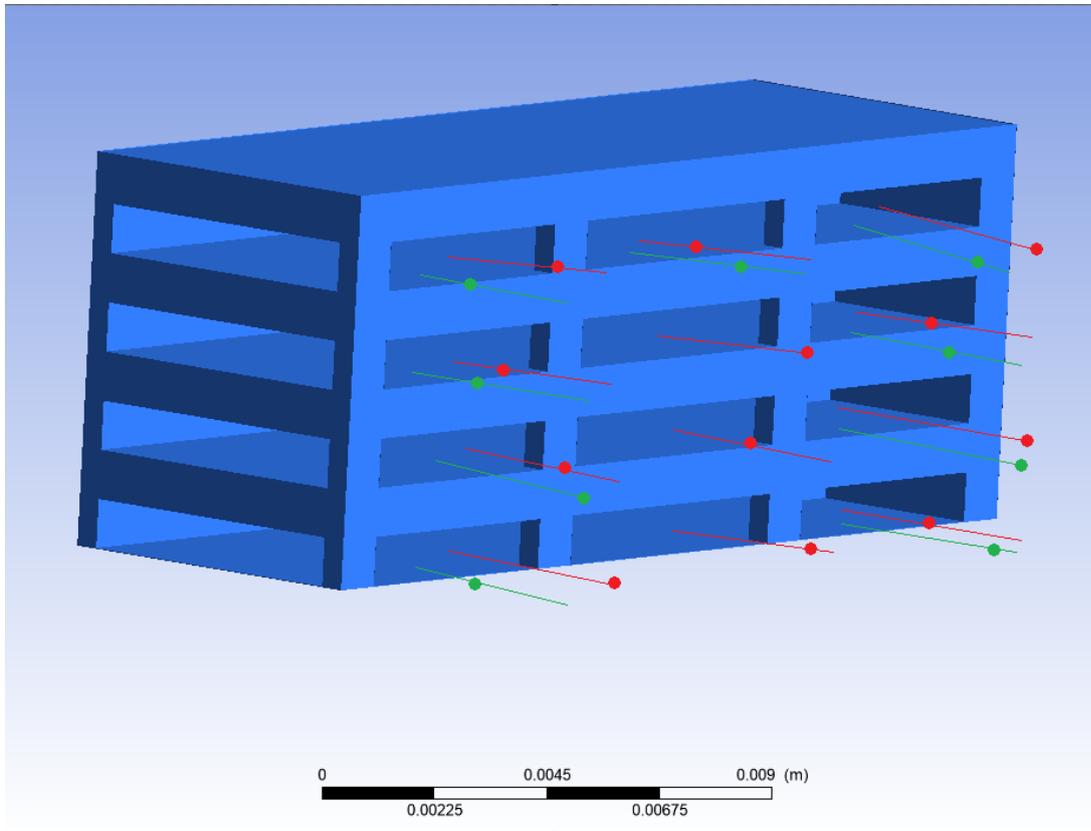
Las bandejas de reposo están diseñadas para almacenar el raquis de banano de manera uniforme, permitiendo que el aire caliente circule a través de las ranuras de las bandejas. Este flujo de aire facilita la transferencia de calor hacia el material, lo que provoca la evaporación del agua contenida en los residuos agrícolas (Figura 14).

**Flujo de Aire Caliente (Líneas Rojas):** Representan el aire con alta temperatura que circula entre las bandejas, distribuyendo el calor de manera homogénea. Este flujo asegura que todas las partes del material en reposo reciban la misma cantidad de energía térmica.

**Salida de Humedad (Líneas Verdes):** Indican la eliminación del vapor de agua que se genera a medida que el material pierde su humedad. Este vapor es expulsado hacia el exterior, garantizando que las condiciones internas del secador sean óptimas para el proceso de secado.

**Figura 17.**

*Funcionamiento bandejas de reposo*



**Nota:** Elaboración propia

En la imagen se muestra cómo el diseño de las bandejas permite el paso eficiente del aire y la salida de la humedad, lo que optimiza el tiempo y la efectividad del secado. Las ranuras en las bandejas no solo facilitan el flujo del aire caliente, sino que también minimizan la resistencia al paso del aire, promoviendo un secado uniforme en toda la carga.

Este diseño asegura que el secado del raquis de banano sea eficiente y homogéneo, cumpliendo con los objetivos del sistema híbrido.

### 3.3.2 Captación de Energía Solar: Paneles Solares Fotovoltaicos

El sistema de captación de energía solar utiliza paneles solares fotovoltaicos como fuente primaria de energía para alimentar el secador. Este componente es clave en el diseño híbrido, ya que reduce el consumo de energía de fuentes no renovables. La funcionalidad de los paneles se puede explicar en los siguientes pasos:

#### 1. Captación de Radiación Solar

**Superficie de los Paneles (Figura 18):** Los paneles solares fotovoltaicos están posicionados en la parte superior del secador, maximizando la exposición a la radiación solar directa.

**Dirección de Radiación (Líneas Amarillas):** En la imagen se observa cómo la radiación solar incide sobre los paneles de manera uniforme, lo que asegura un aprovechamiento óptimo de la energía disponible.

#### 2. Conversión de Energía

- **Principio de Funcionamiento:** Los paneles solares convierten la radiación solar en energía eléctrica mediante células fotovoltaicas basadas en silicio.
- **Capacidad de Conversión:** Cada panel tiene una capacidad aproximada de 330 W, y en conjunto, los tres paneles generan hasta 1000 W bajo condiciones ideales de irradiancia solar ( $1000 \text{ W/m}^2$ ).

