

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE  
TOSTADOR DE GRANOS DE CACAO DE 6  
kg/hora QUE FUNCIONE CON ENERGIA SOLAR  
CONCENTRADA**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico,  
que presenta el bachiller:

**FÉLIX ESCALANTE DELGADO**

**ASESOR: Mg. Miguel Hadzich Marín**

**Lima, Mayo del 2015**

## RESUMEN

La presente tesis expone el diseño energético y las pruebas respectivas sobre un prototipo de tostador solar de granos de cacao de manera que pueda ser replicado en el sector rural del Perú. Esto tiene como finalidad brindarle al agricultor una tecnología nueva de tostado que esté de acuerdo con la calidad del mercado.

El tostador usa la potencia térmica otorgada por un concentrador Scheffler de 8m<sup>2</sup> de superficie llegando a aprovechar 3.8 kW de potencia, haciendo posible tostar 3 kg de granos de cacao en media hora, es decir, 6 kg en una hora en dos etapas.

En los capítulos iniciales se muestra una descripción del funcionamiento y aplicaciones de uso del concentrador Scheffler. También la metodología del diseño para definir un proyecto definitivo óptimo.

Luego se realiza un análisis térmico del tostador, evaluando las temperaturas, potencia entregada por el sol y la potencia recibida, con la finalidad de obtener expresiones que permitan simular el comportamiento del tostador antes de construir un primer prototipo. De la misma manera, se realiza un análisis de las partes más importantes de la máquina como son la estructura, el motor y el sistema de transmisión.

Finalmente, el prototipo construido se somete a diversas pruebas para así validar todo el análisis teórico realizado y comprobar que, efectivamente, el tostador cumple con la meta principal que es tostar granos de cacao.



A Félix y Patricia

Este logro es de ustedes. Gracias por todo

## AGRADECIMIENTOS

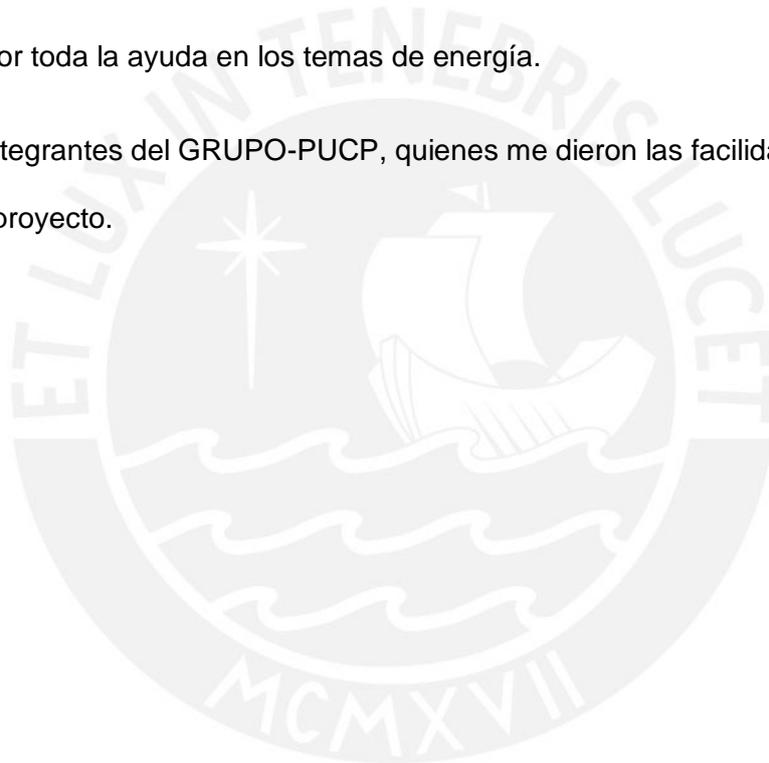
A Diana, por acompañarme y apoyarme a lo largo de todo este proceso.

A Jesús Leonardo, por la amistad a lo largo de toda la vida.

Al profesor Miguel Hadzich, Juan Pablo, Jorge, Víctor, por acogerme en el proyecto del cacao y preocuparse, incluso más que yo, en que termine la Tesis.

A François, por toda la ayuda en los temas de energía.

A todos los integrantes del GRUPO-PUCP, quienes me dieron las facilidades para realizar este proyecto.



