



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
ENERGÍA – PROCESOS Y USO EFICIENTE DE ENERGÍA

PROPUESTA DE SECADOR DE GRANOS Y CAFÉ APOYADO CON ENERGÍA  
SOLAR Y GEOTÉRMICA

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
GARCÍA ÁVILA MIGUEL ÁNGEL

TUTOR PRINCIPAL  
DR. HÉCTOR MIGUEL AVIÑA JIMÉNEZ  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO. ENERO 2024



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

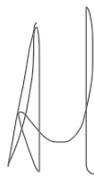
**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. León de los Santos Gabriel  
Secretario: Dr. Silva Rico José Antonio  
1er. Vocal: Dr. Aviña Jiménez Héctor Miguel  
2do. Vocal: Dr. Alarcón Flores Rodrigo  
3er. Vocal: M. en I. Rodiles Amaro Fabiola

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: C.U., Instituto de Ingeniería, UNAM

**TUTOR DE TESIS:**

DR. HÉCTOR MIGUEL AVIÑA JIMÉNEZ



-----  
**FIRMA**

México, Ciudad de México. Enero 2024

## **Resumen**

En el presente trabajo, se propone el diseño de un secador de granos rotatorio que funcionará exclusivamente con fuentes de energía renovable. La energía térmica será generada a través de la utilización de energía geotérmica de baja entalpía, mientras que la energía eléctrica requerida, será suministrada mediante paneles fotovoltaicos. Asimismo, se llevó a cabo un análisis de la viabilidad económica del proyecto con el objetivo de desarrollar un equipo accesible para los productores de granos, el cual también se caracteriza por ser de fácil transporte y contribuirá a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

En la primera parte del trabajo se explica el proceso de producción de granos, algunos de los granos producidos mundialmente y su producción en México, los métodos de secado más utilizados, al igual que los tipos de secadores, y finalmente la producción de café en México y en el mundo.

El segundo capítulo analiza con mayor detalle los secadores rotatorios, las diferentes fuentes de energía térmica para el proceso de secado, la energía geotérmica, una comparación de los beneficios de usar el secador geotérmico con respecto a otros secadores y de realizar el secado mecanizado y no el tradicional, la zona de interés para su posterior instalación, el modelo matemático que se utilizará para conocer la carga térmica requerida y las ecuaciones y consideraciones para conocer el flujo de aire requerido.

El tercer capítulo consiste en el diseño mecánico del secador: volumen del tambor, tamaño del eje, elevadores, el motor y sistema de transmisión necesarios, el diseño en 3D y los planos del equipo.

En el cuarto se muestran los resultados de las cargas térmicas requeridas, el dimensionamiento de los diferentes equipos auxiliares: ventilador, bomba hidráulica, intercambiador de calor, difusor para el movimiento de aire. De igual manera se hace una validación del modelo matemático, un diagrama de flujo para una mejor comprensión del proceso y el dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

En el quinto capítulo se realiza un análisis económico del proyecto con el fin de conocer su viabilidad económica, considerando una vida útil de 10 años.

Se concluyó que el proyecto puede llegar a reducir la humedad de los granos en un periodo de tiempo de 40 horas para una carga máxima del equipo de 200 kg, se puede llegar a considerar aceptable debido a que el secado tradicional puede llegar a tardar un mínimo de 8 días. En cuanto a la rentabilidad, al considerar solamente la producción de un solo tipo de grano, en este caso de café, no se llega a recuperar la inversión, por lo que se propuso un escenario donde el equipo este trabajando todo el año y de esta manera, el equipo tiene un tiempo de retorno de 3 años. Para trabajos posteriores, se deberá comprobar la calidad del secado a las condiciones de operación propuestas y el plantear un modelo de negocio para su implementación en diferentes secados de granos y lograr la viabilidad económica del proyecto.

## Índice general

<b>Resumen.....</b>	<b>I</b>
<b>Índice general .....</b>	<b>II</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>VI</b>
<b>Planteamiento del problema .....</b>	<b>VII</b>
<b>Objetivo Principal.....</b>	<b>VIII</b>
<b><i>Objetivos secundarios .....</i></b>	<b><i>VIII</i></b>
<b>1. Secado de granos.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Granos .....</b>	<b>1</b>
1.1.1. Clasificación de los granos .....	1
1.1.1.1. Café.....	1
1.1.1.2. Arroz.....	2
1.1.1.3. Cebada .....	5
1.1.1.4. Avena.....	7
1.1.1.5. Sorgo.....	9
<b>1.2. Procesos de producción.....</b>	<b>11</b>
1.2.1. Siembra y producción.....	11
1.2.2. Desgrane.....	12
1.2.3. Limpieza .....	12
<b>1.3. Secado.....</b>	<b>13</b>
1.3.1. Tipos de secado .....	14
<b>1.4. Tipos de secadores.....</b>	<b>16</b>
1.4.1. Mecanismos de transferencia.....	17
1.4.2. Tipo de cámara de secado.....	18
<b>1.5. Café en México y mundo.....</b>	<b>21</b>
1.5.1. Arábigo.....	22
1.5.2. Robusta.....	23
<b>1.6. Proceso productivo del café.....</b>	<b>23</b>
1.6.1. Beneficio húmedo.....	23

1.6.2. Beneficio seco.....	24
1.6.3. Beneficio Honey .....	24
<b>1.7. Producción de café en México y el mundo .....</b>	<b>26</b>
1.7.1. Producción en México.....	26
1.7.2. Producción mundial .....	28
<b>1.8. Conclusiones .....</b>	<b>30</b>
<b>2. Secador rotatorio .....</b>	<b>31</b>
<b>2.1. Descripción .....</b>	<b>31</b>
<b>2.2. Tipos de secadores rotatorios.....</b>	<b>34</b>
<b>2.3. Principio de funcionamiento.....</b>	<b>36</b>
<b>2.4. Fuente de energía térmica .....</b>	<b>36</b>
2.4.1. Energía geotérmica.....	37
2.4.1.1. Clasificación.....	38
2.4.1.2. Usos directos .....	38
2.4.1.3. Usos directos en México .....	40
<b>2.5. Comparación entre secadores .....</b>	<b>40</b>
<b>2.6. Zonas de interés .....</b>	<b>42</b>
<b>2.7. Modelos matemáticos.....</b>	<b>45</b>
2.7.1. Calor inicial para el calentamiento del producto .....	45
2.7.2. Calor para la evaporación del agua en los granos.....	46
2.7.3. Calor requerido para elevar la temperatura del aire dentro de la cámara.....	46
2.7.4. Calor necesario para elevar la temperatura del equipo .....	47
2.7.5. Calor cedido por el equipo.....	47
2.7.6. Calor por renovación del aire .....	50
<b>2.8. Flujo de aire por parte del ventilador .....</b>	<b>50</b>
<b>2.9. Conclusiones .....</b>	<b>51</b>
<b>3. Propuesta de diseño mecánico de un secador rotario .....</b>	<b>52</b>
<b>3.1. Consideraciones .....</b>	<b>52</b>
<b>3.2. Volumen del tambor.....</b>	<b>53</b>
<b>3.3. Elevadores.....</b>	<b>55</b>
3.3.1. Análisis estático.....	56

3.3.1.1.	Flexión .....	56
3.3.1.2.	Esfuerzo cortante .....	59
3.3.1.3.	Caso especial .....	60
<b>3.4.</b>	<b><i>Sistema de transmisión</i></b> .....	<b>61</b>
<b>3.5.</b>	<b><i>Eje de transmisión</i></b> .....	<b>64</b>
3.5.1.	Fuerzas en el piñón.....	64
3.5.2.	Diagrama de cuerpo libre.....	65
<b>3.6.</b>	<b><i>Motor</i></b> .....	<b>68</b>
3.6.1.	Eje 69	
3.6.2.	Granos .....	69
3.6.3.	Elevadores .....	69
<b>3.7.</b>	<b><i>Propuesta</i></b> .....	<b>72</b>
<b>3.8.</b>	<b><i>Conclusiones</i></b> .....	<b>74</b>
<b>4.</b>	<b>Equipos auxiliares</b> .....	<b>75</b>
<b>4.1.</b>	<b><i>Zona de estudio</i></b> .....	<b>75</b>
<b>4.2.</b>	<b><i>Cargas térmicas</i></b> .....	<b>76</b>
<b>4.3.</b>	<b><i>Ventilador</i></b> .....	<b>77</b>
<b>4.4.</b>	<b><i>Bombas hidráulicas</i></b> .....	<b>79</b>
<b>4.5.</b>	<b><i>Intercambiador de tubos aletados</i></b> .....	<b>80</b>
<b>4.6.</b>	<b><i>Validación modelo</i></b> .....	<b>83</b>
<b>4.7.</b>	<b><i>Diagramas de flujos</i></b> .....	<b>84</b>
<b>4.8.</b>	<b><i>Paneles solares</i></b> .....	<b>87</b>
4.8.1.	Panel solar .....	87
4.8.2.	Baterías .....	90
4.8.3.	Inversor .....	92
4.8.4.	Propuesta.....	92
<b>4.9.</b>	<b><i>Recapitulación</i></b> .....	<b>95</b>
<b>4.10.</b>	<b><i>Conclusiones</i></b> .....	<b>97</b>
<b>5.</b>	<b>Análisis económico</b> .....	<b>98</b>
<b>5.1.</b>	<b><i>Costos e inversiones del proyecto</i></b> .....	<b>98</b>
<b>5.2.</b>	<b><i>Inversiones del proyecto</i></b> .....	<b>98</b>

<b>5.3.</b>	<b><i>Plan de producción</i></b> .....	<b>99</b>
5.3.1.	Ingresos .....	100
<b>5.4.</b>	<b><i>Costos del proyecto</i></b> .....	<b>102</b>
5.4.1.	Insumos agrícolas.....	102
5.4.2.	Mano de obra.....	102
5.4.3.	Suministro energético .....	102
5.4.4.	Depreciación y amortizaciones.....	103
5.4.5.	Costos totales .....	103
<b>5.5.</b>	<b><i>Flujo de caja libre</i></b> .....	<b>105</b>
<b>5.6.</b>	<b><i>Comparación con sistema convencional</i></b> .....	<b>109</b>
5.6.1.	Conexión a la red eléctrica nacional .....	109
5.6.2.	Conexión a una planta de diesel .....	110
5.6.3.	Comparación.....	111
<b>5.7.</b>	<b><i>Análisis de riesgo</i></b> .....	<b>111</b>
5.7.1.	Producción de café seco .....	112
5.7.2.	Precio de venta .....	113
5.7.3.	Costo del agua geotérmica .....	114
5.7.4.	Tasa de cambio del dólar.....	115
<b>5.8.</b>	<b><i>Conclusiones</i></b> .....	<b>117</b>
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>118</b>
	<b>Referencias</b> .....	<b>120</b>
	<b>Confidenciales</b> .....	<b>125</b>

## **Introducción**

México se encuentra entre las 15 economías mundiales más grandes, la segunda más grande en América Latina y como la séptima potencia agrícola mundial. El servicio de información agroalimentaria y pesquera (SIAP, 2022) registra que los diez principales productos con mayor superficie sembrada son el maíz grano, frijol, sorgo, caña de azúcar, café, cereza, avena y maíz forrajero, trigo, alfalfa y cebada. Los granos son semillas pequeñas cosechadas para el consumo humano o animal o mediante su transformación en otro tipo de alimentos.

El proceso de producción de granos consiste en el desarrollo de las plantas, recolección de los frutos, fermentación, lavado, secado y tostado, de manera general. La mayoría de los procesos se realizan a temperatura ambiente, excepto los dos últimos donde las temperaturas requeridas son de 50 °C a 60 °C y de 170 °C a 240 °C respectivamente y/o mediante la utilización de equipos auxiliares como el uso de intercambiadores de calor y quemadores. Para cubrir la demanda térmica demandada, los productores recurren al uso de métodos tradicionales, como el secado mediante el uso de energía solar y/o quema de biomasa o combustibles fósiles, mientras que la demanda energética se puede cubrir mediante la conexión a la red eléctrica nacional, uso de plantas auxiliares o energía fotovoltaica. El problema surge al querer cubrir la demanda térmica, debido a la intermitencia de la energía solar, la cual dependerá de las condiciones climáticas de la zona, necesitando tiempos prolongados, más de 8 días para llegar a las condiciones de humedad requeridas. En el caso de la quema de combustibles, son las emisiones de contaminantes que llegan a contribuir con el efecto invernadero y cambio climático las que representan un problema.

Para resolver estas necesidades, una opción es el uso de energías renovables para cubrir los requerimientos energéticos. México es un país con alto potencial geotérmico y solar, ya que cuenta con una capacidad de instalación de 40,000 MWt (Gutiérrez Negrín, Canchola Félix, Romo Jones, & Quijano León, 2020) y 25,000 MWe (José, 2019) respectivamente. Por lo tanto, se puede asumir que, mediante el uso de estas fuentes de energía, se puede cumplir con la demanda energética del proceso de secado de granos para su principal instalación en regiones productoras de granos con potencial geotérmico y reducir el impacto ambiental.

Lo que se busca en este trabajo es proponer la metodología para la construcción de un equipo de secado de granos, el cual aprovecha la energía térmica mediante el uso de energía geotérmica de baja entalpía, y el uso de la solar fotovoltaica para el suministro de la energía eléctrica. Las limitantes de este trabajo son que será un trabajo teórico, el dimensionamiento se considera para el secado de café, se asume una distribución de temperatura homogénea dentro del secador, así como que el proyecto sea suministrado eléctricamente mediante energía solar fotovoltaica únicamente, y sólo se enfocará al proceso de secado, debido al rango de temperaturas que se requieren y al recurso geotérmico que se planea utilizar.

Este trabajo analizará en su primer capítulo la producción de granos en el país. En el segundo se describirá las características físicas y operacionales de los secadores rotatorios. En el tercero y cuarto se propondrá el diseño mecánico del secador y el dimensionamiento los equipos auxiliares: ventilador, intercambiador de calor, motor, bomba y paneles fotovoltaicos. En el quinto se establecerá los costos de producción donde se compara un sistema convencional y el propuesto.



## **Planteamiento del problema**

La seguridad alimentaria en México es una preocupación constante. Según datos del Banco Mundial, en 2020, aproximadamente el 21% de la población mexicana vivía por debajo del umbral de pobreza, lo que a menudo se traduce en dificultades para acceder a alimentos nutritivos de manera constante.

El proceso de secado de granos tiene un impacto significativo en la seguridad alimentaria, ya que, en caso de realizarse de manera inadecuada, puede llevar a pérdidas de cultivos de hasta el 20% debido a problemas de calidad y almacenamiento. Esto es especialmente relevante en un país donde el maíz y los frijoles son alimentos básicos para la dieta de la población. Además, México es vulnerable a eventos climáticos extremos que pueden afectar la producción de alimentos, lo que acentúa la necesidad de encontrar soluciones sostenibles para preservar la calidad de los productos agrícolas.

En México, la energía geotérmica es una fuente potencialmente abundante y sostenible. El país cuenta con regiones geotérmicas activas, lugares como Los Azufres en Michoacán y Cerro Prieto en Baja California, donde ya se aprovecha para la generación eléctrica, pero como se verá más adelante, hay una mayor cantidad de regiones que pueden llegar a ser aprovechadas para usos directos, como el caso del secado de granos. Además, la radiación solar en México es alta en la mayoría del territorio, lo que hace que la energía solar fotovoltaica sea una opción viable para abordar los problemas de suministro energético en áreas rurales.

La propuesta de utilizar una solución sostenible que combine la energía geotérmica y solar fotovoltaica en el proceso de secado de granos en México podría no solo reducir las pérdidas de cultivos, sino también contribuir significativamente a mejorar la seguridad alimentaria en el país ya que se pueden llegar a almacenar por una mayor cantidad de tiempo y disponer de estos alimentos en temporadas de baja o nula producción, al mismo tiempo que promueve la adopción de fuentes de energía limpias y sostenibles.



## **Objetivo Principal**

Diseño y fabricación de un secador de granos tipo rotatorio.

### Objetivos secundarios

- Recopilación de la producción de café en México.
- Recopilación de datos técnicos de los secadores rotatorios
- Diseño mecánico del secador
- Diseño térmico y dimensionamiento de los equipos auxiliares
- Análisis financiero del proyecto

## 1. Secado de granos

En este capítulo se explicará qué son los granos, cuál es la producción nacional e internacional, el proceso de producción y los diferentes tipos de secadores y las diferentes técnicas de acondicionamiento.

### 1.1. Granos

En el sector agrícola, existe una diferencia entre grano y semilla. Para este trabajo, la semilla es aquella que se utiliza para la siembra y reproducción de la especie vegetal, mientras que los granos son aquellos que se destinan como alimento o materia prima para la industria. Este trabajo se enfocará en el diseño de equipo para procesar diferentes granos. Para el dimensionamiento del equipo, se usará al café como referencia.



Figura 1- 1 Diferentes tipos de granos (Cook for Your Life Staff, 2020)

#### 1.1.1. Clasificación de los granos

Una manera de clasificar a los granos es por el uso que se le da. Pueden ser básicos, los cuales se destinan como alimentos imprescindibles en la dieta de las personas, la cual varía con cada país. Para México son el maíz, frijol, trigo y arroz.

También están los industriales, los cuales se refieren al grano para su industrialización o procesamiento, principalmente como un alimento no esencial. Algunos ejemplos son el café, la cebada, la avena, el sorgo y el arroz.

Mientras que la última clasificación es la de los oleaginosos son aquellos granos que se les puede extraer aceite, ya sea para consumo humano o uso industrial. Algunos granos de esta clasificación son el girasol, cártamo, soya y canola.

A continuación, se mencionarán algunos granos industriales.

##### 1.1.1.1. Café

Es un cultivo tradicional, básico y estratégico, el cual tiene una antigüedad de más de 200 años en nuestro país. Es una fuente generadora de empleos y divisas en México, ya que se emplea un aproximado de 500,000 productores nacionales con una producción anual de 953 mil toneladas (SIAP, 2021), llegando a exportar un aproximado del 35.1% de la producción nacional (CEDRSAA, 2019), llegando incluso a generar ingresos por exportaciones de más de 15 billones de dólares anuales y generando empleos a más de 20 millones de familias en el mundo (Figueroa Hernández, Pérez Soto, & Godínez Montoya, 2015).

Su uso principal es para el consumo humano, como bebida, aunque se puede encontrar como ingrediente en comidas, principalmente en postres.



*Figura 1- 2 Granos de café (Yutu Cuii, 2019)*

#### 1.1.1.2. Arroz

Pertenece a la familia de gramíneas o plantas de espigas, cuyo origen se remonta a la edad media en Asia, al sur de China. Entre las especies más destacadas están la caña de azúcar, el trigo, el arroz, el maíz, el sorgo, la cebada, la avena, el centeno o el bambú. Entre las características principales, la más importante es el bajo número de calorías que tiene, cantidad moderada de carbohidratos y el aporte de azúcares que otorga. Debido a su bajo costo y principales propiedades nutricionales, convierten a este producto en un alimento fundamental con respecto a la seguridad alimentaria de varias regiones como África, América y Asia, además de ser la principal fuente de ingresos de familias agricultoras.

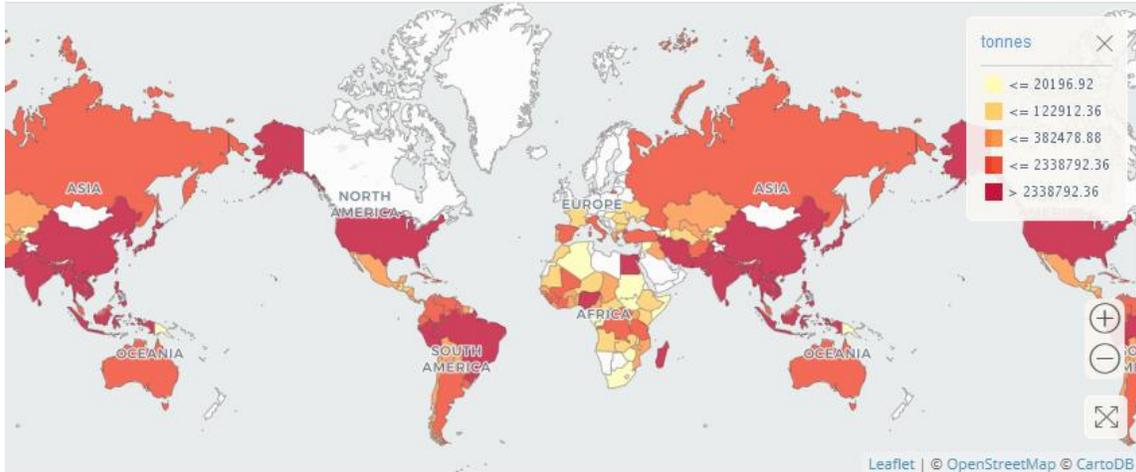


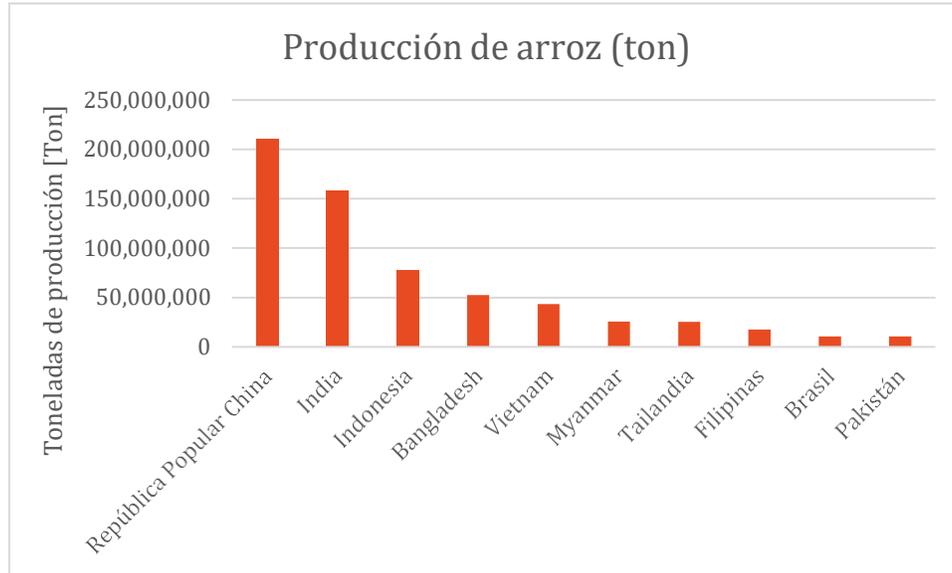
Figura 1- 3 Zonas de producción de arroz (Anónimo, 2020)

Su principal zona de producción es el Sureste de Asia con China, India, Indonesia, Bangladesh y Vietnam los 5 principales productores, llegando a producir aproximadamente, tres cuartas partes de la producción mundial. América es el segundo continente en importancia con respecto a la producción mundial, con una participación del 6% del total mundial. El principal productor de la región es Brasil siendo el noveno productor, le sigue Estados Unidos de América como el onceavo productor, llegando a producir un equivalente al 2.8% del total mundial. Otros países productores son Perú, Colombia, Ecuador, Argentina, Uruguay con producciones mayores a 1,000,000 toneladas. Éstos últimos países llegan a generar el 1.34% de la producción mundial.

Actualmente, existen unas 80,000 variedades diferentes, según lo reportado por los estudios y registros del Instituto Internacional de Investigaciones del Arroz (IRRI). Las variedades más conocidas son los arroces semiblanqueados o blanqueados, los partidos, los paddy, y los descascarillados o pardos.

Los principales países productores se muestran en la siguiente tabla:

Gráfico 1-1 Principales países productores de arroz (Atlas Big, 2020)



Con respecto a la producción mundial, México se encuentra en el puesto 59 con una producción de 250,000 toneladas al año. El principal estado productor es Campeche con 72,000 toneladas, le siguen Nayarit con 52,800; Michoacán con 34,000; Veracruz con 26,700 y Colima 19,250. La producción nacional se muestra en la siguiente tabla:

Gráfico 1-2 Estados productores de arroz (SIAP, 2023)



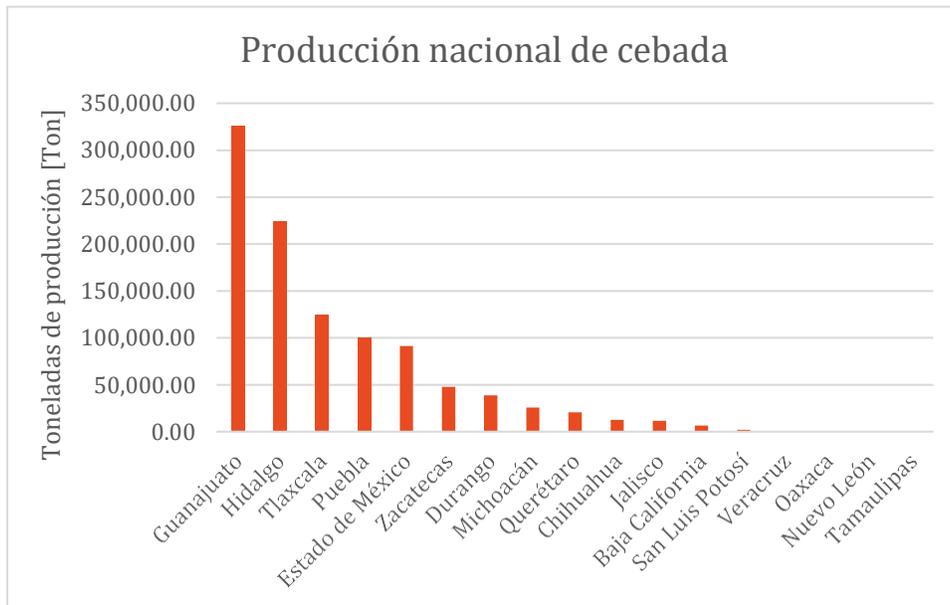


Gráfico 1-3 Países productores de cebada (Ibíd)



En cuanto a la producción de cebada en grano, México llega a producir 1,032,000 toneladas, llega a representar menos al 1% de la producción mundial y ocupar el puesto 26. Los 5 principales estados productores son: Guanajuato, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y Estado de México.

Gráfico 1-4 Estados productores de cebada (SIAP, 2023)



A pesar de no tener un impacto importante en la producción de grano de cebada, México es el primer país exportador de cerveza debido a que el 73% de los insumos son nacionales (Martínez, 2023), llegando a cubrir el 21.32% de las exportaciones a nivel mundial. En el país se llegan a producir aproximadamente 864 mil toneladas

anuales (Ibid), de los cuales el 93% se destina a la industria cervecera (SAGARPA, 2021).



*Figura 1- 5 Granos de cebada (Cook for Your Life Staff, 2021)*

#### 1.1.1.4. Avena

La avena es una planta herbácea anual, perteneciente a la familia de las gramíneas. Posee raíces más abundantes y profundas que las de los demás cereales. Sus tallos son gruesos y rectos y pueden variar de medio metro hasta metro y medio. Aunque se cosecha principalmente en regiones mediterráneas y al sur de Asia, sus orígenes son en la región norte de Europa. Se cosecha de dos formas.



*Figura 1- 6 Países productores de avena (Atlas Big, 2020)*

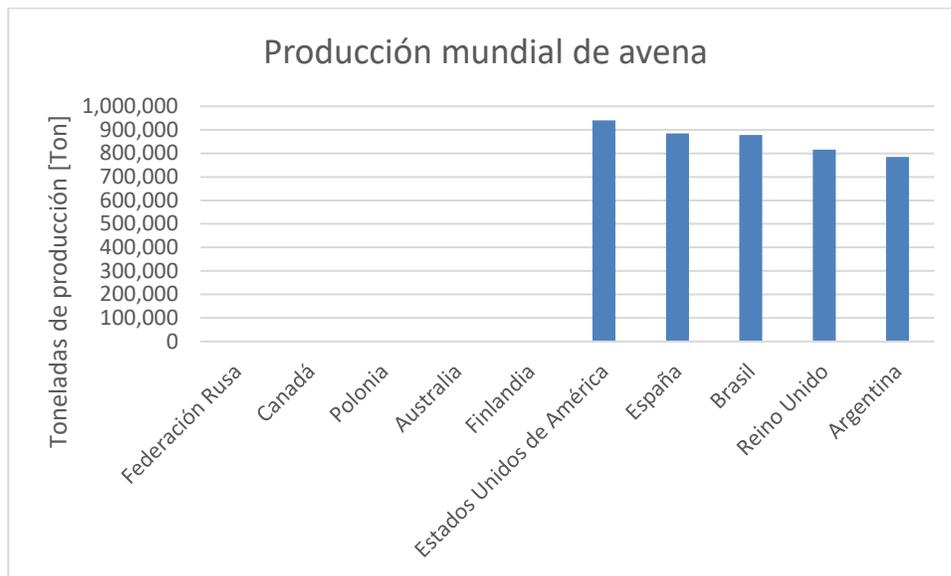
Las principales formas de cosecha son: como grano cuyo destino es el consumo humano, mientras que la segunda forma es como forraje, sirve de alimento para los animales. Su importancia radica en sus proteínas de alto valor biológico, grasas y un gran número de vitaminas y minerales, al igual por su contenido de fibra.



Figura 1- 7 Granos de avena (Tiendas punto, 2023)

Los 5 principales productores mundiales de avena son: Rusia con 4,761,000 toneladas al año; Canadá con 3,018,000; Polonia con 1,360,000; Australia con 1,300,000; y Finlandia con 1,037,000. llegando a representar aproximadamente el 50% de la producción mundial. En la tabla se muestran los 10 principales países productores.

Gráfico 1-5 Principales países productores de avena (Atlas Big, 2020)



En cuanto a México, la producción a nivel nacional es de 101,070 toneladas anuales, llegando a ocupar el lugar 29 a nivel mundial. Los 5 principales estados productores son Chihuahua, Estado de México, Tlaxcala, Zacatecas y Baja California. En la tabla se muestran los estados productores de avena en el país.

Gráfico 1-6 Estados productores de avena (SIAP, 2023)



#### 1.1.1.5. Sorgo

Cereal similar al maíz tanto en apariencia como en aporte nutricional, pero con un menor aporte calórico, y con un aporte mayor de proteínas. Al igual que la avena, se cosecha el sorgo como grano y forraje. Sus principales usos son como alimento de ganado y en la preparación de harinas. En la industria de extracción se emplea para la obtención de almidón, alcohol y glucosa; y en la producción de solventes como el alcohol, acetona y butanol. La producción nacional es de 4.7 millones de toneladas.



Figura 1- 8 Granos de sorgo (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2018)

A nivel mundial, los 5 principales productores son: Nigeria 7,000,000 toneladas anuales; Estados Unidos de América 5,989,000; Sudán 5,000,000; México 4,850,000; Etiopía 4,500,000; e India con 4,400,000; llega a representar un 44% de la producción mundial. En la tabla se muestran los 10 principales países productores.



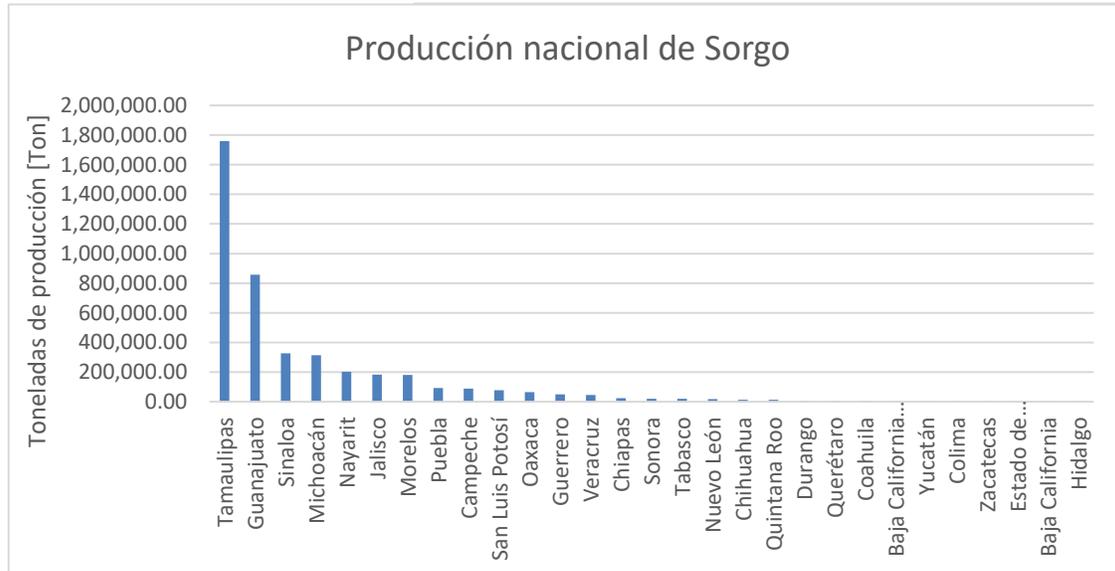
Figura 1- 9 Países productores de sorgo (Dr Schär, 2020)

Gráfico 1-7 Principales países productores (ProduccionAgricolaMundial.com, 2014)



El país, como se mencionó anteriormente, es el cuarto productor, llegando a representar el 8% de la producción mundial. A nivel nacional, los 5 principales estados productores son Tamaulipas, Guanajuato, Sinaloa, Michoacán y Nayarit. En la tabla se muestran los estados productores de sorgo.

Gráfico 1-8 Estados productores de sorgo (SIAP, 2023)



## 1.2. Procesos de producción

La producción de granos consiste desde la siembra hasta el almacenaje para su distribución. Dependiendo del tipo de grano a cosechar, tendrá alguna etapa extra, pero de manera general, el proceso es el siguiente:

### 1.2.1. Siembra y producción

Consiste en colocar las semillas en la tierra y cosechar los productos. Esta etapa consiste en:

- Preparación del suelo: dar las condiciones necesarias al suelo para que la semilla germine y se desarrolle la planta.
- Siembra: seleccionar la variedad a cosechar, tomando en cuenta las diferentes características de cada cultivo y las condiciones del suelo y clima de la zona.
- Raleo: eliminación de las plantas que no lograron germinar. Esto con el fin de no afectar en el crecimiento de las demás plantas.
- Riego y fertilización: brindar las cantidades de agua y nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas.

- Control de malezas y plagas: consiste en mantener los cultivos libres de plantas ajenas a los cultivos y de impedir la propagación de insectos y enfermedades en las plantas.
- Cosecha: etapa final donde se recolectan las cosechas y se preparan para el siguiente proceso.



Figura 1- 10 Esquema del proceso de cultivo de los granos (Vectorka, 2022)

### 1.2.2. Desgrane

Al llegar a la etapa de maduración, los granos tienen la mayor cantidad de materia seca, por lo que conviene cosecharlos en ese instante para tener el mayor rendimiento posible. El problema que surge es debido a que los altos contenidos de humedad limitan la cosecha, deben mantenerse en el exterior para que disminuya ésta y sea posible su almacenamiento.

Para estos casos, se recomienda cosechar los granos húmedos lo más pronto posible y ponerlos a secar, esto con el fin de obtener una mayor cantidad de materia seca. En la mayoría de los países latinoamericanos, la humedad que deben tener los granos para su correcto almacenamiento es del 11 al 13% (FAO, 2020).



Figura 1- 11 Ejemplificación del proceso de desgrane (Wil.Amaya, 2022)

### 1.2.3. Limpieza

Trata de la eliminación total o parcial de impurezas. Una de las principales razones para

quitar las impurezas es debido a que estas son higroscópicas, humedecen el grano y propicia el desarrollo de microorganismos y enfermedades. Otra razón es el daño que pueden causar a los equipos de secado. Consiste en el uso de ventiladores, tamices y aspiradores



*Figura 1- 12 Ejemplificación del proceso de limpieza (Cubillos, Merizalde, & Correa, 2019)*

### 1.3. Secado

El secado es una de las etapas más importantes en la cadena de producción de los granos. Como se mencionó anteriormente, la humedad afecta tanto en la calidad como en la propagación de enfermedades.

Se puede definir al secado como: “el método universal de acondicionar los granos por medio de la eliminación del agua hasta un nivel que permita su equilibrio con el aire ambiente, de tal forma que preserve su aspecto, sus características de alimentos, su calidad nutritiva y la viabilidad de la semilla” (DEGESCH De Mexico, 2017). El principal beneficio del secado es el tiempo de almacenamiento que se puede mantener los granos, en la tabla se muestra el tiempo de almacenamiento con respecto a la temperatura ambiente y la humedad contenida en ellos.

Tabla 1-1 Tiempos de almacenamiento con respecto a la temperatura y humedad del grano (Anónimo, 2022)

Temperatura de almacenamiento [°C]	10	15	20	25	30
Humedad del grano [%]	Tiempo de almacenamiento [días]				
14	1314	634	368	218	129
16	339	164	95	56	33
20	64	31	19	11	7



Figura 1- 13 Apariencia del grano A) antes del secado; B) después del secado (Ly, 2016)

### 1.3.1. Tipos de secado

Hay dos formas generales para el secado de granos:

- Tradicional: este método consiste en colocar camas de granos en el piso y aprovechar la radiación solar. Es el más utilizado, debido a que no requiere de ningún equipo especializado. Para lograr que el grano pierda entre el 43 y 48 % en promedio de cualquier tipo de grano, el proceso puede tardar entre 8 y 15 días promedio.

De los principales inconvenientes es que requiere de condiciones específicas en el ambiente, ya que, al estar expuesto al ambiente, es propenso a verse afectado por contaminantes, requiere de mano de obra extra para estar moviendo los granos y tener un secado uniforme, y deben resguardarse en caso de lluvia y por las noches. Además, para sus usos industriales, no se podría cubrir debido a las altas demandas y al tiempo que requieren las empresas con el fin de evitar tiempos muertos en la producción.



Figura 1- 14 Ejemplificación del secado natural (Ibid)

- Artificial: este método utiliza una fuente externa de calor para aumentar la temperatura del aire entre 45 hasta 120 °C (FAO, 2020). Consiste de un ventilador que se encarga de mover el aire entre los granos, una cámara donde se colocan los granos y un quemador el cual se encarga de aumentar la temperatura del aire. Las ventajas es que permite el sacado de grandes volúmenes y en un menor tiempo en comparación con el tradicional, además de tener un secado más uniforme. De los inconvenientes que tiene este método es el uso de combustibles fósiles, ya que generan gases de efecto invernadero, depende del precio del combustible y requiere de personal capacitado para el uso de equipos más especializado.