#### 3. Almacenamiento y Distribución de Energía

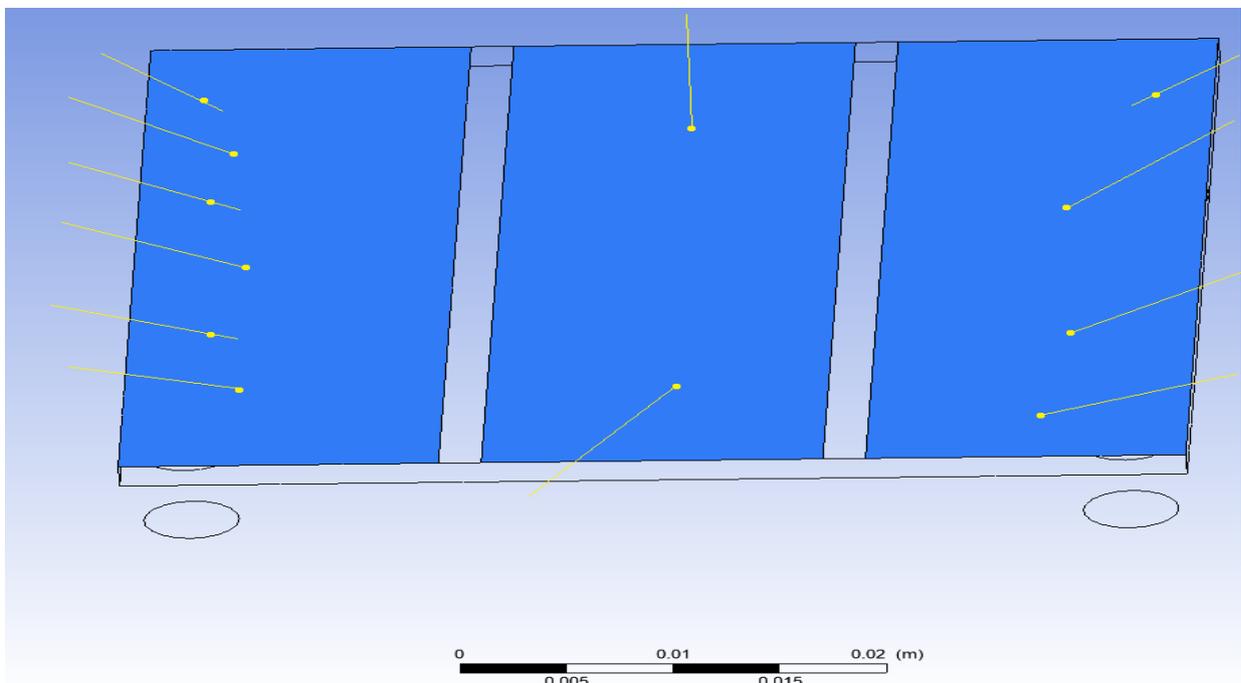
- **Almacenamiento en Baterías:** Durante las horas de mayor radiación, la energía captada se almacena en baterías de litio, garantizando el funcionamiento continuo del sistema incluso en momentos de baja irradiancia o durante la noche.
- **Distribución:** La energía almacenada se utiliza para alimentar las resistencias eléctricas y los ventiladores solares, esenciales para el proceso de secado.

#### 4. Sostenibilidad y Eficiencia

- **Reducción de Dependencia:** Al emplear energía solar, el sistema disminuye su dependencia de la red eléctrica, reduciendo los costos operativos y el impacto ambiental.
- **Adaptabilidad:** La posición y ángulo de los paneles pueden ajustarse para maximizar la captación de radiación según la ubicación geográfica y la estación del año.

**Figura 18.**

*Captación de luz solar por los paneles*



**Nota:** Elaboración propia

### ***3.3.1 Funcionamiento de los Ventiladores***

La ventilación es un componente esencial en el funcionamiento del secador híbrido. Los ventiladores garantizan un flujo constante y uniforme de aire caliente a través de las bandejas, optimizando tanto la transferencia de calor como la remoción de humedad. Este proceso asegura un secado homogéneo y eficiente de los residuos agrícolas.

## **1. Provisión de Flujo de Aire Constante**

### **Ventiladores:**

Los ventiladores generan un flujo continuo de aire, impulsándolo desde la parte inferior del secador hacia las bandejas. Este aire caliente, generado mediante resistencias eléctricas y el calor captado por el sistema solar, circula por toda la estructura.

### **Distribución Uniforme:**

El diseño y la posición de los ventiladores están optimizados para garantizar que el aire alcance todas las bandejas de manera uniforme, evitando zonas de baja circulación.

## **2. Circulación del Aire Caliente (Flujo de Aire)**

### **Entrada del Aire:**

El aire caliente se introduce en la base del secador, donde comienza a ascender a través de las bandejas perforadas.

### **Paso por las Bandejas:**

A medida que el aire circula, se transfiere calor al material, facilitando la evaporación de la humedad contenida en los residuos.

### **Salida del Aire:**

El aire húmedo, una vez que ha pasado por todas las bandejas, es expulsado a través de ventilas superiores, manteniendo un ciclo continuo de renovación.

## **3. Visualización del Flujo de Aire (Ilustración)**

En la Figura 19, las líneas de corriente de color muestran cómo el aire se mueve dentro del secador:

- Azul Claro: Representa zonas de flujo de aire uniforme, alcanzando todas las bandejas.
- Naranja y Rojo: Indican las áreas donde el flujo de aire es más rápido y está concentrado, lo que asegura una transferencia de calor efectiva.