## CONTENIDO

<b>RESUMEN.....</b>	<b>I</b>
<b>CONTENIDO .....</b>	<b>II</b>
<b>INDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>V</b>
<b>INDICE DE TABLAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO 1: ESTADO DE LA TECNOLOGIA.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 Concentradores solares .....</b>	<b>2</b>
1.1.1 Funcionamiento del concentrador solar Scheffler.....	3
1.1.2 Aplicaciones del concentrador solar Scheffler .....	5
1.1.3 Datos técnicos de un concentrador Scheffler de 8m <sup>2</sup> .....	6
<b>1.2 Experiencias de tostado solar de cacao .....</b>	<b>7</b>
1.2.1 En Estados Unidos.....	7
1.2.2 En México.....	9
<b>1.3 Cacao.....</b>	<b>10</b>
1.3.1 Zonas cacaocaleras en el Perú.....	10
1.3.2 Situación de las zonas cacaocaleras en el Perú.....	11
1.3.3 Calidad del grano de cacao.....	11
1.3.4 Desde el cacao fruto a pasta de cacao.....	11
<b>1.4 Lista de exigencias.....</b>	<b>14</b>
<b>CAPITULO 2: DISEÑO DEL TOSTADOR .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Estructura de funciones .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 Matriz morfológica.....</b>	<b>17</b>

<b>2.3</b>	<b>Evaluación técnico – económica .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4</b>	<b>Proyecto preliminar óptimo.....</b>	<b>21</b>
<b>2.5</b>	<b>Descripción del funcionamiento de la solución óptima.....</b>	<b>22</b>
<b>2.6</b>	<b>Análisis Energético .....</b>	<b>23</b>
2.6.1	Comportamiento térmico del tostador .....	23
2.6.2	Cálculo de potencia solar .....	26
2.6.3	Cálculos de potencia del concentrador .....	35
2.6.4	Parámetros considerados .....	37
2.6.5	Análisis óptico.....	40
2.6.6	Resistencias térmicas.....	42
2.6.7	Evaluación de pérdidas .....	46
2.6.8	Valores de los parámetros .....	53
2.6.9	Primeras pruebas .....	56
<b>2.7</b>	<b>Análisis Mecánico .....</b>	<b>59</b>
2.7.1	Paletas.....	59
2.7.2	Sistema de rotación.....	62
2.7.3	Sistema de alimentación .....	66
2.7.4	Cálculo de árbol de transmisión.....	68
2.7.5	Cálculo de estructura.....	71
2.7.6	Cálculo de mesa soporte.....	72
2.7.7	Cálculo de estabilidad .....	74
	<b>CAPITULO 3: PRUEBAS .....</b>	<b>76</b>
<b>3.1</b>	<b>Pruebas de simulación .....</b>	<b>76</b>
<b>3.2</b>	<b>Análisis de simulación.....</b>	<b>80</b>
<b>3.3</b>	<b>Pruebas con el tostador .....</b>	<b>80</b>
3.3.1	Parámetros a considerar .....	82
<b>3.4</b>	<b>Análisis de pruebas.....</b>	<b>85</b>
<b>3.5</b>	<b>Efecto de la radiación .....</b>	<b>88</b>