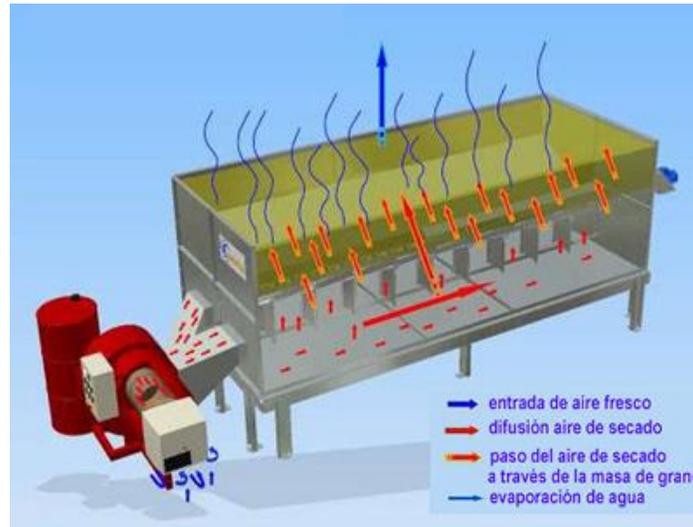


Figura 1- 15 Esquema de un secador mecanizado (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2018)

#### 1.4. Tipos de secadores

Los secadores por lo general se pueden clasificar dependiendo del mecanismo de transferencia de calor y del tipo de recipiente de secado. De manera general, estos equipos tienen los siguientes componentes:

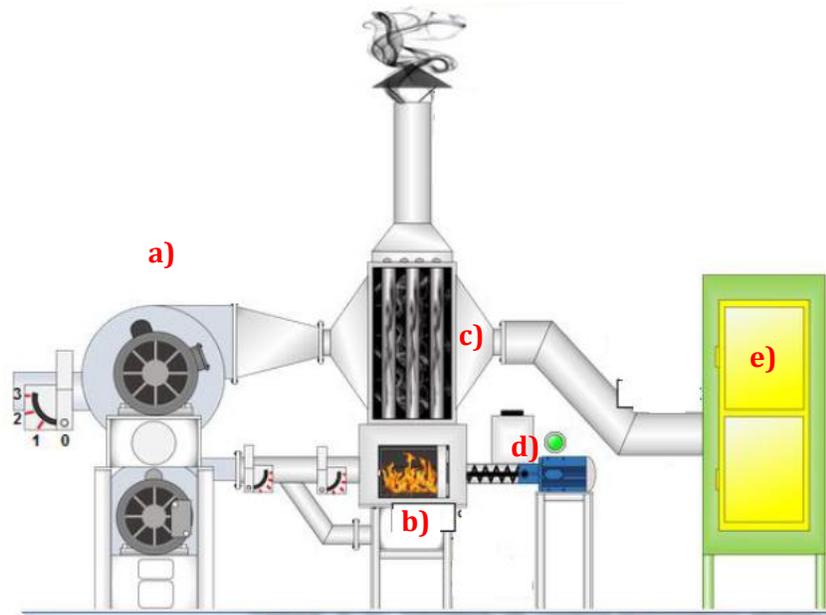


Figura 1- 16 Partes de un secador: a) entrada de aire, b) fuente de energía térmica, c) intercambiador de calor, d) sistema de alimentación de la fuente térmica, e) cámara de secado (CUEES, 2021)



La función de cada uno de los componentes es la siguiente:

- Ventilador: toma el aire ambiente y lo direcciona al secador.
- Fuente de energía térmica: parte del equipo donde se obtiene la energía necesaria para el secado.
- Intercambiador de calor: sección donde se realiza el intercambio de energía entre la fuente y el aire de trabajo.
- Sistema de alimentación de la fuente térmica: equipo necesario para el suministro de energía térmica
- Cámara de secado: sección donde se ingresa el material húmedo y se realiza el secado.

#### 1.4.1. Mecanismos de transferencia

Los mecanismos que se utilizan para el secado de manera general son:

- Conducción: también conocidos como secadores indirectos, ya que se calienta el recipiente y éste le transfiere la energía térmica al producto. Como se mencionó, el calor se suministra a través de superficies colocadas dentro del secador que ayudan con soportar, confinar y/o transportar los sólidos. La humedad retirada de estos últimos es removida por vacío o por una corriente de aire.
- Convección: o secadores directos, ya que la transferencia se hace mediante un gas que está en contacto con el material a secar, y de igual manera, el gas que se usa como mecanismo de transferencia de calor es el que se encarga de absorber la humedad retirada de los productos. El gas más utilizado es el aire, pero también se llegan a utilizar gases inertes como el nitrógeno para sólidos húmedos con solventes orgánicos, o vapor sobrecalentado.
- Radiación: se utilizan diversas fuentes de radiación electromagnética con longitudes de onda que van desde el espectro solar y las microondas. Un inconveniente de la radiación solar es que apenas penetra la capa externa del producto y solo es una parte de la radiación solar total en el ambiente. La radiación infrarroja se usa principalmente para secar recubrimientos y láminas delgadas. Debido a los altos costos operativos y de capital, este mecanismo es utilizado principalmente para ciertos sectores industriales como puede ser en la industria textil o para eliminar la humedad final que se encuentra en pequeñas cantidades como puede ser el caso de secado de papel.

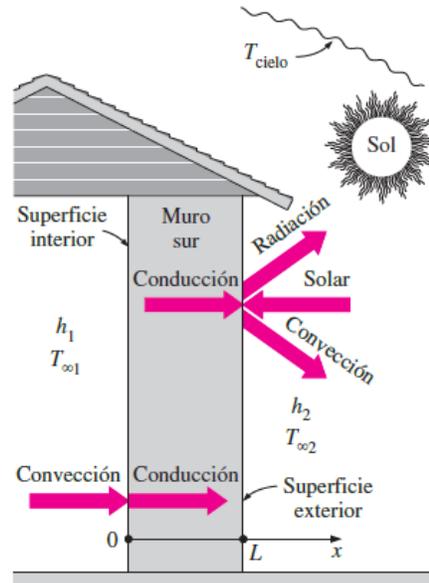


Figura 1- 17 Esquema de los mecanismos de transferencia de calor (Cengel & Ghajar, 2011)

#### 1.4.2. Tipo de cámara de secado

La cámara de secado es la ubicación donde se ingresa el material húmedo y se realiza la extracción de la humedad. La clasificación de las diferentes cámaras de secado es:

- Indirectos: como se había mencionado antes, son aquellos donde se calienta la superficie y ésta le transfiere energía al producto. Las temperaturas empleadas son desde  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $300^{\circ}\text{C}$ . Para poder remover la humedad se requiere de un flujo de gas o por medio de vacío. Se suele emplear para alimentos, productos farmacéuticos, biomateriales como madera, cerámica y materiales lodosos como arcilla, turba, etc. El consumo típico de energía está en el rango de 2800 a 3600 kJ/kg de agua evaporada en comparación con los secadores directos, que consumen entre 4000 y 600 kJ/kg de agua evaporada. Algunos modelos son los de charola, rotatorios indirectos, de vacío por lotes rotativos y de tipo agitador.

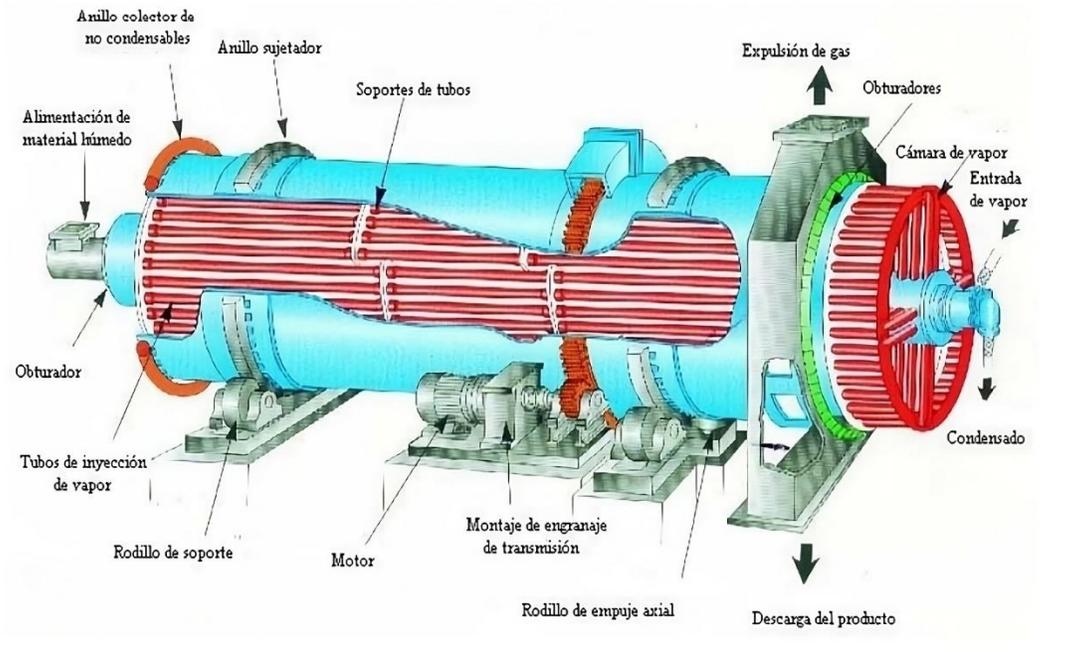


Figura 1- 18 Esquema de un secador de tubos indirectos (Riveros, 2010)

- Tambor giratorio: consisten en carcasas cilíndricas que giran sobre cojinetes y que se encuentran generalmente un poco inclinados. El material húmedo se introduce por el extremo superior y se retira por el extremo inferior. Es utilizado principalmente para materiales pastosos y granulados.

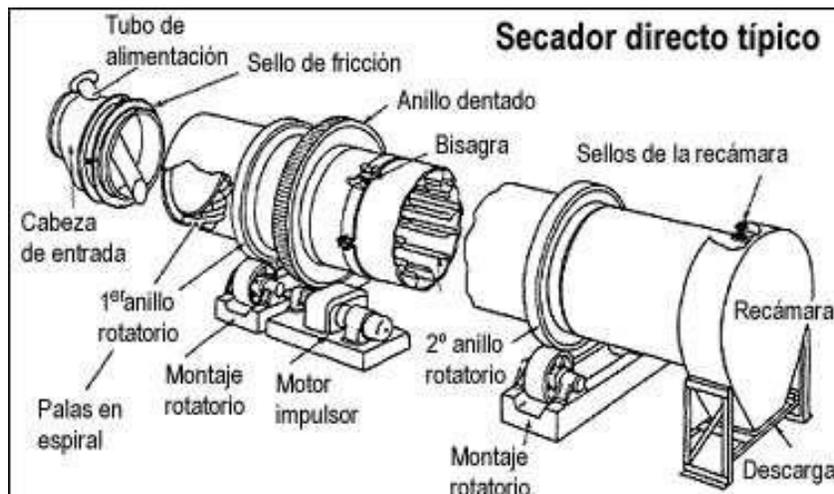


Figura 1- 19 Esquema de un secador de tambor giratorio (Sper Bernallván & Torres Córdova, 2009)

- Lecho fluidizado: es un equipo que se utiliza para reducir el contenido de humedad de productos químicos, carbohidratos, alimentos, biomateriales, bebidas, cerámica, productos farmacéuticos en polvo o aglomerados, etc. Para el secado de polvos en el rango de tamaño de partícula de 50 a 200  $\mu$ m. El principio de funcionamiento del secador de lecho fluidizado comienza cuando se introduce aire caliente a alta presión a través de un lecho perforado de partículas sólidas

húmedas. Los materiales que se van a secar se colocan en el recipiente de secado, que luego se coloca dentro del secador de lecho fluido. Los sólidos húmedos se levantan desde la parte inferior y se suspenden en una corriente de aire. Algunas unidades poseen bases vibratorias para facilitar el movimiento del producto. En el conducto de salida del aire se incorporan separadores de polvo, normalmente ciclones, para recoger los sólidos finos. Los secaderos pueden operar a presión superior o inferior a la atmosférica.

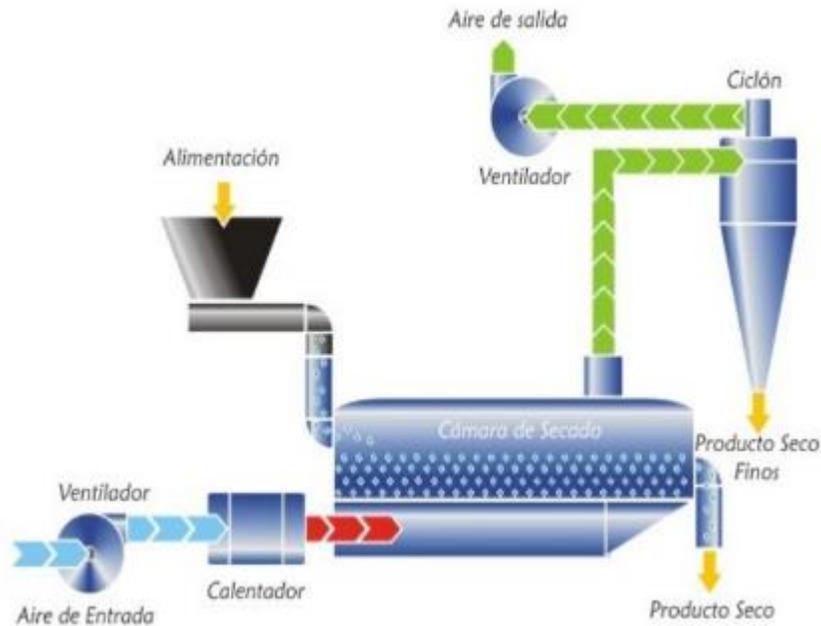


Figura 1- 20 Esquema de un secador de lecho fluidizado (Viera, 2013)

- **Spray:** consiste en la transformación de una suspensión o disolución en un material seco particulado, mediante la atomización del primero en un medio caliente y seco. El secado por atomización de gotas es utilizado en muchas aplicaciones industriales de los sectores cerámico, químico, alimentario, farmacéutico. El concentrado se atomiza mediante un atomizador rotativo o boquillas de alta presión. El aire de secado entra a gran velocidad a través del dispersor de aire para garantizar el mezclado óptimo con el concentrado atomizado. La evaporación es instantánea y tiene lugar cuando las pequeñas gotas pasan por la cámara de secado. El polvo procedente de la cámara de secado se recoge en un sistema de transporte y enfriamiento neumático. El aire de salida pasa por un filtro para separar las partículas restantes.

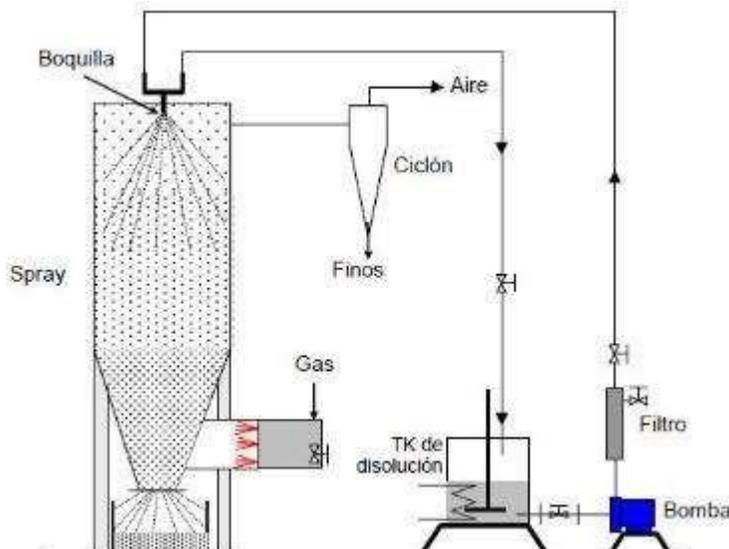


Figura 1- 21 Esquema de un secador de tipo spray (Velasco, Villaflor, Flores, & Bisonard, 2014)

En la siguiente tabla, se muestra el tipo de secador que se debe utilizar con respecto al tipo de materia prima a secar, que en este caso se considera sólidos libres.

Tabla 1-2 Comparación de los productos que se pueden secar dependiendo del tipo de secador (Mujumdar, 2006)

Tipo de secador	Polvos	Granos	Cristal frágil	Pellets	Fibras
Cinta transportadora		X	X	X	X
Tipo flash	X	X			X
Lecho fluidizado	X	X		X	
Rotatorio	X	X		X	X
Bandeja	X	X	X	X	X

### 1.5. Café en México y mundo

El café pertenece a la familia de las rubiáceas, también se les conoce como rubia, galio blanco o familia del café. Otras plantas que pertenecen a esta familia son la chinchona y gambir.

Es una planta de clima cálido que requiere de ambientes húmedos. La altitud recomendable es de 1,000 a 1,300 M.S.N.M. Necesita de suelos ricos en nutrientes y húmedos, pero que sean capaces de drenar el exceso de las precipitaciones. Se cultiva en regiones frías con temperaturas de 13 a 26 °C.

Los beneficios del consumo del café son:

- Tiene efectos diuréticos y activa el sistema digestivo.
- Minimiza el riesgo de enfermedades cardíacas, la diabetes y previene el cáncer.

- Activa el sistema nervioso y neuromuscular.
- Disminuye el dolor.
- Estimula el metabolismo
- Reduce el apetito

Las principales especies que se cultivan tanto en el país, como a nivel mundial son el arábigo y el robusto.

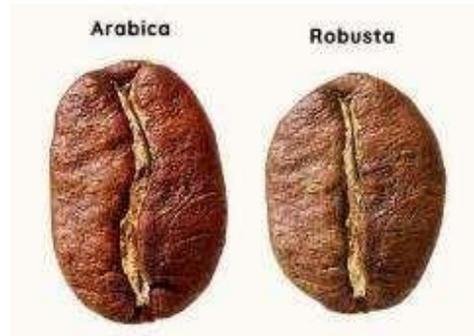


Figura 1- 22 Tipos de cafés cosechados en México (Café la Nacional, 2020)

#### 1.5.1. Arábigo

Es la principal variedad cultivada, ya que abarca un 70% de la producción global. La altura de la planta es entre 9 y 12 metros y se cultiva en zonas húmedas y climas cálidos a una altitud de 500 a 2,400 metros. Cada arbusto puede llegar a producir un kilo anualmente.

Los principales países productores de esta variedad son: África del Este, Colombia, Estados Unidos, Brasil, Vietnam, Guatemala, Costa Rica y Honduras.

Las principales características son:



- El nivel de concentración de cafeína está alrededor del 1.7%
- Tiene un sabor dulce
- Es más delicado en cuanto a plagas, enfermedades y condiciones climáticas.
- La forma del grano es ovalado y verdoso

#### 1.5.2. Robusta

Es la segunda variedad más producida, llegando a estar cerca del 30%. La altura del arbusto es de 10 metros. A diferencia del café arábigo, resiste mejor a las condiciones ambientales, llegando a prosperar en zonas donde el arábigo no puede desarrollarse, ya que es capaz de cultivarse a altitudes iguales al nivel del mar hasta 800 metros y se da en regiones con temperaturas de 18 a 36 °C.

Las principales características son:

- La concentración de cafeína es del 2.2 al 2.7%
- Mayor resistencia a la roya, enfermedad que afecta a las plantas de café
- Porcentaje de lípidos es del 30%, la mitad del contenido en el arábigo
- Sabor más amargo
- Requiere de menos cuidados
- La forma del grano es redondo y amarillento

#### 1.6. Proceso productivo del café

Como se describió anteriormente, el proceso productivo general para la producción de granos es la siembra, cosecha, el desgrane, secado y almacenaje. Para el caso de los granos de café hay tres procesos intermedios que se encuentran entre la recolección y el secado.

Se les conoce como beneficio húmedo, seco y honey.

##### 1.6.1. Beneficio húmedo

Para este proceso se requiere de agua, por lo que zonas con poco recurso hídrico no se realiza. Este proceso brinda ciertos sabores frutales.

Como primera etapa se realiza el despulpado, consiste en que los granos seleccionados son trasladados mediante un flujo de agua hasta una máquina que se encarga de separar la parte carnosa del fruto y sólo quede una película gelatinosa llamado mucílago, dejando el grano listo para un tratamiento posterior conocido como fermentación.

La fermentación consiste en colocar los granos en depósitos con agua por un tiempo aproximado de 16 horas, aunque este valor varía con la región. Este proceso consiste en remover el mucílago gracias a que las levaduras y bacterias contenidas en el mucílago mediante sus enzimas naturales se oxidan parcialmente los azúcares y producen energía (ATP), ácido láctico, ácido acético, dióxido de carbono, etanol y otros alcoholes y sustancias olorosas como aldehídos, cetonas y ésteres. Los productos obtenidos en esta etapa pueden ser aprovechados como biocombustibles o ser aprovechados como suplemento alimenticio.

Como última fase, se realiza el lavado, donde se remueve la miel o los restos que quedan en el grano. Se realiza de manera manual, mediante la inmersión de éstos y su transporte por medio de canales conocidos como canales de correteo; o mediante lavado mecanizado empleando bombas de sólidos y canales, buscando generar un flujo laminar que permita clasificar con mayor facilidad los granos. Los granos se juntan al final de los canales para ser secados a continuación.

#### 1.6.2. Beneficio seco

La principal característica de este beneficio es que no se realiza el despulpado, fermentación y lavado y se llevan directamente a secar los granos cuando son recolectados.

El motivo para realizar este beneficio, además de ser aprovechado en zonas con poco recurso hídrico, es dar sabores más dulces a los granos utilizando el azúcar que se encuentra en el mucílago.

#### 1.6.3. Beneficio Honey

Éste es similar al beneficio húmedo, difieren en que no se realiza el fermentado, pero si el despulpado y es llevado directamente al secado. Se obtienen sabores intermedios, haciendo la comparación con los otros beneficios, los granos son dulces y ácidos a la vez. El nivel de dulzura depende de la cantidad de mucílago con la que se queda el grano después del despulpado.

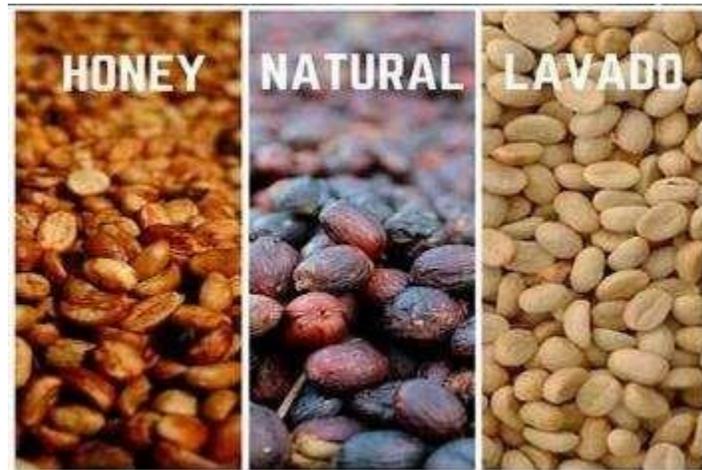


Figura 1- 23 Diferentes beneficios del café (Decafe, 2019)

Los pasos posteriores en la producción de café, una vez realizado el secado, son el trillado donde a los granos se les quita la cáscara, de manera manual o mecanizada, y se obtiene el café “verde”.

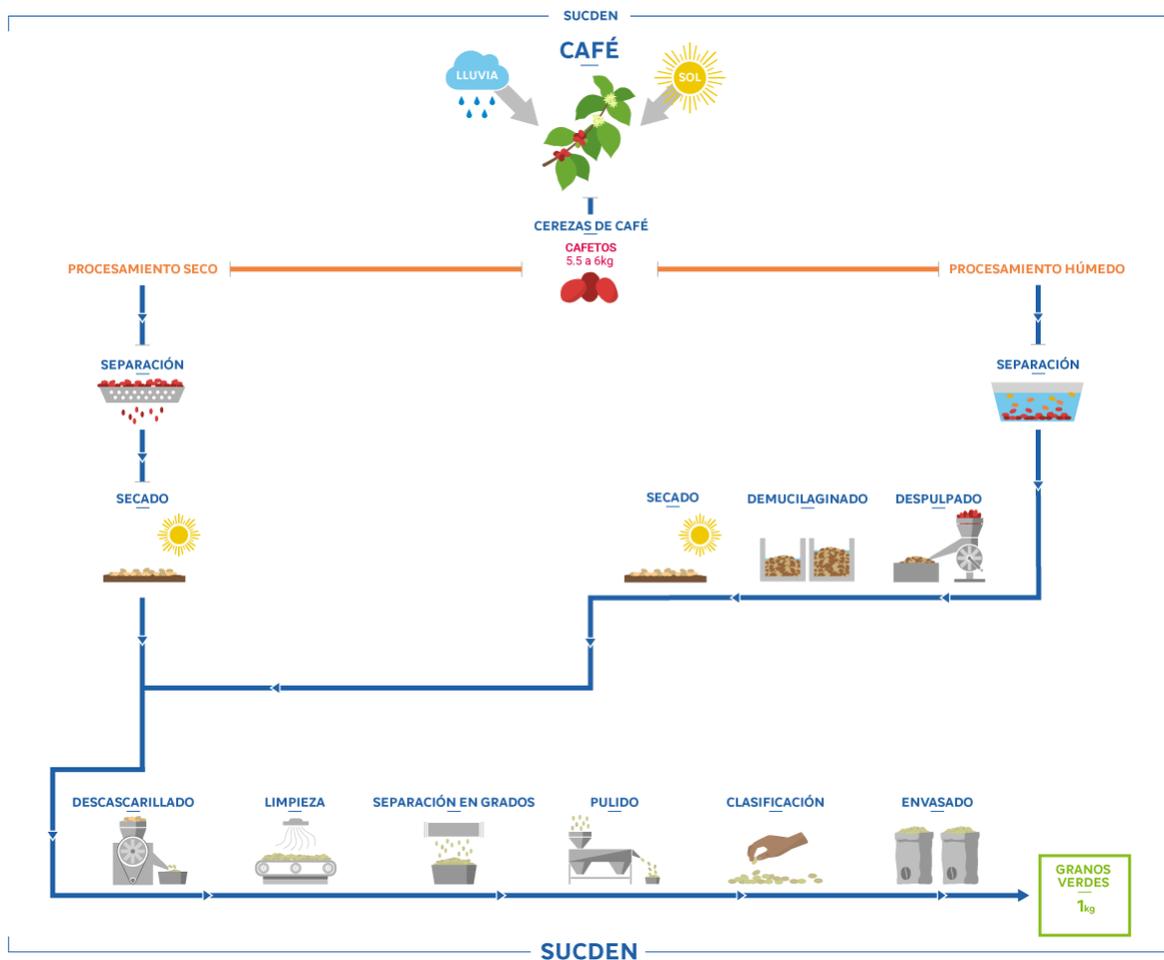


Figura 1- 24 Esquema del proceso de producción del café (Sucden, 2018)

Después se procede al almacenamiento en costales, los cuales son comercializados. El objetivo es mantener la calidad y proteger los granos de las condiciones ambientales. La forma más común es en costales de 46 kilogramos, conocidos como 1 quintal.

El último paso es el tostado, donde se exponen los granos a temperaturas entre 120 y 200 °C por tiempo que pueden ser desde 12 a 25 minutos, dependiendo de la capacidad de la máquina y de la experiencia del productor. Se debe tener cuidado en esta etapa ya que se puede ver afectado el peso, sabor, color y generación de dióxido de carbono.

## 1.7. Producción de café en México y el mundo

### 1.7.1. Producción en México

Es considerado un cultivo estratégico por su capacidad de generar empleos y divisas, además de la conservación de la biodiversidad. Llegando a ser el 11avo productor a nivel mundial, con una producción de 953 mil toneladas en el 2020 (SIAP), siendo el arábigo el de mayor producción, con un 96%.

El 94% de la producción nacional se concentra en 5 estados: Chiapas con el 41.3%, Veracruz el 24.4%, Puebla con 15.8%, Oaxaca con 8.2% y Guerrero con el 4.5% (CEDRSSA, 2018).



Figura 1- 25 Estados productores de café (SAGARPA, 2017)

Actualmente se satisface el total de los requerimientos nacionales, y se ha tenido un aumento en la producción, aunque no se ha llegado a producir más de 1 millón de toneladas, como en años anteriores. La principal razón es el cambio climático, generando un aumento en la temperatura y disminución de las precipitaciones. De igual manera, la roya, enfermedad que afecta principalmente a la producción de granos, ha venido afectando a los cafetaleros desde el 2012. La producción de café ha ido en aumento desde el 2017 con un aumento casi constante del 8%, como se muestra en el Gráfico 1, siendo la excepción el 2020 debido a la pandemia por SARS-COVID.

Gráfico 1-9 Producción anual de café en México (CEDRSSA, 2018)



La participación de México en el comercio internacional del grano ha repuntado en los dos últimos años debido a la recuperación del cultivo (Ibíd). Hasta el octavo mes de 2021, el volumen importado ha sido el más bajo de los últimos cinco años: 15 mil 988 toneladas al año. En tanto que las exportaciones cifran un récord de 71 mil 400 toneladas en el periodo referido.

Del volumen que México ofertó al exterior en agosto, el 3% se utiliza para la exportación, siendo los principales países compradores Estados Unidos, con más del 50% de las exportaciones, y el resto a países del bloque europeo, Japón, Cuba y Canadá. Durante 2021, más de 45 países han adquirido el agroindustrial mexicano, de los cuales 13 han realizado compras constantes durante el año, el resto solo al menos un mes en el periodo (Ibíd). Los precios internacionales del café han registrado una tendencia alcista, consecuencia de dos aspectos: condiciones climáticas adversas inhiben la oferta exportable de los principales países exportadores y el incremento de la transportación marítima. Ambos aspectos impactan para una volatilidad récord de los precios al contado y de futuros del grano.



Figura 1- 26 Comparación de las importaciones y exportaciones de café (Ibid)

En la tabla anterior, se muestra una comparativa de como se ha tenido un aumento en las exportaciones y una disminución en las importaciones.

### 1.7.2. Producción mundial

De acuerdo a la Asociación Internacional de café (ICO por sus siglas en inglés) en su último informe del mercado de café (septiembre 2023), mencionan que la producción mundial de café cayó un 1,4 % a 168,5 millones de sacos en el año cafetero 2021/22 debido a problemas climáticos y la producción fuera del bienio en varios lugares clave. Se proyecta una recuperación del 1,7 % a 171,3 millones de sacos en 2022/23, a pesar de los desafíos, como los altos costos de fertilizantes y condiciones climáticas adversas.

Las perspectivas para los granos de Arábica son positivas, anticipándose un aumento del 4,6 % a 98,6 millones de sacos en 2022/23, tras una disminución del 7,2 % en el año anterior. La producción de América del Sur, a pesar de la caída del 7,6 % en 2021/22, se espera que se recupere un 6,2 % a 82,4 millones de sacos en 2022/23, siendo la región líder en producción de café a nivel mundial.

El consumo mundial de café aumentó un 4,2 % a 175,6 millones de sacos en 2021/22, impulsado por la liberación de la demanda acumulada durante la pandemia de la COVID-19 y el crecimiento económico global del 6,0 % en 2021. Se proyecta un aumento continuo en 2022/23, aunque a una tasa de desaceleración del 1,7 %, alcanzando los 178,5 millones de sacos. Se espera que la desaceleración provenga principalmente de países no productores, y se prevé una disminución significativa en el consumo de café en Europa, con tasas de crecimiento bajando al 0,1 % en 2022/23, frente al 6,0 % registrado en 2021/22 (International Coffe Organization, 2023).



Figura 1- 27 Principales productores de café en el mundo (Entre barras, gráficos y mapas, 2019)

El promedio mensual del precio indicativo compuesto de la OIC disminuyó un 19% y pasó de 190 centavos en septiembre de 2021 a 153.13 en septiembre de 2023. Las principales razones en la disminución del precio son debido a las fluctuaciones en las divisas, disminución de la oferta, condiciones meteorológicas (International Coffe Organization, 2023).

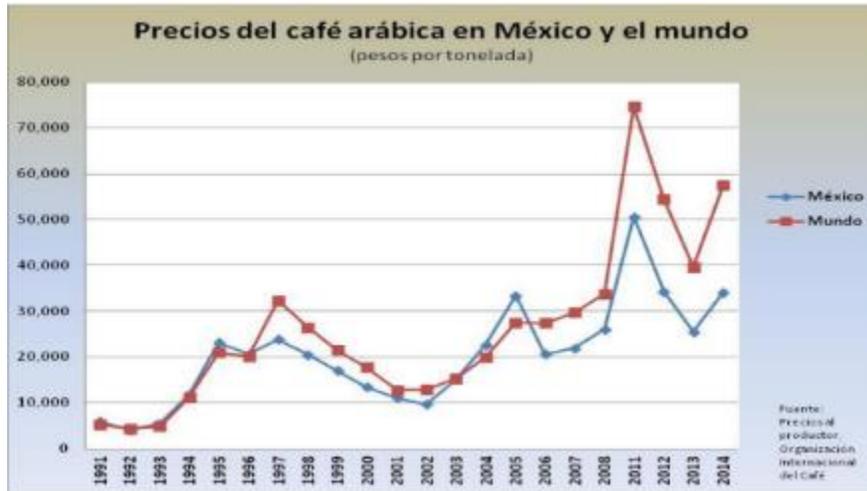


Figura 1- 28 Evolución del precio del café (CEDRSSA, 2019)



## 1.8. Conclusiones

De lo que se abordó en este capítulo, se estableció que:

- Se estableció una diferencia de los granos y semillas y que este trabajo se basará en que los granos son utilizados para un proceso mientras que las semillas se utilizan para uso directo.
- Existe un amplio mercado para el proceso de secado de granos en el país, el cual puede llegar a ser beneficioso ya que se puede llegar a tener una producción anual al plantear un programa de secado de diferentes productos.
- Se analizó que, para la selección de equipos, se dependerá del producto a cosechar, por lo que, para granos, se puede usar cualquiera de los equipos expuestos en este capítulo como el rotatorio, el de bandeja o el de lecho fluidizado.
- La producción de café es una de las más importantes del país, por la cantidad que se exporta, se debe buscar la manera de mejorar los procesos para tener una mayor producción.

## 2. Secador rotatorio

En este capítulo se describe el principio de funcionamiento, los tipos, ventajas y desventajas, campos de aplicación, normas de diseño y los modelos térmicos necesarios para su diseño.

### 2.1. Descripción

El secador rotatorio es uno de los equipos más utilizados para el secado de materiales, principalmente para materiales granulares con partículas de 10 mm o más grandes, que no son demasiado frágiles o sensibles al calor o causan otros problemas de manejo de sólidos son secados con este tipo de equipo.

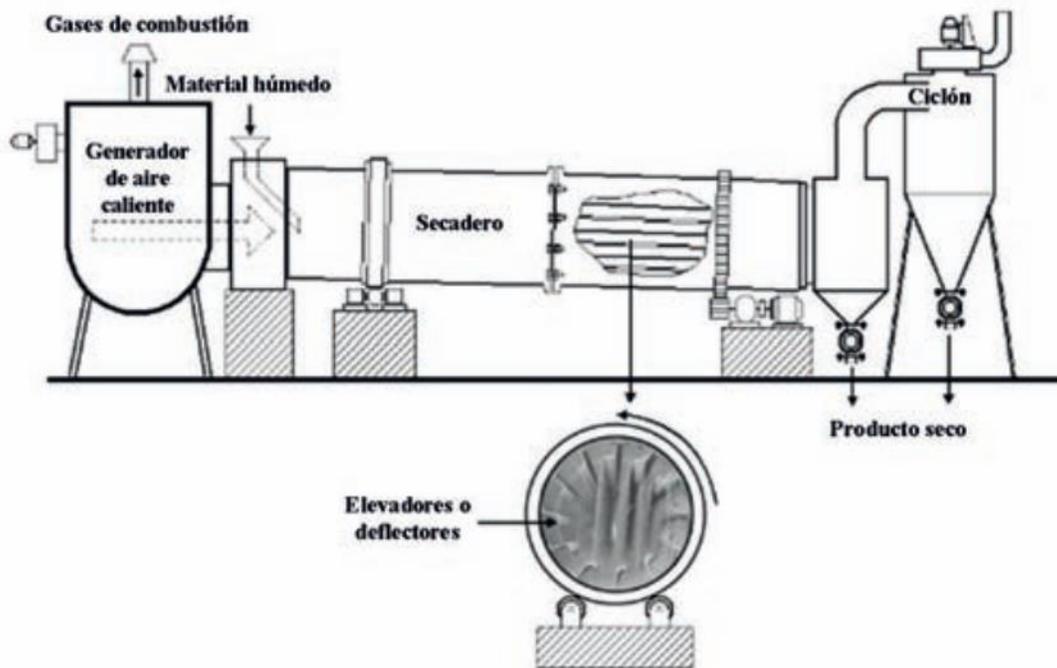


Figura 2 - 1 Esquema de un secador rotatorio (Zalazar Oliva, 2023)

Este tipo de secadores consta de los siguientes componentes:

- **Carcasa:** Es la parte más grande del secador donde se colocan los granos a secar. Dependiendo de la configuración, transfiere la energía de manera directa o indirecta. Puede estar fabricada con una variedad de materiales, como acero al carbono, acero inoxidable, hastelloy, inconel y otras aleaciones. Esta también se puede personalizar de diversas formas según las necesidades del material y del proceso. Por ejemplo, el grosor de la carcasa se puede ajustar en situaciones donde la retención de calor dentro de la secadora es crucial. Además, la carcasa puede estar aislada para retener el calor. Suelen estar rectos o con una inclinación de 5 ° para una recolección y movimiento del material seco. Sus medidas típicas varían de 0.3 a 5 metros de

diámetro y de 5 a 90 metros de longitud.