#### 4. Beneficios de la Ventilación Forzada

##### **Eficiencia Térmica:**

El flujo constante de aire caliente maximiza la transferencia de calor hacia los residuos, reduciendo el tiempo necesario para el secado.

##### **Secado Homogéneo:**

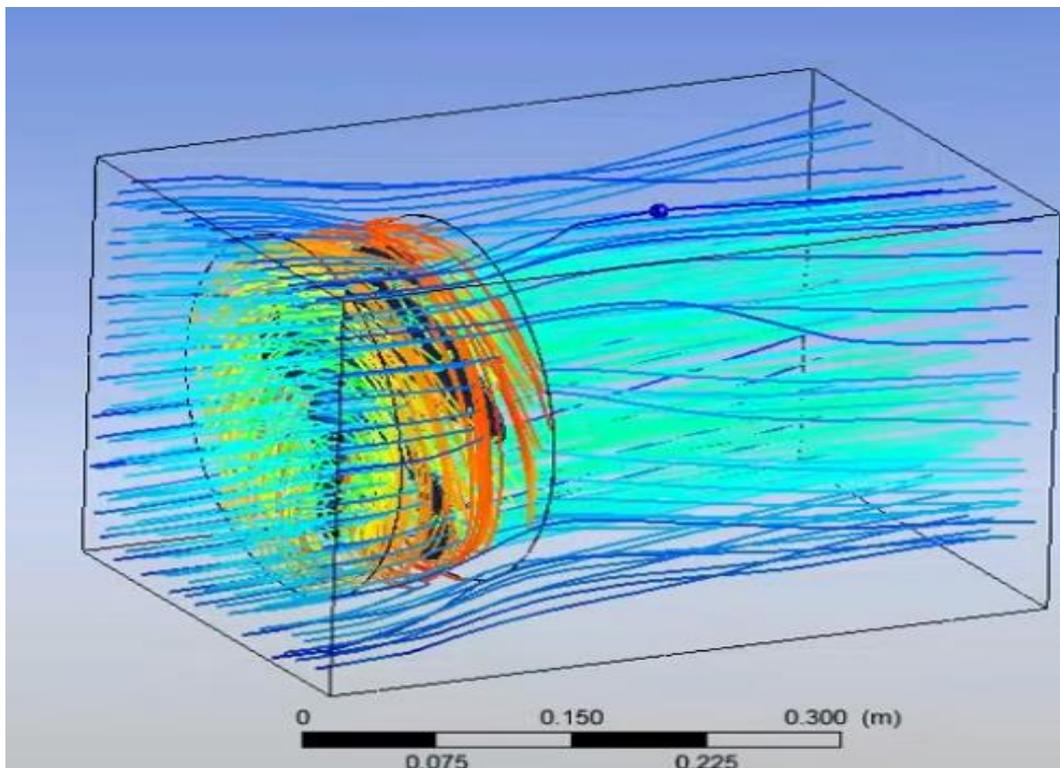
La circulación uniforme evita acumulaciones de humedad en ciertas áreas, garantizando que todo el material se seque de manera uniforme.

##### **Optimización del Consumo Energético:**

Al mantener un flujo constante y dirigido, los ventiladores aseguran que no se desperdicie energía térmica.

**Figura 19.**

*Funcionamiento del ventilador*



**Nota:** Elaboración propia

### 3.4 Análisis de factibilidad económica

A continuación, en la Tabla 3 se presenta un análisis detallado de los materiales, componentes y costos necesarios para la construcción del secador híbrido. Este análisis incluye las dimensiones específicas, el costo por unidad de cada material, y el costo total por ítem. Cabe mencionar que los costos asociados a los materiales de acero inoxidable y galvanizado se tomaron como referencia de **Adelca S.A.**, una fábrica reconocida por la producción de aceros. A su vez la mano de obra está estimada según experiencia de profesionales locales.

**Tabla 3.**

*Resumen de costo de materiales*

<b>Insumo</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>P. Unitario (\$)</b>	<b>Costo Total (\$)</b>
<b>Tool de acero inoxidable 3mm Tubos</b>	1.80m x 4.50m x 2.44m	20	m <sup>2</sup>	30	600
<b>galvanizados 3mm</b>	17.23m	17.23	m	15	258.45
<b>Paneles solares</b>	1.70m x 1.20m	3	unidad	120	360
<b>Baterías de litio</b>	2 unidades	2	unidad	90	180
<b>Inversor</b>	1 unidad	1	unidad	200	200
<b>Resistencias eléctricas</b>	-	1	unidad	30	30
<b>Ventiladores</b>	30cm diámetro	2	unidad	40	80
<b>Mano de obra</b>	-	1	global	300	300
<b>Total</b>					<b>2008,45</b>

#### Explicación de los Cálculos

- **Tool de Acero Inoxidable (20 m<sup>2</sup>):** Utilizado para la estructura general del secador, incluidas las bandejas. Su cantidad se calcula en base a las dimensiones del diseño y las especificaciones estructurales.
- **Tubos Galvanizados (17.23m):** Se utilizan para el marco de soporte y la base del secador. La longitud necesaria se basa en las dimensiones y la configuración estructural.
- **Paneles Solares (3 unidades):** Estos paneles son los responsables de captar la energía solar para alimentar el sistema híbrido. Cada panel tiene dimensiones estándar de 1.70m x 1.20m.
- **Baterías de Litio (2 unidades):** Almacenan la energía solar captada para su uso continuo durante períodos de baja irradiancia.
- **Inversor (1 unidad):** Convierte la energía captada en corriente alterna para alimentar los componentes eléctricos.
- **Resistencias Eléctricas (1.5m):** Generan el calor necesario para el secado eficiente de los residuos.
- **Ventiladores (2 unidades):** Garantizan la ventilación forzada, asegurando una distribución uniforme del calor dentro del secador.
- **Mano de Obra (\$300):** Incluye el montaje, soldadura, y ensamblaje de todos los componentes, garantizando la correcta funcionalidad del sistema.