CONCLUSIONES ..... 90

REFERENCIAS ..... 92

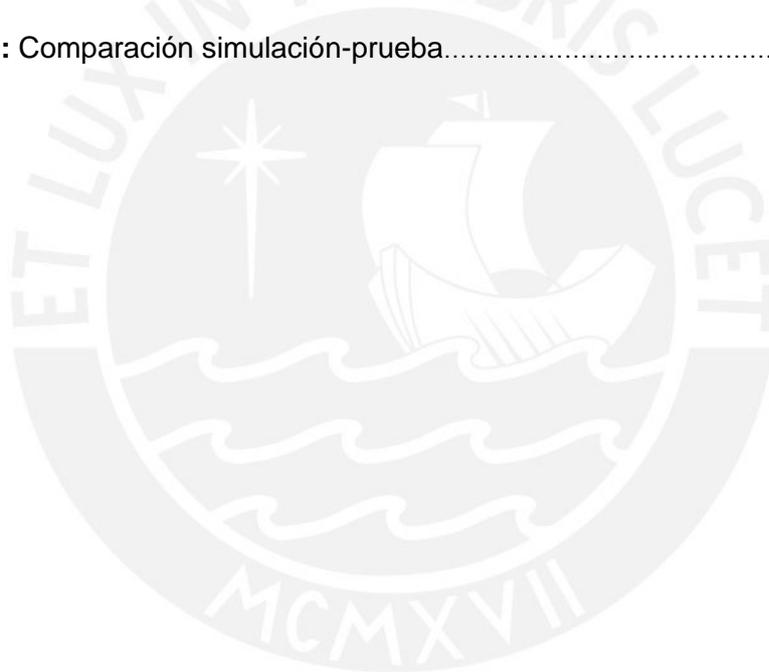


## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Concentrador Scheffler (derecha) para su uso en cocinas.....	2
<b>Figura 1.2:</b> Orientación del concentrador Scheffler .....	4
<b>Figura 1.3:</b> Variación de la superficie de espejos del concentrador Scheffler con respecto a diferentes días del año.....	5
<b>Figura 1.4:</b> Cocina solar en Rajastán, India .....	6
<b>Figura 1.5:</b> Dan Rattigan instalando su modelo de tostador.....	8
<b>Figura 1.6:</b> Dan Rattigan probando su modelo de tostador.....	9
<b>Figura 1.7:</b> Concentrador “Fuego Solar” en funcionamiento .....	9
<b>Figura 1.8:</b> Zonas cacaocaleras en el Perú .....	10
<b>Figura 1.9:</b> Esquema del proceso del cacao .....	13
<b>Figura 2.1:</b> Estructura de funciones .....	17
<b>Figura 2.2:</b> Matriz morfológica .....	18
<b>Figura 2.3:</b> Diagrama de evaluación técnico – económico según VDI 2225.....	20
<b>Figura 2.4:</b> Proyecto preliminar óptimo .....	21
<b>Figura 2.5:</b> Esquema de tostado.....	23
<b>Figura 2.6:</b> Flujo energético .....	24
<b>Figura 2.7:</b> Análisis energético de la olla con los granos de cacao .....	25
<b>Figura 2.8:</b> Flujo másico .....	26
<b>Figura 2.9:</b> Mapa solar de Cusco.....	27
<b>Figura 2.10:</b> Ecuación de tiempo E en minutos en función de día del año .....	28
<b>Figura 2.11:</b> Gráfico declinación y ángulo horario.....	31
<b>Figura 2.12:</b> Gráfico altura y azimut.....	31
<b>Figura 2.13:</b> Gráfico inclinación y ángulo de incidencia .....	32
<b>Figura 2.14:</b> Disipación de la radiación antes de la superficie terrestre.....	34
<b>Figura 2.15:</b> Los rayos, para este uso, se reflejan mejor en un cilindro cortado.....	38

<b>Figura 2.16:</b> Esquema de apertura .....	38
<b>Figura 2.17:</b> Simulación en SolTrace. Concentrador Scheffler (superficie verde), segundo reflector (superficie roja), olla (superficie azul) .....	41
<b>Figura 2.18:</b> Distribución de rayos en la base de la olla .....	42
<b>Figura 2.19:</b> Resistencias térmicas .....	43
<b>Figura 2.20:</b> Forma y dimensiones del grano .....	45
<b>Figura 2.21:</b> Resistencias térmicas a través de la olla .....	48
<b>Figura 2.22</b> Radios involucrados .....	49
<b>Figura 2.23</b> Conducción a través del árbol .....	52
<b>Figura 2.24:</b> Recorrido de un grano de cacao durante el tostado .....	59
<b>Figura 2.25:</b> Paletas del tostador .....	60
<b>Figura 2.26:</b> Paletas en funcionamiento .....	61
<b>Figura 2.27:</b> Simulación mecánica de las paletas .....	62
<b>Figura 2.28:</b> Motor DC a utilizar .....	65
<b>Figura 2.29:</b> Esquema del sistema de alimentación .....	67
<b>Figura 2.30:</b> Sistema de alimentación a usar .....	67
<b>Figura 2.31:</b> Elementos de árbol .....	68
<b>Figura 2.32:</b> Diagrama de cuerpo libre .....	68
<b>Figura 2.33:</b> Diagramas de fuerzas internas .....	69
<b>Figura 2.34:</b> Estructura metálica .....	71
<b>Figura 2.35:</b> Simulación de resistencia de estructura .....	72
<b>Figura 2.36:</b> Mesa soporte .....	73
<b>Figura 2.37:</b> Simulación de resistencia de la mesa soporte .....	73
<b>Figura 2.38:</b> Simulación de resistencia de la bocina .....	74
<b>Figura 2.39:</b> Centro de gravedad de tostador .....	75
<b>Figura 2.40:</b> Centro de gravedad en posición crítica .....	75