- **Cámara de combustión:** En esta cámara ocurre la reacción de combustión real y se dirige el flujo de aire al secador rotatorio. Las cámaras de combustión pueden integrarse en secadores de corriente paralela (donde el flujo de aire va en la misma dirección que el flujo de material) o en secadores de contracorriente, con el objetivo de evitar el contacto directo del material con la llama del quemador. Existe una variedad de cámaras de combustión, que pueden tener una carcasa simple o doble, revestimiento refractario y pueden estar en ángulo. También pueden acomodar una amplia variedad de quemadores.

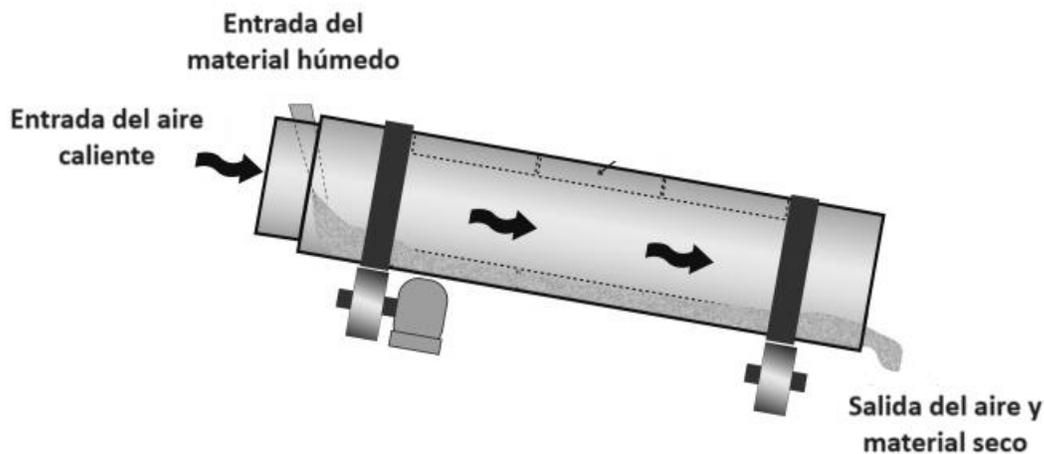


Figura 2 - 2 Secador de corriente paralela (Kerr, 2019)

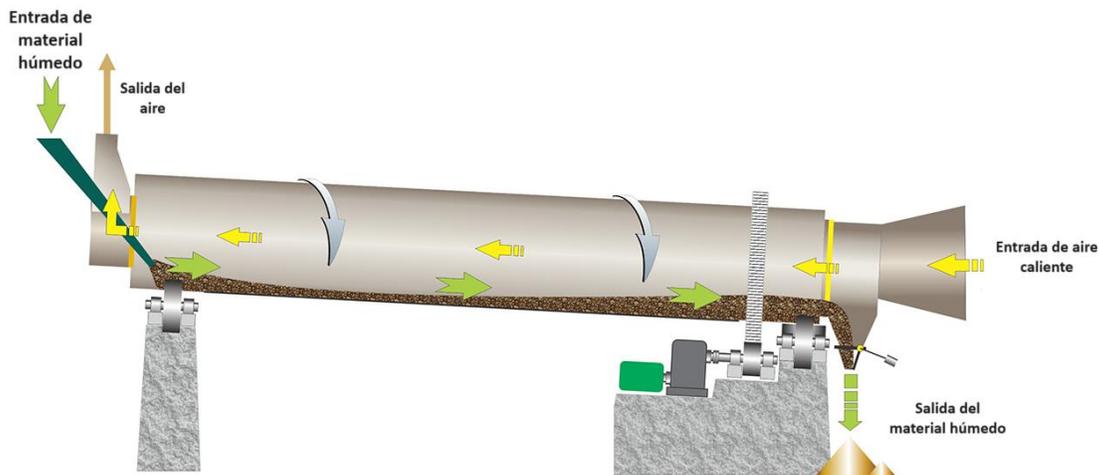


Figura 2 - 3 Secador de contracorriente (GEA, 2023)

- **Quemador:** Es la parte principal del secador, ya que suministra la energía para secar los granos. Se diseña de acuerdo con las especificaciones de cada combustible.
- **Sistema de alimentación:** Esta sección alimenta los granos húmedos al secador. Usualmente se utiliza una tolva o un tornillo de alimentación. El conducto de alimentación está diseñado específicamente para ser robusto, resistente al desgaste

y para reducir la acumulación de material.

- Sistema de transmisión: Es el encargado de transferir la potencia del motor a la carcasa. Las principales configuraciones son mediante cadena y rueda dentada para motores menores a 75 hp, o con un sistema de engranajes y piñón para motores mayores a 75 hp.
- Anillos de montaje: Agregan soporte estructural al tambor y sirven como punto para absorber la presión. El anillo de conducción se desplaza sobre el rodillo de apoyo.
- Elevadores: Son láminas de metal presentes en los secadores. Su función principal es recoger el material y dejarlo caer por gravedad, permitiéndole pasar por la corriente de aire caliente, mejorando así la transferencia térmica. El diseño de estos varía en función de las características de los sólidos.

Se muestran diferentes geometrías de álabes

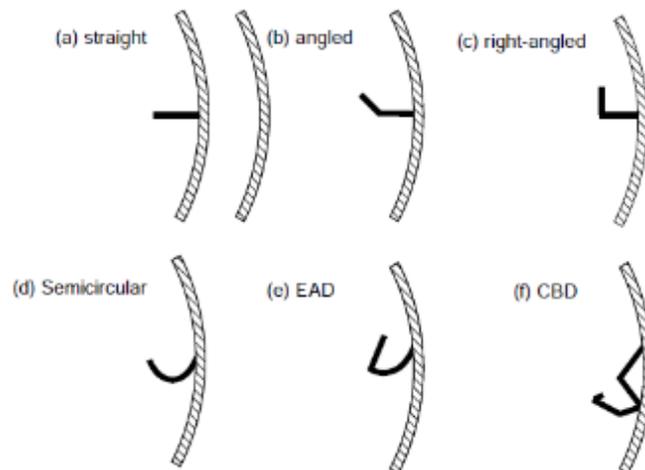


Figura 2- 4 Diferentes diseños de elevadores (Mujumdar, 2006)

Las geometrías A, B, C y D de la Figura 2.3 son comúnmente empleados en secadores rotatorios en cascada. El primero, el segmento A, resulta especialmente adecuado para el tratamiento de sólidos pegajosos en la parte más húmeda del secador. En contraste, el segmento D, con su forma semicircular (Purcell, 1979), se presume que se forma de manera más eficiente en comparación con los tipos B y C.

Los dos últimos diseños se han propuesto sobre la base de la teoría para mejorar el rendimiento de la secadora, pero su perfil es bastante complejo.

- Zona de descarga: es donde ocurren dos funciones principales: el producto sale del secador y los granos pasan a un tamizado donde se enfrían, y se preparan para almacenamiento o envío; la segunda función es la descarga de gases de escape, donde se expulsan los gases residuales y el polvo generado del sistema.

- Ventilador: se encarga de enviar el aire ambiente y se le transfiera energía térmica en la cámara de combustión, para así poder secar los granos.

El diseño típico de un secador es el siguiente:

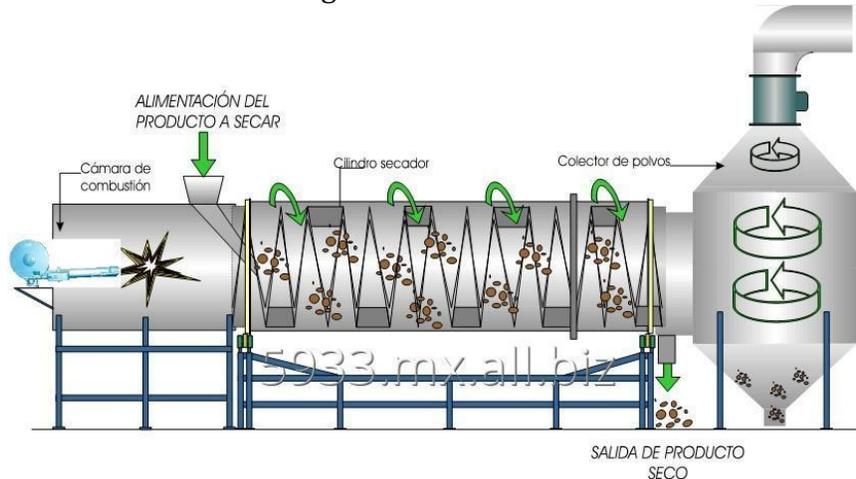


Figura 2- 5 Diseño de un secador rotatorio de tipo directo (Ingeniería, calor y manufactura, 2022)

## 2.2. Tipos de secadores rotatorios

- Secador rotativo directo: consiste en un cilindro con o sin elevadores, es recomendable para operaciones a baja y media temperatura. El aire caliente se introduce por el centro del cilindro y está en contacto directo con el aire. Éste se utiliza principalmente para la mayoría de los sólidos en la industria, como puede ser la agricultura, minería, productos químicos, etc.

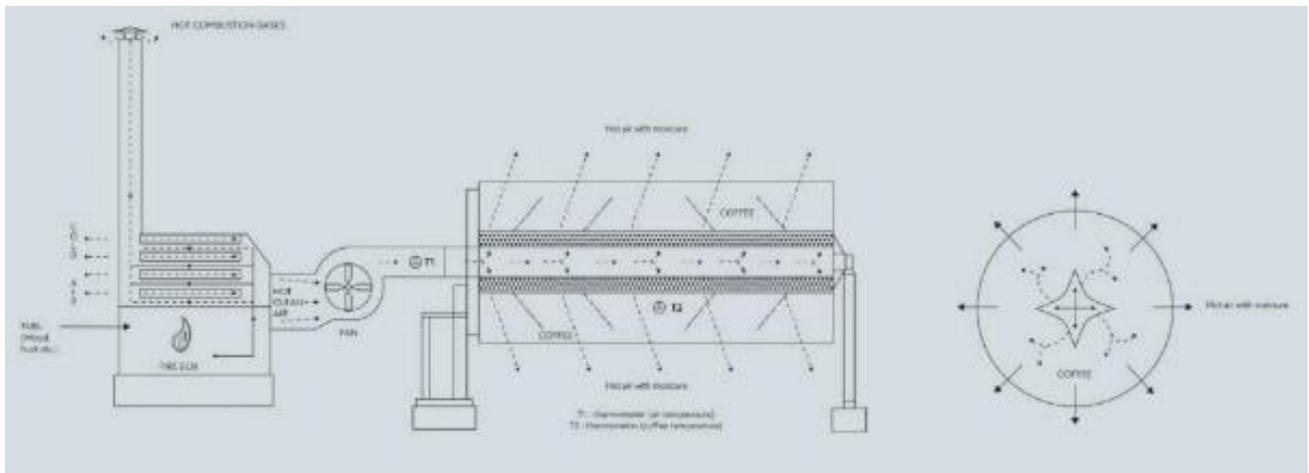


Figura 2- 6 Esquema de un secador rotatorio (BH, 2020)

- Secador rotativo indirecto: el cilindro se encuentra rodeado por el quemador o por resistencias eléctricas y se utiliza principalmente para altas temperaturas, siendo la

máxima que puede tolerar el material del cilindro. Para acero inoxidable de 800 a 1,025 °C y para acero al carbón de 650 a 700 °C. Se utiliza principalmente para procesamiento de polvos, materiales finos y que se oxidan al contacto con el aire, algunos ejemplos son para pigmentos, materiales combustibles, pulpas, etc.

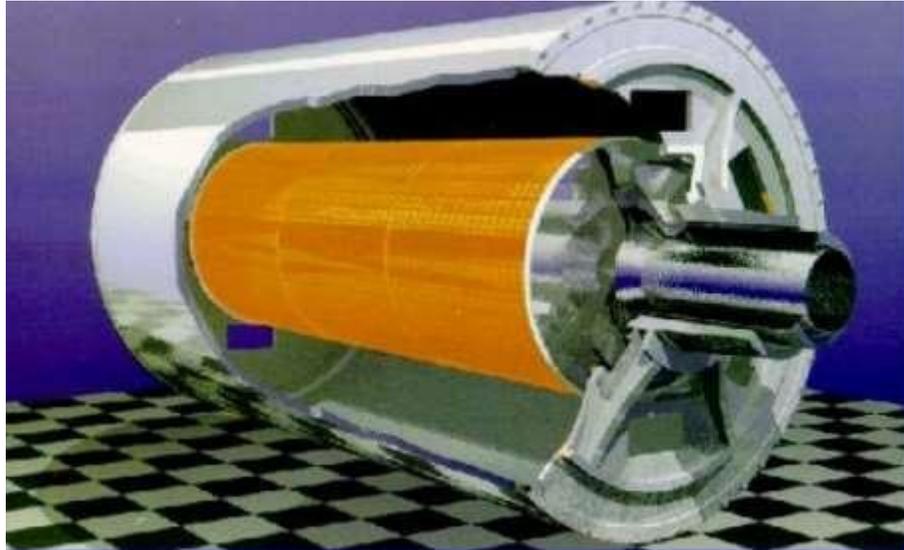


Figura 2- 7 Diseño de un secador indirecto (Energy Solutions Center, 2016)

- Secador de tubo de vapor indirecto: el cilindro secador contiene tubos en su interior por el que circula vapor. El material por secar está en contacto directo con los tubos. Su principal aplicación es en el secado de virutas y otros productos de madera ligeramente granulados, Piensos (granos secos de destilería con solubles), Tortas de prensado y harina de semillas oleaginosas, piensos de gluten de maíz, bagazo de cerveza, biomasa y materiales a granel.



Figura 2- 8 Diseño de un secador de vapor indirecto (Myande, 2020)

- Secador directo Roto-Louvre: es una modificación del secador convencional. Está formado con elevadores longitudinales y que forman un tambor cónico dentro del tambor. Las partículas forman un lecho fluidizado que rueda en el interior a medida que se introduce el gas. Debido al diseño, la transferencia de calor es mayor que en uno convencional, con esta modificación, se puede llegar a reducir el tamaño del secador hasta un 50%, pero a un costo mayor.

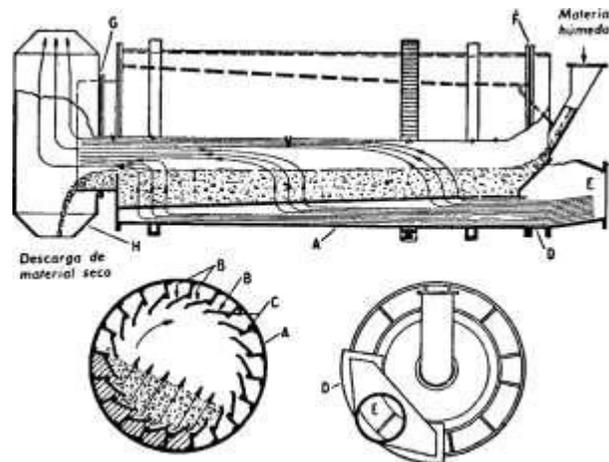


Figura 2- 9 Secador directo Roto-Louvre (Brito, 2020)

### 2.3. Principio de funcionamiento

El funcionamiento del secador rotativo es bastante simple. El material húmedo se introduce en uno de los lados del dispositivo de secado y es agitado por los álabes en el interior del tambor. Esto extiende el material de manera uniforme a través del área de secado y lo expone al flujo del aire caliente. La transferencia de calor es acelerada por la mezcla y permite que la humedad dentro de la misma se evapore rápidamente. Durante todo el proceso de secado, los álabes agitan continuamente el material de modo que se expone de manera uniforme al aire caliente. Al final del proceso, todo el material se desplaza por la carcasa de la secadora, donde se descarga en la parte más baja.

### 2.4. Fuente de energía térmica

Dependiendo de las características del material, la fuente de calor puede ser dos:

- Quemador: se utilizan los gases de combustión de manera directa para el secado. Los principales combustibles que se utilizan son: petróleo, gas y combustibles sólidos como puede ser el carbón o biocombustibles como la cascarilla del café o de alguna otra semilla, de esta forma se evita la generación de desperdicios. El principal problema es que se debe mantener una buena combustión, se debe controlar la relación aire-combustible y una correcta atomización del combustible, además de evitar que los gases de combustión se enfríen ya que se pierde energía pueden llegar a licuarse y afectar la calidad del producto.



Figura 2- 10 Método de calentamiento directo (Prosilice, 2013)

- Intercambiador de calor: se utilizan para cuidar la calidad de los productos. Consiste en un sistema de transferencia de calor donde la fuente de calor le cede energía al fluido de trabajo. Se puede utilizar el vapor de agua, el principal fluido de trabajo es el aire, ya que se encuentra en todo el ambiente y no tiene costo alguno. Los principales modelos empleados son los de tipo tubo y coraza, de placas y serpentines.

Suele emplearse combustibles fósiles o materia orgánica para realizar la combustión, se deben buscar maneras alternativas para generar las condiciones necesarias para el secado utilizando energías verdes como la energía solar. El problema de esta es su intermitencia, los largos periodos de secado ya que tardan hasta 15 días en poder secar granos en cantidades de hasta 60 toneladas (Thulukkanam, 2013) y depende de las condiciones ambientales de la región. Es por ello que se deben de buscar otras fuentes, siendo una de éstas el uso de la energía geotérmica.



Figura 2- 11 Intercambiador de calor para calentamiento de aire (Fediter SAC, 2021)

#### 2.4.1. Energía geotérmica

La energía geotérmica es la cantidad de calor de la Tierra que puede ser aprovechada y explotada por el ser humano.

El calor se debe a diferentes fuentes, las cuales son:

- El calor residual durante la formación de la Tierra.
- Desintegración de isótopos radiactivos como el Uranio 235, 238, Torio 282 y Potasio 40.
- Movimiento diferencial entre las capas, principalmente entre el manto y corteza.
- Cristalización del núcleo.

Un rasgo distintivo de la energía geotérmica radica en que la temperatura aumenta a medida que la profundidad también lo hace, este fenómeno se conoce como gradiente geotérmico. Dicho gradiente ilustra el incremento de temperatura en relación con la profundidad, con valores que suelen oscilar entre 3 y 5 °C por cada 100 metros de profundidad.

#### 2.4.1.1. Clasificación

La forma más común de clasificación, en cuanto al aprovechamiento para su explotación, es mediante el potencial energético que tienen.

- Muy baja temperatura: recursos que se tiene temperaturas menores a los 30 °C. Se utilizan para la climatización mediante el uso de bombas de calor.
- Baja temperatura: recursos con temperaturas entre los 30 y 90 °C. Se utilizan principalmente para los usos directos, que son los procesos que aprovechan el calor de manera directa.
- Media temperatura: tiene valores entre 90 y 150 °C. Se utilizan principalmente para la producción indirecta de energía eléctrica o ciclos orgánicos.
- Alta temperatura: son los recursos con temperaturas mayores a los 150 °C. Son los que se utilizan para la producción directa de energía eléctrica

#### 2.4.1.2. Usos directos

El principal uso que se busca actualmente en el país es para la generación de electricidad, pero como se mencionó antes, se requiere de recurso a alta temperatura y que sea principalmente vapor. Pero no siempre se tienen estas características, además de que el 95 % es recurso de baja y media entalpía.

Es por ello por lo que el resto del recurso se aprovecha como fuente de calor para usos industriales, se le conoce como usos directos.

Algunas aplicaciones de acuerdo con diferentes sectores son:

- Vivienda, ocio, salud
  - Calefacción
  - Balneoterapia
  - Balneología

- Agricultura, alimentación
  - Piscicultura
  - Climatización de invernaderos
  - Producción de hongos
  - Secado de semillas
  - Deshidratado de frutas
- Proceso industrial
  - Secado de productos industriales
  - Extracción de sustancias químicas
  - Deshielo
  - Desalinización de agua de mar
  - Fabricación de papel

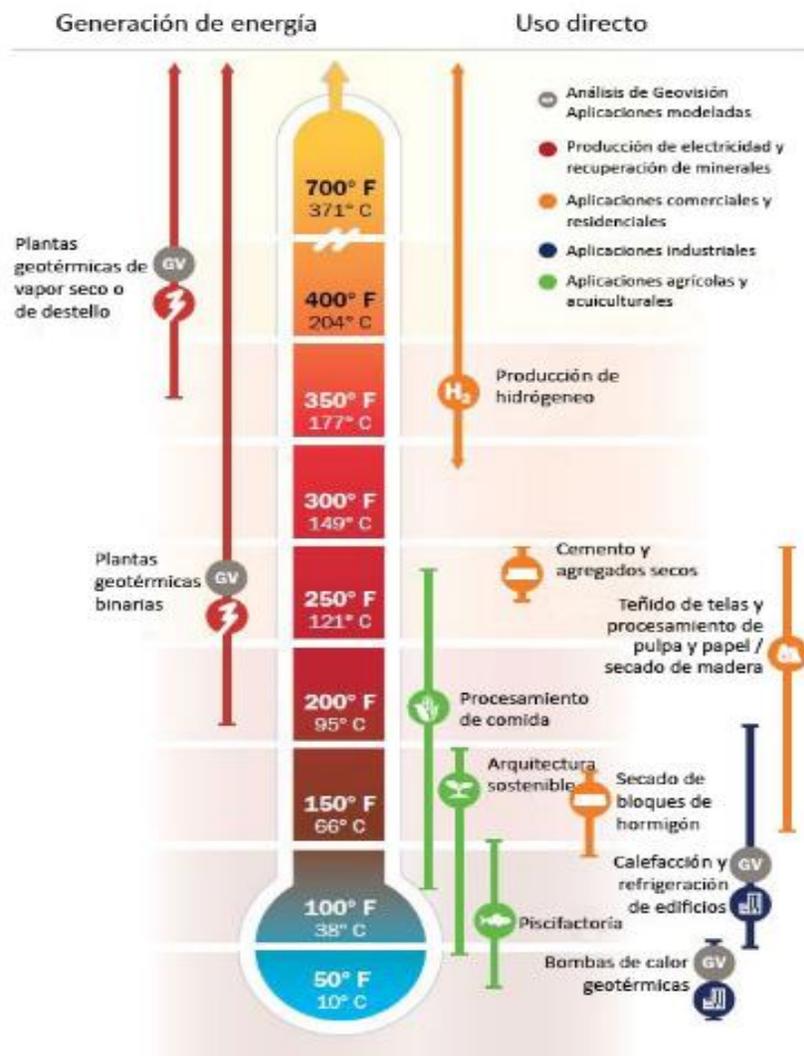


Figura 2- 12 Diagrama de Lindal (Mapfre, 2021)

### 2.4.1.3. Usos directos en México

Mientras que la producción de energía eléctrica es de 5,375 GWhr/año y con una capacidad instalada de 1,005.8 MWe (Gutiérrez Negrín, Canchola Félix, Romo Jones, & Quijano León, 2020), el uso como energía térmica es el mismo que hace 5 años, de 156 MWt.

Actualmente los principales usos directos son para la balneología, también se utiliza en la climatización de espacios, deshidratado de productos agrícolas y bombas de calor. En la tabla se muestran las capacidades instaladas y cuánto representa de la potencia total instalada.

Tabla 2- 1 Usos directos en México (Ibíd)

Aplicación	Potencia instalada (MWt)	% de la potencia total
Acondicionamiento de espacios	0.115	0.07
Deshidratado de productos agrícolas	0.518	0.33
Balneología	155.347	99.508
Bombas de calor	0.133	0.081
Total	156.114	100

De los 900 sistemas geotérmicos (Ibíd) en México, la mitad presenta valores de temperatura de 62 a 100 °C, 40% entre 100 y 149 °C, 5% abajo de 62 °C y 5% con temperaturas superiores a 149 °C. Iglesias estimó que si tan solo se usará el 0.1% de todos estos recursos, se llegaría a tener una capacidad de 40,000 MWt.

Se aprecia que se tiene un gran potencial que se puede aprovechar para diferentes procesos industriales, pero debido a que solo se ha buscado la explotación para la generación de electricidad, no se le ha dado la misma importancia y no se utiliza.

## 2.5. Comparación entre secadores

Para conocer la cantidad de energía y de gases de efecto invernadero se producen al utilizar los secadores rotatorios, se comparan en con otros modelos y dependiendo de la cantidad de café seco que produce.

Mejía, Marcía Fuentes, Torres Mejía, Hernández Bonilla, Santos Alemán, Varela, Kazemzadeh & Montero Fernández (2021), realizaron la comparación entre tres modelos diferentes, uno

rotatorio, vertical y estacionario. Ellos reportaron los siguientes resultados:

Tabla 2- 2 Comparación de parámetros de operación entre diferentes tipos de secadores (Ibíd)

Equipo	Capacidad de café húmedo	Total de energía consumida	TonCO2eq /kg
Rotatorio	2,556.82	9.7	2.5
Vertical	5,682.56	13.0	3.5
Estático	4,545.45	5.4	1.5

Se observa que el secador vertical es el equipo que consume mayor energía y genera más contaminantes, pero esto se debe a que es el de mayor capacidad de los tres. Si comparamos el rotatorio con el estático, se observa que tiene una menor capacidad y genera más contaminantes. Se debe a que el secador rotatorio requiere de energía adicional para mover el tambor, pero el beneficio es que puede ser compacto y ser instalado en varias zonas, a diferencia del estacionario donde se requiere de espacios altos ya que puede llegar a medir de 9 hasta los 25 metros de altura.

Para comparar el beneficio del tiempo al secar los granos, Sandeep, Channabasamma, Gopinandhan & Nagaraja (2021) compararon el tiempo y la energía requerida entre un secador rotatorio y secado al sol. En su proceso compararon diferentes temperaturas dentro del secador, y con ambos procesos se realizó un primer secado al sol. Reportaron los siguientes resultados.

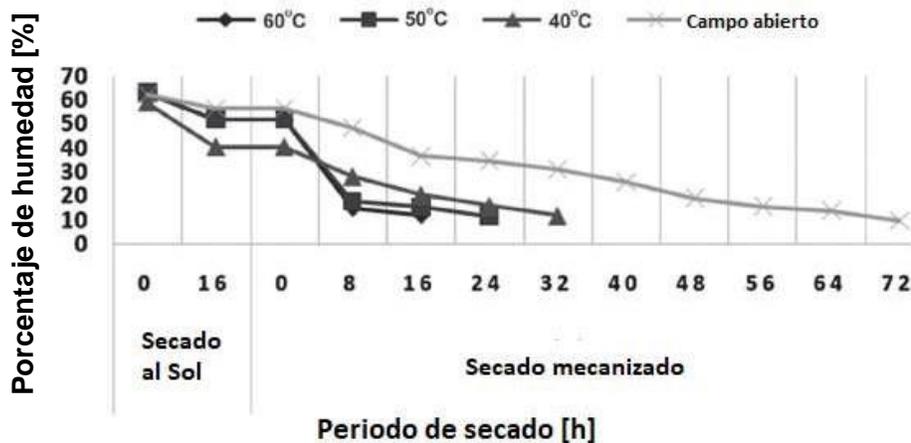


Figura 2- 13 Tiempo de secado a diferentes temperaturas (Ibíd)

Tabla 2- 3 Energía requerida para diferentes tipos de secadores (Ibíd)

Temperatura [°C]	Energía requerida [MJ*T <sup>-1</sup> ]							
	Robusta Cherry				Robusta Parchment			
	Eléctrico	Térmico	Humano	Total	Eléctrico	Térmico	Humano	Total
60	192.78	5.06	1.08	198.92	129.42	5.06	0.54	135.02
50	271.98	5.94	1.08	279.00	129.42	4.07	0.54	134.03
40	477.9	5.06	1.62	484.58	256.14	3.96	0.81	260.91
Solar	-	-	2.70	2.70	-	-	1.35	1.35

Como se observa, al usar los secadores mecánicos, el tiempo se reduce hasta el triple. En el mecánico se tienen tiempos de 16 a 32 horas, mientras que en el solar se tienen hasta 88 horas. Cabe recordar que, al usar el método tradicional de secado, no son horas continuas, sino que varía con las condiciones atmosféricas. Al comparar la energía utilizada, se aprecia la razón de usar el secado al natural, ya que solo se tiene el consumo de energía del personal, a diferencia del mecanizado donde el consumo de energía aumenta hasta más de 100 veces.

### 2.6. Zonas de interés

Lo importante de este trabajo, es el reconocer que estados cafetaleros tienen recurso geotérmico aprovechable. El siguiente mapa que se muestra, es una sobreposición de dos mapas donde se muestran los estados cafetaleros (Coffeebehind the scenes , 2019) y las regiones con potencial geotérmico (Prol Ledesma, Carrillo de la Cruz, Torres Vera, Membrillo Abad, & Espinoza Ojeda, 2018).

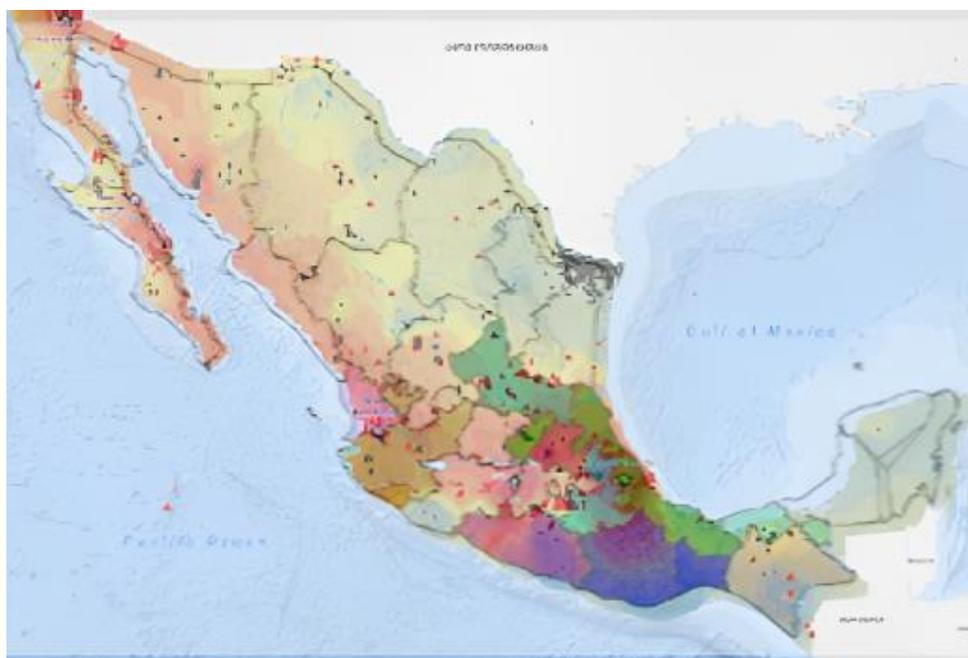


Figura 2- 14 Localización de estados cafetaleros con potencial geotérmico



Del mapa anterior, los estados de interés son: Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Puebla, Nayarit y Jalisco.

- Chiapas

Este estado es el principal productor de café nacional con una producción de 384,550 toneladas anuales. Se ha encontrado que en la zona alrededor del volcán El Chichón, se tiene recursos de 35 °C a 80 °C que se podría aprovechar para el secado, aunque se tienen estudios que indican que se tiene recurso de hasta 220 °C.

- Oaxaca

Es el cuarto estado productor con 85,900 toneladas. Las regiones de interés son San José Manialtepec, ubicado en la costa, al norte de la laguna San José Manialtepec, en la margen izquierda del río del mismo nombre afloran 2 manantiales de aguas termales con temperatura máxima de 45°-50°C.

- Veracruz

Es el segundo estado productor con 230,000 toneladas. La principal zona de interés es la zona del cofre de Perote, donde se localiza la planta de generación de Los Humeros. Aunque esta planta se encuentra en Puebla, la región de interés se encuentra en una región colindante entre ambos estados. Otras regiones con mayor interés son:

- Los Baños-Tinajitas está localizada a 2 km al noroeste de Tinajitas, municipio de Actopan. En esta zona se concentran más de 8 pequeños manantiales y chorreaderos, con temperaturas que varían de 40° a 65°C.
- La Cumbre está a 6 km al sureste de la ciudad de Jalapa, en el municipio de Dos Ríos. La manifestación corresponde a un manantial de 32°C.
- El Carrizal localizada en la zona central-sur del estado, es una zona turística de aguas termales con fuentes de 39°C hasta 50 °C.
- Área de Tlapacoyan, donde hay 2 pequeños manantiales con temperaturas de 27° y 28°C.
- Poblado de Lázaro Cárdenas, dentro del municipio de Tierra Blanca, tiene recursos con temperatura 38°C.

- Puebla

Como se mencionó anteriormente, se encuentra la planta generadora de Los Humeros. Cabe destacar que en el municipio de Chignautla se encuentra el proyecto de una bomba de calor



que climatiza un consultorio del IMSS y una escuela primaria, anteriormente contaba con proyectos de producción de setas y deshidratado de alimentos. Este estado es el tercer productor de café nacional con una producción de 150,000 toneladas.

Otras zonas de interés son:

- Las Derrumbas, trata de un par de domos volcánicos donde se tienen fumarolas y recursos con temperaturas de 41°C a 76°C.
- La zona de Acoculco cuenta con manantiales a 49 °C y puede llegar a tener recursos de hasta 240 °C.

- Nayarit

Se encuentra instalada la única planta de producción por parte de una empresa privada, además de una planta deshidratadora de mango en el Domo de San Pedro, y apoya a los productores de la región. Es considerado el octavo productor de café, siendo una zona de interés, la región de Mesillas, debido a que los manantiales de la zona llegan a presentar temperaturas de hasta 130 °C. De igual manera, la región de Santa Cruz de Camotlán cuenta con manantiales de hasta 77 °C.

Otras regiones que presentan manifestaciones termales son Los Tepetates - La Palma, Tepic, El Molote, Valle Verde y Ceboruco.

- Jalisco

Es el noveno estado productor de café con 4,770 toneladas, las regiones con potencial geotérmico son los siguientes:

- Santa Rita-Agua Caliente ubicada a 80 km al oriente de Guadalajara, los manantiales de esta zona presentan temperaturas que oscilan entre 30 y 77°C.
- La Soledad situada 4 km al norte del poblado San Francisco Tesistán, la manifestación más importante son conjuntos de chorros de vapor de agua a presión con 97°C de temperatura
- El Orito-Los Borbollones situada a 5 km al noroeste de Tequila, en el poblado El Orito se localizan chorros de vapor de agua con temperaturas de 85°C,
- San Juan Cosalá-Jocotepec, se localiza sobre la ribera norte del lago de Chapala, entre los poblados de Jocotepec y Chapala, consta de diez pozos termales de temperaturas que van de 32 a 89°C,
- Acatic – El Tule, en el poblado de Acatic, Jalisco, se encuentran nueve manantiales con temperaturas que varían de 29 a 43°C,

- El campo geotérmico La Primavera localizada en el extremo noroccidental del Eje Neovolcánico y suroriental de la Sierra Madre Occidental, es una zona de interés, ya que se ha realizado planes de construir una planta de generación, debido a que se han perforado ocho pozos y registrado temperaturas que van de 180 °C hasta 350°C
- Río Grande-Chilatán, zona situada 15 km al noreste de Tepalcatepec, Michoacán, sobre las márgenes del río Grande se localizan doce pozos con temperaturas que van de 31 a 36°C y cinco manantiales que registran temperaturas entre 31 y 64°C
- Agua Caliente-Río Purificación, que se localiza a 25 km al noroeste de Barra de Navidad sobre el cauce del río Purificación en el poblado Agua Caliente. En ese lugar se sitúa un manantial termal con temperatura de 70°C

## 2.7. Modelos matemáticos

Para el diseño del secador, se utiliza el método propuesto por Delgado, Peralta, Quilambaqui, Gonzalez, Reinoso, Arevalo, Arancibia, Paucar, & Velázquez (2019), también es conocido como el método de pérdidas y se divide en los siguientes elementos:

- Calor inicial para el calentamiento del producto
- Calor requerido para elevar la temperatura del aire dentro de la cámara
- Calor para la evaporación del agua en los granos
- Calor cedido por el equipo
- Calor necesario para elevar la temperatura del equipo
- Calor por renovación del aire

La suma de los anteriores elementos será la cantidad total de calor requerido para el proceso de sacado.

### 2.7.1. Calor inicial para el calentamiento del producto

Es el calor requerido para elevar la temperatura de los granos, de la temperatura ambiente hasta la temperatura de operación, que para el caso del café se encuentra en el rango de 40 °C a 60 °C. Para que los granos pierdan la humedad necesaria, primero se debe calentar hasta la temperatura de operación para que éstos pierdan el agua libre que posee, posteriormente perderá el agua contenida dentro de los granos.

Para este cálculo se utiliza la siguiente ecuación

$$q_1 = m_{granos} \times M \times C_{granos} \times \Delta T \quad (1)$$

Donde:



$m_{\text{granos}}$ : la cantidad de granos a secar [kg]

$M$ : la humedad inicial de los granos, en base seca (b.s. por sus siglas) [ $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{masa total}}$ ]

$C_{\text{granos}}$ : calor específico de los granos [kJ/kgk]

$\Delta T$ : la diferencia de temperatura entre la temperatura de operación y la inicial de los granos [°C]. Para mayor facilidad, la temperatura de los granos inicial es igual a la del ambiente.

Para el caso de granos de café, el calor específico se utiliza la ecuación propuesta por Montoya, Oliveros & Roa (1990).

$$C_{\text{cafe}} = 1.3556 + (5.7859 \times M) \quad (2)$$

### 2.7.2. Calor para la evaporación del agua en los granos

Como se mencionó en el punto anterior, se debe eliminar el agua contenida dentro de los granos. Esto se conoce como calor latente y se da cuando la temperatura del grano es igual a la de operación.

Para conocer la cantidad de energía necesaria, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_2 = m_{\text{granos}} \times \Delta M \times L_{\text{granos}} \quad (3)$$

Para conocer el calor latente de vaporización ( $L_{\text{granos}}$ ), se utiliza la ecuación propuesta por Trejos, Roa & Oliveros (1989):

$$L_{\text{cafe}} = (2,502.4 - 2.42958T) \times (1 + 1.44408e - 21.5011M) \quad (4)$$

Donde:

$T$ : es la temperatura promedio entre el ambiente y la de operación.

$M$ : es el promedio de la humedad del proceso, en b.s.