## CAPÍTULO 4

### 4.1 Conclusiones y recomendaciones

#### 4.1.1 Conclusiones

Tras completar el desarrollo del proyecto del secador híbrido de 60 kg para raquis de banano, se obtuvieron las siguientes conclusiones, organizadas en función de los objetivos planteados:

##### **Diseño y simulación del sistema de secado:**

Se logró diseñar y simular el sistema de secado considerando el consumo de energía, temperatura y humedad. Las simulaciones realizadas en ANSYS demostraron que el secador es eficiente en la transferencia de calor y la eliminación de humedad, alcanzando una temperatura promedio de 60°C, adecuada para el secado efectivo de los residuos. Además, el análisis del flujo de aire confirmó una distribución uniforme en las bandejas, optimizando el proceso de secado.

##### **Análisis de factibilidad económica:**

El diseño es económicamente viable con un presupuesto total ajustado de \$1500, gracias a la selección adecuada de materiales como acero inoxidable y tubos galvanizados. La integración de un sistema fotovoltaico reduce los costos operativos a largo plazo, haciendo del secador una solución sostenible y rentable. El equilibrio entre calidad y costo asegura que el diseño pueda implementarse en zonas rurales con recursos limitados.

##### **Manual de operación:**

Se elaboró un manual de operación detallado que describe claramente el funcionamiento, mantenimiento y cuidado del secador híbrido. Este documento facilita la comprensión para usuarios con poca o ninguna experiencia técnica, asegurando un uso eficiente y seguro del sistema, además de prolongar la vida útil de los componentes.

#### **4.1.2 Recomendaciones**

Tras culminar el desarrollo del proyecto, se plantean las siguientes recomendaciones para futuros trabajos e investigaciones relacionadas:

**1. Optimización del diseño para diferentes tipos de residuos:**

Se recomienda realizar adaptaciones al diseño del secador para procesar otros tipos de residuos agrícolas, ajustando parámetros como temperatura y flujo de aire según las características específicas de cada material.

**2. Automatización del sistema:**

En futuras fases, se podría incorporar un sistema de monitoreo y control automático que permita ajustar en tiempo real la temperatura y el flujo de aire, optimizando aún más el proceso de secado.

**3. Ampliación de la capacidad:**

Evaluar la factibilidad de incrementar la capacidad del secador para atender una mayor cantidad de residuos por lote, considerando las limitaciones estructurales y energéticas del diseño actual.

**4. Estudio del impacto ambiental:**

Realizar un análisis más detallado sobre la reducción de emisiones y el impacto ambiental positivo derivado del uso de este sistema híbrido, comparándolo con métodos tradicionales de secado.

**5. Exploración de fuentes de financiamiento:**

Considerar la implementación de estrategias para reducir costos iniciales, como alianzas con instituciones agrícolas o programas de subsidio, que permitan una mayor adopción del secador en zonas rurales.

**6. Mejoras en los materiales de construcción:**

Investigar el uso de materiales alternativos más económicos o con mayor eficiencia térmica, manteniendo la durabilidad y sostenibilidad del sistema.

**7. Estudio de mantenimiento preventivo:**

Desarrollar un plan más detallado de mantenimiento preventivo basado en los ciclos de operación y desgaste de los componentes, especialmente de los paneles solares, ventiladores y resistencias eléctricas.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Camayo, C. (2020). *Velocidad de secado en tres tipos de secadores solares del Aguaymanto*. Obtenido de [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-33052020000200248](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052020000200248)
- Castillo, J. C. (2021). Aprovechamiento de residuos en cultivos tropicales: una perspectiva para la economía circular en bananeras. *Journal of Tropical Agriculture*.
- Castro, S. y. (2020). Optimización energética en secadores agrícolas: una revisión de tecnologías. *Energy and Agriculture*.
- CHOW, M. (2017). *H. STARS GROUP*. Obtenido de [https://es.hstarschiller.com/dehumidification-type-heat-pump-drying-for-agriculture-and-seafood\\_p112.html](https://es.hstarschiller.com/dehumidification-type-heat-pump-drying-for-agriculture-and-seafood_p112.html)
- Condor, M. (2008). *SECADOR SOLAR HÍBRIDO. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN*. Obtenido de [https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/94277/Documento\\_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/94277/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Frauberth, C. L. (junio de 2020). *Velocidad de secado en tres tipos de secadores solares del Aguaymanto*. Obtenido de [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-33052020000200248](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052020000200248)
- González, A. H. (2019). Gestión de residuos agrícolas en el cultivo de banano. *Revista de Agricultura y Sostenibilidad*.
- Hegde, V. N. (2015). Design, fabrication and performance. *Hegde et al. Energy, Sustainability and Society*, 2-11.
- IEEE Standards Association. (2005). *IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment*. Obtenido de <https://standards.ieee.org/ieee/1100/3055/>
- IEEE STANDARDS ASSOCIATION. (2007). *IEEE Guide for Optimizing the Performance and Life of Lead-Acid Batteries in Remote Hybrid Power Systems*. Obtenido de <https://standards.ieee.org/ieee/1561/3533/>
- IEEE Standards Association. (2022). *Guía IEEE para el uso de la norma IEEE 1547 para la interconexión de recursos de energía distribuida y almacenamiento de energía con sistemas de energía eléctrica*. Obtenido de <https://standards.ieee.org/ieee/1547.9/10875/>
- Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). (2024). Obtenido de Banano, plátano y otras musáceas: <https://www.iniap.gob.ec/banano-platano-y-otras-musaceas/>
- Instituto Nacional de Preinversión. (2014). ATLAS (Bioenergético del Ecuador). ESIN Consultra S.A.