<b>Figura 3.1:</b> Simulación de tostado de cacao .....	77
<b>Figura 3.2:</b> Gráfica simulación 1 .....	78
<b>Figura 3.3:</b> Gráfica simulación 2 .....	79
<b>Figura 3.4:</b> Ubicación del foco del reflector Scheffler .....	81
<b>Figura 3.5:</b> Foco del Scheffler en el tostador .....	81
<b>Figura 3.6:</b> Gráfico prueba 1 .....	86
<b>Figura 3.7:</b> Gráfico prueba 2 .....	87
<b>Figura 3.8:</b> Gráfico prueba 3 .....	88
<b>Figura 3.9:</b> Comparación simulación-prueba .....	89



## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1:</b> Información de un concentrador Scheffler de 8m <sup>2</sup> .....	7
<b>Tabla 1.2:</b> Lista de exigencias.....	15
<b>Tabla 2.1:</b> Valoración técnica.....	19
<b>Tabla 2.2:</b> Valoración económica.....	20
<b>Tabla 2.3:</b> Irradiancia en algunos días del año en Huyo .....	34
<b>Tabla 2.4:</b> Dimensiones de la superficie del concentrador .....	35
<b>Tabla 2.5:</b> Factor de apertura.....	36
<b>Tabla 2.6:</b> Apertura útil para diferentes días del año .....	36
<b>Tabla 2.7:</b> Propiedades de los posibles materiales para el segundo reflector .....	39
<b>Tabla 2.8:</b> Parámetros de simulación para el reflector Scheffler.....	41
<b>Tabla 2.9:</b> Valores de parámetros .....	53
<b>Tabla 2.10:</b> Resistencias térmicas referentes al flujo de calor útil .....	54
<b>Tabla 2.11:</b> Cálculo de coeficientes de convección y resistencias térmicas referente a las pérdidas.....	55
<b>Tabla 2.12:</b> Potencias en la olla .....	56
<b>Tabla 2.13:</b> Datos del día de la prueba .....	57
<b>Tabla 2.14:</b> Resultados de primera prueba .....	58
<b>Tabla 2.15:</b> Especificaciones técnicas del motor seleccionado .....	65
<b>Tabla 2.16:</b> Datos para equilibrio de árbol.....	69
<b>Tabla 2.17:</b> Parámetros para cálculo de fatiga .....	70
<b>Tabla 3.1:</b> Valores iniciales para simulación.....	77
<b>Tabla 3.2:</b> Datos de prueba 1 .....	83
<b>Tabla 3.3:</b> Datos prueba 2.....	85

## INTRODUCCIÓN

La presente tesis tiene como objetivo el desarrollo de un tostador de granos de cacao de 6kh/hora utilizando energía solar de una manera simple, económica y con muy poco impacto ambiental. Esta tecnología está orientada a ser utilizada en el sector rural del país donde diversas comunidades productoras del grano de cacao resultarían beneficiadas.

Usualmente, para tostar el cacao, la energía utilizada es eléctrica o proviene de leña o gas. Estas fuentes, de una u otra manera, contaminan el medio ambiente por lo que esta alternativa de energía solar es eficaz en cuanto a problemas de contaminación se refiere. Asimismo, el uso de los combustibles cuesta, lo que encarece el proceso de tostado de cacao.

Para este caso, se propone usar como fuente de energía al Sol, empleando una tecnología bastante utilizada y estudiada, la cual es el concentrador solar tipo Scheffler. Este concentrador permite concentrar, la radiación directa del sol en un solo punto focal, logrando alcanzar elevadas temperaturas ( $>200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), suficiente para calentar, hervir agua o, para nuestro caso, tostar cacao.

Por falta de recursos y tecnología en las zonas cacao cultoras del Perú, zonas como: La Convención, el Vrae, Alto Marañón, Bagua central, etc., la mayoría se limita a comercializar el cacao como granos recién cosechados. Con la realización de esta tesis muchas comunidades saldrían beneficiadas ya que con esta tecnología, limpia y barata, se puede le puede dar un valor agregado al cacao aumentando el beneficio para los productores.