### 2.7.3. Calor requerido para elevar la temperatura del aire dentro de la cámara

Es la cantidad de energía requerida para elevar la temperatura del aire dentro de la cámara, que se considera que está a temperatura ambiente, hasta la temperatura de operación.

$$q_3 = m_{\text{aire}} \times C_{\text{p aire}} \times \Delta T \quad (5)$$

Donde:

$m_{\text{aire}}$ : la masa de aire libre dentro de la cámara

$C_{\text{p aire}}$ : calor específico del aire a presión constante.

#### 2.7.4. Calor necesario para elevar la temperatura del equipo

Al igual que el anterior punto, se debe considerar la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura inicial del material que compone el secador.

$$q_4 = \Sigma (m_i \times C_i) \times \Delta T \quad (6)$$

El sufijo “i” hace referencia a los diferentes materiales que componen a los secadores. Para este caso solo se considera un material, es acero inoxidable.

#### 2.7.5. Calor cedido por el equipo

Un factor importante, es la cantidad de energía cedida por la estructura del equipo. Estas pérdidas pueden representar la mayor cantidad de energía requerida dentro del sistema.

Para calcular este factor, se utiliza la siguiente ecuación:

$$q_5 = U \times A \times \Delta T \times t \quad (7)$$

Donde:

U: coeficiente global de transferencia de calor [kJ/m<sup>2</sup>K]

A: área superficial de transferencia de energía del equipo [m<sup>2</sup>] t: es el tiempo de secado [seg]

Para el tiempo, se plantea que sea de máximo 12 horas, esto con el fin de proponer un equipo que trabaje con energía solar fotovoltaica.

El área de transferencia se toma como el área longitudinal de un cilindro.

$$A = 2 \pi \times r \times l \quad (8)$$

r: radio externo del secador [m]



$l$ : longitud del secador [m]

Para conocer el coeficiente global de transferencia, se debe analizar los fenómenos de transferencia que ocurren en la cámara. Se tiene el mecanismo de convección dentro de la cámara entre el aire caliente y los granos, conducción entre los granos, la pared del secador y finalmente se tiene convección en la pared externa y el aire ambiente.

El fenómeno de convección se basa en la ley de enfriamiento de Newton, donde la principal incógnita es el coeficiente de calor convectivo ( $h$ ):

$$Q_{conv} = h * A * \Delta T \quad (9)$$

Para conocer el valor de este parámetro, se utilizará el número de Nusselt que nos relaciona la transferencia de calor por convección y conducción:

$$h = \frac{Nu \times k}{Lc} \quad (10)$$

Donde:

$Nu$ : número de Nusselt

$k$ : conductividad del fluido, en este caso es aire [W/mK]

$Lc$ : longitud característica, para el caso del secador, al ser un cilindro, será igual al diámetro interno

Se debe buscar una correlación para el número de Nusselt que satisfaga las características del equipo. Algunas correlaciones para el interior de tubos estacionarios son los siguientes:

$$Nu = 0.023Pr^{0.4} Re^{0.8}$$

Esta es la correlación de Dittus y Bolter, aplicable cuando el número de Prandtl debe estar entre 0.7 a 120 y el número de Reynolds entre un rango de 104 y  $1.2 \times 10^5$ .

Otra correlación es la de Gnielinski

$$Nu = \frac{\left(\frac{(0.79 \ln(Re^{-0.25}))^{-2}}{2}\right)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\left(\frac{(0.79 \ln(Re^{-0.25}))^{\frac{1}{2}}}{2}\right)(Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (11)$$

La cuál es aplicable para rangos de Prandtl entre 0.7 a 160 y número de Reynolds mayores entre 2300 y  $5 \times 10^6$ .

En este trabajo, se utilizará la correlación de Gnielinski, ya que la desviación absoluta entre cada una de las correlaciones es de 4.6 y 3.1, respectivamente.

Para la conducción, la cual se apoya de la ley de Fourier, se debe conocer la conductividad térmica de los materiales y el espesor de éstos.

En el caso del secador, se considera al café como un cilindro y la longitud será el radio de éste; el segundo material será el de la cámara, el cual es de acero inoxidable y la longitud es el espesor de la cámara.

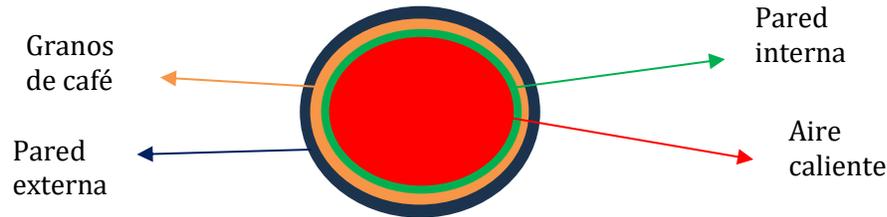


Figura 2- 15 Esquema de la geometría del secador y los granos

Para ello, se utiliza la ecuación de transferencia de calor para cilindros

$$q = \frac{2\pi kL}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \Delta T \quad (12)$$

Los parámetros necesarios para este fenómeno son los siguientes:

Tabla 2- 4 Parámetros de diseño del secador

Parámetro	Valor
conductividad térmica del café [W/mK]	0.18
radio interno del "cilindro" del café [m]	0.04
radio externo del "cilindro" del café [m]	0.23
conductividad térmica del acero inoxidable [W/mK]	16.30
radio interno del tambo [m]	0.348
radio externo del tambo [m]	0.35

Para la convección externa, se considera que se tiene convección forzada. En este caso se tienen las correlaciones de Dropkin & Carmi el cual se utiliza para cilindros rotando entre los rangos de Reynolds de 1500 y 433000, Etmad para rangos de 8000 a 65400 y Becker entre 800 y 100000.

$$Nu = 0.073 * Re_{\omega}^{2/3} \quad (13)$$

$$Nu = 0.076 * Re_{\omega}^{0.7} \quad (14)$$

$$Nu = 0.119 * Re_{\omega}^{2/3} \quad (15)$$

$$Re_{\omega} = \frac{\Omega D^2 \rho}{2\mu} \quad (16)$$

Donde:

$\Omega$ : revoluciones del secador

Se elige la correlación de Dropkin & Carmi debido a que muestra una desviación total de 5.4%, mientras que las otras correlaciones tienen una desviación de 8.1% y 11.6% respectivamente (Özdem, 200)

#### 2.7.6. Calor por renovación del aire

Como el aire se satura de la humedad que pierden los granos, éste se debe renovar, pero debe ser calentado, ya que se toma del ambiente.

La forma de obtener la carga térmica es de la siguiente forma:

$$q_6 = \frac{m_{granos} \times \Delta X \times Cp_{aire} \times \Delta T}{a - b} \quad (17)$$

donde “a” y “b” son las humedades absolutas en el interior del tanque y el ambiente, respectivamente.

#### 2.8. Flujo de aire por parte del ventilador

Para conocer la cantidad de aire que se debe suministrar, se parte de la hipótesis de que la cantidad de calor necesaria para remover la humedad que puede absorber cierta masa de aire caliente de los granos es la misma cantidad que el calor cedido por el aire. La ecuación queda de la siguiente manera:

$$Q_{tot} = \dot{m} \times Cp_{aire} \times (T_{secado} - T_{amb}) \quad (18)$$

Con esta ecuación se conocerá el flujo másico que el equipo debe entregar.



## 2.9. Conclusiones

De este capítulo, se puede recopilar lo siguiente:

- Se establecieron parámetros de operación típicos de secadores rotatorios, los cuales serán necesarios para el diseño de este proyecto.
- Se comparó el proceso de secado de granos utilizando diferentes secadores: de entre los beneficios de uno vertical se observa que se tiene una menor generación de gases de efecto invernadero y mejor aprovechamiento de energía térmica. Mientras que, al comparar con el método tradicional, se observa que los tiempos de secado se llegan a disminuir de días a horas.
- Se puede lograr el proceso de secado mediante el empleo de recurso geotérmico de baja entalpía, los cuales se encuentra en el país y no se han explotado lo suficiente.
- Se comprobó que hay varios estados en los cuales se puede aprovechar este proyecto, al ser de los principales estados productores de café y al tener recurso geotérmico. Siendo estados como Puebla y Nayarit, estados donde ya se tiene emplea la geotermia para la producción de energía eléctrica y se ha utilizado para usos directos.
- Se establecieron las bases teóricas para el dimensionamiento de un secador rotativo.

### 3. Propuesta de diseño mecánico de un secador rotario

En este capítulo se realizará el dimensionamiento del equipo de secado en cuanto a sus componentes mecánicos y de transmisión para proporcionar el giro. Se iniciará con ciertos parámetros los cuales deberán ser corroborados posteriormente. La información confidencial de las diferentes piezas se colocará en los Anexos al final de este trabajo.

#### 3.1. Consideraciones

Para la parte mecánica, el secador consta de los siguientes elementos:

- Tambor: contendrá a los granos y eje de transmisión.
- Eje bastidor con elevadores: transfiere el movimiento del motor a los granos para mantenerlo en constante movimiento con el fin de asegurar un secado lo más homogéneo posible. En el eje se colocarán unos elevadores, los cuales se encargarán de mover a los granos.
- Sistema de transmisión: es el encargado de brindar el movimiento del motor al eje, este puede ser mediante el empleo de engranes, cadenas o poleas.
- Motor: encargado de brindar el movimiento a todo el equipo.

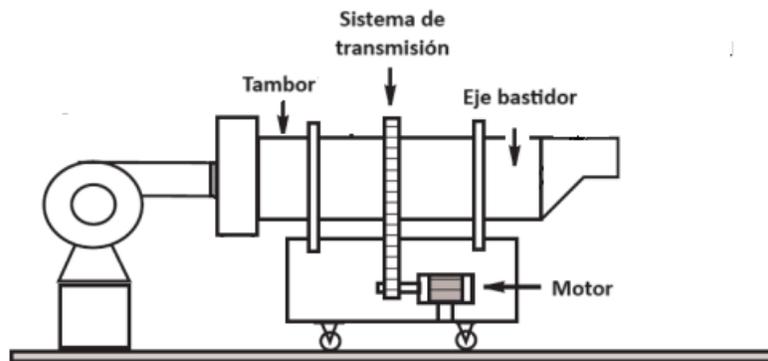


Figura 3 - 1 Esquema de la propuesta del secador (Fran Lobato, Barbosa Libotte, & Menndes Platt, 2022)

Para poder dimensionar los equipos, se deberá partir de algunas medidas y comprobar que puede cubrir las necesidades requeridas. Es por ello que se toman las siguientes consideraciones:

- La capacidad del tambor debe ser de 200 kilogramos, llegando a ocupar el 80% del volumen del secador (Mujumdar, 2006), sin contar el volumen que ocupa el eje. Esta capacidad se consideró de diferentes trabajos realizados, además de la recomendación de un cafetalero para un volumen mínimo de trabajo.
- El motor será de 0.33 HP, está basado en trabajos previos donde la cantidad a secar era de 500 kilogramos (Vivas Carmona, Paz Torres, & Rojas Carvajal, 2007).

- El eje será un tubo hueco de 3 pulgadas de diámetro.
- El sistema de transmisión será mediante una cadena.
- El material que se considera para el tambor y del eje bastidor con elevadores será de acero inoxidable AISI 304.
- El diámetro máximo del tambor será de 90 cm, debido a las características físicas del laboratorio donde se planea su construcción.
- La velocidad de rotación del eje es de 3 RPM (Mujumdar, 2006).
- Las medidas del eje, cadena y motor deben ser de valores comerciales.

Proponiendo estos valores, se procede a calcular los parámetros necesarios.

### 3.2. Volumen del tambor

El tambor o la cámara de secado se considera como un cilindro hueco que aloja el eje, los granos y donde se realiza el intercambio de calor. Este puede ser móvil o fijo dependiendo del método de transmisión del movimiento.

Para este trabajo, se considera al tambor en movimiento, ya que se considera que el sistema de transmisión será transmitido al eje, ya que este último estará dentro del tambor. De igual manera, el café se considera como un eje hueco.

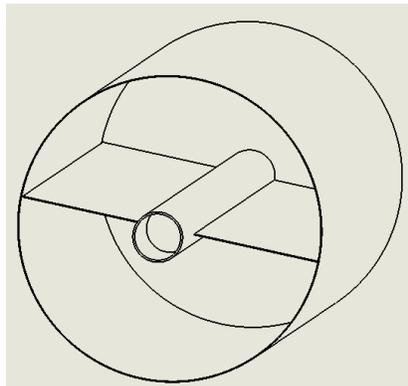


Figura 3 - 2 Esquema de la cámara de secado y el eje bastidor con los elevadores

En la imagen anterior se aprecia una vista de la propuesta del tambor con el eje bastidor.

Para conocer las medidas necesarias, se tomarán las siguientes ecuaciones:

$$V = \frac{\pi}{4} \times (D^2 - d^2) \times L \quad (19)$$

La ecuación 19 nos indica el volumen de un cilindro hueco, donde:

V: volumen [m<sup>3</sup>]



D: diámetro mayor [m] d: diámetro menor [m]

L: longitud del tambor [m]

Se inicia con el eje, el cual se tiene la mayor cantidad de información, los valores comerciales son los siguientes

Tabla 3- 1 Parámetros iniciales de diseño del eje del secador

Parámetro	Valor
Medida nominal	3 [inch]
Diámetro externo (D)	88.90 [mm]
Cédula	40
Espesor	2.2 [mm]
Diámetro interno (d)	109.9 [mm]

Para aplicar la ecuación 1 falta definir el volumen o la longitud. Por facilidad, se define una longitud, la cual será la misma para todo el secador. Se elige una longitud de 1 metro.

Los pasos por seguir son los siguientes:

1. Calcular el volumen del eje mediante la ecuación 1.
2. Calcular el volumen de café. Se utiliza la siguiente ecuación:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (20)$$

Donde

m: masa de granos [kg]; en este caso es de 200 kg.

$\rho$ : densidad de los granos [kg]; se considera de 687.17 (Kornman, 2016)

3. Calcular el diámetro externo del café. Se considera como diámetro interno del café el diámetro externo del eje.
4. Calcular el volumen total del tambor. Se debe recordar que el café ocupa el 80% del volumen total.
5. Calcular el diámetro externo del espacio libre. Se considera como un cilindro hueco donde el diámetro interno es igual al diámetro externo del café.

6. El diámetro interno del tambor es igual al diámetro calculado en el punto 5 y el diámetro externo dependerá del fabricante. Como primera instancia, se toma que el espesor es de 3 mm (Distribuidora Metálica S.A. de C.V., 2019).

Estos valores iniciales fueron tomados con referencia de trabajos realizados por (de la Cruz de la Cruz, 2020)

Los valores obtenidos son los siguientes:

*Tabla 3-2 Parámetros finales del tambor del secador*

Parámetro	Valor
Diámetro externo del eje [m]	0.114
Diámetro externo del café [m]	0.651
Diámetro interno del tambor [m]	0.696
Diámetro externo del tambor [m]	0.700
Longitud del secador [m]	1.100
Volumen del café [ $m^3$ ]	0.364
Volumen del tambor [ $m^3$ ]	0.434

### 3.3. Elevadores

Los elevadores o álabes son elementos que se usan comúnmente tanto en secadores como en enfriadores rotatorios para maximizar la transferencia de calor entre el material y el aire de secado o enfriamiento. Fijados al interior del tambor, recogen el material a medida que gira el tambor y lo dejan caer gradualmente a través de la corriente de aire. Una variante es donde los elevadores se colocan en el eje y el tambor se deja fijo. La razón de poner los elevadores en el eje o tambor dependerá del volumen del tambor, ya que se ponen en el tambor cuando el volumen que ocupará el producto a secar es del 10 % al 12 % (Mujumdar, 2006), mientras que en el eje es cuando el volumen del material ocupa del 80 % a 90 % (Ibíd).

En la siguiente imagen se muestra un diseño típico de los elevadores en el eje de transmisión. Para este trabajo se considera que los elevadores serán de una geometría recta, como los mostrados en la figura 2.3, debido a su facilidad de manufactura.

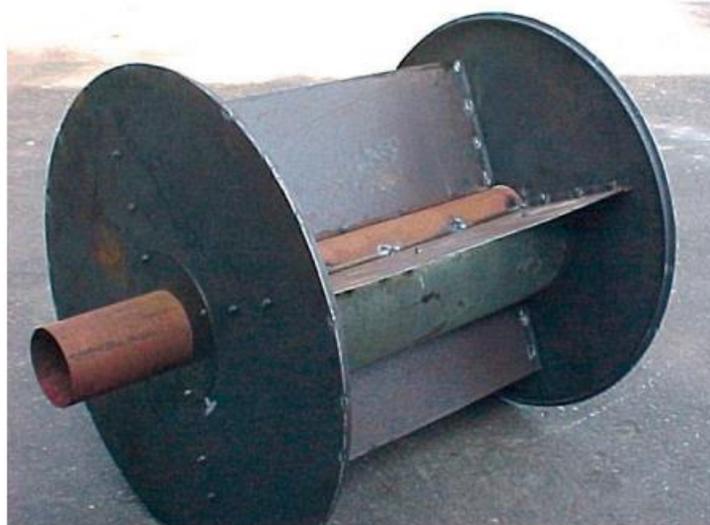


Figura 3 - 3 Ejemplo de elevadores unidos al eje (de Sousa e Silva, Precci Lopes, Gonzaga Vitor, & Lopes Donzales, 2014)

Como se considera un volumen del 80%, los elevadores se colocan en el eje. Debido a que moverán el material, éstos deben ser capaces de soportar las cargas estáticas y dinámicas del café, por lo que se deben buscar las medidas en las cuales no habrá daños al equipo.

Los elevadores se consideran como una lámina rectangular, tanto el largo como el ancho deberá cubrir la mayor parte del secador, pero sus medidas serán menores, ya que, si fueran las mismas, éstos se dañarán y al tambor. Se considera que deberán ocupar el 95% del secador.

### 3.3.1. Análisis estático

El símil para su análisis es el de una viga en voladizo, la cual está sometida a una carga distribuida.

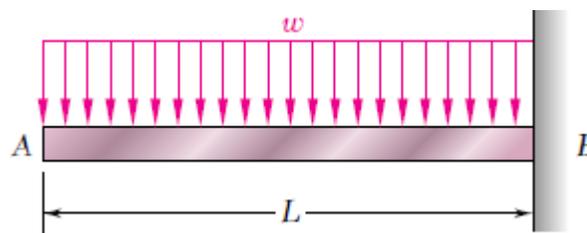


Figura 3 - 4 Análisis de una viga (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2010)

Se realizará un análisis para flexión y esfuerzo cortante.

#### 3.3.1.1. Flexión

Es un tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. El término "alargado" se aplica cuando una dimensión es dominante frente a las otras.

El rasgo más destacado es que un objeto sometido a flexión presenta una superficie de puntos llamada fibra neutra tal que la distancia a lo largo de cualquier curva contenida en ella no varía con respecto al valor antes de la deformación. La fuerza que provoca la flexión se denomina momento flector.

Un ejemplo de flexión mecánica es la barra de la figura que a continuación se muestra, la misma se encuentra inicialmente en estado de reposo; posteriormente es sometida a la acción de una fuerza, en consecuencia, se dobla en el mismo sentido de la fuerza.

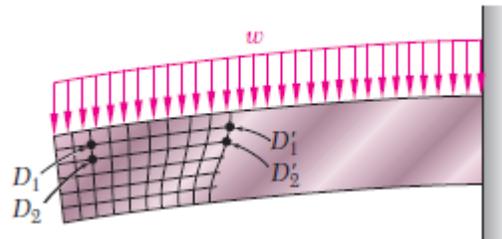


Figura 3 - 5 Esquema de un análisis de flexión (Ibíd)

Para el cálculo del esfuerzo por flexión, se realiza mediante la siguiente ecuación

$$\sigma = \frac{|M|}{S} \quad (21)$$

Donde:

$\sigma$ : esfuerzo por flexión [Pa]

M: momento flector [Nm]

S: módulo de sección elástica [m<sup>3</sup>]

El momento flector es una fuerza normal aplicada a una distancia dada desde un punto de referencia. Para su análisis, se considera que los granos se dividen en cuatro secciones de masas iguales dentro del secador. Para este análisis se considera que los elevadores están de manera perpendicular y soporta cada uno 200 kg de café.

La fuerza que aplican éstos se obtiene empleando la Segunda Ley Newton:

$$F = m \times g \quad (22)$$



Donde:

$g$ : aceleración por la gravedad; se considera de  $9.81 \text{ m}$

El momento flector para cargas distribuidas se calcula de la siguiente forma:

$$M = \frac{1}{2} * w * L^2 \quad (23)$$

Donde:

$w$ : carga distribuida

$L$ : longitud de la viga [m]

La carga distribuida se obtiene mediante la relación entre la fuerza y la longitud “ $L$ ” de la viga.

El módulo de sección elástica es la relación entre el segundo momento de inercia y la distancia máxima a la superficie neutra. Para el caso de vigas rectangulares, se utiliza la siguiente ecuación:

$$S = \frac{1}{6} Ah \quad (24)$$

Donde:

$A$ : sección transversal de la viga [m<sup>2</sup>]

$h$ : altura o espesor de la viga [m]

El procedimiento para su cálculo es mediante la proposición de la longitud del álabe, el ancho y espesor de éste. Como se mencionó anteriormente, el largo del álabe y radio del eje se propone que sea del 95% con respecto al radio del tambor. Para el ancho se propone que ocupe el 98% de la longitud del álabe.

Se procede a calcular el espesor mínimo que puede soportar. Para ello el esfuerzo por flexión deberá ser igual al esfuerzo máximo que soporta el material. Para ello se busca la resistencia a la fluencia del acero 304; se considera este parámetro debido a que se quiere evitar que los álabes tengan una deformación plástica, se busca que siempre nos encontremos en la región elástica.

Para conocer la resistencia de diseño, se considera un factor de seguridad, en este caso se toma un valor de 1.5 a 2 ya que es para materiales para materiales bien conocidos debido a que se busca que sean comerciales, se trabaja bajo condiciones ambientales



razonablemente constantes, sujetos a cargas y tensiones que pueden determinarse fácilmente. Para este trabajo, se decide utilizar un valor de 2, se calcula la resistencia de diseño de la siguiente manera:

$$S = \frac{\sigma_{material}}{\sigma_{diseño}} \quad (25)$$

### 3.3.1.2. Esfuerzo cortante

El esfuerzo cortante o de cizallamiento, se produce debido a fuerzas que actúan paralelamente al plano que las resiste. Debido a esta situación este esfuerzo suele conocerse con el nombre de esfuerzo tangencial.

Para el cálculo del esfuerzo cortante, se realiza mediante la siguiente ecuación

$$\mathcal{T} = \frac{3V}{2A} \quad (26)$$

Donde:

$\tau$ : esfuerzo cortante [Pa]

V: fuerza cortante vertical [N]

A: área superficial [m<sup>2</sup>]

Para conocer la fuerza cortante de una distribución de cargas es de la siguiente forma:

$$V = \omega \times L \quad (27)$$

Se realiza el mismo procedimiento del esfuerzo por flexión.

Del análisis estático se obtienen los siguientes resultados:

*Tabla 3- 3 Resultados del análisis estático de los elevadores*

Parámetro	Valor
$\sigma_{\text{material}}$ [MPa]	230
$\mathcal{T}_{\text{material}}$ [MPa]	165
FS	2
$\sigma_{\text{diseño}}$ [MPa]	115
$\mathcal{T}_{\text{diseño}}$ [MPa]	82.5
L [m]	0.275
b [m]	0.98
$h_{\text{flexión}} \text{ mínimo}$ [mm]	1.43
$h_{\text{cortante}} \text{ mínimo}$ [mm]	0.01

Como se observa en la tabla, el espesor mínimo para los esfuerzos cortantes son valores muy bajos y que no son comerciales. Éstos nos indican que los esfuerzos principales son debido a flexión, mientras que el espesor mínimo requerido con valores comerciales es de 2 mm.

### 3.3.1.3. Caso especial

Con el fin de asegurar que los elevadores no se vean dañados por el peso de los granos, se realiza el mismo procedimiento cálculo que en la sección 3.3.1, la diferencia radica en que mientras que en los cálculos anteriores se asumía que los granos se encontraban distribuidos de manera equitativamente y solo cargaban una cuarta parte del total de la capacidad. Para este caso se asume que se tiene el total de la capacidad en un solo elevador.

Asumiendo los mismos datos, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

*Tabla 3- 4 Resultados del análisis dinámico de los elevadores*

Parámetro	Valor
masa [kg]	200
aceleración de gravedad [m/s <sup>2</sup> ]	9.81
FS	2
$\sigma_{\text{diseño}}$ [MPa]	101.63
$\tau_{\text{diseño}}$ [MPa]	0.37
Espesor mínimo requerido [mm]	4

Con este análisis, se obtiene que se requiere un espesor mayor que el calculado anteriormente. Se decide que se tomará este nuevo espesor como el requerido, a pesar de ser un caso hipotético se utilizará para evitar daños en el equipo durante la operación.

#### 3.4. Sistema de transmisión

Los elementos más utilizados para la transmisión de potencia mecánica son las bandas y cadenas. Su funcionamiento es que estos elementos se conectan al motor y al eje mediante el uso de poleas o catarinas para cada uno de los elementos respectivamente.

En este trabajo, se empleará el sistema de transmisión por cadena, principalmente porque se emplean para transmitir movimiento entre dos ejes paralelos. Estos sistemas constituyen uno de los métodos más eficientes utilizados para transmitir potencia mecánica, dado que los dientes de las ruedas dentadas evitan que la cadena se resbale. Esta condición les da más capacidad de transmisión y las hace más confiables. El sistema consta de dos ruedas dentadas y un miembro deformable formado por una serie de eslabones rígidos. Estos sistemas transmiten el movimiento entre los ejes por medio del empuje generado entre los eslabones de la cadena y los dientes de las ruedas, que en la práctica se conocen como sprockets.

Este sistema de transmisión presenta ciertas ventajas y desventajas, éstas son:

- La longitud puede variar mediante la adición o eliminación de eslabones.
- Se pueden obtener rendimientos elevados del orden del 98%, dado que se excluyen problemas de deslizamiento entre los componentes del sistema.
- Se puede transmitir rotación a varios árboles o ejes con una misma cadena.
- Cuando se requieren transmitir potencia elevadas simplemente bastará con emplear



múltiples hileras.

Las desventajas que incluye este sistema son:

- Elevados costos de componentes cuando se requieren materiales o tratamientos especiales para evitar el desgaste o uso en ambientes especiales.
- Se requieren montajes precisos con el objetivo de evitar que alguna de las caras de la cadena se someta a cargas superiores y falle por fatiga anticipadamente.
- Se requieren prácticas de mantenimiento minuciosas y procesos de lubricación.
- Se pueden presentar marchas irregulares, oscilaciones o choques en trabajos con máquinas alternativas o durante el accionamiento.

Para la selección de una cadena, se siguen los pasos descritos por Mott, 2006, los cuales se describen a continuación:

1. Proponer la potencia y revoluciones de un motor de catálogos de proveedores.
2. Conocer la velocidad de giro del eje.
3. Especificar el factor de servicio y la potencia de diseño. El factor de servicio depende del tipo de carga que se moverá y del tipo de impulsor.
4. Calcular la relación de velocidades entre el motor y el eje.
5. Consultar en tablas de proveedores el número de cadena y número de dientes del sprocket pequeño. Éste dependerá de la velocidad de giro del eje y la potencia de diseño obtenida en el punto 2.
6. Calcular el número de dientes del sprocket grande mediante la relación de velocidad y número de dientes pequeños. La cantidad de dientes debe ser un número entero, por lo que se deberá redondear el valor obtenido.
7. Comprobar la velocidad de salida con la relación del número de dientes.
8. Obtener los diámetros de paso de los sprockets.
9. Especificar una distancia entre centros nominal. Se recomienda que sea un valor entre 30 a 50 pasos (Mott, 2006).
10. Obtener la longitud de la cadena.
11. Calcular la distancia entre centros teóricos.
12. Calcular los ángulos de contacto de la cadena en cada sprocket.

Al aplicar esta serie de pasos, los resultados obtenidos son los siguientes:

*Tabla 3- 5 Resultados de los sprockets*

Parámetro	Valor
Potencia nominal del motor [HP]	1
Factor de diseño	1.3
Potencia de diseño [HP]	1.3
RPM motor	35
RPM eje	3
Número de cadena	40
Número de paso [mm]	12.70
Dientes sprocket pequeño	11
Tipo de lubricación	A
Relación de velocidades	11.67
Dientes sprocket grande	128
Longitud de la cadena [m]	2
Distancia entre centros teórica [m]	0.508

A continuación, se muestra un esquema del sistema propuesto:

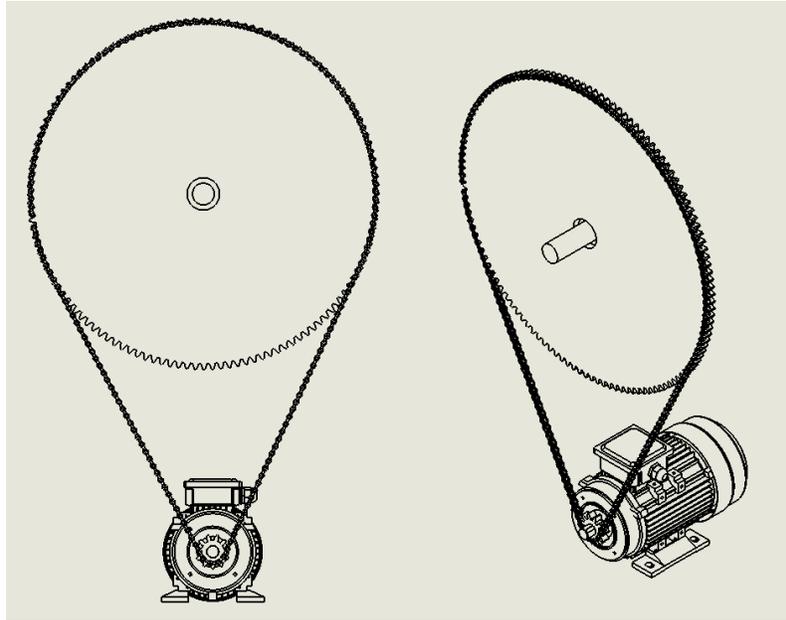


Figura 3 - 6 Esquema del sistema de transmisión propuesto

### 3.5. Eje de transmisión

Un eje o árbol es un componente de dispositivos mecánicos que transmite movimiento rotatorio y potencia. Es parte de cualquier sistema mecánico donde la potencia se transmite desde un motor, que puede ser eléctrico o uno de combustión, a otras partes giratorias del sistema.

Para comprobar que el diámetro propuesto se realiza el siguiente procedimiento:

#### 3.5.1. Fuerzas en el piñón

El sprocket y la cadena generan fuerzas de tensión y momentos en el sistema.

Para conocer el torque del sprocket, se obtiene de la siguiente manera:

Donde:

Pot: potencia de diseño utilizada para calcular el sistema de transmisión

$\omega$ : velocidad angular del eje

Otro factor que se debe conocer es la fuerza de la catarina. Para este caso se asume que solo aplicará fuerza en la dirección de la gravedad, ya que se plantea el poner la catarina de manera colineal. Para conocer la fuerza, se aplica la siguiente ecuación:

$$F_c = \frac{T}{\frac{D_{catarina}}{2}} \quad (28)$$

Donde:

$F_c$ : fuerza de la catrina

$D_{catarina}$ : diámetro de la catarina

### 3.5.2. Diagrama de cuerpo libre

Se realizan los diagramas de cuerpo libre para conocer las cargas que afectan al eje.

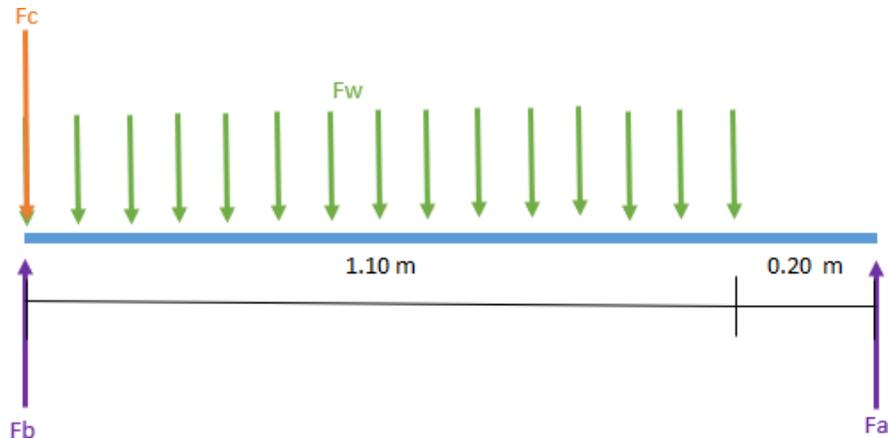


Figura 3 - 7 Esquema de las fuerzas que afectan al eje

Se considera que el tambo tiene una longitud de 1.10 metros y se les aplica una carga distribuida debido a los granos de café ( $F_w$ ) y la Catarina ( $F_c$ ). En este caso solo se tiene las reacciones en las orillas ( $F_a$  y  $F_b$ )

Como se puede observar del diagrama, las fuerzas solo afectan a lo largo del eje z. Realizando la sumatoria de fuerzas en el eje z y momentos en el punto A, se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\sum_z F_z = F_a + F_b - F_w - F_c \quad (29)$$

$$\sum_a M_a = (F_b \times d_{ab}) - (F_w \times d_{aw}) - (F_c \times d_{ab}) \quad (30)$$

Los valores de las fuerzas obtenidas del análisis son las siguientes:

$$F_a = 830.08 \text{ N}$$

$$F_b = 10,275.20 \text{ N}$$

Para conocer el diámetro mínimo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$D = \left[ \frac{32FS}{\pi} \sqrt{\left(\frac{M}{S'}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{kc \times T}{Sy}\right)^2} \right]^{1/3} \quad (31)$$

Donde:

FS: factor de seguridad

M: máximo momento flector [Nm]

T: par de torsión máximo [Nm]

kc: factor de carga debido a la fuente motriz

S': resistencia a la fluencia modificada [Pa]

Sy: resistencia a la fluencia del material [Pa]

Para conocer el máximo momento flector se obtiene del análisis de momentos como el máximo momento:

Gráfico 3- 1 Resultados del análisis de fuerzas en el eje

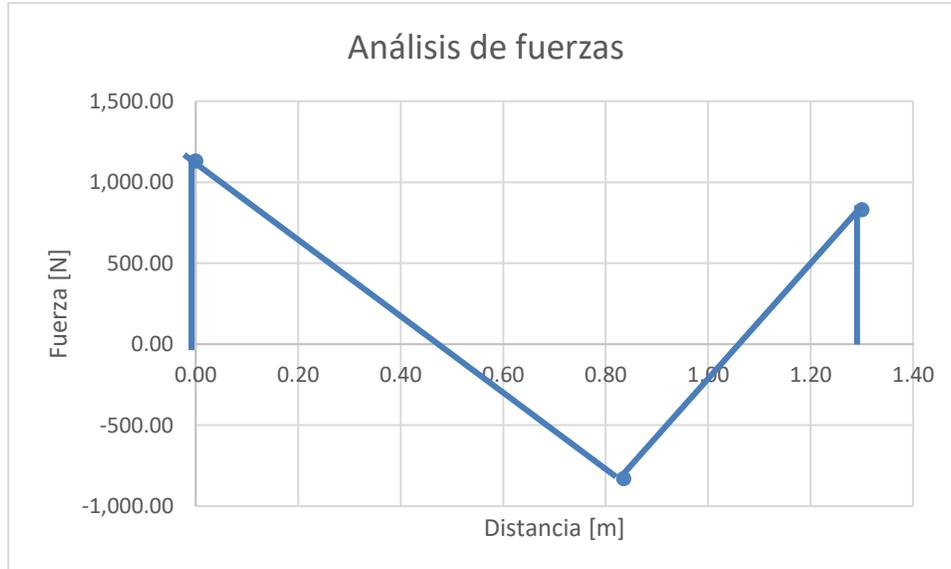
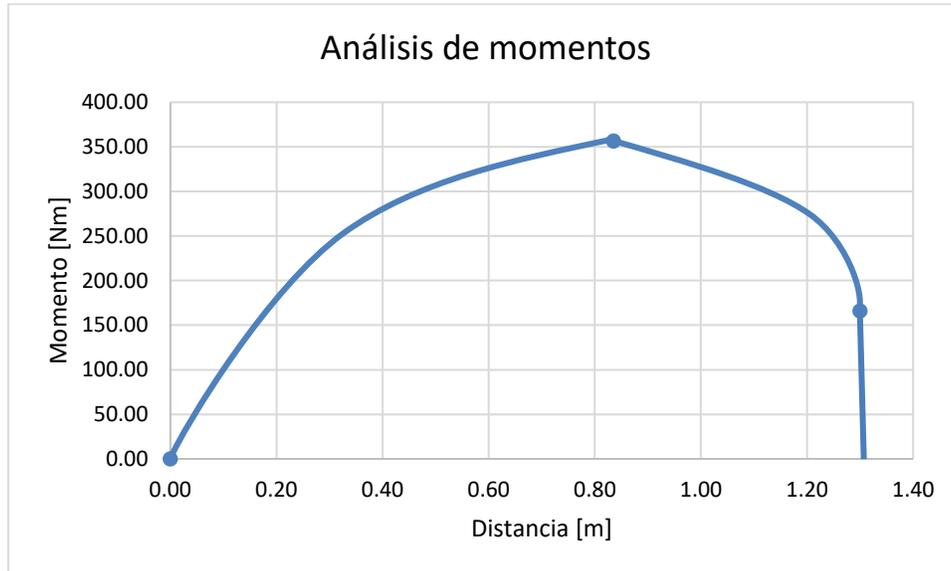


Gráfico 3-2 Análisis de momentos en el eje



El torque se obtiene de la ecuación 13. Para obtener la resistencia a la fluencia modificada, es mediante la siguiente fórmula:

$$S_e = k_a \times k_b \times k_c \times k_d \times k_e \times k_f \times 0.5 \times S_y \quad (32)$$

Donde:

$k_a$ : factor de acabado superficial

$k_b$ : factor de relación de dimensiones

$k_c$ : factor de nivel de confiabilidad

$k_d$ : factor de temperatura de operación

$k_e$ : factor de modificación de concentración de esfuerzos

$k_f$ : factor de condiciones adversas

Algunos de estos factores se obtienen de tablas, mientras que otros se deben calcular, estos se explican más a detalle en los confidentiales

Los valores obtenidos se muestran en la Tabla:

*Tabla 3- 6 Resultados del diseño del eje*

Parámetro	Valor
M [Nm]	549.83
T [Nm]	596.83
Sy [MPa]	206.81
FS	2
k <sub>c</sub>	1.75
k <sub>a</sub>	0.8
k <sub>b</sub>	0.75
k <sub>c</sub>	0.81
k <sub>d</sub>	1.60
k <sub>e</sub>	1
k <sub>f</sub>	1
d [mm]	62.28

Debido a que se utilizará tubo hueco, se debe conocer las medidas comerciales que cubran las necesidades requeridas, este se obtiene de la siguiente forma:

$$d = d_{ext} \left[ 1 - \left( \frac{d_{int}}{d_{ext}} \right)^4 \right]^{1/3} \quad (33)$$

Donde  $d_{ext}$  y  $d_{int}$  son los diámetros externo e interno del tubo. Para conocer el valor, se debe iterar con los valores comerciales, en este caso, las medidas que cubren las necesidades son de un tubo de 3 pulgadas cédula 40.