- José Hernández, P. Q. (2017). *SECADO SOLAR DE FRUTAS Y VERDURAS EN QUINTANA ROO, MÉXICO*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/813/81351597001/html/>
- L, B. (2016). *GUÍA PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE ENERGÍA SIN FRONTERAS*.
- Lescot, T. (28 de febrero de 2012). *CARBON FOOTPRINT ANALYSIS IN BANANA*. Obtenido de [https://www.fao.org/fileadmin/templates/banana/documents/Docs\\_Resources\\_2015/Carbon\\_Footprint\\_study\\_on\\_banana\\_Final\\_Oct12.pdf](https://www.fao.org/fileadmin/templates/banana/documents/Docs_Resources_2015/Carbon_Footprint_study_on_banana_Final_Oct12.pdf)
- López, J. G. (2019). Costos y beneficios de la tecnología de secado en la gestión de residuos agrícolas. *Economía Agraria y Medio Ambiente*.
- Manisha, J. (2023). BANANA WASTE TO HEALTH. *VIGYAN VARTA*, 5.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2023). *SIPA*. Obtenido de <https://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/bananos>
- Ramírez, L. P. (2018). Tecnologías de secado con eficiencia energética en procesos agrícolas. *Journal of Renewable Energy*.
- Romero-Sáez, M. (2022). *Los residuos agroindustriales, una oportunidad para la economía circular*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/3442/344271354013/html/>
- Sagastibelza. (2018). *Secado asistido por microondas aplicado en frutas: comparativa frente al secado convencional por aire caliente*. Obtenido de [https://academica-79.e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/29030/TFG\\_Sagastibelza\\_Blanca.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://academica-79.e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/29030/TFG_Sagastibelza_Blanca.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Santos, M. O. (2021). Evaluación del impacto ambiental y económico de secadores en el sector agrícola. *Agricultural Engineering Journal*.
- TORRES, I. (2009). <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/13789/1/D-42942.pdf>.

# **APENDICE**

## Apéndice A

### Manual de Operación del Secador Híbrido de Residuos Agrícolas

#### Introducción

El presente manual de operación está diseñado para guiar al usuario en el uso correcto y eficiente del secador híbrido de residuos agrícolas. Este sistema combina tecnología fotovoltaica, ventilación forzada y resistencias eléctricas para garantizar un proceso de secado óptimo de residuos como el raquis de banano. Siga las instrucciones cuidadosamente para maximizar el rendimiento y prolongar la vida útil del equipo.

#### 1. Descripción del Secador

El secador híbrido está compuesto por los siguientes componentes principales:

1. **Estructura principal:** Fabricada en tool de acero inoxidable, con bandejas perforadas para el paso del aire caliente.
2. **Paneles solares:** Encargados de captar la energía solar y suministrar electricidad al sistema.
3. **Inversor y baterías:** Convierte la energía captada y la almacena para su uso continuo.
4. **Ventiladores:** Generan un flujo constante de aire caliente que pasa a través de las bandejas.
5. **Resistencias eléctricas:** Proveen calor adicional cuando la radiación solar no es suficiente.
6. **Sistema de control:** Permite ajustar la temperatura y monitorear el funcionamiento del equipo.

## **2. Procedimiento de Operación**

### **2.1 Preparación Inicial**

#### **1. Instalación del Secador:**

- Coloque el secador en un área abierta y nivelada, con buena exposición al sol.

- 
- Asegúrese de que los paneles solares estén inclinados adecuadamente (20-30 grados) para captar la máxima irradiación solar.

#### **2. Revisión de Componentes:**

- Verifique que todos los cables eléctricos estén conectados correctamente.
- Asegúrese de que las bandejas estén limpias y bien colocadas.
- Inspeccione el sistema de ventilación y las resistencias eléctricas para confirmar su funcionalidad.

#### **3. Encendido del Sistema:**

- Active el interruptor principal en el sistema de control.
- Espere a que el sistema fotovoltaico y las baterías comiencen a suministrar energía.

### **2.2 Carga de Residuos**

1. Triture los residuos de raquis de banano en trozos pequeños para facilitar el secado.
2. Coloque los residuos en las bandejas de forma uniforme, asegurándose de no sobrecargar cada bandeja (espesor máximo de 1.5 cm por capa).
3. Asegúrese de que las bandejas estén correctamente alineadas para permitir el flujo de aire.

## 2.3 Ajuste de Parámetros

### 1. Temperatura:

- Ajuste la temperatura deseada en el panel de control (recomendada: 60°C).
- Si la temperatura ambiente es alta, puede reducir el uso de las resistencias para ahorrar energía.

### 2. Velocidad del Aire:

- Configure la velocidad de los ventiladores según el tipo de residuo y la cantidad de humedad inicial.
- 

## 2.4 Proceso de Secado

1. El aire caliente generado por las resistencias y los ventiladores circulará a través de las bandejas, eliminando la humedad de los residuos.
2. Los residuos deben revisarse periódicamente (cada 2-3 horas) para asegurar un secado uniforme.
3. Una vez alcanzado el nivel deseado de humedad, apague el sistema y retire los residuos secos.