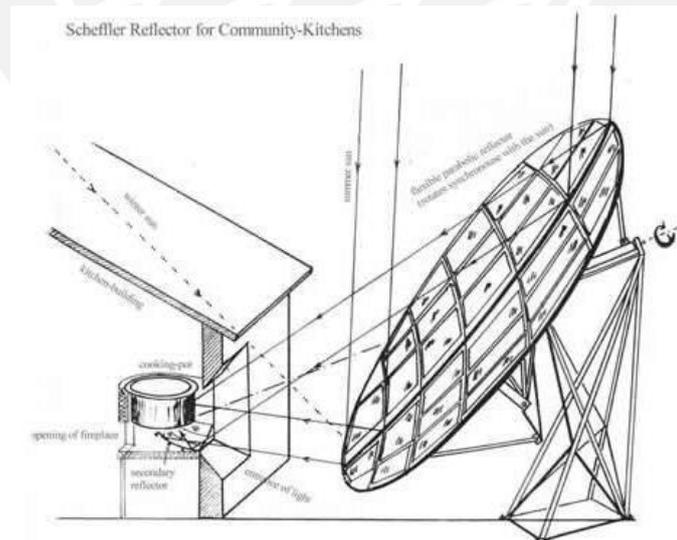
## CAPITULO 1

### ESTADO DE LA TECNOLOGIA

#### 1.1 Concentradores solares

Existen diversos motivos de utilización de la energía proporcionada por el sol. La concentración de la energía solar, a diferencia de las otras, tiene la ventaja de poder alcanzar una alta temperatura en un solo punto que se puede utilizar de diversas maneras. Existen tres tipos de tecnologías: de enfoque, fijo o semifijos. Los concentradores de enfoque tienen la ventaja de alcanzar altas temperaturas, ya que cuentan con un mecanismo de seguimiento solar, pudiendo llegar a temperaturas superiores a 100 °C. Los demás concentradores (fijo y semifijos) no utilizan un seguidor solar por lo que alcanzan temperaturas más bajas.

Entre los concentradores solares de enfoque, existe un tipo en particular que fue inventado hace 26 años por el ingeniero alemán Wolfgang Scheffler (Figura 1.1).



**Figura 1.1:** Concentrador Scheffler (derecha) para su uso en cocinas [Scheffler, 2013]

La ventaja de este tipo de concentradores es la ubicación del punto focal donde el calor es concentrado. Este punto es fijo y se encuentra fuera de la sección del paraboloide. Dentro de las tecnologías de concentración, la mayoría tiene su foco

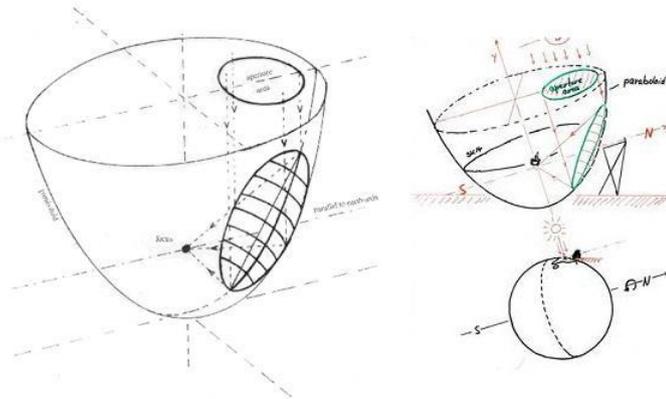
móvil, en función de la posición del sol. Este modelo tiene la sección de paraboloide, conformada por espejos, móvil de modo que recibe la radiación directa del sol concentrándolo en un solo punto fijo.

Existen diversos tamaños de concentradores solares Scheffler para diferente utilización. El tamaño está en función del área cubierta por la sección del paraboloide. Los tamaños pueden ser:  $2\text{m}^2$ ,  $2.7\text{m}^2$ ,  $8\text{m}^2$ ,  $16\text{m}^2$ , etc. En las instalaciones del Grupo de Apoyo al Sector Rural, GRUPO-PUCP se encuentran dos concentradores, uno de  $2.7\text{m}^2$  y otro de  $8\text{m}^2$ . En la presente tesis se utilizará el segundo reflector ya que puede concentrar una mayor temperatura y es con el cual se realizarán todas las pruebas que sean necesarias.