### 3.6. Motor

En esta sección se revisará si el motor propuesto cubre los requerimientos.

Para conocer la potencia necesaria del motor, se debe conocer la inercia que se debe vencer



por los siguientes elementos:

- Eje
- Granos
- Elevadores

Como se considera que el tambor no estará en movimiento, no se calculará su momento de inercia.

### 3.6.1. Eje

Para conocer este, se utiliza la ecuación del momento de inercia de un eje hueco:

$$I = \frac{m(R^2 + r^2)}{2} \quad (34)$$

Donde:

m: masa del cilindro [kg]

R: radio mayor [m]

r: radio menor [m]

Para conocer la masa, se requiere conocer el volumen del eje y la densidad del material

### 3.6.2. Granos

Se realiza el mismo procedimiento que el utilizado para el eje, ya que se considera que los granos son un cilindro hueco.

### 3.6.3. Elevadores

Para conocer la inercia de este elemento, se utilizará el teorema de ejes paralelos;

$$I_{ele} = I_{placa} + m_{placa} \times r^2 \quad (35)$$

Donde:

$I_{placa}$ : momento de inercia de una placa [kg\*m<sup>2</sup>]

$m_{placa}$ : masa de la placa [kg]

r: radio de giro [m], el cual consiste en la distancia total desde el centro del eje hasta la

longitud final del elevador.

Para conocer  $I_{placa}$ , se utiliza la ecuación del momento de inercia de un rectángulo:

$$I_{placa} = \frac{m \times L^2}{12} \quad (36)$$

Donde “L” es la longitud del álabe que se propuso anteriormente.

Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla

*Tabla 3- 7 Datos iniciales para el diseño del motor*

Parámetro	Valor
densidad del AISI 304 $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	8,000
Longitud del eje [m]	1.13
radio mayor del eje [m]	0.057
radio menor del eje [m]	0.055
masa del eje [kg]	8.4
radio mayor del café [m]	0.33
radio menor del café [m]	0.06
Longitud del secador [m]	1.13
masa del café [kg]	250
Longitud del álabe [m]	0.282
masa del álabe [kg]	5.4
radio de giro [m]	0.327
Momento de inercia del eje [kg*m <sup>2</sup> ]	0.03
Momento de inercia del café [kg*m <sup>2</sup> ]	13.66
Momento de inercia del álabe [kg*m <sup>2</sup> ]	0.63
Momento de inercia total [kg*m <sup>2</sup> ]	14.95



Conociendo la inercia total, se podrá obtener el momento que realiza el motor:

$$M_{motor} - M_{granos} = I_{total} \times \alpha \quad (37)$$

Donde:

$M_{motor}$ : momento de torsión que realiza el motor [Nm]

$M_{granos}$ : momento de torsión de los granos [Nm]

$I_{total}$ : inercia total [kg\*m<sup>2</sup>]

$\alpha$ : aceleración angular [rad/s<sup>2</sup>]

Para conocer el momento de torsión de los granos, se calcula de la siguiente forma:

$$M_{granos} = m \times g \times r \quad (38)$$

Donde:

$m$ : masa de granos [kg]

$g$ : aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

$r$ : radio de giro de los granos [m]

Mientras que, para conocer la aceleración de la gravedad, se calcula de la siguiente forma:

$$\alpha = \frac{\pi \times \omega}{t} \quad (39)$$

Donde:

$\omega$ : velocidad angular [rad/s]

$t$ : tiempo de arranque [s]; se toma el valor de 2.5 segundos, ya que se basa en el trabajo presentado por (de la Cruz de la Cruz, 2020)

Para conocer la potencia requerida, se realiza lo siguiente:

$$W_{motor} = M_{motor} \times \omega \quad (40)$$

Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

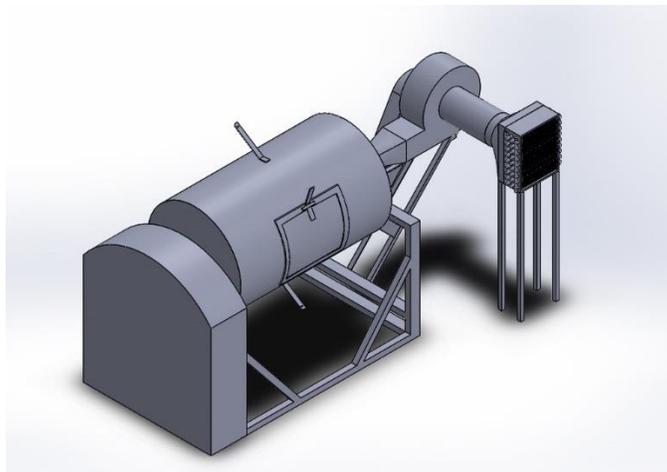
*Tabla 3- 8 Resultados del diseño del motor*

Parámetro	Valor
Momento de inercia total [kg*m <sup>2</sup> ]	9.93
aceleración angular [rad/s <sup>2</sup> ]	0.13
Momento torsor de los granos [Nm]	573.70
Potencia del motor [W]	180.62

Como se observa, la potencia mínima es de 0.24 HP, por lo que el motor de 1 HP cubre las necesidades requeridas.

### 3.7. Propuesta

La propuesta de diseño se muestra con las siguientes figuras. El diseño se mandó a construir mediante la compañía ASA. Como se mencionó anteriormente, la mayor parte del diseño se mantuvo, siendo las dos únicas modificaciones realizadas el tamaño del eje, la cual se realizó una modificación debido a que también es la entrada del aire caliente, y el motor, debido a que no se utilizó un motorreductor, sino un sistema de engranes, pero se mantuvo la velocidad de giro propuesta de 3 RPM. A continuación, se muestra el diseño por computadora del secador, al igual que un plano de la cámara de secado y fotos del modelo físico. Para más detalle de los planos, revisar los anexos.



*Figura 3 - 8 Modelo computacional de la propuesta del secador*

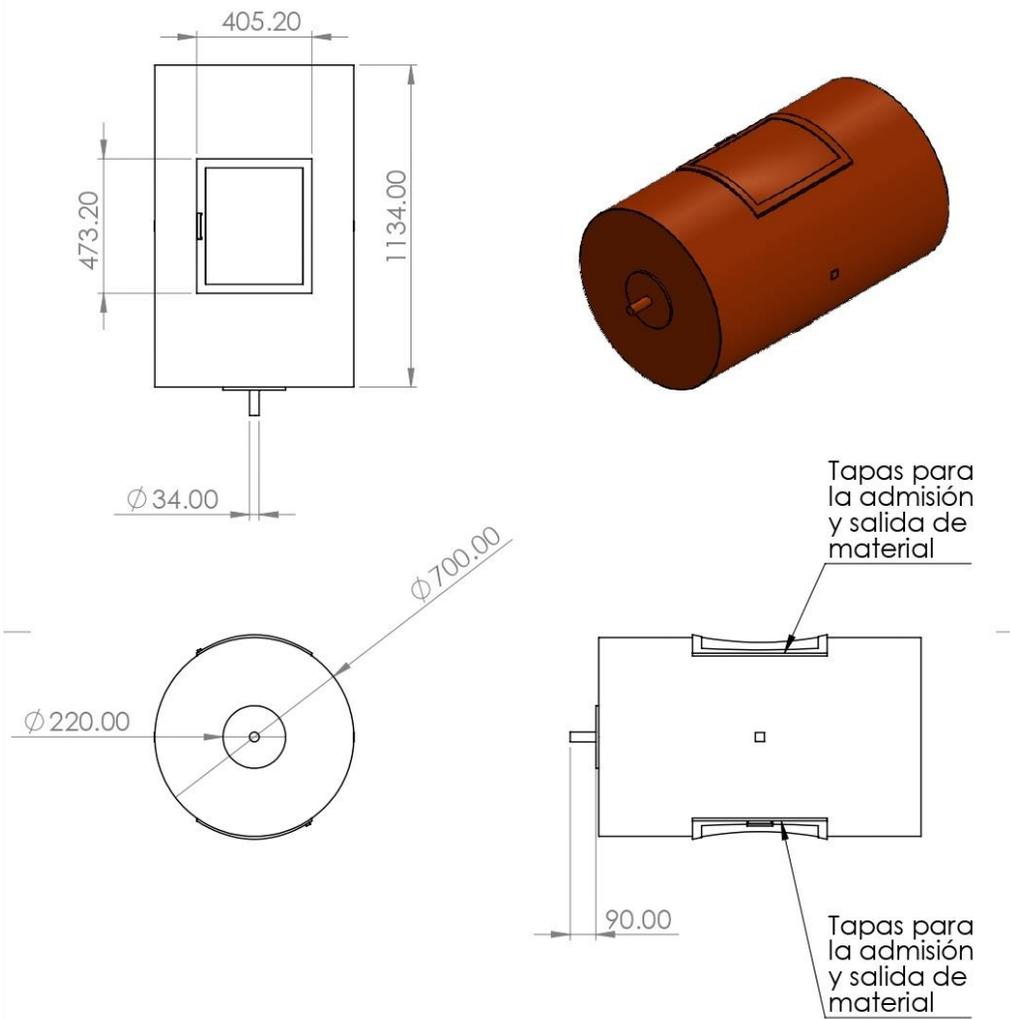


Figura 3 - 9 Plano de la cámara de secado



Figura 3 - 10 Modelo físico del secador



*Figura 3 - 11 Arreglo para pruebas en laboratorio*

### 3.8. Conclusiones

Del capítulo, se sintetiza lo siguiente:

- Se propuso un diseño teórico de secador rotatorio.
- Una vez realizada la etapa de diseño y validación teórica, se procedió a la manufactura del prototipo.
- De la propuesta calculada, al momento de manufacturar se llegaron a valores similares como en el caso del espesor de los elevadores y el tamaño del eje. Donde se tuvo la principal diferencia fue en el motor, ya que se había propuesto un motorreductor, pero por experiencia de los fabricantes, se utilizó un sistema de engranes.

#### 4. Equipos auxiliares

El objetivo de este capítulo es el dimensionar los equipos necesarios para el proceso de secado, éstos son: intercambiador de tubos aletados, intercambiador de placas, ventilador, bomba hidráulica y los paneles solares necesarios, como los mostrados en el siguiente diagrama

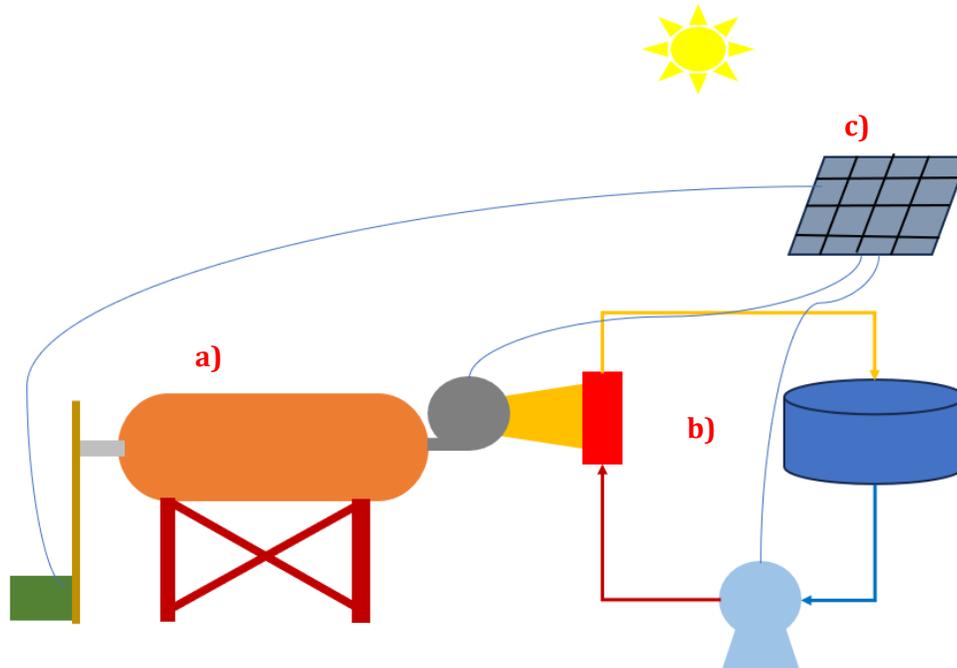


Figura 4 - 1 Esquema del proyecto: a) sistema de secado, b) sistema geotérmico, c) sistema fotovoltaico

##### 4.1. Zona de estudio

El proyecto se tiene planeado su instalación en la región de Mesillas, Nayarit, en las cercanías de la zona del Molote y Mesillas. Esta zona fue elegida debido a lo reportado por Garduño (2021), quien indica que esta locación ha sido estudiada por la empresa PI INGENERA, quienes han reportado que se encuentran pozos a cielo abierto con recurso geotérmico de 90 °C, además se encuentra en las inmediaciones de zonas cafetaleras, siendo una de las empresas regionales “Café Molote”.

La locación se encuentra en las coordenadas 21°12'39"N, 105°01'04"W

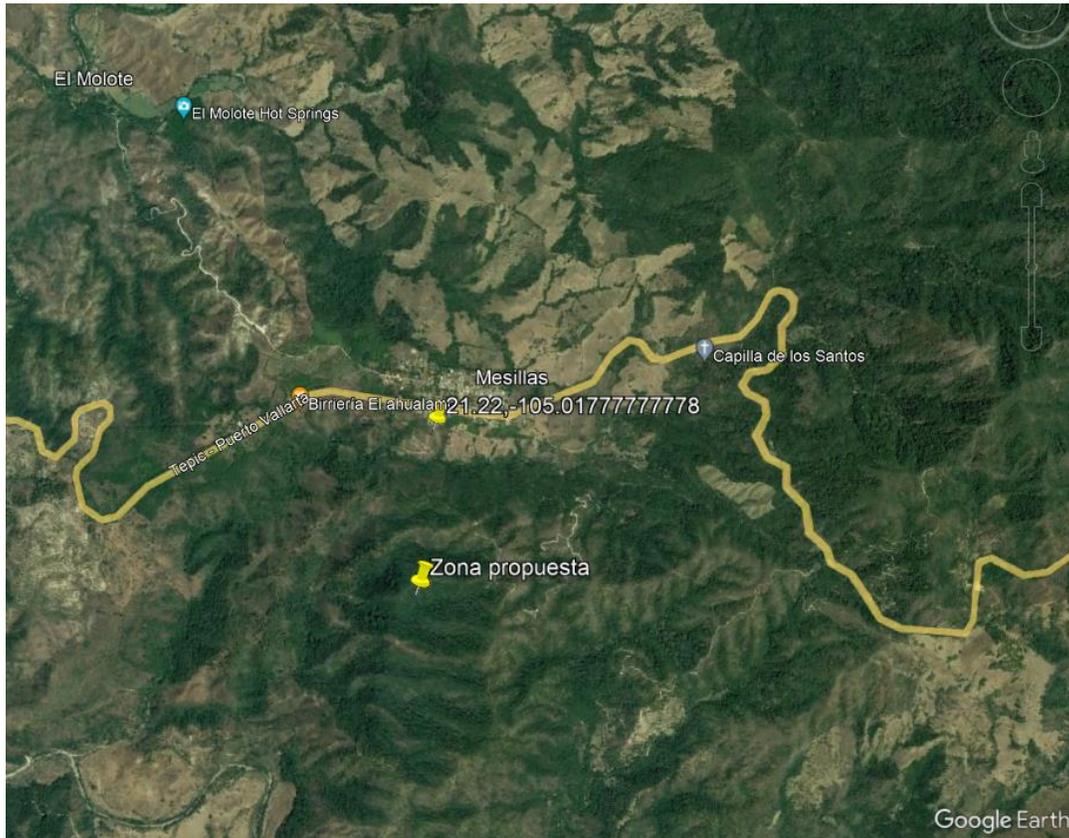


Figura 4 - 2 Propuesta de la localidad de estudio



Figura 4 - 3 Productores de café locales de la región de estudio

#### 4.2. Cargas térmicas

Del modelo planteado en el capítulo 2, se plantean su instalación para la región de Mesillas, Nayarit, siendo los datos de entrada, los siguientes:

Tabla 4- 1 Parámetros de operación del secador

Parámetro	Valor
Masa de granos a secar [kg]	200
Temperatura dentro de la cámara [°C]	50
Temperatura ambiente [°C]	27
Humedad inicial granos [%b.h.]	55
Humedad final granos [%b.h.]	10
Humedad absoluta en el ambiente [kg/kg]	0.0055
Humedad absoluta en la cámara [kg/kg]	0.06

Las cargas térmicas obtenidas del modelo matemático son las siguientes:

*Tabla 4- 2 Cargas térmicas en el secador*

energía térmica		
q1	16,207.89	2.47%
q2	603.54	0.09%
q3	3.56	0.001%
q4	542,726.69	82.70%
q5	57,900.55	8.82%
q6	38,779.24	5.91%
qtot	656,221.46	100.00%

Como se aprecia, las principales cargas térmicas son el calor latente la principal, seguido de las pérdidas por el material, la renovación de aire y finalmente el calor sensible de los granos.

#### 4.3. Ventilador

En puntos anteriores, se explicó cómo obtener el flujo que debe cubrir, para poder seleccionar el equipo, también se debe conocer la potencia que el ventilador debe mantener con el propósito de hacer circular el aire dentro del circuito de secado

Para ello, se debe hacer un análisis de flujo en tubería, y mediante la aplicación de la ecuación de Bernoulli

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + h_{vent} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_l \quad (41)$$

Cada elemento representa la diferencia de presión, energía cinética, potencial, carga del equipo y pérdidas en la tubería. La ecuación se simplifica al hacer las siguientes consideraciones:

- El secador está abierto al ambiente, la presión es la misma
- El aire tiene una velocidad de cero a la entrada
- la diferencia de altura es despreciable

La nueva ecuación queda de la siguiente manera:

$$h_{vent} = \frac{v_2^2}{2g} + h_l \quad (42)$$

Para este caso, la carga del ventilador depende de la velocidad a la que entra al secador y de las pérdidas por fricción.

Para conocer la velocidad, se debe multiplicar el volumen específico del aire por el flujo másico calculado anteriormente y se multiplica por el inverso del área superficial de la entrada de aire del secador.

$$v = \frac{\dot{m} \times v_{aire}}{A_{entrada}} \quad (43)$$

En este caso, se propone el siguiente arreglo de tubería

Los datos necesarios para conocer la carga del ventilador son los siguientes:

Tabla 4- 3 Datos iniciales para la selección del ventilador

Parámetro	Valor
velocidad [m/s]	3
tipo de material de la tubería	Acero
Longitud de tubería [m]	1.55
rugosidad del material [mm]	0.06
Superficie entrada de aire [m <sup>2</sup> ]	0.2

De acuerdo con los datos de entrada, el ventilador requerido debe tener un flujo de 0.66 kg/s, 1,250 cfm y una carga de 0.5 m.

El equipo que mejor se adapta es SP157992SCO588V0-CET-5000-460V

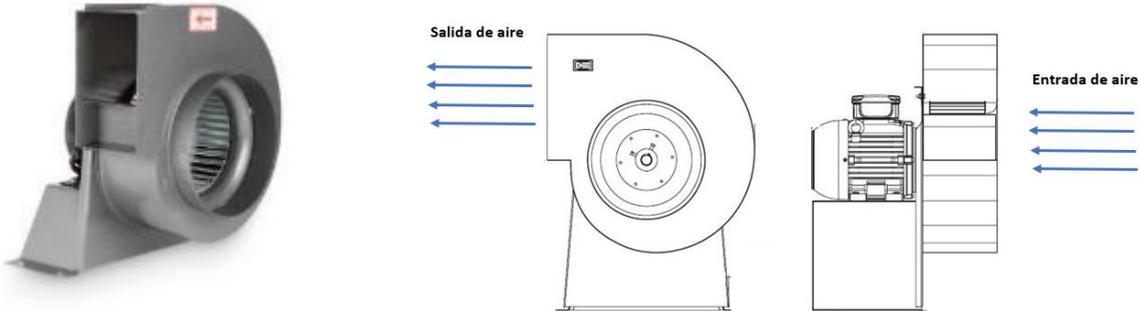


Figura 4 - 4 Ventilador propuesta: a) modelo seleccionado, b) esquema de los flujos de aire (Soler & Palau, 2023)

Para más información, revisar los confidentiales, donde se presenta la hoja de datos técnicos del ventilador.

Para conocer la carga térmica que entrega el aire, se considera los datos de mencionados en la tabla Tabla 4-3., y la tabla anterior, por lo que la carga máxima que entrega el equipo es de 11.92 kWt, por lo que el tiempo total de secado es de 14.65 horas.

#### 4.4. Bombas hidráulicas

Se aplica el mismo procedimiento que en el dimensionamiento del ventilador, en este caso, se debe considerar la caída de presión de los intercambiadores. La ecuación de Bernoulli queda de la siguiente manera:

$$h_{bomba} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_l \quad (44)$$

La velocidad se obtiene de la misma manera que en el ventilador. Como se plantea que se utilice energía fotovoltaica para energizar el sistema, se buscan equipos de bombeo de corriente directa, con el fin de que se conecten directamente al sistema fotovoltaico y se eviten altos picos de corriente que puedan dañar el sistema eléctrico del proyecto.

Los datos de entrada para el dimensionamiento son los siguientes:

*Tabla 4- 4 Parámetros iniciales para la selección de la bomba*

Calor total	4.06	kW
Flujo másico	0.14	kg/s
Calor específico agua	4.20	kJ/kgK
Temperatura agua entrada	75	°C
Temperatura agua salida	67	°C
densidad agua	977	kg/m <sup>3</sup>
Flujo volumétrico	0.52	m <sup>3</sup> /h

Para la tubería, se utilizará tubo plus y solo se cambiará a cobre para cuando se llegue al intercambiador. En el caso del flujo másico, se seleccionó la bomba que llegaba a aguantar la mayor temperatura. Para Mesillas, se toma de referencia los datos reportados por Garduño (2021) para la longitud de tubería requerida, las condiciones de trabajo son:

*Tabla 4- 5 Parámetros de diseño de la red de tubería*

Parámetro	Valor
Pérdida de presión en el intercambiador de tubos aletados [MPa]	0.1
Velocidad del agua [m/s]	1.08
Longitud de la tubería [m]	12
Diámetro de la tubería [inch]	1
Codo 90	8
Válvula de globo	1
Válvula check	1
Conexión tipo "T"	1
Pérdida total en tubería [m]	1.71
Carga de la bomba [m]	10.85

Para más información, revisar los anexos donde se pone la hoja de datos técnicos de la bomba que mejor se adapta.

#### 4.5. Intercambiador de tubos aletados

Para el cálculo del intercambiador de tubos aletados, se utilizó la metodología de Pis'Mennyi, Polupan, Carvajal, Sánchez & Piro (2016), del manual para el cálculo de intercambiadores de calor y bancos de tubos aletados, la cual consiste en lo siguiente:

1. Conocer las condiciones de operación como las temperaturas y flujos másicos de agua y aire en el sistema, pérdidas de presión en el sistema y dimensiones del conducto por el que pasará el aire.

2. Balance térmico entre el agua y el aire del sistema.
3. Proponer las dimensiones del banco de tubos mediante las características físicas de los tubos aletados los cuales son el material, diámetro de los tubos aletados, la altura, el paso y espesor de las aletas; y propiedades térmicas.
4. Cálculo del área de superficie de intercambio, donde se obtendrá la cantidad de tubos necesarias.
5. Cálculos de caída de presión del aire y del agua dentro del sistema. Cabe resaltar que para el dimensionamiento del ventilador y bomba se propusieron valores obtenidos de trabajos previos, por lo que se deben de corroborar los cálculos, una vez realizado el dimensionamiento del intercambiador de calor.

Los valores iniciales de las características geométricas de los tubos aletados y de diseño del intercambiador se tomaron de valores comerciales y trabajos realizados por Garduño (2021) respectivamente:

*Tabla 4- 6 Parámetros de diseño de los tubos aletados*

Parámetro [cm]	Valor
Diámetro interno	1.4
Espaciado entre aletas	0.26
Espesor aleta	0.07
Espesor del tubo	0.2
Diámetro aleta	3.25
Diámetro externo	1.6
Longitud del tubo con aletas	26.7
Longitud total del tubo	31.8

Tabla 4- 7 Parámetros de diseño del intercambiador

Parámetro	Valor
Temperatura del aire a la entrada	27 °C
Temperatura del aire a la salida	50 °C
Presión del aire a la entrada	77 kPa
Pérdidas de la presión del aire en el intercambiador	0.001 MPa
Temperatura del agua a la entrada del intercambiador	75 °C
flujo másico de aire	0.18 kg/s
Flujo másico del agua	0.14 kg/s
Presión del agua a la entrada	0.1 MPa
Resistencia hidráulica del conducto para el flujo de agua	0.01 MPa
dimensiones del conducto para el flujo de aire (axbxc)	0.4x0.3x

Los resultados obtenidos del método utilizado, nos indica que se requiere de un total de 38 tubos. El arreglo es de tipo triangular, se acomodan 9 filas de tubos y por 4 columnas para un total de 36 tubos.

El arreglo se muestra en la siguiente figura, para un mayor detalle de lo confidencial, revisar el anexo.

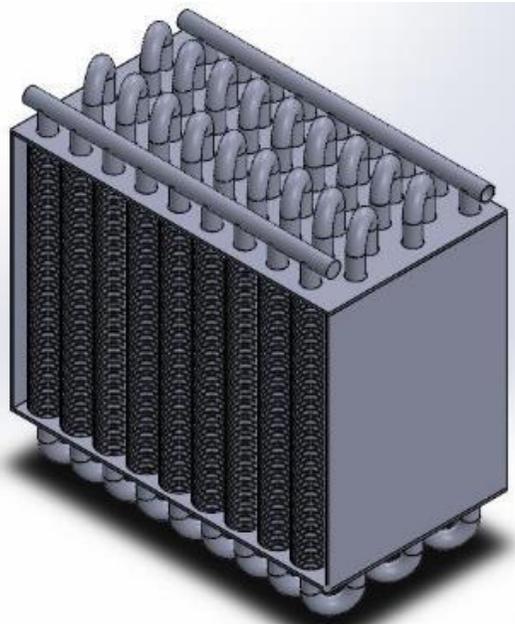


Figura 4 - 5 Propuesta preliminar del intercambiador de calor



#### 4.6. Validación modelo

Como uno de los alcances de este trabajo, una vez realizado el diseño teórico y dimensionamiento de los equipos del sistema térmico, se procedió a la contratación de de diferentes empresas para la manufactura del proyecto.

Para el diseño de todo el secador, se contactó con la empresa ASA Maquinaria, por su experiencia en el desarrollo de equipos de secado. La diferencia con el diseño final son los siguientes:

- La entrada de aire es de 0.2 m<sup>2</sup>.
- El motor utilizado es sin reductor de velocidad y utiliza un sistema de más de dos engranes.
- Los datos técnicos del ventilador no fueron proporcionados, pero se midió la velocidad del aire, la cual es de 5 m/s, por lo que da un flujo de 340 cfm.
- El tiempo para el proceso de secado aumenta hasta 40 horas.

Para comprobar el modelo matemático y la información proporcionada, se realizó el siguiente análisis:

1. Para la validación del modelo matemático, se consultó a los fabricantes sobre el tiempo de secado. Mientras que ellos consideran una temperatura en la cámara de 80 °C, y al realizar ellos pruebas en laboratorio, mencionan que se tardan 24 horas para los 200 kg. Cambiando los parámetros de operación y considerando los 80 °C en la cámara; el tiempo total es de 23.62 horas, por lo que se tomó como una buena aproximación y correcto el modelo.
2. Debido a los cambios realizados en el sistema térmico se volvieron a realizar el dimensionamiento del intercambiador. Se contacto a la empresa Itisa Calor por su historial de proyectos realizados. Al mandar a fabricar el intercambiador, los proveedores ofrecieron un diseño alternativo, donde la principal diferencia es que las medidas del ducto serían de mayor tamaño, de los 0.4 m x 0.3 m propuestos, se aumentaron a 0.75 m x 0.75 m, haciendo que se tenga la misma cantidad de tubos calculados, pero con una menor pérdida de presión en la sección del aire de trabajo. Para comprobar lo propuesto, se redimensiono el intercambiador, llegando a un resultado similar al ofrecido. El nuevo arreglo es el siguiente, de igual manera revisar los confidentiales para mayor detalle:



*Figura 4 - 6 Diseño final del secador*



*Figura 4 - 7 Modelo físico del intercambiador*

#### 4.7. Diagramas de flujos

Para tener un mejor entendimiento de los equipos necesarios y del proceso de secado, se incluye un diagrama de flujo y proceso o DFP, al igual que un diagrama de tubería e instrumentación o DTI que servirá para trabajos posteriores en la realización de pruebas de laboratorio.

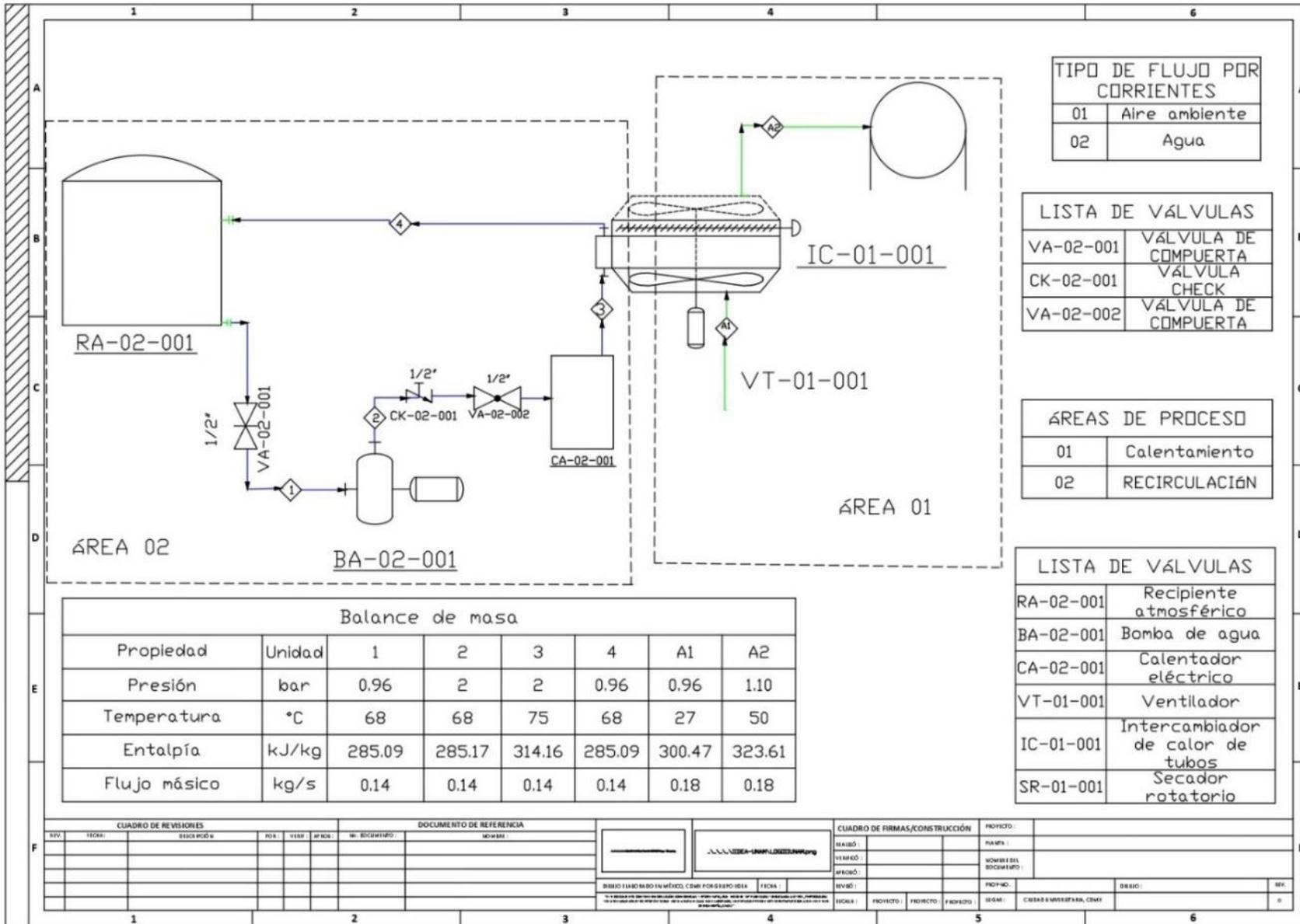


Figura 4 - 8 DFP del proyecto

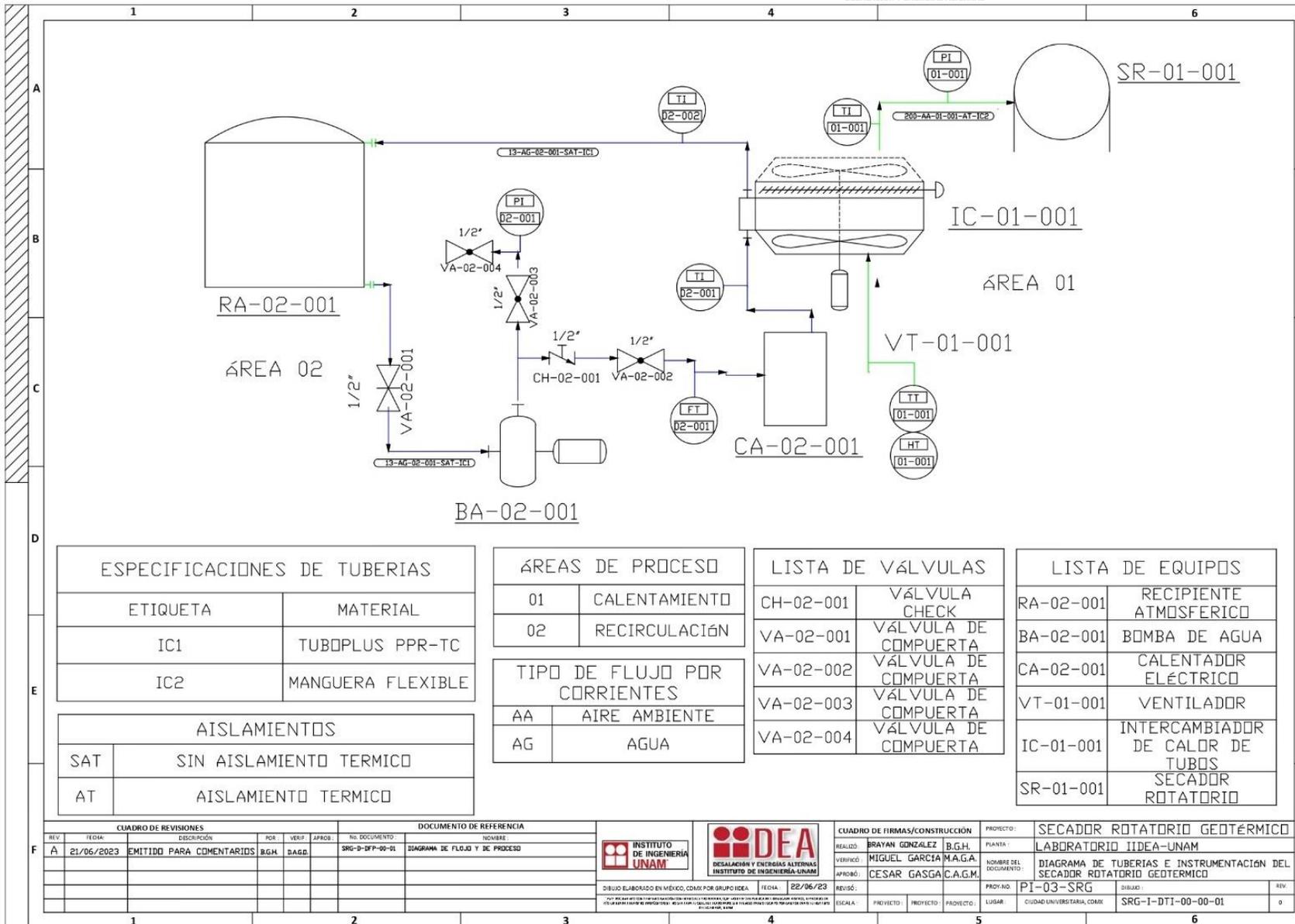


Figura 4 - 9 DTI del proyecto



Como estos diagramas fueron realizados para su aplicación en pruebas de laboratorio, el recurso geotérmico se simula con un recipiente atmosférico que puede ser un tinaco comercial y un calefactor eléctrico para elevar la temperatura del agua.