## 3. Mantenimiento

### 3.1 Limpieza

- Limpie las bandejas después de cada uso para evitar acumulación de residuos y garantizar un flujo de aire eficiente.
- Use un paño húmedo para limpiar las superficies externas y los ventiladores.

### **3. Mantenimiento**

#### **3.1 Limpieza**

- Limpie las bandejas después de cada uso para evitar acumulación de residuos y garantizar un flujo de aire eficiente.
- Use un paño húmedo para limpiar las superficies externas y los ventiladores.

#### **3.2 Revisión de Componentes**

- Inspeccione los cables y conexiones eléctricas semanalmente para detectar posibles daños o desgaste.
- Verifique la eficiencia de los paneles solares cada 3 meses y limpie la superficie con un paño suave.

#### **3.3 Sustitución de Partes**

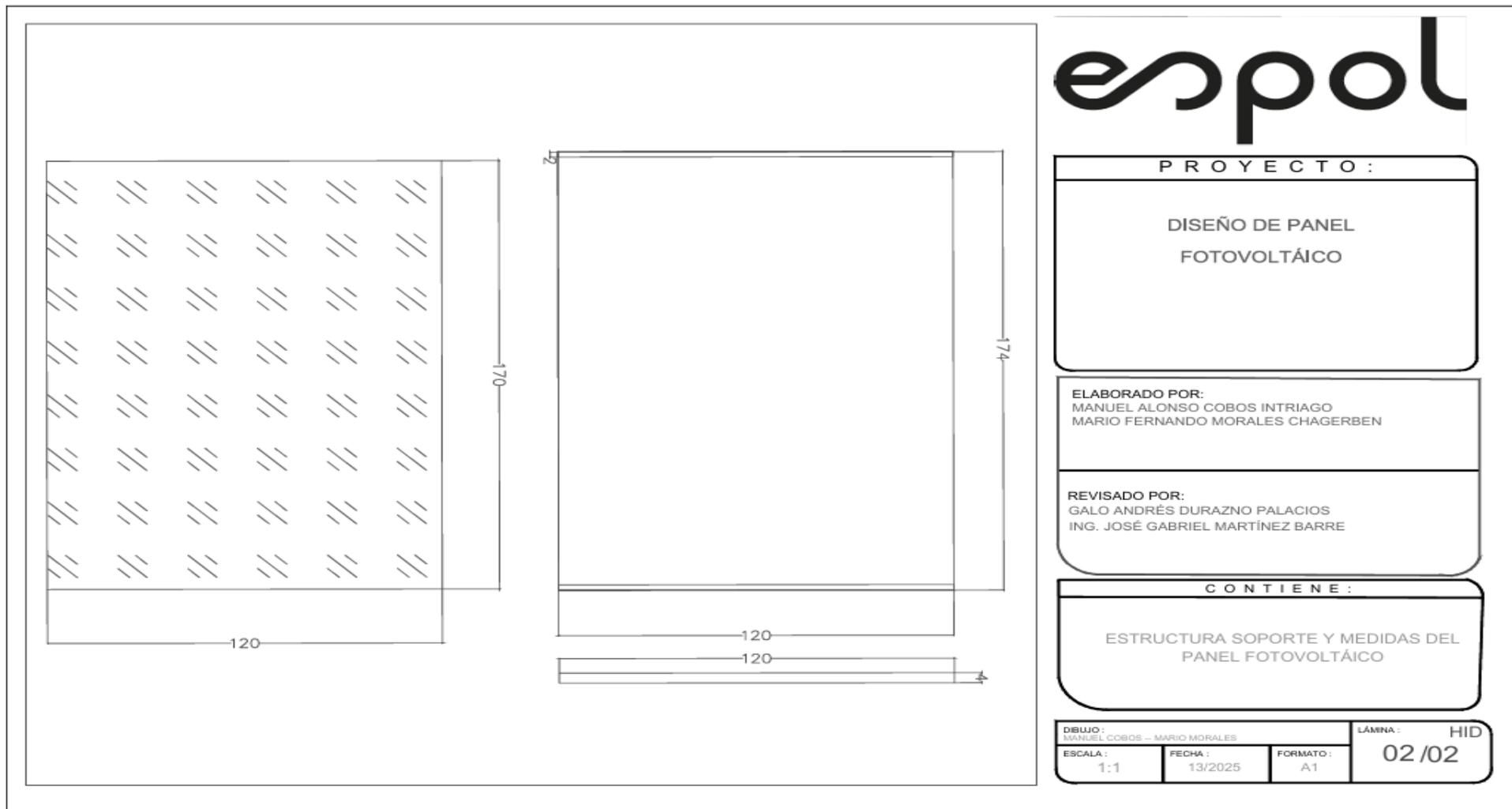
- Cambie las resistencias eléctricas si observa una reducción significativa en el calor generado.
- Reemplace los ventiladores si presentan ruidos inusuales o disminución en la velocidad de flujo.

### **4. Precauciones de Seguridad**

1. Nunca toque los componentes eléctricos mientras el sistema está en funcionamiento.
- 
2. Evite colocar objetos inflamables cerca del secador.
  3. No opere el secador bajo lluvia intensa o condiciones de humedad extrema.
  4. Desconecte el sistema de la fuente de energía antes de realizar cualquier mantenimiento.