### 1.1.1 Funcionamiento del concentrador solar Scheffler

Existen diversas fuentes, incluidas tesis, con amplia información sobre el funcionamiento de los concentradores Scheffler. En esta parte se explicará un resumen de su funcionamiento.

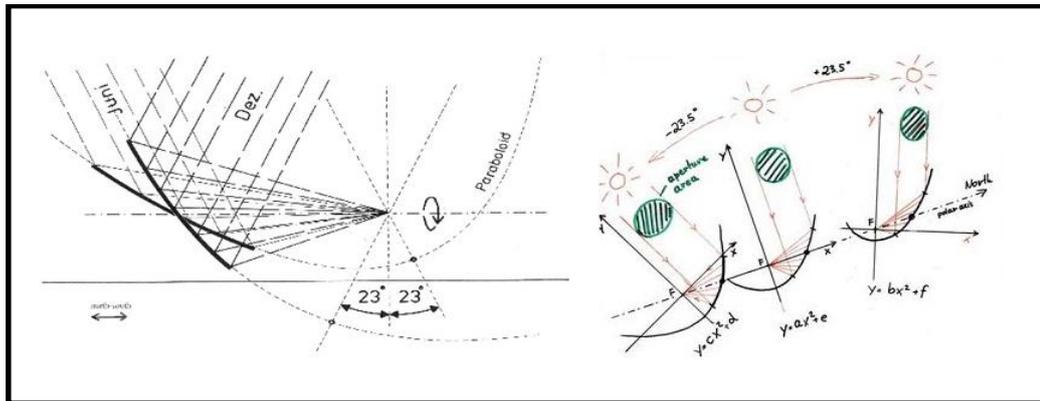
La forma de concentrador es una porción lateral de paraboloide circular. El borde de la forma elíptica característico del reflector Scheffler se da por el trazo de corte inclinado. El eje rotacional del reflecto está orientado en dirección norte-sur de la tierra, paralelo al eje terrestre y coincidiendo con su centro de gravedad. De esta manera no se requiere mucha fuerza para el accionamiento del giro. Para que el foco también sea fijo, este también tiene que coincidir con el eje rotacional. La orientación del concentrador se puede apreciar en la Figura 1.2.



**Figura 1.2:** Orientación del concentrador Scheffler [Sheffler, 2013]

A lo largo del día, el reflector solo girará en torno a su eje, en ningún momento girará en otro sentido, ya sea horizontal o verticalmente, ya que de esta manera el foco se mantiene fijo en un solo punto.

Con el transcurso del tiempo a lo largo de un año, el ángulo de incidencia del sol varía en  $\pm 23.5^\circ$  comparado con la línea vertical paralela al eje terrestre. Para que esto no afecte el funcionamiento del reflector, este también se tiene que inclinar el mismo ángulo, de manera que el foco no cambie su posición. Para que esto sea posible, el bastidor del reflector tiene que tener un nivel de elasticidad para que la superficie reflectante varíe su forma de acuerdo a la posición del sol. De esta manera un único reflector funcionaría de una buena manera todos los días del año. Esta explicación se puede entender mejor en la Figura 1.3.



**Figura 1.3:** Variación de la superficie de espejos del concentrador Scheffler con respecto a diferentes días del año [Scheffler, 2013].

### 1.1.2 Aplicaciones del concentrador solar Scheffler

La principal utilización que se le da al concentrador Scheffler en los países en vías de desarrollo es para cocinar, ya que carecen de electricidad y combustibles. Ya que la leña es el principal insumo que se utiliza para cocinar, esta tecnología ayuda a la reducción de la deforestación. Para cocinar con este concentrador solar se lo coloca en el exterior de la casa, la cual tiene una entrada ubicada en la pared de la cocina, de manera que el foco se sitúa al interior de la casa.

De la misma manera, el reflector Scheffler es usado para la generación de vapor, proporcionando energía para una cocina de gran tamaño. Un gran ejemplo de esto es la construcción de la cocina solar más grande del mundo en la universidad Brahma Kumaris, en Rajastán, India (Figura 1.4), con la capacidad de alimentar a 18000 personas. Esta cocina utiliza 84 concentradores solares, utilizando 3500 kg de vapor al día, llegando a 650 grados.