#### 4.8. Paneles solares

Para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico, se optó por un método alternativo al tradicional que es el Hora Sol Pico (HSP), el cual se basa en el máximo aprovechamiento de la energía solar, realizado de manera conjunta con el doctor León de los Santos Gabriel. La principal característica del método HSP, es que se basa en la cantidad de horas al día en que se recibe una irradiación de más de  $1000 \text{ W/m}^2$ , además de que llega a ser un dato fácil de obtener de datos climatológicos. La desventaja es que, dependiendo de la zona de estudio, las HSP son variables, llegando a ser en algunas regiones de solo 5 a 7 HSP, cuando se tiene hasta 12 horas de luz solar, haciendo que los sistemas se sobredimensionen y se requiera una inversión mayor.

Para este método se realiza el siguiente procedimiento:

##### 4.8.1. Panel solar

- 1) Establecer la potencia utilizada en los equipos y las horas de operación.

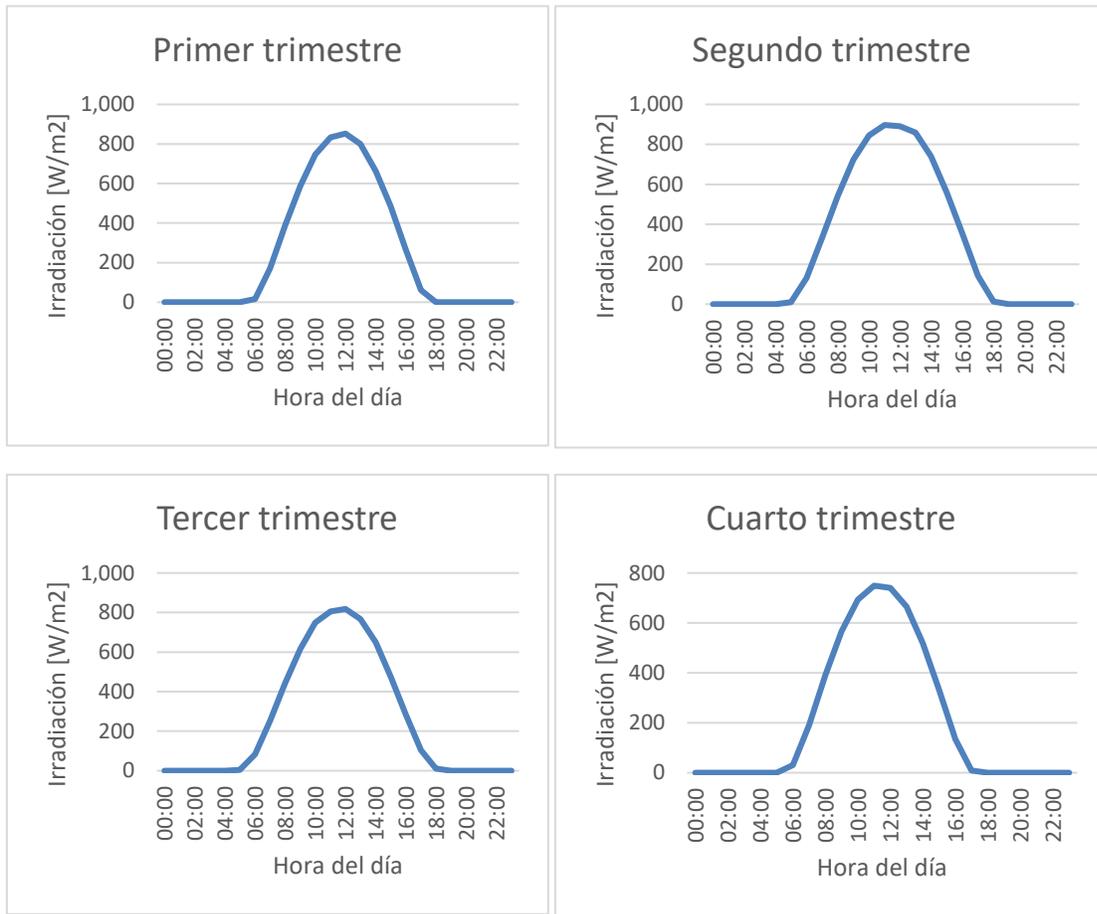
*Tabla 4- 8 Irradiación solar por hora en Mesillas.*

Hora del día	Potencia equipos [W]
00:00	0
01:00	0
02:00	0
03:00	0
04:00	0
05:00	0
06:00	0
07:00	210
08:00	2,075
09:00	2,075
10:00	2,075
11:00	2,075
12:00	2,075
13:00	2,075
14:00	2,075
15:00	2,075
16:00	2,075
17:00	0
18:00	0
19:00	0
20:00	0
21:00	0
22:00	0
23:00	0

Se propone este horario de operación, ya que en la zona de estudio, amanece por lo general entre 6:00 y 7:00, por lo que para asegurar que haya personal, se enciende solamente de 7:00 a 8:00 la bomba de agua para que el agua de trabajo llegue a la temperatura de operación. El resto del tiempo ya se encienden los demás equipos para empezar con las labores de secado.

- 2) Obtener la irradiación solar por hora de la región de estudio. Para simplificar los cálculos, se analizará por trimestres y se obtiene el promedio de cada uno.

Gráfico 4 - 1 Irradiación solar promedio por trimestre promedio



3) Se utilizará una constante de proporción aproximación, la cual consiste en considerar que el día cuenta con 12 horas de radiación. La aproximación consiste en que al medio día se tendrá la máxima cantidad de irradiación, si se considera que a las 12:00 se tiene el 100%, por cada hora a partir de la salida del sol, por lo que se tiene un aumento del 17% por cada hora. Para mayor detalle de esta aproximación, se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4- 9 Constante de proporción de la irradiación

Hora del día	Constante de proporción [1]
07:00	0.17
08:00	0.33
09:00	0.50
10:00	0.67
11:00	0.84
12:00	1.00
13:00	0.84
14:00	0.67
15:00	0.50
16:00	0.33
17:00	0.17

- 4) Se buscan los datos técnicos de un modelo comercial, para conocer la potencia total generada de los paneles y poder dimensionar la cantidad de paneles necesarios. Para este trabajo se propone utilizar el modelo ET-M672BH450WW/WB de la marca Elite Plus de 450 W. Para mayor información de sus datos técnicos, revisar los confidentiales.
- 5) Para calcular la potencia generada, se utiliza la siguiente fórmula

$$P_{gen} = \frac{I_p \times P_p}{STC} \times N_t \quad (45)$$

Donde:

%p: constante de proporción calculada anteriormente

$I_p$ : irradiación promedio del trimestre

$P_p$ : potencia del panel

STC: condiciones estándar de testeo, equivalen a 1000 W/m<sup>2</sup>

$N_t$ : número de paneles necesarios

Lo principal es que la potencia generada llegue a cubrir la demanda requerida en su mayoría, y el restante sea cubierto con las baterías.

- 6) Se dimensiona el sistema al calcular la cantidad de paneles en serie y paralelo necesarios.

#### 4.8.2. Baterías

Para el dimensionamiento de las baterías, se realiza el siguiente método:

1) Se calcula la demanda del sistema en Ampere-hora, mediante la siguiente ecuación

$$E_{d(Ah)} = \frac{E_{d(Wh)}}{\eta_{pce} \times V_{nsv}} \quad (46)$$

Donde:

$E_{d(wh)}$ : es la potencia total del sistema en un día

$\eta_{pce}$ : factor de conversión, se considera de 0.9

$V_{nsv}$ : voltaje nominal del sistema

Para conocer el voltaje nominal, se selecciona de la siguiente tabla, dependiendo de la potencia del sistema

Tabla 4- 10 Relación del voltaje del sistema con la potencia

Voltaje nominal del sistema [V]	Potencia del sistema [W]
12	$P < 800$
24	$800 < P < 1600$
48	$1600 < P < 3200$

En nuestro caso, como la potencia es de 2,075 W, el voltaje para nuestro proyecto es de 48 V

2) Se calcula la capacidad del banco de baterías mediante la siguiente ecuación:

$$B_{rc} = \frac{E_{c(Ah)} \times D_s}{(DOD)_{max} \times \eta_T} \quad (47)$$

Donde:

$\eta_t$ : factor de corrección de temperatura, el cual se considera de 0.9

$DOD_{max}$ : máxima descarga de la batería, se considera de 80%

$D_s$ : son los días de autonomía en los que funcionará las baterías de manera independiente, se considera de 2 días.

Todos estos valores fueron seleccionados de acuerdo a Bhuiyan & Asgar (2003), dimensionaron un sistema aislado con valores de potencia similares a los obtenidos en el proyecto.

3) Se calculan la cantidad de baterías en paralelo, en serie y el total. Para ello se utilizan las siguientes fórmulas

$$B_p = \frac{B_{rc}}{B_{sc}} \quad (48)$$

$$B_s = \frac{V_{nsv}}{V_{nbv}} \quad (49)$$

$$B_T = B_p \times B_s \quad (50)$$

Se seleccionó la marca YaBo, por tener un modelo que tiene un voltaje de operación de 48 V, mientras que la capacidad de la batería es de 200 Ah. Para mayor información del equipo, revisar los confidenciales.

#### 4.8.3. Inversor

Para la selección del inversor, deberá ser de una potencia mayor a la del sistema, por lo que se debe buscar uno mayor 2.10 kW. Se seleccionó el modelo Sp48/120—3000L de la marca Swipower, por tener una potencia máxima de operación de 3,000 W y voltaje de operación entre 42 V y 58 V. Para mayor detalle, revisar los confidenciales.

#### 4.8.4. Propuesta

Los resultados obtenidos del dimensionamiento son los siguientes:

*Tabla 4- 11 Dimensionamiento del sistema fotovoltaico*

Número de paneles totales	12
Paneles en serie	6
Paneles en paralelo	2
Baterías totales	6
Baterías en serie	1
Baterías en paralelo	6

A continuación se muestran los gráficos donde se detallan la cantidad de energía eléctrica generada con los paneles y la potencia de operación con las horas de operación propuesta.

Gráfico 4 - 2 Comparación entre producción y la demanda de energía eléctrica en el proyecto





Como se aprecia, se puede llegar a cubrir la demanda con el arreglo propuesto. Para comparar la cantidad de equipos necesario si se hubiera utilizado el método de HSP, se obtuvieron un resultado de 28 paneles totales y 11 baterías. Esto nos repercute principalmente en la cantidad de material que se debe comprar y en el análisis financiero que se realizará a continuación.

#### 4.9. Recapitulación

A manera de sumario, se enlistan las consideraciones y resultados del proyecto

Tabla 4- 12 Recapitulación de parámetros de diseño y resultados

Marco	Concepto	Valor
Parámetros de operación del secador	Temperatura ambiente [°C]	27
	Temperatura de la cámara de secado [°C]	50
	Masa de granos a secar [kg]	200
	Humedad inicial de los granos (B.H.) [%]	55
	Humedad final de los granos (B.H.) [%]	10
Energía térmica requerida	Energía sensible de los granos [MJ/kg]	16.2
	Energía sensible del material del secador [MJ/kg]	0.6
	Energía sensible del aire [kJ/kg]	3.56
	Energía latente de vaporización de los granos [MJ/kg]	542.7
	Pérdidas de energía en el equipo [MJ/kg]	57.9
	Energía requerida para la renovación de aire [MJ/kg]	38.8
	Energía total [MJ/kg]	656.221
Características de operación del secador	Potencia térmica del secador [kW]	4.06
	Velocidad del aire [m/s]	5.0
	Diámetro de entrada del aire [m]	0.2
	Tiempo de secado [horas]	44.89

Parámetros de operación de la bomba de agua	Temperatura máxima del agua de trabajo [°C]	75
	Temperatura de salida del agua [°C]	68
	Flujo másico [kg/s]	0.14
	Carga de la bomba [m]	8.66
Parámetros de operación del intercambiador de tubos aletados	Temperatura de entrada del aire [°C]	27
	Temperatura de salida del aire [°C]	50
	Temperatura del agua a la entrada [°C]	75
	Dimensiones de la entrada del aire en el conducto [m]	0.75 x 0.75
	Número de columnas	2
	Número de filas	19
	Cantidad total de tubos	38
Características de operación de los módulos fotovoltaicos	Corriente Pico del módulo [Amp]	10.85
	Corriente de corto circuito [Amp]	11.6
	Voltaje del módulo [V]	41.5
	Voltaje de corto circuito [V]	49.3
	Potencia del módulo [W]	450
	Módulos en paralelo	6
	Módulos en serie	2
	Total de módulos	12
Características de las baterías	Voltaje [V]	48
	Capacidad [Ah]	200
	Total de baterías	6



#### 4.10. Conclusiones

De este capítulo se extrae lo siguiente:

- Se considera el modelo matemático como válido, debido a que se comprobó con información proporcionada por el fabricante de pruebas experimentales que ellos realizaron.
- Al igual que el secador, un aspecto importante del proyecto fue el diseño teórico y la manufactura del intercambiador de tubos aletados. A pesar de las modificaciones recomendadas del fabricante, se llega al mismo resultado, solamente cambiando la configuración.
- Se realizó el dimensionamiento de los demás equipos y se comprobó con modelos comerciales.
- Se propone un diseño para lograr uno de los objetivos del proyecto, el cual es el cubrir la demanda eléctrica del proyecto mediante el empleo de la energía fotovoltaica.



## 5. Análisis económico

En este capítulo se definirán las características de la zona de estudio para su futura instalación y se realizará un análisis económico del proyecto con base en la producción de café para un periodo de 10 años. Se enlistará la cotización de los materiales, equipos, mano de obra y costos de producción y se realizará un análisis de sensibilidad.

### 5.1. Costos e inversiones del proyecto

Los costos para el proyecto son los gastos económicos necesarios para el proceso de secado, estos son:

- Insumos agrícolas, los cuales son la compra de granos recién cosechados.
- Gastos debido al agua geotérmica; no se considera energía eléctrica, debido a que el proyecto será independiente al suministro eléctrico nacional.
- Mano de obra.
- Mantenimiento de los equipos.
- Depreciación y amortización.

Las inversiones o gastos fijos engloban todo el material y equipo necesarios para la realización del proyecto, estos son:

- Secador y los equipos adicionales necesarios para el proyecto.
- Construcción de elementos adicionales.
- Montaje y puesta en marcha del sistema de tuberías e instalación del sistema fotovoltaico.
- Costo de la ingeniería.
- Capital de trabajo.

Estos serán desglosados a continuación.

### 5.2. Inversiones del proyecto

Las inversiones del proyecto se dividen en fijas y diferidas, siendo las primeras los bienes materiales y tangibles como pueden ser el secador, equipos de bombeo, instrumentos de medición, etc. Mientras que las inversiones diferidas son los bienes intangibles como los servicios de instalación.

En la siguiente tabla se muestran las inversiones del proyecto:

Tabla 5- 1 Inversiones fijas del proyecto<sup>7</sup>

	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unitario</b>	<b>Total</b>
<b>Inversiones Fijas</b>			<b>\$279,086.25</b>
Secador	1	\$50,000.00	\$50,000.00
Intercambiador	1	\$31,000.00	\$31,000.00
Bomba solar	1	\$6,400.00	\$6,400.00
campana difusora	1	\$2,000.00	\$2,000.00
sistema de tubería	1	\$5,700.00	\$5,700.00
instrumentación	1	\$3,690.04	\$3,690.04
			\$0.00
Sistema fotovoltaico			\$180,296.21
Batería	6	\$22,088.67	\$132,532.02
Panel	10	\$3,712.00	\$37,120.00
Inversor	1	\$10,644.19	\$10,644.19
<b>Montaje y Puesta en Marcha</b>	<b>1</b>	<b>\$5,000.00</b>	<b>\$5,000.00</b>
<b>Capital de trabajo</b>	<b>1</b>	<b>\$88,670.74</b>	<b>\$88,670.74</b>
<b>Sub total</b>			<b>\$372,756.99</b>
<b>Ingeniería</b>			<b>\$111,827.10</b>
<b>Total CAPEX</b>			<b>\$484,584.09</b>

El montaje y puesta en marcha, se tomó como referencia trabajos previos dentro del grupo, para el capital de trabajo se tomaron los primeros 3 meses de los costos de operación en temporada alta. Estos se expondrán más adelante. Para el caso de la ingeniería, esta se refiere a la cantidad que se recibirá del proyecto, por lo que se asume de 30%.

### 5.3. Plan de producción

Para el caso de la producción de café, primero se debe conocer cuál es el peso que tendrá al final del secado, debido a la pérdida de humedad. Para conocer el peso final se realiza el siguiente cálculo:

- Agua inicial en los granos

Para conocer este valor, se emplea la siguiente ecuación

$$M_{ai} = X_i \times C_s \quad (51)$$

Donde:

X<sub>1</sub>: es la humedad inicial

C<sub>s</sub>: capacidad del secador



- Cantidad de café seco al final

$$Materia\ seca\ final = masa\ total - masa\ agua\ inicial \quad (52)$$

- Cantidad de agua final del café en tambor rotativo

$$Masa\ de\ agua\ final = \frac{humedad\ final\ del\ cafe \times masa\ seca\ de\ cafe}{1 - humedad\ final\ del\ cafe} \quad (53)$$

- Cantidad de café al final del proceso de secado

$$Masa\ de\ cafe\ final\ seco = masa\ seca\ de\ cafe + masa\ de\ agua\ final \quad (54)$$

Siguiendo la metodología anterior, y recordando que la humedad final será de 10% y la capacidad del secador es de 200 kg, la masa de café final seco es de 91 kg.

El tiempo necesario para el secado es de 44 horas, recordando que el proyecto se energiza completamente mediante energía fotovoltaica, y aunque se utilicen baterías, se considera que el tiempo de operación será de 12 horas, por lo que el tiempo necesario para procesar un lote sería de 4 días.

De acuerdo con lo reportado por Garduño (2021), los meses de cosecha del café son de los meses de diciembre a marzo, siendo un mes de 5 semanas y los demás de 4 semanas, teniendo una producción mensual de 455 y 364 kg respectivamente. Para tener un acercamiento más cercano a la realidad, se considera una merma de 18% (Gomez Posada, 2019), por lo que la producción mensual final será de 373 y 298 kg para una producción anual de 1,267 kg.

### 5.3.1. Ingresos

Para especificar el precio del producto, se investigó y recopiló precios de venta de diferentes productores. Cabe especificar que el precio es de café verde, ya que es el previo al tostado, el cual es el que principalmente se comercializa.

Los precios obtenidos se enlistan en la siguiente tabla:

*Tabla 5- 2 Comparativa de precios de café verde*

Marca	Presentación	Precio [\$, MXN]	Precio unitario[\$/kg]
Café verde de Chiapas	50 kg	\$7,500.00	\$150.00
Café verde de Veracruz	69 kg	\$8,694.00	\$126.00
ORO Café en Grano verde	50 kg	\$8,900.00	\$178.00
Verde oro Soconusco	12 kg	\$1,800.00	\$150.00
Café verde Bella Vista	1 kg	\$199.00	\$199.00

Para este trabajo, se toma el precio promedio, siendo de \$160.60 por kilogramo. Los ingresos obtenidos por el secado se muestran en la siguiente tabla:

*Tabla 5- 3 Ingresos obtenidos por el secado*

Mes	Producción (kg)	Precio (MXN)
Enero	373	\$59,860.00
Febrero	298	\$47,888.00
Marzo	298	\$47,888.00
Abril	Etapa de crecimiento	-
Mayo	Etapa de crecimiento	-
Junio	Etapa de crecimiento	-
Julio	Etapa de crecimiento	-
Agosto	Etapa de crecimiento	-
Septiembre	Etapa de crecimiento	-
Octubre	Etapa de crecimiento	-
Noviembre	Etapa de crecimiento	-
Diciembre	298	\$47,888.00
Anual	1,267	\$203,524.00

#### 5.4. Costos del proyecto

Como se mencionó anteriormente, los costos hacen referencia a todo el material y personal necesario para poder el secador. Estos se explican a continuación:

##### 5.4.1. Insumos agrícolas

Son los costos de los granos recién cosechados, para este caso se consulta el precio medio rural (PMR), ya que se plantea el comprar los granos directamente de los productos de Nayarit; del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), de su anuario estadístico de producción.

Se reporta que el PMR es de \$12,283.241 por tonelada. El costo unitario será de \$12.28 por kilogramo.

##### 5.4.2. Mano de obra

Los empleos requeridos para el proyecto serán los siguientes:

- Administrador de proyectos: encargado del proyecto. Sera el encargado de tener un control del proyecto, llevar un control de las compras de insumos, ventas de productos, control del mantenimiento y comunicación con el operador.
- Operador: encargado de operar el secador, suministrar y recolectar el café seco y limpieza del equipo.

*Tabla 5- 4 Costo de la mano de obra*

Ocupación	Número de trabajadores	Salario mensual mínimo (\$ MXN)
Administrador	1	10,000.00
Operador	1	8,000.00

Se considera que el administrador se le pagará todos los meses del año, mientras que al operador solamente en los meses de recolección de café.

##### 5.4.3. Suministro energético

Para el proyecto, solo se considera el consumo de agua caliente, debido a que la energía eléctrica solamente se suministra por medio de paneles fotovoltaicos.

Para conocer el costo del recurso geotérmico, se toma como referencia el costo de la energía geotérmica para los usos directos reportado por Fridleifsson, Ingvar B. (2003), el cual tiene un costo entre 0.5-5 US¢/kWh. Debido a que es un costo general, ya que no especifica el uso

directo, se toma como referencia el costo propuesto para un invernadero geotérmico de 0.07 USD/kWh (García, 2021), cabe aclarar que para tener un costo real para secadores geotérmicos, se deberán realizar otros estudios.

*Tabla 5- 5 Costo del agua geotérmica*

Concepto	Valor
Carga térmica [kW]	4.06
Horas de operación en un mes	220
Carga térmica mensual [kWh]	893.2
Costo del calor producido [ $\frac{\$(USD)}{kWh}$ ]	0.07
Costo mensual [\$(USD)]	250
Costo anual [\$(USD)]	83.51

Considerando la conversión del dólar para el día 20 de julio del 2023 de \$16.69, el costo anual es de \$3,548.00 MXN.

#### 5.4.4. Depreciación y amortizaciones

Para todo modelo financiero, se debe considerar la depreciación y amortización, ya que con el paso del tiempo los diferentes activos de los proyectos se van desgastando, por lo que sirve para tener un ahorro con el fin de reemplazar los equipos en caso de continuar con los proyectos. La depreciación se realiza con los activos fijos tangibles como equipos y estructuras, mientras que las amortizaciones son para los activos fijos intangibles como el proceso de ingeniería en los proyectos.

De acuerdo con la Ley de Impuestos sobre la Renta (Ley del ISR), en el artículo 33, los cargos diferidos para las amortizaciones son del 5% para un total de 5 años. En caso de la depreciación, éstas se mencionan en los artículos 34 y 35. Se divide en tres apartados los activos para la depreciación:

De acuerdo con la Ley del ISR, para estos tres apartados son del 10%, y se considera como vida útil, la duración de los invernaderos, de acuerdo a la NMX-E-255-CNCP-2013, es de 10 años.

#### 5.4.5. Costos totales

En la Tabla 4.13 se muestran los costos totales para un periodo de 10 años:

Tabla 5- 6 Costos del proyecto

<b>Costos</b>										
<b>Concepto</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>	<b>Año 6</b>	<b>Año 7</b>	<b>Año 8</b>	<b>Año 9</b>	<b>Año 10</b>
<b>Mantenimiento</b>	\$5,68 1.73									
<b>Renta</b>	\$7,70 3.22									
<b>Materiales</b>	\$125,840.0 0									
<b>Mano de obra</b>	\$216,000.0 0									
<b>Luz</b>	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<b>Agua caliente</b>	\$10,852.67	\$10,852.67	\$10,852.67	\$10,852.67	\$10,852.67	\$10,852.67	\$10,852.67	\$10,852.67	\$10,852.67	\$10,852.67
<b>Depreciación</b>	\$9,879.00	\$9,879.00	\$9,879.00	\$9,879.00	\$9,879.00	\$9,879.00	\$9,879.00	\$9,879.00	\$9,879.00	\$9,879.00
<b>Amortizaciones</b>	\$11,725.56	\$11,725.56	\$11,725.56	\$11,725.56	\$11,725.56	\$11,725.56	\$11,725.56	\$11,725.56	\$11,725.56	\$11,725.56
<b>Total OPEX</b>	<b>\$387,682.17</b>									

Para la renta del espacio, se comparó el costo de diferentes terrenos, tanto de en San Pedro Lagunillas y Tepic (icasas, 2023). Se considera que el metro cuadrado cuesta \$33.35 MXN, por lo que los 23 m<sup>2</sup> requeridos para el proyecto, tendrá un costo anual de \$641.93 al mes.

## 5.5. Flujo de caja libre

En la Tabla 5-7 se muestra el flujo de caja libre:

Tabla 5- 7 Flujo de caja libre del proyecto

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
<b>Ingresos</b>		\$ 203,524.0	\$ 203,524.0	\$ 203,524.0	\$ 203,524.0	\$ 203,524.0	\$ 203,524.0	\$ 203,524.0	\$ 203,524.0	\$ 203,524.0	\$ 203,524.0
<b>OPEX</b>		\$295,677.4 9	\$295,677.49	\$295,677.4 9	\$295,677.4 9	\$295,677.4 9	\$295,677.4 49	\$295,677.4 9	\$295,677.4 9	\$295,677.4 49	\$295,677.4 9
<b>Ganancia neta</b>		- \$92,153.49	-\$92,153.49	- \$92,153.49	- \$92,153.49	- \$92,153.49	- \$92,153.4 9	- \$92,153.49	- \$92,153.49	- \$92,153.4 9	-\$92,153.49
PTU		\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Impuestos		\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<b>Beneficio después de impuestos</b>		- \$92,153.49	-\$92,153.49	- \$92,153.49	- \$92,153.49	- \$92,153.49	- \$92,153.4 9	- \$92,153.49	- \$92,153.49	- \$92,153.4 9	-\$92,153.49
Operating profit		-\$92,153.49	-\$92,153.49	-\$92,153.49	-\$92,153.49	-\$92,153.49	-\$92,153.49	-\$92,153.49	-\$92,153.49	-\$92,153.49	-\$92,153.49
Tax * OP		\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<b>NOPAT</b>		- \$92,153.49	-\$92,153.49	- \$92,153.49	- \$92,153.49	- \$92,153.49	- \$92,153.49	- \$92,153.49	- \$92,153.49	- \$92,153.49	-\$92,153.49
Depreciación		\$9,879.00	\$9,879.00	\$9,879.00	\$9,879.00	\$9,879.00	\$9,879.00	\$9,879.00	\$9,879.00	\$9,879.00	\$9,879.00
Amortization		\$11,725.56	\$11,725.56	\$11,725.56	\$11,725.56	\$11,725.56	\$11,725.56	\$11,725.56	\$11,725.56	\$11,725.56	\$11,725.56
CAPEX	\$486,44 0.79	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Inversión Fija	\$279,08 6.25	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Inversiones Diferidas	\$117,25 5.57	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Capital de Trabajo	\$90,098. 97	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<b>FCFP</b>	- \$486,44 0.79	- \$70,548.93	-\$70,548.93	- \$70,548.93	- \$70,548.93	- \$70,548.93	- \$70,548.9 3	- \$70,548.93	- \$70,548.93	- \$70,548.9 3	-\$70,548.93



Para el mantenimiento anual, se toma el 3% del coste de reposición de equipos, los cuales corresponden a los costos de los equipos y su instalación (Ingeniería del mantenimiento, 2017). En el caso del Impuesto Sobre la Renta (ISR), será del 30% y la Participación de los Trabajadores en las Utilidades (PTU), del 10%.

Con el propósito de conocer la factibilidad económica del proyecto, se calcula la tasa interna de retorno (TIR) y el valor presente neto (VPN) con el fin de saber la máxima tasa de inversión y la rentabilidad del estudio respectivamente.

Con el fin de conocer la tasa de inversión de esta investigación, se calcula el Coste Medio Ponderado del capital (CMPC) mediante la Ec. 55:

$$CMPC = K_e \times \frac{E}{E + D} + K_d \times (1 - T) \times \frac{E}{E + D} \quad (55)$$

Donde:

$K_e$ : Coste de los fondos propios

$D$ : Deuda propia

$E$ : Fondos propios

$K_d$ : Coste financiero

$T$ : Tasa impositiva

Se considera que no se tiene deuda, por lo que solo se debe obtener los costos de los fondos propios, estos se obtienen mediante la Ec. 56:

$$CMPC = K_e = R_f + (\text{Beta} \times R_p) \quad (56)$$

Donde:

$\text{Beta}$ : es una medida del riesgo sistemático o de mercado de una acción y ofrece a los inversores indicación de la volatilidad de una emisión en relación con el mercado de valores en general. Para el caso del secado, al no tener un valor, se utiliza el de procesamiento de alimentos, cuyo su valor es de 0.92 (Damodaran, Total Betas by Sector, 2020)

$R_f$ : es la tasa de interés libre de riesgo (Risk-free rate, por su nombre en inglés), que representa "la rentabilidad que se obtiene al invertir en un activo y se considera que es cien por cien seguro" (raisin, 2020), para el caso de México es de 9.20% (Investing, 2020)

Rp: la rentabilidad que exigen los inversionistas para compensarlos por el riesgo de inversión, dependiendo del país extranjero, en comparación con la inversión del mercado nacional. Se debe elegir el Country Risk Premiun para México, el cual tiene el valor de 2.35% (Damodaran, 2020)

En la Tabla 5-8 se muestran los indicadores financieros para el invernadero de rosas

*Tabla 5- 8 Indicadores financieros*

CMPC	11.34%
Horizonte Evaluación	10 Años
TIR	#¡NUM!
VPN	-\$786,447
<i>Pay Back(meses)</i>	120.000
<i>Pay Back(años)</i>	10.000
<i>Relación Costo/Beneficio</i>	-1.8
<i>ROI</i>	-22%

Como se observa, para un horizonte de evaluación de 10 años, la TIR muestra un error, el VPN, ROI y la Relación costo beneficio es negativo, mientras que los tiempos de recuperación son los valores máximos. Esto nos indica que el proyecto no llega a ser rentable.

La principal razón por la que no se tiene un proyecto rentable es porque se tienen más gastos operacionales que ingresos, para poder comparar con sistemas convencionales y realizar los escenarios para el análisis de riesgo, es proponer un escenario donde el proyecto llegue a ser rentable. Para este caso, como se propone el generar un equipo genérico, se asume que se tiene una producción durante todos los meses del año.

El nuevo flujo de caja e indicadores financieros se muestran a continuación:

Tabla 5- 9 Flujo de caja libre actualizado

<i>Flujo de caja libre</i>											
	<b>Año 0</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>	<b>Año 6</b>	<b>Año 7</b>	<b>Año 8</b>	<b>Año 9</b>	<b>Año 10</b>
<i>Ingresos</i>		\$ 622,544. 0	\$ 622,544.0	\$ 622,544. 0							
<i>OPEX</i>		\$387,68 2.17	\$387,682.17	\$387,68 2.17	\$387,682 .17						
<i>Ganancia neta</i>		\$234,86 1.83	\$234,861.83	\$234,86 1.83	\$234,861 .83						
<b>PTU</b>		\$23,486. 18	\$23,486.18	\$23,486. 18							
<b>Impuestos</b>		\$63,412. 69	\$63,412.69	\$63,412. 69							
<i>Beneficio después de impuestos</i>		\$171,44 9.14	\$171,449.14	\$171,44 9.14	\$171,449 .14						
<b>Operating profit</b>		\$234,86 1.83	\$234,861.83	\$234,86 1.83	\$234,861 .83						
<b>Tax * OP</b>		\$63,412. 69	\$63,412.69	\$63,412. 69							
<i>NOPAT</i>		\$171,44 9.14	\$171,449.14	\$171,44 9.14	\$171,449 .14						
<b>Depreciación</b>		\$9,879.0 0	\$9,879.00	\$9,879.0 0							
<b>Amortization</b>		\$11,725. 56	\$11,725.56	\$11,725. 56							
<b>CAPEX</b>	\$486 ,440. 79	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<b>Inversión Fija</b>	\$279 ,086. 25	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<b>Inversiones Diferidas</b>	\$117 ,255. 57	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<b>Capital de Trabajo</b>	\$90, 098. 97	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<i>FCFP</i>	- \$486 ,440. 79	\$193,05 3.70	\$193,053.70	\$193,05 3.70	\$193,053 .70						

Tabla 5- 10 Indicadores financieros actualizados

Indicadores Financieros	
Horizonte Evaluación	10 años
<b>TIR</b>	38.12%
<b>VPN</b>	\$844,158
<b>Pay Back(meses)</b>	30.237
<b>Pay Back(años)</b>	2.520
<b>Relación Costo/Beneficio</b>	4.0
<b>ROI</b>	35%

Como se puede apreciar, al tomar la consideración de una producción anual, el proyecto llega a ser rentable, teniendo un tiempo de recuperación de aproximadamente de dos. Se procede a realizar los diferentes escenarios para su comparación.

### 5.6. Comparación con sistema convencional

Para comparar el beneficio de usar este proyecto utilizando energías renovables como fuentes principales de energía, se comparará considerando que no se tienen paneles fotovoltaicos y que se encuentra conectado a la red nacional, y el caso donde la energía eléctrica se obtiene de una planta generadora de diesel.

#### 5.6.1. Conexión a la red eléctrica nacional

Para este caso, se toma en cuenta el costo de la energía eléctrica por el tipo de carga. Los valores de referencia del costo son los reportados por CFE (2023)

Tabla 5- 11 Tarifas eléctricas de la región de Nayarit

Región Noroeste		
Tipo de energía	Cargo por kilowatt 4(MXN)/kW <sub>e</sub>	Horas del día
Energía base	0.9137	0:00-6:00
Energía intermedia	1.0914	6:00-20:00 22:00-24:00
Energía punta	2.1750	20:00-22:00

Al realizar esta consideración, se puede realizar el secado durante todo el día, al no depender de las condiciones ambientales, pero con el fin de comparar el sistema propuesto, se toman las mismas consideraciones de operación que en el caso pasado. Con esto, al decir que solo opera por 12 horas, como las horas de Sol de la región son aproximadamente entre 12 y 13 horas, no la salida del Sol es cercana a las 6:00 AM y la puesta es entre las 18:00 y 19:45 durante el año, se tiene únicamente energía intermedia.

Tomando los datos de la tabla 4.8, los costos eléctricos obtenidos se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 5- 12 Desglose de los costos eléctricos

Equipo	Potencia [W]	Tiempo de operación [hr]	Costo diario [\$/kW <sub>e</sub> h]
Bomba	210.24	12	\$ 2.75
Ventilador	1118.6	12	\$ 14.65
Motor	746	12	\$ 9.77

Tabla 5- 13 Costo total de la energía eléctrica

Costo diario	\$ 27.17
Costo semanal	\$ 190.22
Costo mensual (4 semanas)	\$ 760.87
Costo mensual (5 semanas)	\$ 951.08
Total	\$3,994.54

Los nuevos indicadores financieros obtenidos son los siguientes:

Tabla 5- 14 Indicadores financieros con conexión a la red eléctrica nacional

Horizonte Evaluación	10 años
<b>TIR</b>	80.10%
<b>VPN</b>	\$883,564
<b>Pay Back(meses)</b>	14.830
<b>Pay Back(años)</b>	1.236
<b>Relación Costo/Beneficio</b>	6.8
<b>ROI</b>	62%

### 5.6.2. Conexión a una planta de diesel

Para este tercer caso, se considera el comprar una planta generadora de la marca Poweren, la cual tiene una capacidad máxima de 5 kW<sub>e</sub>. Para este caso, se debe considerar el costo del diesel de la región, para la región de Compostela, el promedio es de 24.89 \$/litro.

Los costos del diesel y los indicadores financieros son los siguientes:

Tabla 5- 15 Costos operacionales del generador diesel

Consumo diario diesel (L)	36
Costo diario \$/L	\$24.89
Costo semanal	\$6,272.28
Costo mensual (4 semanas)	\$25,089.12
Costo mensual (5 semanas)	\$31,361.40

*Tabla 5- 16 Indicadores financieros con el generador diesel*

Horizonte Evaluación	10 Años
TIR	#¡NUM!
VPN	-\$738,731
Pay Back(meses)	120.000
Pay Back(años)	10.000
Relación Costo/Beneficio	-1.5
ROI	-19%

### 5.6.3. Comparación

Como se aprecia, de los tres escenarios, el mejor es cuando se tiene conexión a la red eléctrica nacional, ya que una de las principales inversiones es todo el sistema fotovoltaico, que equivale a un 46% del total de la inversión, logrando que la inversión se recupere en medio año. El principal inconveniente es que, dependiendo de la región, será el nivel de electrificación que tengan, ya que hay regiones donde el suministro energético no es el adecuado.

Para el caso de uso de un generador de diesel, no se llega a recuperar la inversión, que a pesar de que el costo del generador diesel es menor que el sistema fotovoltaico, el tener que comprar el combustible durante todo el año, hace que los costos operacionales aumenten, haciendo que no se recupere la inversión. Otro problema es el uso de combustibles fósiles, ya que, en caso de haber desabasto o alza de precios, los costos operacionales aumentan. Pero el principal es la generación de gases de efecto invernadero. De acuerdo con datos de la CFE (2022), se emiten 3 ton por cada m<sup>3</sup> de diesel consumido, por lo que anualmente se estarían produciendo un aproximado de 30 toneladas anuales de CO<sub>2</sub>, emisiones que se estarían evitando al usar el sistema propuesto de energía fotovoltaica.

### 5.7. Análisis de riesgo

En el apartado anterior se muestra que el proyecto es rentable, pero es tomando algunos valores promedio o base, como es el caso del precio de venta. Se aplicará un análisis de riesgo al proyecto, con el fin de conocer los límites en los cuales el proyecto sería económicamente fiable.

Las variables que se escogen serán las siguientes:

- Producción de café seco
- Precio de venta
- Costo del agua geotérmica
- Tasa de cambio del dólar

A continuación, se muestran los resultados obtenidos.

### 5.7.1. Producción de café seco

Para este caso, los valores límites elegidos es tomando el tiempo requerido para el secado natural, será de 8 días (Garduño, 2021), siendo la producción de 3 lotes al mes; y para el caso donde se puede aprovechar al máximo el equipo, debido a que se había propuesto que, en una semana, solo se usarían 4 días de operación, por lo que se propone que se aprovechen los 2 días que no se consideraron de una semana de operación.