## Apéndice B

### Plano 1. Panel fotovoltaico



espol

PROYECTO :

DISEÑO DE PANEL  
FOTOVOLTÁICO

ELABORADO POR:

MANUEL ALONSO COBOS INTRIAGO  
MARIO FERNANDO MORALES CHAGERBEN

REVISADO POR:

GALO ANDRÉS DURAZNO PALACIOS  
ING. JOSÉ GABRIEL MARTÍNEZ BARRE

CONTIENE :

ESTRUCTURA SOPORTE Y MEDIDAS DEL  
PANEL FOTOVOLTÁICO

DEBUIO :  
MANUEL COBOS - MARIO MORALES

LÁMINA : HID

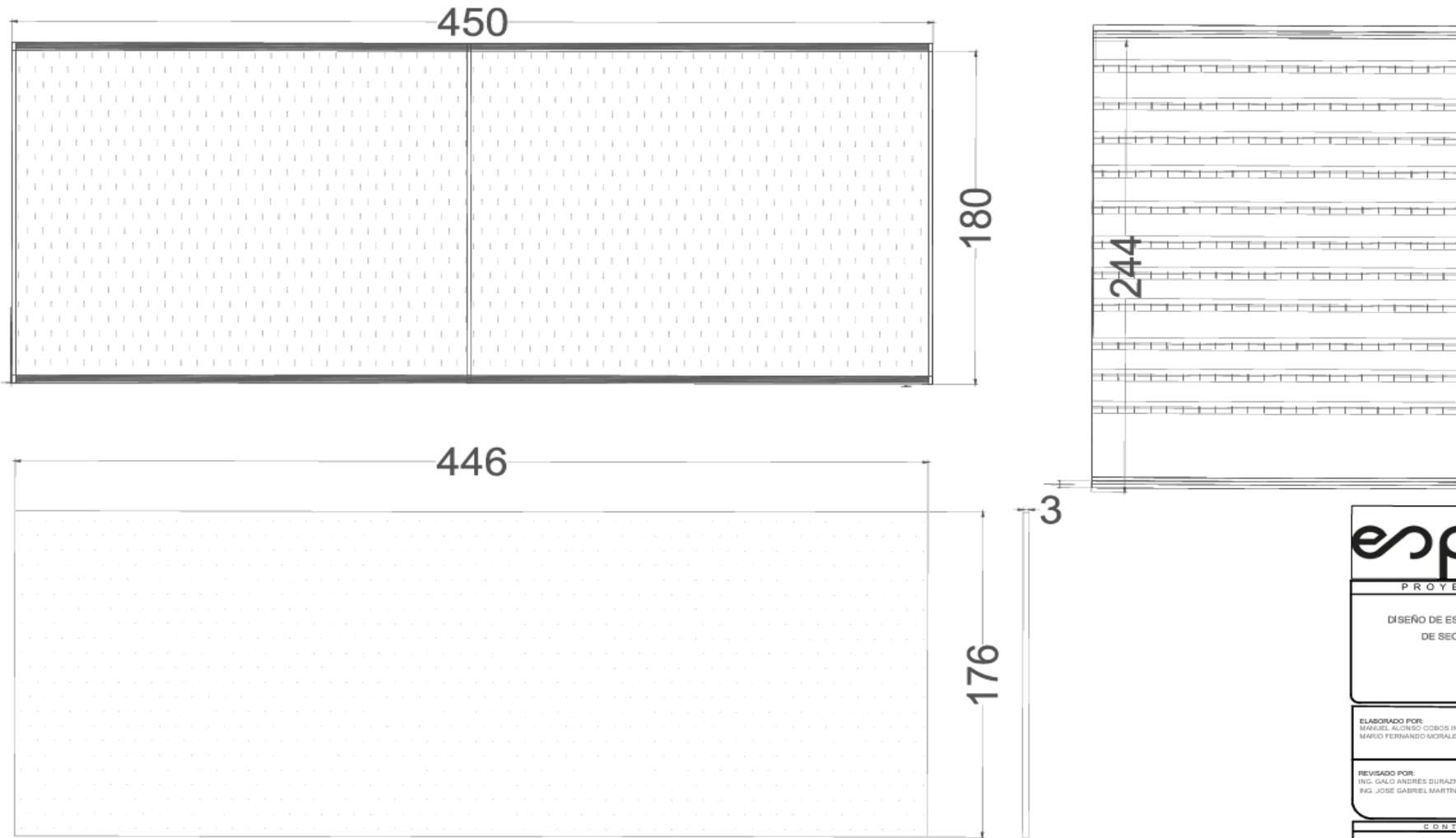
ESCALA :  
1:1

FECHA :  
13/2025

FORMATO :  
A1

02/02

**Plano 2. Estructura secado**



**espol**

PROYECTO:

DISEÑO DE ESTRUCTURA DE SECADO

ELABORADO POR:  
MANUEL ALONSO COBOS INTRIAGO  
MARIO FERNANDO MORALES CHAMBERBEN

REVISADO POR:  
ING. GALO ANDRÉS DURAZNO PALACIOS  
ING. JOSÉ GABRIEL MARTÍNEZ BARRÉ

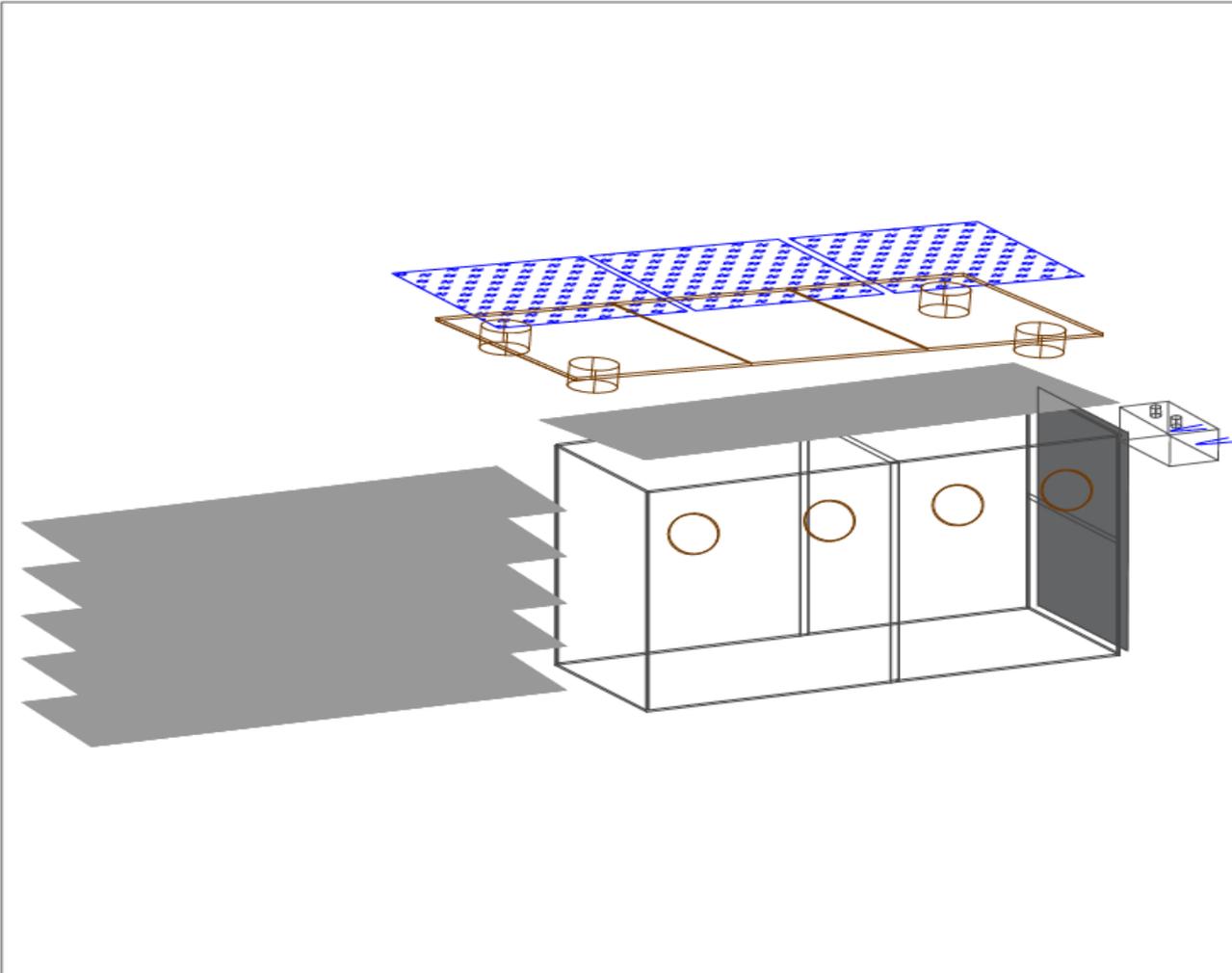
CONTIENE:

BANDEJAS DE SECADO Y ESTRUCTURAS DE SOPORTE DE BANDEJAS

ESCALA	FECHA	PROYECTO	HID
1:1	13/02/2025	A1	01/02

## Apéndice C

### Plano 3. Ensamblado de secador híbrido



**espol**

PROYECTO :

ENSAMBLAJE DE  
SECADOR HÍBRIDO

ELABORADO POR:  
MANUEL ALONSO COBOS INTRIAGO  
MARIO FERNANDO MORALES CHAGERBEN

REVISADO POR:  
GALO ANDRÉS DURAZNO PALACIOS  
ING. JOSÉ GABRIEL MARTÍNEZ BARRE

CONTIENE :

ESTRUCTURA DE SECADO.  
ESTRUCTURA DE BANDEJAS  
ESTRUCTURA DE VENTILADORES  
ESTRUCTURA DE PANEL FOTOVOLTAICO  
PANEL FOTOVOLTAICO  
ESTRUCTURA DE CAJA DE REVISIÓN

DIBUJO : MANUEL COBOS -- MARIO MORALES			LÁMINA : HID
ESCALA : 1:1	FECHA : 13/2025	FORMATO : A1	01/01

## Apéndice D

### Proforma inicial ferretería caracol – distribuidor ADELCA

Machachi, Calle barriga 26  
1724935729001  
Santa Soledad  
ferreteriaacarolec@gmail.com

# Proforma / Factura	Fecha
PRF00000152687	13/01/2025



DESCRIPCION	CANT	PRECIO	DTO	TOTAL
PLANCHA DE ACERO INOXIDABLE 3MM	4	250		1000
TUBO GALVANIZADO CUADRADO 3MM	3	50		150
PANES SOLARES (PEDIDO)	3	120		360
LIBRA ELECTRODOS	2	79		158
RESISTENCIA INDUSTRIAL	1	40		10
BATERIA LITIO MEDIANA	2	90		180
PERNOS ANCLAJE	50	45		45

PROFORMA

<b>TOTAL</b>	<b>\$1933</b>
--------------	---------------