Para este caso, la producción de 4 y 5 lotes por mes aumentaría a 6 y 7 lotes para un mes de 4 y 5 semanas respectivamente.

Tabla 5- 17 Primer caso con cambio en la producción

Evento	Producción mensual [kg]	Producción anual [kg]	Ingresos anuales [\$ ,MXN]
3 lotes por mes	224	2,684	430,992
4 a 5 lotes por mes	298 y 373	3,876	622,544
6 a 7 lotes por mes	447 y 522	5,665	909,872

Los nuevos indicadores financieros obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5- 18 Indicadores financieros para el caso de cambiar la producción de granos

Evento	Indicador financiero	
3 lotes al mes	TIR	12.05%
	VPN	\$105,077
	<i>Pay Back(meses)</i>	67.669
	<i>Pay Back(años)</i>	5.639
	<i>Relación Costo/Beneficio</i>	1.8
	<i>ROI</i>	13%
4 a 5 lotes al mes	TIR	38.12%
	VPN	\$844,158
	<i>Pay Back(meses)</i>	30.237
	<i>Pay Back(años)</i>	2.520
	<i>Relación Costo/Beneficio</i>	4.0
	<i>ROI</i>	35%
6 a 7 lotes al mes	TIR	70.05%
	VPN	\$1,952,779
	<i>Pay Back(meses)</i>	17.046
	<i>Pay Back(años)</i>	1.421
	<i>Relación Costo/Beneficio</i>	7.0
	<i>ROI</i>	66%

Se observa que, en los tres casos, se llega a recuperar las ganancias en tiempos menores a los dos años o hasta en cinco años y medio. Aunque se tiene un beneficio, se debe recordar que, al aumentar la producción, los costos de operación también aumentan, los costos se muestran a continuación:

*Tabla 5- 19 Actualización de los costos de operación*

<b>Costos de operación anuales</b>	4 a 5 lotes	6 a 7 lotes
<b>Mantenimiento</b>	\$5,681.73	\$5,681.73
<b>Renta</b>	\$7,703.22	\$7,703.22
<b>Materiales</b>	\$125,840.00	\$183,920.00
<b>Mano de obra</b>	\$216,000.00	\$216,000.00
<b>Electricidad</b>	\$0.00	\$0.00
<b>Agua caliente</b>	\$10,852.67	\$15,861.59
<b>Depreciación</b>	\$9,879.00	\$9,879.00
<b>Amortizaciones</b>	\$11,725.56	\$12,198.72
<b>Total OPEX</b>	<b>\$387,682.17</b>	<b>\$451,244.26</b>

En este caso, los únicos costos que aumentan son el de los materiales ya que se deben de comprar más granos; al igual que el agua caliente ya que operará por un mayor periodo de tiempo.

### 5.7.2. Precio de venta

Para este análisis, la producción se mantiene la de defecto, 4 a 5 lotes al mes; se consideran los precios de venta mínimo, máximo y el defecto, expuesto en el apartado 5.

Los resultados obtenidos, se muestran en la tabla

*Tabla 5- 20 Segundo caso considerando un cambio en el precio de venta*

Precio de venta [\$, MXN]	Ingresos anuales [\$, MXN]
126.00	465,163
160.60	622,544
199.00	771,396

La comparación de los indicadores financieros se enlista a continuación:

Tabla 5- 21 Indicadores financieros al cambiar el precio de venta

Precio de venta	Indicador financiero	
126.00	TIR	9.71%
	VPN	\$52,309
	Pay Back(meses)	74.678
	Pay Back(años)	6.223
	Relación Costo/Beneficio	1.6
	ROI	12%
160.60	TIR	38.12%
	VPN	\$844,158
	Pay Back(meses)	30.237
	Pay Back(años)	2.520
	Relación Costo/Beneficio	4.0
	ROI	35%
199.00	TIR	61.51%
	VPN	\$1,593,099
	Pay Back(meses)	19.347
	Pay Back(años)	1.612
	Relación Costo/Beneficio	6.2
	ROI	58%

Los resultados obtenidos al cambiar el precio de venta, son similares a los obtenidos al cambiar por los valores máximos de la cantidad de lotes de producción. Se puede llegar a optar por cambiar los precios de venta, ya que no se tiene que recurrir a aumentar los gastos operacionales, y se tienen los mismos beneficios.

### 5.7.3. Costo del agua geotérmica

Al igual que en el precio de venta, se tomó un valor promedio, se realizará el mismo procedimiento de análisis utilizado anteriormente.

Los costos mínimos y máximos, al igual que los indicadores financieros son los siguientes:

Tabla 5- 22 Tercer caso cambiando el costo del agua geotérmica

Evento	Costo [US/kWh]
Mínimo	0.005
Defecto	0.07
Máximo	0.5

Tabla 5- 23 Indicadores financieros cambiando el costo del agua geotérmica

Costo agua geotérmica [US/kWh]	Indicador financiero	
0.05	TIR	38.71%
	VPN	\$860,724
	Pay Back(meses)	29.825
	Pay Back(años)	2.485
	Relación Costo/Beneficio	4.0
	ROI	36%
0.07	TIR	38.12%
	VPN	\$844,158
	Pay Back(meses)	30.237
	Pay Back(años)	2.520
	Relación Costo/Beneficio	4.0
	ROI	49%
0.5	TIR	25.51%
	VPN	\$487,995
	Pay Back(meses)	42.189
	Pay Back(años)	3.516
	Relación Costo/Beneficio	2.8
	ROI	24%

Se aprecia que, en este caso, al cambiar el costo del agua geotérmica con el valor mínimo, no afecta en gran medida los diferentes indicadores, ya que se mantienen valores similares. Caso contrario cuando se tiene el valor máximo donde el tiempo de recuperación llega a aumentar en un año, pero considerando una vida útil de 10 años, se puede considerar aceptable.

Con el fin de saber hasta qué valor se puede tener una ganancia, se busca el máximo valor que puede costar el agua geotérmica. El máximo valor que se puede tener del agua geotérmica es de \$1.08 dólares, con un tiempo de recuperación de 7 años.

#### 5.7.4. Tasa de cambio del dólar

Debido a que el costo del agua geotérmica es en dólares, el costo final siempre dependerá de la tasa de cambio, que como se ha visto a lo largo de los años, éste puede cambiar y llegar a valores máximos debido a eventos fuera de nuestro control como es el caso de la pandemia de COVID-19 que inicio a finales del 2019 y duró hasta mayo del 2023 cuando la OMS declaró fin a la pandemia, o la Guerra Ruso-Ucraniana que inició en febrero del 2022 y continua actualmente. En este análisis, debido a que el dólar tiene un valor a la baja, que no se había visto en 7 años, se tomarán valores promedios que se tuvo en años pasados y el valor máximo registrado.

Los resultados son los siguientes:

Tabla 5- 24 Cuarto caso considerando el cambio del dolar

Periodo	Tasa de conversión de 1 dólar a MXN
Actualidad	16.69
Promedio de años pasados	20.12
Máximo registrado (01/04/2020)	24.49

El máximo registrado fue en abril del 2020, cuando en el país se empezaba con los incrementos de casos de COVID, al igual que en el resto de los países.

Tabla 5- 25 Indicadores financieros por el tipo de cambio del dolar

Tasa de conversión del dólar	Indicador financiero	
16.69	TIR	38.12%
	VPN	\$844,158
	<i>Pay Back(meses)</i>	30.237
	<i>Pay Back(años)</i>	2.520
	<i>Relación Costo/Beneficio</i>	4.0
	<i>ROI</i>	49%
20.12	TIR	37.69%
	VPN	\$832,243
	<i>Pay Back(meses)</i>	30.539
	<i>Pay Back(años)</i>	2.545
	<i>Relación Costo/Beneficio</i>	3.9
	<i>ROI</i>	35%
24.49	TIR	37.15%
	VPN	\$817,062
	<i>Pay Back(meses)</i>	30.931
	<i>Pay Back(años)</i>	2.578
	<i>Relación Costo/Beneficio</i>	3.9
	<i>ROI</i>	34%

Al igual que con el costo del agua geotérmica, la principal ventaja que se tiene es el costo del agua es en centavo de dólar, por lo que el tipo de cambio de divisas, no afecta en gran medida a la parte económica del proyecto.

A manera de indicador, se buscará el precio máximo del agua con la mayor tasa de conversión de dólar. Para este caso, con la tasa de cambio de \$24.49, el máximo costo del agua geotérmica es de \$0.74 USD para tener todavía una ganancia en el proyecto.

## 5.8. Conclusiones

Se concluye lo siguiente de este capítulo:

- El proyecto solo llega a ser rentable y recuperarse en un periodo de 2 años, considerando un horizonte de 10 años cuando llegamos a considerar que se tiene funcionando todos los meses del año, por lo que se deben buscar el secar diferentes productos, ya que se debe recordar que el café no se llega a producir todo el año y solo se hizo esta consideración para los análisis de riesgo.
- De entre los escenarios propuestos, para lograr que el tiempo de recuperación sea menor, se debe buscar el secar diferentes tipos granos en los meses donde no se tiene producción de café, de ahí la necesidad de fabricar un equipo genérico para el proceso de secado.
- Los parámetros que se deben cuidar son la cantidad de productos secados y el precio de venta, ya que son los que afectan principalmente al rendimiento del proyecto.
- Se debe realizar un análisis más riguroso del costo de la energía geotérmica, ya que se tomó un valor promedio para los usos directos.



## 6. Conclusiones

En la tesis se propuso el diseño de un secador rotatorio energizado mediante recurso geotérmico de baja entalpía y solar fotovoltaico para el secado de granos, principalmente para granos de café en la región de Mesillas, Nayarit.

Debido a que el principal método de secado es el tradicional, el cual depende de las condiciones ambientales de la región. Aunque no se recurre a ningún costo, los principales problemas de este método son: tiempos de por lo menos 8 días para llegar a las condiciones de humedad necesarias, requiere de un trabajador que se encuentre para el Sol para estar paleando los granos, lograr un secado más homogéneo y requiere de extensiones de tierra que se podrían aprovechar para cultivos u otras aplicaciones. Es por ello que se deben buscar tecnologías que faciliten este proceso.

Una solución es el uso de secadores mecanizados que permiten secar grandes volúmenes de café, en tiempos de hasta 24 horas. El problema surge que para lograr este proceso, se requiere la quema de combustibles, a pesar de poder utilizar los desperdicios de cultivos; se generan gases de efecto invernadero que terminan contribuyendo al calentamiento global y cambio climático. Es por ello que se propone el uso de la energía geotérmica, ya que México tiene el beneficio de contar con este recurso, que por desgracia, solo se utiliza para la generación de energía eléctrica y representa solo el 5% de todas las manifestaciones en el país.

Otro factor importante, es que en ocasiones, las regiones agrícolas no cuentan con un buen suministro energético: ya sea eléctrico o de combustibles fósiles. Debido a esto, se propuso un diseño que sea fácil de transportar y que se energice con energía solar fotovoltaica para tener un sistema independiente de la red eléctrica nacional y utilice recursos renovables con el fin de apoyar en la lucha contra el calentamiento global. Siendo los principales beneficiosos que se puede instalar en regiones con bajo o nulo acceso a recursos energéticos y a que se evitan más de 5 toneladas de emisiones anuales de CO<sub>2</sub>.

El diseño y dimensionamiento se propuso para la región de Mesillas, Nayarit, debido a ser uno de los diez principales estados productores de café, además de la experiencia que se tiene en Grupo iiDEA, ya que se ha planteado diferentes proyectos de usos directos en la región, además de haber realizado viajes de campo para comprobar el recurso geotérmico de la zona.

Se propuso el uso de recurso de baja entalpía, debido a que prácticamente el 50% de las manifestaciones en el país son de este rango, además de que se propone el que la temperatura de trabajo de será de 50 °C, por lo que se llega a cubrir esta necesidad. De igual manera se dimensionaron los equipos auxiliares con las condiciones que se tiene en Mesillas y se comprobó que existen en el mercado nacional, modelos que llegan a cubrir las necesidades requeridas.

Un factor importante de este trabajo, es que no se quedó como un diseño teórico, sino que se llegó a la manufactura de los sistemas principales y requieren de una mayor experiencia para su manufactura: el secador y el intercambiador de tubos aletados. Se llegó a comprobar que la etapa de diseño teórica, se llega a asemejar en el diseño físico, recibiendo solamente algunas modificaciones, que al realizar los cálculos con estos cambios, se llega al mismo resultado.



Para trabajos posteriores, se deberá realizar pruebas en laboratorio o ambiente controlado del sistema propuesto, para su posterior instalación y pruebas en campo. De igual manera se tiene en mente cambios al diseño, los cuales se deberán de comprobar que beneficios se pueden llegar al tener al modificar el diseño y buscar el generar nueva tecnología para su posterior construcción y buscar la protección del diseño mediante una patente.



## Referencias

- Anónimo. (2 de Marzo de 2020). *Proyecto Conocer la agricultura y ganadería*. Obtenido de <https://conocerlaagricultura.com/contenidos/conoce-los-alimentos/el-arroz-alimento-de-medio-mundo/>
- Anónimo. (22 de Septiembre de 2022). *Almacenaje de grano húmedo: ¿Por qué aumentan los riesgos?* Obtenido de [https://www.adiveter.com/ftp\\_public/A1180108.pdf](https://www.adiveter.com/ftp_public/A1180108.pdf)
- Atlas Big. (20 de Marzo de 2020). *Producción mundial de arroz*. Obtenido de <https://www.atlasbig.com/es-mx/paises-por-produccion-de-arroz>
- Atlas Big. (11 de Abril de 2020). *Producción mundial de cebada por país*. Obtenido de <https://www.atlasbig.com/es-mx/paises-por-produccion-de-cebada>
- Atlas Big. (5 de Marzo de 2020). *World's Leading Oat Producing Countries*. Obtenido de <https://www.atlasbig.com/en-ae/countries-by-oat-production>
- Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2010). *Mecánica de materiales*. México: Mc Graw Hill.
- BH. (18 de Julio de 2020). *PC 6.03 Guardiolas — Mechanical Coffee Dryers*. Obtenido de <https://www.baristahustle.com/lesson/pc-6-03-guardiolas-mechanical-coffee-dryers/>
- Bhuiyan, M., & Asgar, M. A. (2003). Sizing of a stand-alone photovoltaic power system at Dhaka. *Renewable Energy Volume 28*, 929-938.
- Bioqualitum. (2015). *Recomendaciones para el empleo de BactoCROP-DUAL y MicoCROP en plantaciones de Avena (Avena sativa L.)*. México: Bioqualitum.
- Brito, H. (15 de Septiembre de 2020). *EXTO BÁSICO DE OPERACIONES UNITARIAS III*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/figure/Figura-2354-1-Secadero-Roto-Louvre\\_fig2\\_313673664](https://www.researchgate.net/figure/Figura-2354-1-Secadero-Roto-Louvre_fig2_313673664)
- Café la Nacional. (2020). *Manual de Café*. México: Café la Nacional.
- CEDRSSA. (2018). *El Café En México Diagnóstico Y Perspectiva*. México: CEDRSSA.
- CEDRSSA. (2019). *Comercio Internacional del Café*. México: CEDRSSA.
- CEDRSSA. (2019). *Comercio internacional del café, el caso de México*. México: CEDRSSA.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa*. México: Mc Graw Hill.
- Coffee behind the scenes . (6 de Abril de 2019). *El café en México*. Obtenido de <http://www.coffeebehindthescenes.com/es/country/mexico>
- Cook for Your Life Staff. (11 de diciembre de 2020). *Cook for Your Life*. Obtenido de <https://www.cookforyourlife.org/es/nuestro-blog-de-cocina/nuestros-cinco-granos-favoritos/>
- Cook for Your Life Staff. (23 de Julio de 2021). *Cebada*. Obtenido de <https://www.cookforyourlife.org/es/nuestro-blog-de-cocina/cebada/>
- Cubillos, G., Merizalde, G. J., & Correa, E. (11 de Enero de 2019). *Manual de beneficio del cacao*. Obtenido de [https://chocolates.com.co/wp-content/uploads/2020/06/manual\\_beneficio\\_cacao.pdf](https://chocolates.com.co/wp-content/uploads/2020/06/manual_beneficio_cacao.pdf)
- CUEES. (6 de Junio de 2021). *Proyecto de articulación universidad - empresa permitirá mejorar el secado de café*. Obtenido de <https://www.cueesantander.com/blog-11-m/79-proyecto-de-articulacin-universidad---empresa-permitir-mejorar-el-secado-de-caf.htm>
- de la Cruz de la Cruz, W. (2020). *Diseño de una maquina secadora de café orgánico para mejorar lalocalidad del producto en el centro poblado chiñama\_kañaris*. Perú: Universidad César Vallejo.
- de Sousa e Silva, J., Precci Lopes, R., Gonzaga Vitor, D., & Lopes Donzales, S. M. (Mayo de 2014). *Secador rotativo intermitente: Projeto, Construcao e Uso*. Obtenido de [http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/comunicadotecnico/comunicado\\_tecnico\\_05.pdf](http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/comunicadotecnico/comunicado_tecnico_05.pdf)
- Decafe. (5 de Diciembre de 2019). *Procesos del grano de café*. Obtenido de <https://decafe.org/procesos-del-grano-del-cafe/>
- DEGESCH De Mexico. (23 de Febrero de 2017). *Secado de granos*. Obtenido de <http://degeschmexico.com/almacenamiento-y-conservacion/almacenamiento/secado-de->





- Hast, A., Syri, S., Lekavičius, V., & Galinis, A. (2018). District heating in cities as a part of low-carbon energy system. *Energy Volume 152*, 627-639.
- icasas. (15 de noviembre de 2023). *20 lotes de terrenos en renta en Nayarti*. Obtenido de [https://www.icasas.mx/renta/tierras-lotes-terrenos-nayarit-5\\_9\\_18\\_0\\_0\\_0/list](https://www.icasas.mx/renta/tierras-lotes-terrenos-nayarit-5_9_18_0_0_0/list)
- IDAE. (2008). *Ahorro y Eficiencia Energética en invernaderos*. España: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- INEGI. (2019). *Carta hidrológica aguas subterráneas México, Informe técnico*. México: INEGI.
- Ingeniería del mantenimiento. (27 de Junio de 2017). *Como Calcular El Presupuesto De Mantenimiento De Una Instalación*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=JUT8IljGcRM>
- Ingeniería, calor y manufactura. (22 de Marzo de 2022). *Secadores Rotatorios Koleff*. Obtenido de <https://www.secadoresyequiposdeproceso.com/>
- International Coffe Organization. (10 de Septiembre de 2023). *Informe del mercado de café (2022/23)*. Obtenido de <https://www.ico.org/es/Market-Report-22-23-c.asp>
- Jasso Rivera, A. (2016). *Invernadero Geotermico de Baja Entalpia para Cultivo de Jitomates*. México: UNAM.
- Kerr, W. L. (2019). *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering*. Países Bajos: Elsevier. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/rotary-dryers>
- Kornman, C. (2016). *Green Coffee Analytics*. Estados Unidos de América: Royal.
- Kulundu, L., Ndiritu, H., Kituu, G., & Kimotho, J. (2022). *Performance Simulation of a Modified Geothermal Grain Dryer Based at Menengai Well 3 in Kenya*. Kenya: World Journal of Engineering and Technology.
- Ly, K. (14 de Diciembre de 2016). *PERFECT DAILY GRIND*. Obtenido de <https://perfectdailygrind.com/es/2016/12/14/son-los-cursos-universitarios-el-futuro-de-la-educacion-en-cafe/>
- Mapfre. (21 de Abril de 2021). *Geotermia, la energía bajo nuestros pies*. Obtenido de <https://www.mapfreglobalrisks.com/gerencia-riesgos-seguros/articulos/geotermia-la-energia-bajo-nuestros-pies/>
- Márquez de la Cruz, S. E. (2020). *Sistema Computacional Para Estimar La Captura De Carbono En Agroecosistemas De Café: Caso Huatusco, Veracruz*. México: Colegio De Postgraduados Institución De Enseñanza E Investigación En Ciencias Agrícolas.
- Martínez, C. (4 de Agosto de 2023). *Cerveza mexicana: conoce el valor de su producción, exportación y tendencias*. Obtenido de <https://thelogisticsworld.com/manufactura/produccion-de-cerveza-hecha-en-mexico-con-presencia-en-otras-latitudes/>
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (15 de Octubre de 2018). *Plataforma de conocimiento para el medio rural y pequero*. Obtenido de [https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/secado-grano\\_tcm30-58515.pdf](https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/secado-grano_tcm30-58515.pdf)
- Mondragón, R., Julia, J. E., Barba, A., & Jarque, J. C. (2013). *El proceso de secado por atomización: formación de gránulos y cinética de secado de gotas*. España: Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio.
- Montoya R., E., Oliveros T., C., & Roa M., G. (1990). *Optimización Operacional del Secador Intermitente de Flujos Concurrentes para Café Pergamino*. Colombia: Cenicafé.
- Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. México: Pearson.
- Mujumdar, A. S. (2006). *Handbook of Industrial Drying*. Polonia: Taylor & Francis Group, LLC.
- Myande. (15 de Septiembre de 2020). *Secador de tubos*. Obtenido de <https://www.myande.pt/tube-bundle-dryer-15851051099202126.html>
- NASA. (25 de Marzo de 2023). *Power Data Access Viewer*. Obtenido de <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Navarrete, E. (15 de Octubre de 2017). *Apuntes De Geología Física*. Obtenido de <https://www.researchgate.net/figure/Figura-1411-Esquema-del-origen-de-la-energia->



geotermica-Figura-tomada-de-INTERNET\_fig91\_320410516

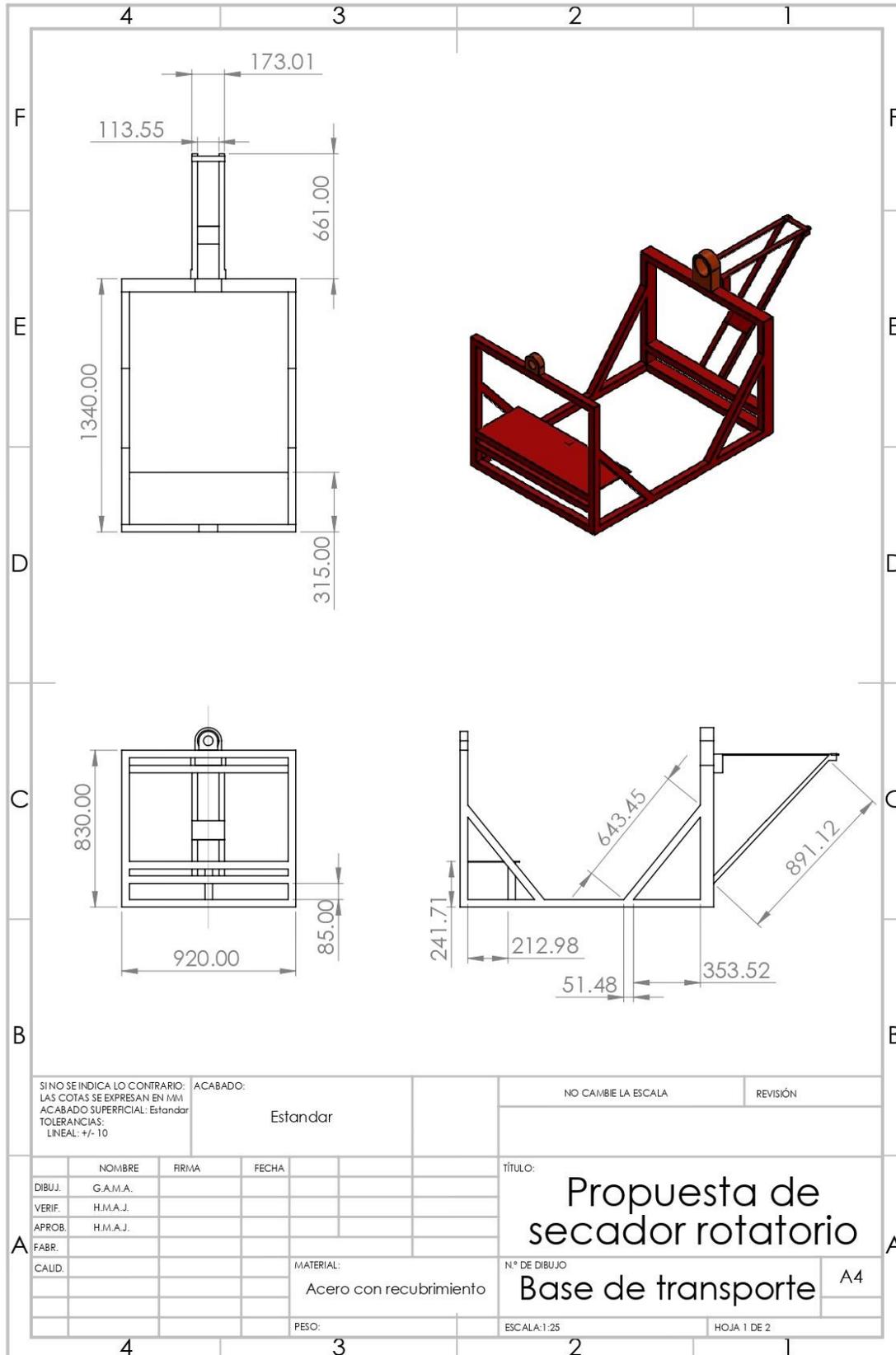
- Njuguna, E. (2020). *Evaluation of Geothermal Grain Dryers: Case Study of Menengai Grain Dryer*. Kenya: 8th African Rift Geothermal Conference.
- Orozco H., C. A., & Bedoya L., F. (2007). *Cálculo de flujo másico y caudal de aire para un ventilador utilizado en silos para secado para del café*. Colombia: REDALYC.
- Özerdem, B. (200). Measurement of convective heat transfer coefficient for a horizontal cylinder rotating in quiescent air. *Pergamon*, 389-395.
- Pacheco Mendoza, E. R. (2019). *Diseño de un secador geotérmico de café*. México: UNAM.
- Pecheron, N. (2010). *Problemas agrarios del Ajusco*. México: Hors collection.
- Pirouti, M., Bagdanavicius, A., Ekanayake, J., Wu, J., & Jenkins, N. (2013). Energy consumption and economic analyses of a district heating network. *Energy Volume 57*, 149-159.
- Pis'Mennyi, E., Polupan, G., Carvajal-Mariscal, I., Sanchez-Silva, F., & Pioro, I. (2016). *Handbook For Transversely Finned Tube Heat Exchanger Design*. Inglaterra: Elsevier.
- Popovska, S., & Vasilevska. (2003). *Drying Of Agricultural Products With Geothermal Energy*. Macedonia: St. Kliment Ohridski University.
- ProduccionAgricolaMundial.com. (20 de Marzo de 2014). *Producción Mundial de Sorgo 2022/2023*. Obtenido de <http://www.produccionagricolamundial.com/cultivos/sorgo.aspx>
- Prol Ledesma, R. M., Carrillo de la Cruz, J. L., Torres Vera, M. A., Membrillo Abad, A. S., & Espinoza Ojeda, O. M. (31 de Octubre de 2018). *Heat flow map and geothermal resources in Mexico / Mapa de flujo de calor y recursos geotérmicos de México*. Obtenido de [https://terradigitalis.igg.unam.mx/html/ojs3/index.php/terra\\_digitalis/article/view/51/103](https://terradigitalis.igg.unam.mx/html/ojs3/index.php/terra_digitalis/article/view/51/103)
- Prol Ledesmaa, R. M., & Morán Zentenob, D. J. (2018). *Heat flow and geothermal provinces in Mexico*. México: ELSEVIER.
- Prosilice. (14 de Septiembre de 2013). *HORNO SECADOR DE ARENA VIDEO 4*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=VgZ05DFe9Yw>
- Purcell, J. (1979). *Chemical Engineer*. Londres: Purcel.
- raisin. (12 de Julio de 2020). *Qué es la tasa libre de riesgo y cómo se calcula*. Obtenido de <https://www.raisin.es/educacion-financiera/que-es-la-tasa-libre-de-riesgo-y-como-se-calcula/#:~:text=En%20el%20mundo%20financiero%2C%20el,tanto%2C%20est%3%A1%20libre%20de%20riesgo>.
- Rehman Mazhar, A., Liu, S., & Shukla, A. (2018). A state of art review on the district heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 96*, 420-439.
- Riveros, G. (16 de Agosto de 2010). *Fundamentos de metalurgia extractiva*. Obtenido de [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/1/MI4100/1/material\\_docente/bajar?id=340610](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/1/MI4100/1/material_docente/bajar?id=340610)
- SAGARPA. (2017). *Atlas Agroalimentario*. México: SIAP. Obtenido de <https://online.pubhtml5.com/clsi/ibhs/#p=24>
- SAGARPA. (2017). *Avena forrajera mexicana*. México: SAGARPA.
- SAGARPA. (2018). *Almacenamiento y conservación de granos y semillas*. México: SAGARPA.
- SAGARPA. (6 de Agosto de 2021). *Cerveza, principal producto agroindustrial de exportación de México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/cerveza-principal-producto-agroindustrial-de-exportacion-de-mexico>
- Sandeep, T., Channabasamma, B., Gopinandhan, T., & Nagaraja, J. (2021). *The effect of drying temperature on cup quality of coffee subjected to mechanical drying*. India: Journal of Plantation Crops.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (24 de Marzo de 2018). *Sorgo grano: "El clan del sorgo rojo"*. Obtenido de <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/sorgo-grano-el-clan-del-sorgo-rojo>
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2008). *Física para ciencias e ingeniería*. México: CENGAGE Learning.
- SIAP. (10 de Febrero de 2023). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Obtenido de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Soler & Palau. (2 de Febrero de 2023). *Ventiladores centrífugos*. Obtenido de

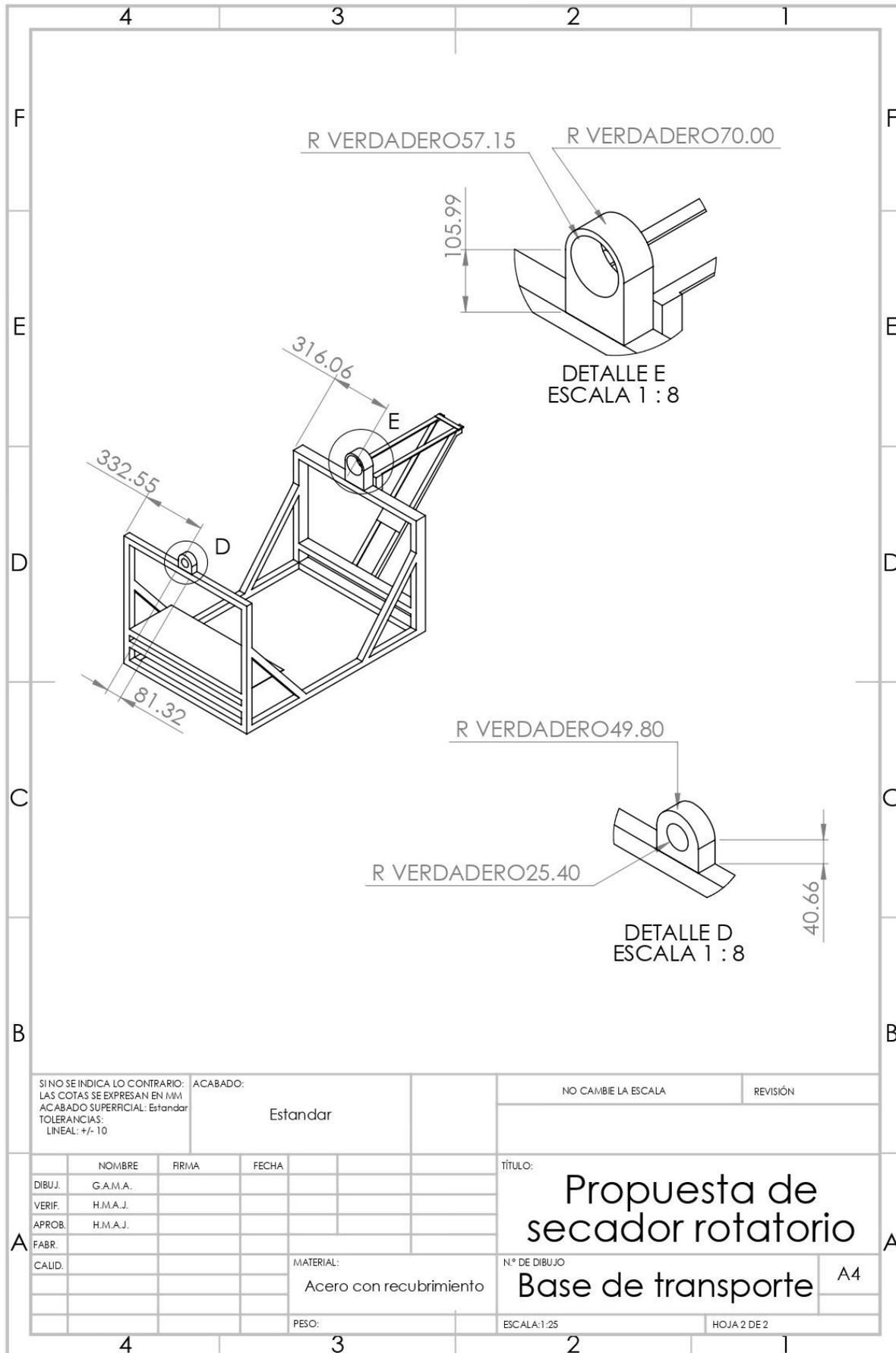


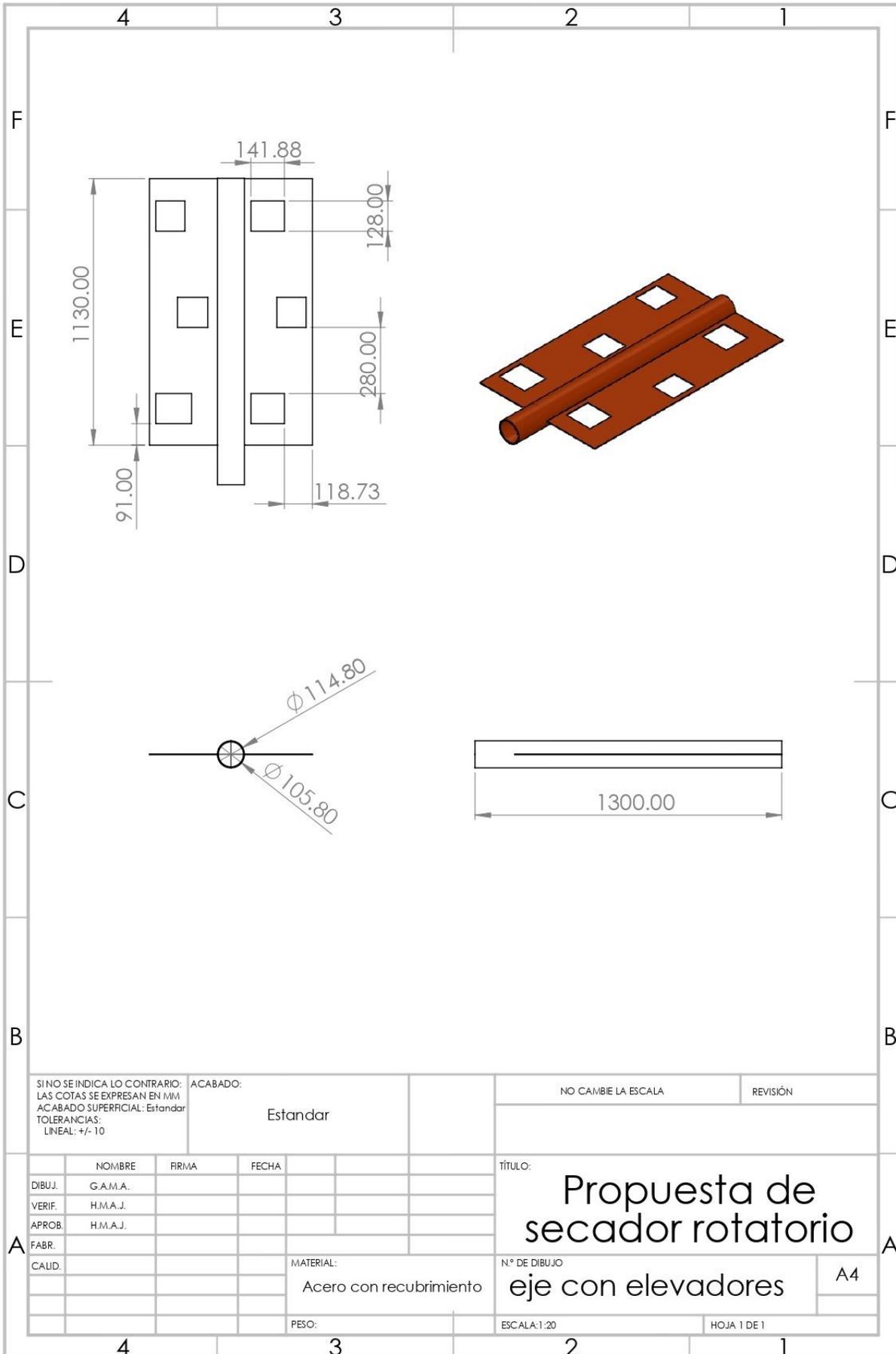
- <https://www.solerpalau.com/es-es/ventiladores-centrifugos/?type=industrial>
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2022). *Producción de alimentos en acuaponía a pequeña escala*. Roma: FAO.
- Sper Bernallván, J. R., & Torres Córdova, X. (2009). *Diseño de una Planta Deshidratadora de Banano usando Secador Rotatorio*. Ecuador: Escuela Superior Politecnica Del Litoral.
- Sucden. (12 de Julio de 2018). *Diagrama De Flujo Del Proceso*. Obtenido de <https://www.sucden.com/es/products-and-services/coffee/process-flowchart/>
- Thulukkanam, K. (2013). *Heat Exchanger Design Handbook*. Estados Unidos de América: Taylor & Francis Group.
- Tiendas punto. (15 de marzo de 2023). *Tiendas punto*. Obtenido de <https://www.tiendaspunto.com/es/avena-natural-sin-gluten-5-kg-copia/?v=0b98720dcb2c>
- Torres Mejía, F., Marcía Fuentes, J., Torres Mejía, J., Hernández Bonilla, F., Santos Alemán, R., Varela, I., . . . Montero Fernández, I. (2021). *Energy Evaluation of the Mechanical Drying of the Grain of Coffea arabica from Honduras*. Honduras: Asian Journal of Biology.
- Trucco Antognini, N. A. (2019). *Rehabilitación de pozos petroleros para la generación de calor por geotermia en la región de Magallanes*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Vectorka. (5 de Diciembre de 2022). *Dreamstime*. Obtenido de <https://es.dreamstime.com/stock-de-ilustraci%C3%B3n-cultivo-de-la-planta-del-vector-sembrando-y-dise%C3%B1o-infographic-del-proceso-de-establecimiento-colecci%C3%B3n-plana-del-argiculture-image75213422>
- Velasco, J. W., Villaflor, G. d., Flores, J. E., & Bisonard, E. (2014). *Operación y Simulación de un Secador Spray para la Producción de Pentaborato de Sodio*. Argentina: Scielo.
- Viera, V. (25 de Abril de 2013). *Secado por lecho fluidizado*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/VLADIMIRVIERA/secado-por-lecho-fluidizado>
- Villao Miranda, O. J., & Consuegra Mite, E. R. (2021). *Dimensionamiento óptimo de un sistema fotovoltaico a través de herramientas cimputacionales en zonas aisladas*. Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Vivas Carmona, S. M., Paz Torres, G., & Rojas Carvajal, A. H. (2007). *Diseño De Secadora De Café Rotativa Con Aprovechamiento De La Energia Biomasa*. México: Universidad Autónoma De Occidente.
- Wil.Amaya. (6 de Diciembre de 2022). *ST Adobe Stock*. Obtenido de <https://stock.adobe.com/au/images/desgrane-de-maiz-manizales-caldas-colombia/275193879>
- Yutu Cui, E. (20 de Agosto de 2019). *Consuma Conciencia*. Obtenido de <https://consumaconciencia.com/producto/cafe-en-grano-medio/>
- Zalazar Oliva, C. (Julio de 2023). *Mathematical modeling of Ni-lateritic ore drying in a rotary cylindrical kiln on a semi-industrial scale*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Eschema-del-secador-de-menas-a-escala-semiindustrial\\_fig1\\_372389704](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Eschema-del-secador-de-menas-a-escala-semiindustrial_fig1_372389704)

# Confidenciales

Anexo 1 Planos del secador geotérmico







SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:  
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM  
ACABADO SUPERFICIAL: Estandar  
TOLERANCIAS:  
LINEAL: +/- 10

ACABADO:  
Estandar

NO CAMBIE LA ESCALA      REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	G.A.M.A.		
VERIF.	H.M.A.J.		
APROB.	H.M.A.J.		
FABR.			
CALID.			

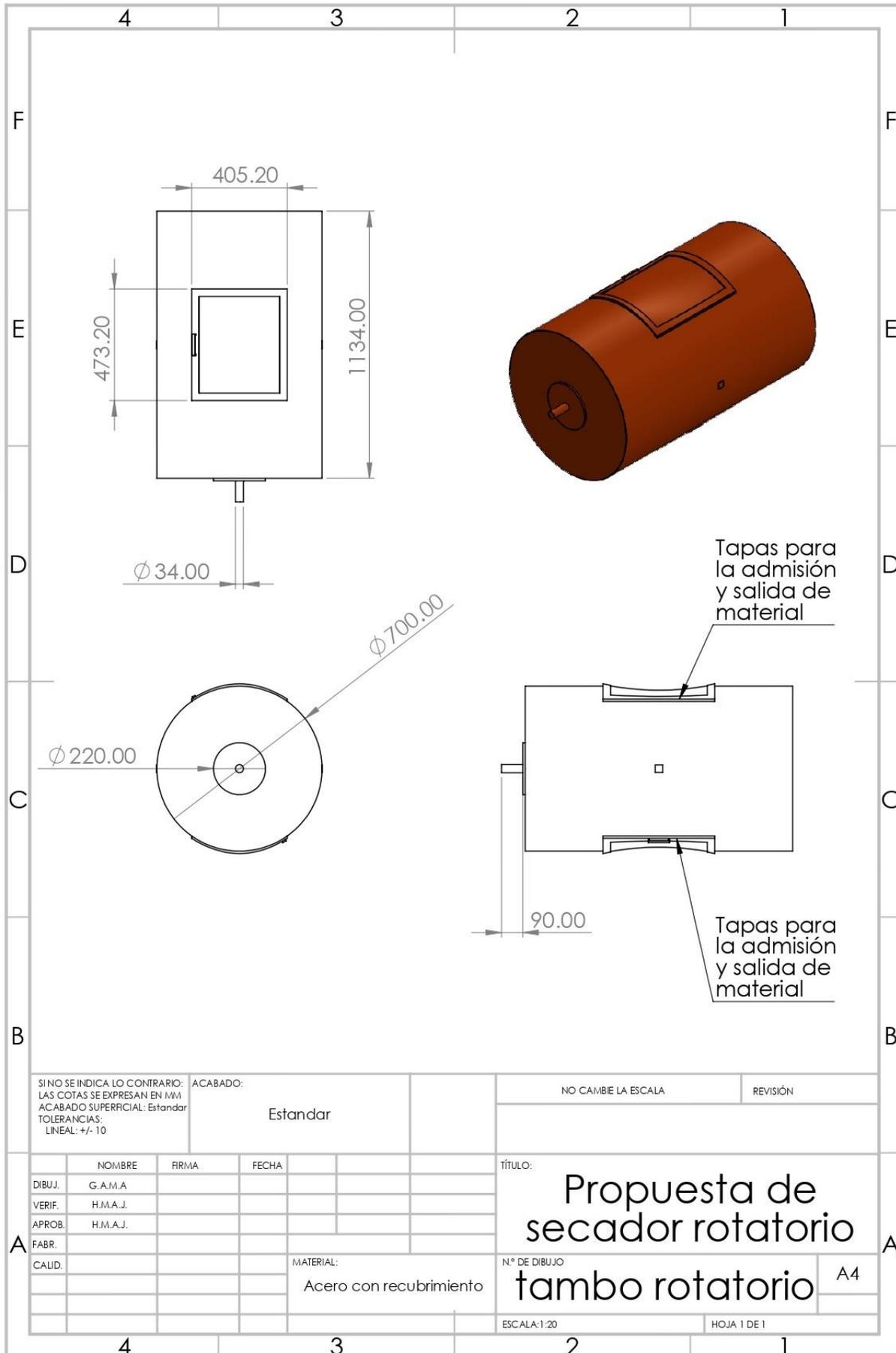
TÍTULO:  
**Propuesta de secador rotatorio**  
eje con elevadores

N.º DE DIBUJO: A4

MATERIAL:  
Acero con recubrimiento

PESO:

ESCALA: 1:20      HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:  
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM.  
ACABADO SUPERFICIAL: Estandar  
TOLERANCIAS:  
LINEAL: +/- 10

ACABADO:  
Estandar

NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
---------------------	----------

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	G.A.M.A		
VERIF.	H.M.A.J.		
APROB.	H.M.A.J.		
FABR.			
CALID.			

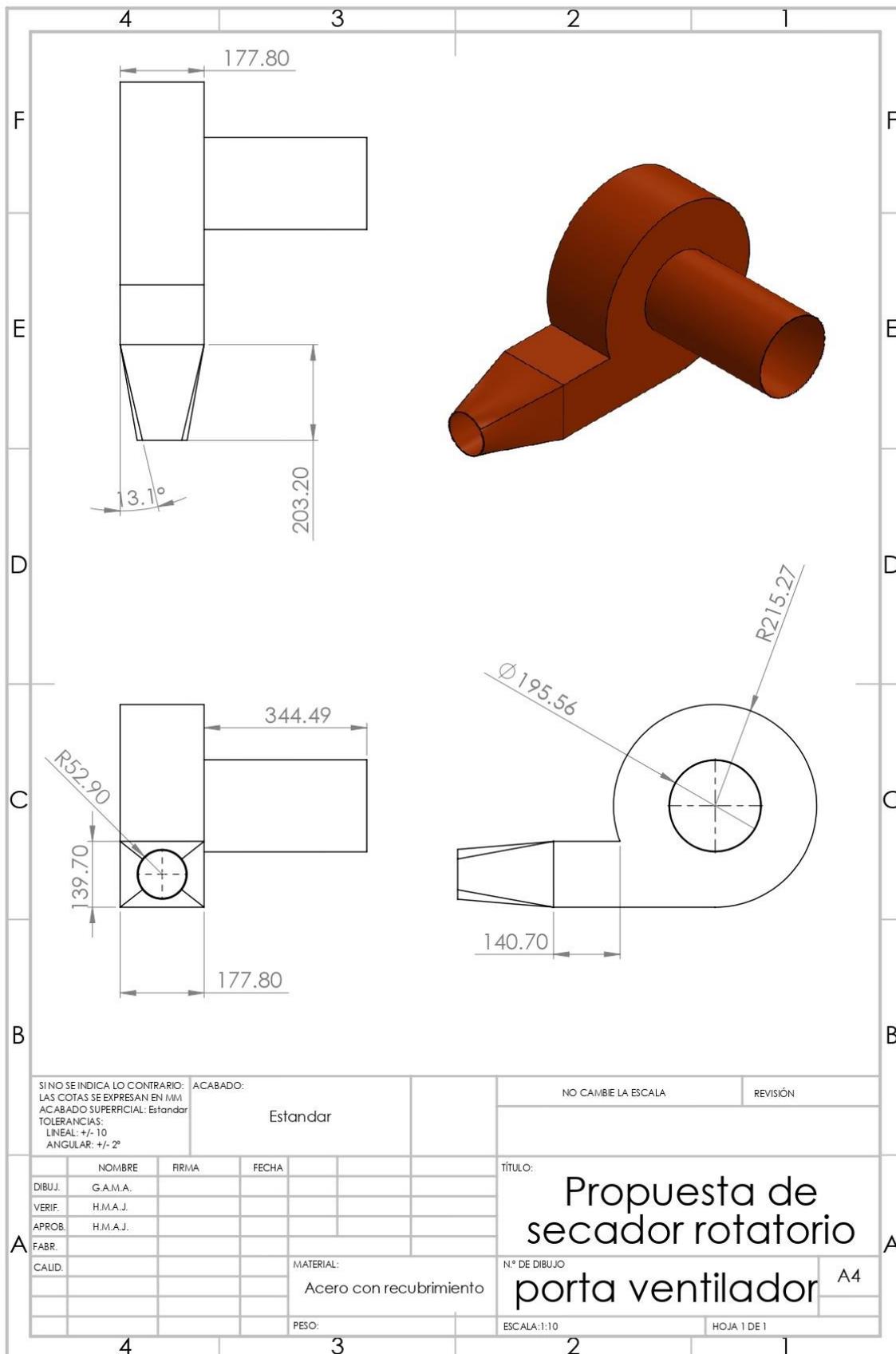
TÍTULO:  
**Propuesta de secador rotatorio tambo rotatorio**

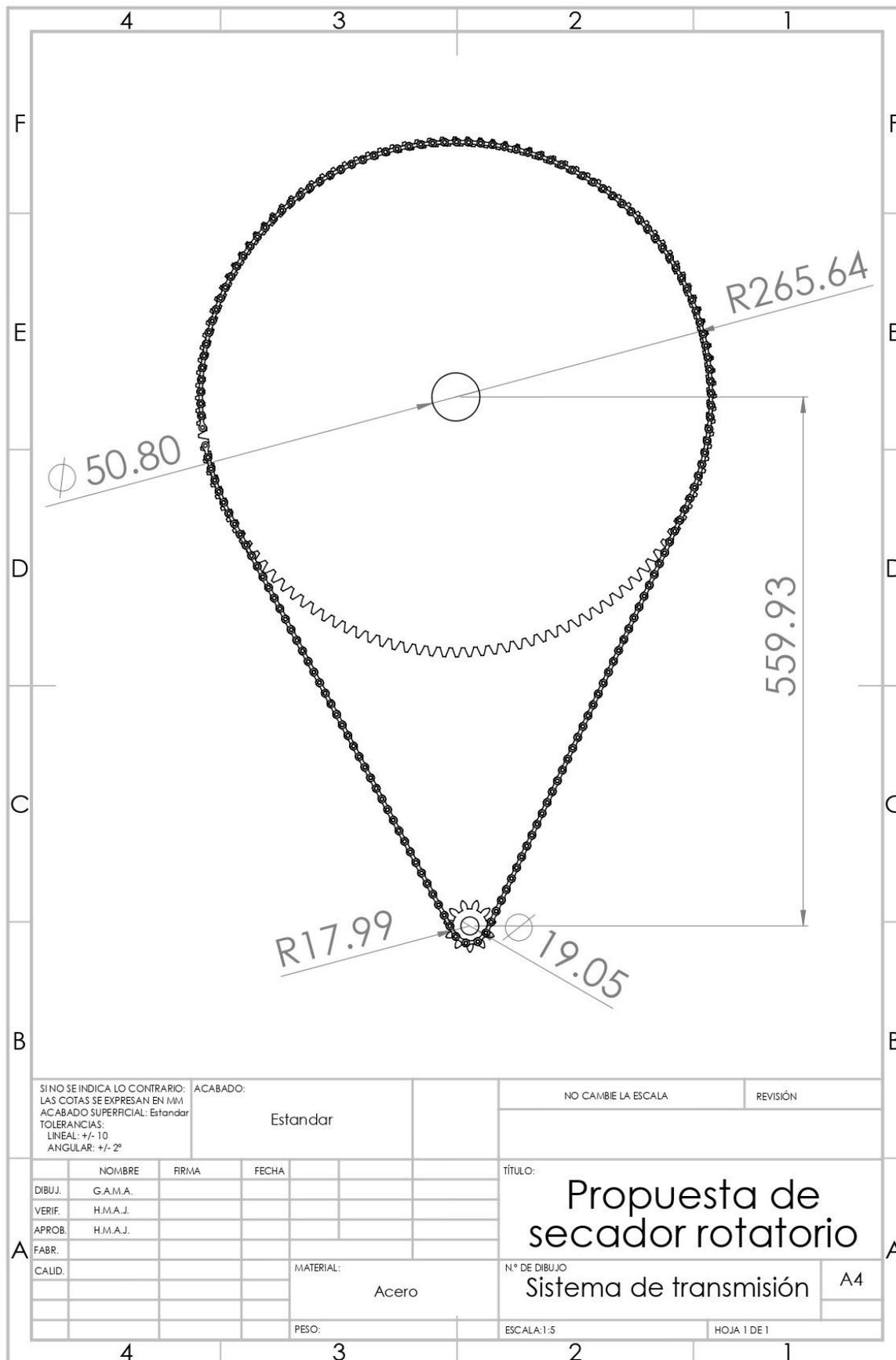
Nº DE DIBUJO: **A4**

MATERIAL:  
Acero con recubrimiento

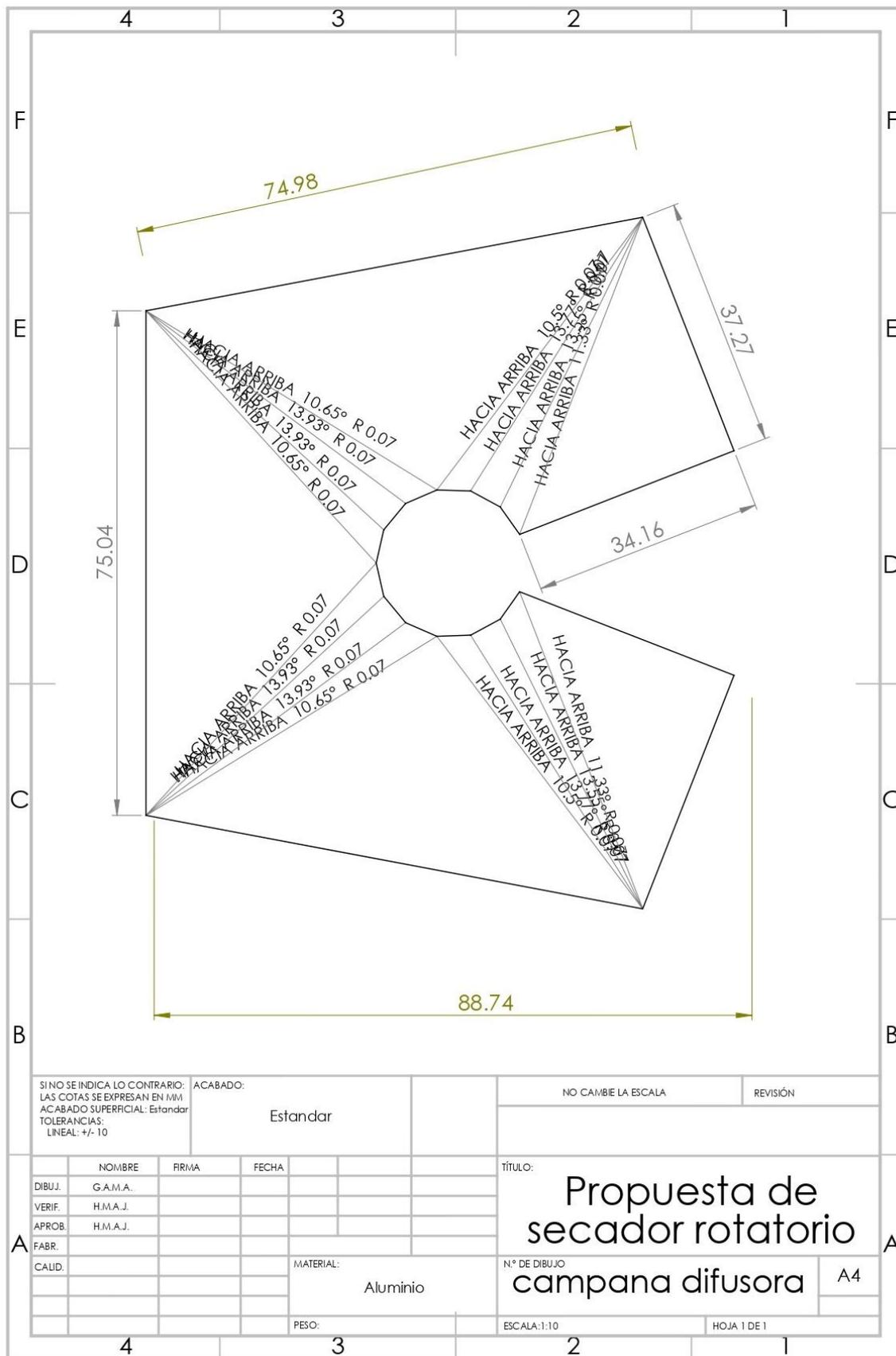
ESCALA: 1:20

HOJA 1 DE 1





SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: Estandar TOLERANCIAS: LINEAL: +/- 10 ANGULAR: +/- 2°		ACABADO: Estandar		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:	
DIBUJ. G.A.M.A.						Propuesta de secador rotatorio	
VERIF. H.M.A.J.							
APROB. H.M.A.J.							
FABR.				MATERIAL:		N° DE DIBUJO	
CALID.				Acero		Sistema de transmisión	
				PESO:		ESCALA: 1:5	
						HOJA 1 DE 1	



SINO SE INDICA LO CONTRARIO:  
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM  
ACABADO SUPERFICIAL: Estandar  
TOLERANCIAS:  
LINEAL: +/- 10

ACABADO:

Estandar

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	G.A.M.A.		
VERIF.	H.M.A.J.		
APROB.	H.M.A.J.		
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:

Propuesta de  
secador rotatorio

N.º DE DIBUJO

campana difusora

A4

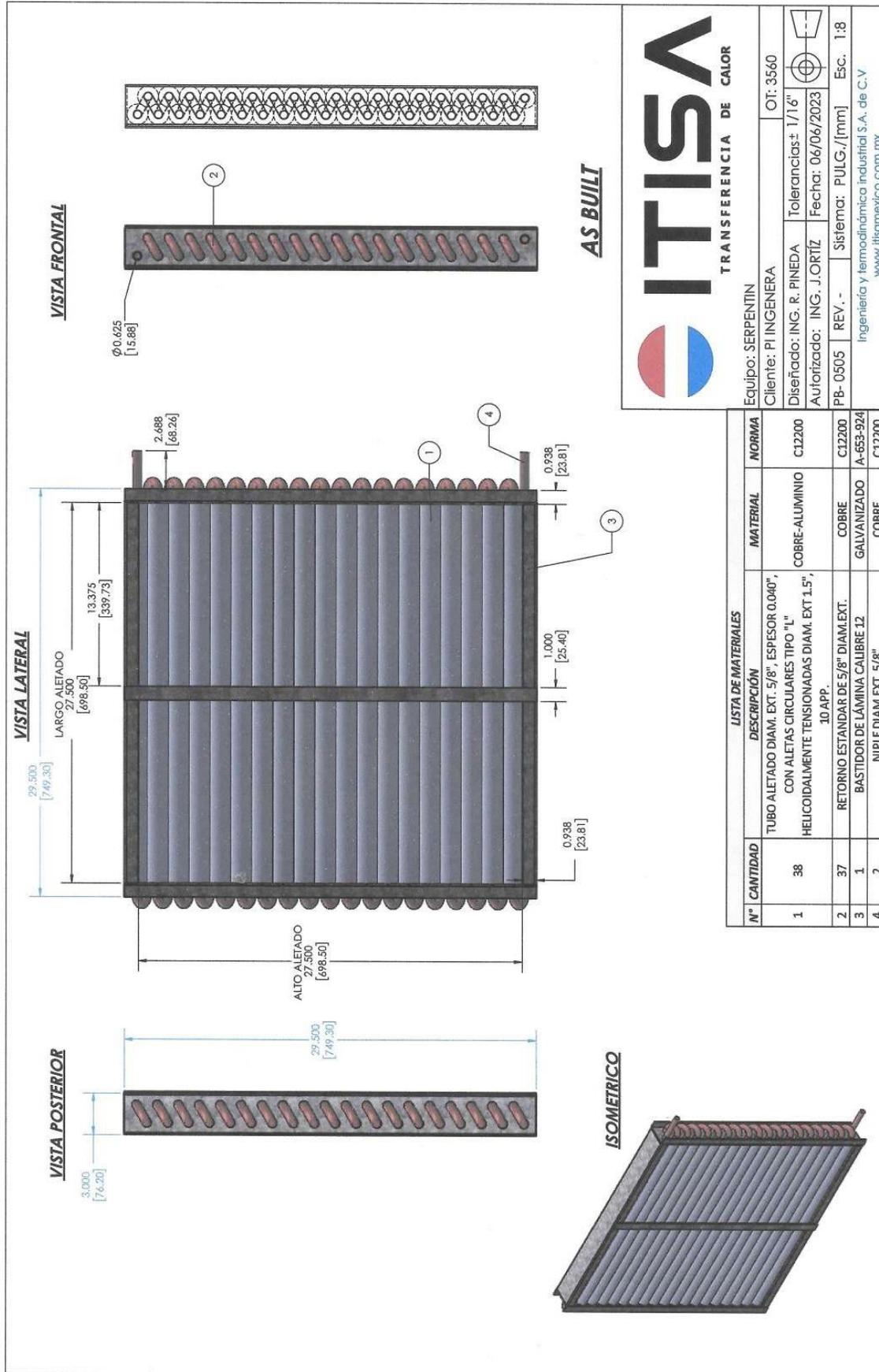
MATERIAL:

Aluminio

PESO:

ESCALA: 1:10

HOJA 1 DE 1



## Anexo 2 Hoja de datos técnicos del ventilador



### CEB-T

SP157992SCO588V0-CET-5000-460V-(208-230~3)



**Extractor Centrifugo de álabes curvos adelantados, simple oído de aspiración, modelo SP157992SCO588V0-CET-5000-460V-(208-230~3), marca S&P.** Transmisión directa. Construcción ligera apropiada a cada tamaño, óptima relación entre consumo y prestaciones.

**Características Constructivas:**

Carcasa fabricada en acero electrosoldado.

Acabado de pintura en polvo poliéster electrostática, con protección anticorrosiva.

Boca de descarga en cuatro posiciones con brida opcional.

Motores monofásicos y trifásicos.

Movimiento de aire limpio.

#### Punto requerido

Caudal	-
Presión Estática	0,000 N / m <sup>2</sup>
Temperatura	20 °C
Altitud	0 m
Densidad	1,2 Kg / m <sup>3</sup>
Frecuencia	-

#### Construcción

Diámetro impulsión	214 mm
Tamaño ventilador	5000
Peso	32kg

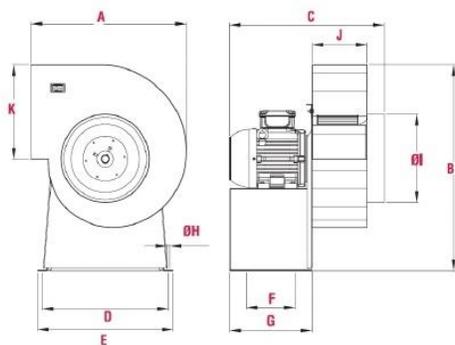
#### Características del motor

Índice de protección	IP55
Clase motor	F

#### Punto de trabajo

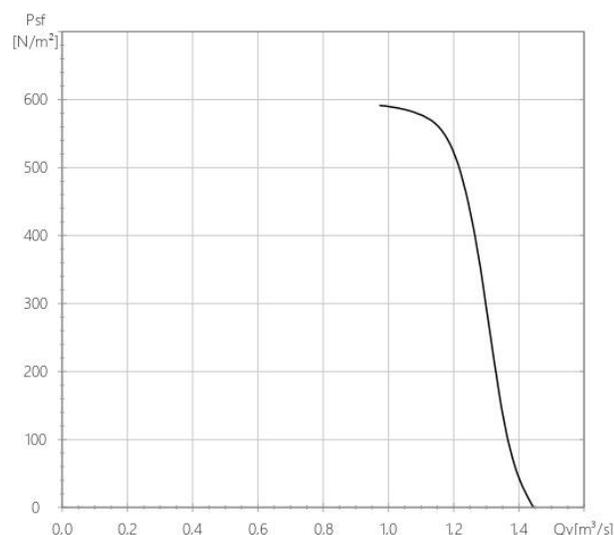
Potencia motor	2
Tensión	208-230/460
Intensidad máxima (A)	5.7/2.8
Velocidad ventilador	1760

#### Dimensiones



A	B	C	D	E	F	G	ØH	ØI
503	595	521	360	394	170	245	11.1	281
J	K							
187	292							

#### Curva



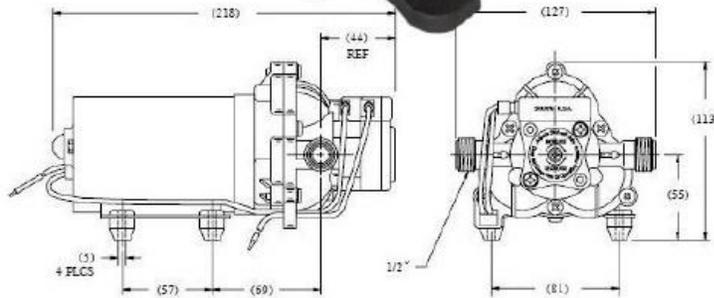
#### Características acústicas

	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Total
Descarga (LwA)	83	83	73	66	66	61	56	51	86
Descarga LpA @ 1m	72	72	62	55	55	50	45	40	75

Anexo 3 Hoja de datos técnicos de la bomba de agua



**Dimensiones 2088**



**Curva de flujo según presión**

*Shurflo 2088*

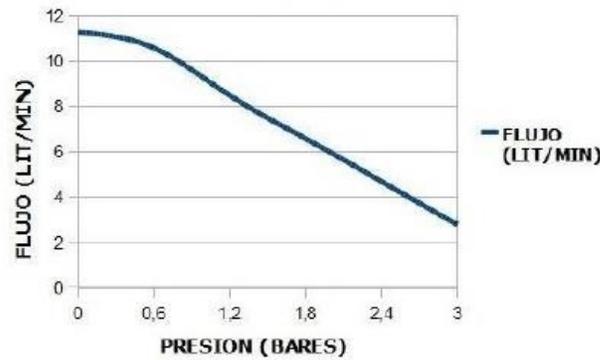
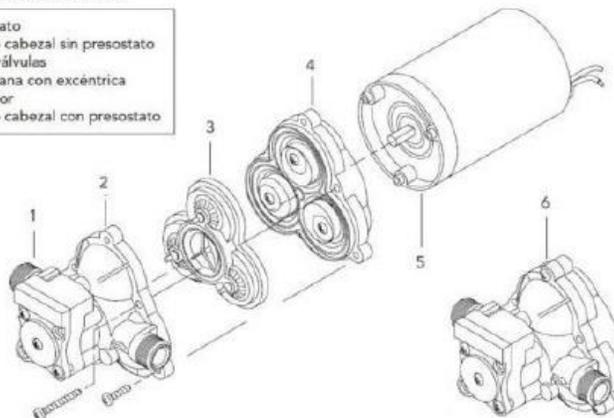


Diagrama de piezas de recambio

- 1 Presostato
- 2 Cuerpo cabezal sin presostato
- 3 Kit de válvulas
- 4 Membrana con excéntrica
- 5 Kit motor
- 6 Cuerpo cabezal con presostato



## Anexo 4 Hoja de datos técnicos del panel solar

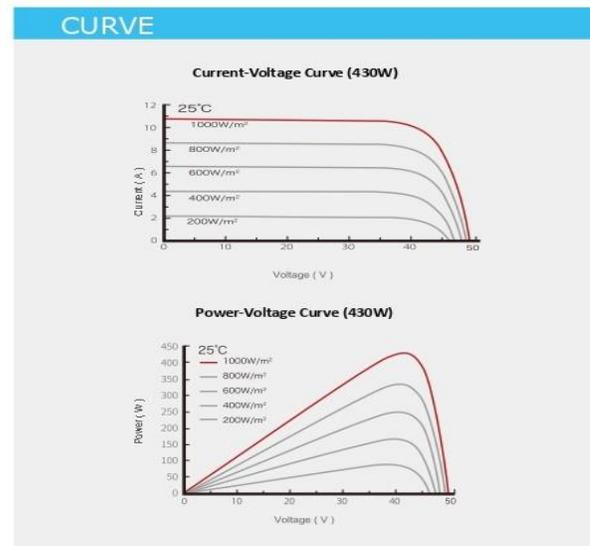
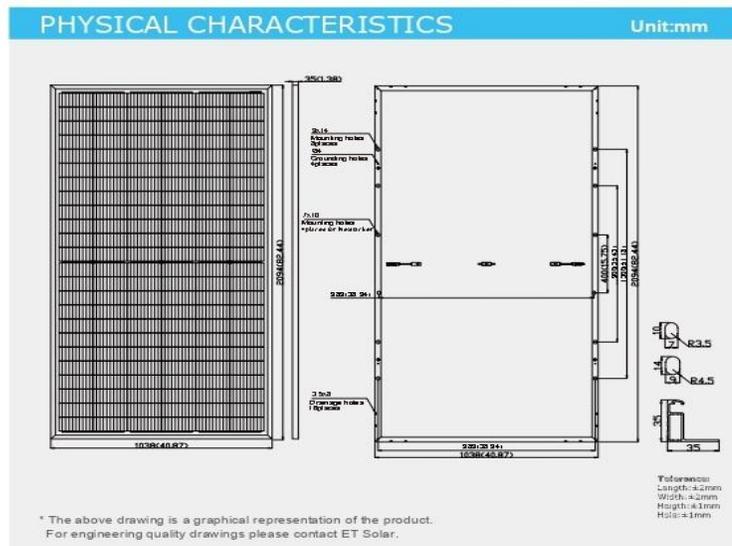
ELECTRICAL SPECIFICATIONS					
Model Type	ET-M672BH450WW	ET-M672BH445WW	ET-M672BH440WW	ET-M672BH435WW	ET-M672BH430WW
	ET-M672BH450WB	ET-M672BH445WB	ET-M672BH440WB	ET-M672BH435WB	ET-M672BH430WB
Peak Power (Pmax)	450W	445W	440W	435W	430W
Module Efficiency	20.4%	20.2%	19.9%	19.7%	19.5%
Maximum Power Voltage (Vmp)	41.5V	41.2V	41.0V	40.8V	40.6V
Maximum Power Current (Imp)	10.85A	10.81A	10.74A	10.67A	10.60A
Open Circuit Voltage (Voc)	49.3V	49.8V	49.6V	49.4V	49.2V
Short Circuit Current (Isc)	11.6A	11.40A	11.33A	11.26A	11.19A
Power Tolerance	0~+4.99W				
Operating Temperature	- 40 ~ + 85 C				
Maximum System Voltage	DC 1500V				
Nominal Operating Cell Temperature	45±2 C				

ELECTRICAL SPECIFICATIONS (NOCT)					
Model Type	ET-M672BH450WW	ET-M672BH445WW	ET-M672BH440WW	ET-M672BH435WW	ET-M672BH430WW
	ET-M672BH450WB	ET-M672BH445WB	ET-M672BH440WB	ET-M672BH435WB	ET-M672BH430WB
Peak Power (Pmax)	334W	330W	318.5W	326W	323W
Maximum Power Voltage (Vmp)	37.96V	37.90V	37.84V	37.78V	37.72V
Maximum Power Current (Imp)	8.90A	8.81A	8.72A	8.63A	8.56A
Open Circuit Voltage (Voc)	46.7V	46.5V	46.3V	46.1V	45.9V
Short Circuit Current (Isc)	9.56A	9.48A	9.40A	9.32A	9.24A

MECHANICAL SPECIFICATIONS	
Cell Type	166mm x 83mm
Number of Cells	144 half-cells (6×24)
Weight	24 kg
Dimension	2094×1038×35mm
Front Glass	3.2mm, Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Junction Box	IP67 rated
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Output cables	4mm <sup>2</sup> ; Portrait:255mm(+)/355mm(-) Or customized

TEMPERATURE COEFFICIENT	
Temp. Coeff. of Isc (TK Isc)	0.048% /°C
Temp. Coeff. of Voc (TK Voc)	-0.290%/°C
Temp. Coeff. of Pmax (TK Pmax)	-0.350%/°C

PACKING MANNER	
Container	40' HQ
Pieces per Pallet	31
Pieces per Container	682



**Note:** the specifications are obtained under the Standard Test Conditions (STCs): 1000 W/m<sup>2</sup> solar irradiance, 1.5 Air Mass, and cell temperature of 25°C. The NOCT is obtained under the Test Conditions: 800 W/m<sup>2</sup>, 20°C ambient temperature, 1m/s wind speed, AM 1.5 spectrum. Please contact [support@etsolar.hk](mailto:support@etsolar.hk) for technical support. The actual transactions will be subject to the contracts. This parameters is for reference only and it is not a part of the contracts. The specifications are subject to change without prior notice.

The specifications are subject to change without prior notice.

## Anexo 5 Hoja de datos técnicos de las baterías

Eléctrica Las características	Tensión Nominal	48V
	Capacidad Nominal	200Ah@0.2C
	Energía	10240Wh
	Resistencia interna	$\leq 35\text{m}\Omega$
	Ciclo de Vida	2000 ciclos @ 0.2C carga/descarga, hasta 70% capacidad
	La descarga	$\leq 3.5\%$ por mes a 25 °C
Estándar de carga	Max tensión de carga	14,0 ~ 14,6 V
	Modo de carga	A temperatura de 0 °C ~ 45 °C, cargado a 14,6 V corriente constante de 0.2C, y luego, cambiado continuamente con voltaje constante de 14,6 V la corriente no sea superior a 0.02C
	Corriente de carga	200A
	Max, la corriente de carga	200A
Estándar de descarga	Descarga actual	200A
	Max, corriente continua	200A
	Max, el pulso actual	210A(<10S)
	Voltaje de corte de descarga	40,0
Condiciones de funcionamiento	Carga de temperatura	0 °C a 45 °C(32 °F a 113 °F) @ 60 ± 25% humed
	Temperatura de descarga	-20 °C a 60 °C(-4 °F a 140 °F) @ 60 ± 25% hum relativa
	Temperatura de almacenamiento	0 °C a 45 °C(32 °F a 113 °F) @ 60 ± 25% humed
	Agua de resistencia al polvo	IP54
Estructura	Celular y formato	LFP54H4K1 54174201
	Carcasa	Mental

## Anexo 6 Datos técnicos del inversor

Model	sp12/120-3000L	sp24/120-3000L	sp48/120--3000L	sp12/230--3000L	sp24/230--3000L	sp48/230--3000L
Continuous Power	3000W					
Surge Power	6000W					
Frequency	50HZ±0.5HZ or 60HZ±0.5HZ					
Wave Form	Pure Sine Wave					
AC Regulation	THD<3%(Linear Load)					
Output Efficiency	92%					
DC Voltage	DC12V	DC24V	DC48V	DC12V	DC24V	DC48V
AC Voltage	120VAC ±5%			230VAC ±5%		
No Load Current Draw	1.6a	0.8a	0.4a	1.6a	0.8a	0.4a
DC Voltage Range	10-15V	20-30V	40-60V	10-15V	20-30V	40-60V
Low Voltage Shut Down	10±0.5V	20±0.5V	40±1V	10±0.5V	20±0.5V	40±1V
Over Voltage Shut Down	15±0.5V	30±0.5V	60±1V	15±0.5V	30±0.5V	60±1V
Low Voltage Recovery	12.5V	25V	50V	12.5V	25V	50V
Protection	Low Voltage/Over Voltage		LED Alarm and Automatic Recovery.			
	Overload		LED Alarm and Automatic Recovery.			
	Over Temperature		LED Alarm and Automatic Recovery.			
	Short Circuit		LED Alarm and Automatic Recovery.			
Working Temperature	-10°- +50°					
Storage Temperature	-30°- +70°					
Production Size	475*165*85(mm)					
Package Size	550*235*150(mm)					
N.W/G.W	4.9/5.9(kg)					
Start	soft-start					
Cooling Way	Intelligent Cooling Fan					