**Figura 1.4:** Cocina solar en Rajasthan, India [Shceffler, 2013]

A.- Instalacion de cocina solar en un toecho. B.- Concentradores Scheffler en funcionamiento.  
C.- Cocina. D.- Ollas a vapor

De la misma manera, se utiliza en sistemas de esterilización a vapor de instrumentos médicos en hospitales rurales, almacenamiento de calor, crematorios, generación de electricidad.

### 1.1.3 Datos técnicos de un concentrador Scheffler de 8m<sup>2</sup>

A continuación se muestra una tabla (Tabla 1.1) con información relevante sobre un concentrados Scheffler de 8m<sup>2</sup> de superficie reflectante.

Temperatura máxima alcanzada en el foco	1020 °C
Rendimiento óptico máximo equipados con espejos de vidrio claro	84%
Rendimiento óptico máximo equipados con espejos vidrio normal	75%
Potencia de cocción media a lo largo del año con una radiación de 700W/m <sup>2</sup> y espejos de vidrio normal	2,2kW(1,7 kW en verano y 2,5 kW en invierno)
Costes de material para un reflector en la India	Aproximadamente 550 Euros

**Tabla 1.1:** Información de un concentrador Scheffler de 8m<sup>2</sup> [Scheffler, 2013]

## 1.2 Experiencias de tostado solar de cacao

Ya existen antecedentes de tostado de granos de cacao con energía solar. En esta sección se mostrarán dos ejemplos: en Estados Unidos y en México

### 1.2.1 En Estados Unidos

Un antecedente de tostado de granos de cacao con energía solar es por parte de la empresa French Broad Chocolates, ubicada en Asheville, Carolina del Norte. Esta empresa produce y vende productos a base de cacao a diversos lugares en Estados Unidos. Al dueño de la empresa, Dan Rattigan, le propusieron el reto de innovar en el procesamiento del cacao y él se inclinó por cambiar el proceso del tostado.

Hizo un reflector de forma de cilindro parabólico de madera cubierto con material reflectante, de manera que los rayos solares se enfocan en una línea. En esta línea focal se encuentra un tambor giratorio donde se encuentran los granos de cacao a tostar.

Este modelo de tostador, a pesar de ser diferente en la forma de la superficie reflectante, es igual de efectivo que el reflector Scheffler. Cuenta con un ventilador para remover el exceso de calor, calentador de agua para cuando no esté en uso, y un motor impulsado por un panel fotovoltaico para girar el reflector. En las figuras 1.5 y 1.6 se ve el modelo de tostador de cacao descrito con su inventor.



**Figura 1.5:** Dan Rattigan instalando su modelo de tostador



Figura 1.6: Dan Rattigan probando su modelo de tostador

### 1.2.2 En México

Otro ejemplo de tostado de cacao con energía solar es la empresa Chocosol, ubicada en Oaxaca, México. Ellos producen 260kg de chocolate solar orgánico cada año.

Utilizan un concentrador solar llamado “Fuego Solar”. Este modelo de concentrador fue desarrollado por un proyecto orientado a la “reducción radical de la contaminación”. Tiene una potencia de 3kW y puede llegar a una temperatura pico de 950 °C. En la figura 1.7 se puede apreciar al “Fuego Solar” en funcionamiento.



Figura 1.7: Concentrador “Fuego Solar” en funcionamiento [Francois Veynandt, 2012]

## 1.3 Cacao

### 1.3.1 Zonas cacaocaleras en el Perú

En el Perú existen zonas de cacao entre las cuales se pueden obtener diferentes variedades de cacao, ya que dependiendo del lugar, los factores climatológicos no son los mismos ofreciendo diversidad de granos de cacao. A continuación, en la Figura 1.8, se pueden ver las zonas con mayor área de cultivo y mayor número de productores dedicados a la cacaocultura. Siendo las zonas cacaocaleras incluidas las siguientes: Zona del Alto Marañón en los departamentos de Cajamarca y Amazonas, Huallaga Central en departamento de San Martín, los valles de los ríos Apurímac y Ene (VRAE), La Convención y Lares en el departamento de Cusco.



**Figura 1.8:** Zonas cacaocaleras en el Perú. [Ministerio de Agricultura, 2012]

### **1.3.2 Situación de las zonas cacaocaleras en el Perú**

Actualmente en el Perú ha aumentado el interés por cultivar el cacao ya que el precio está en aumento y la demanda del mercado internacional y nacional se encuentra insatisfecha. Los productores que se dedican a cultivar este producto con generalmente pequeños agricultores con chacras menores a dos hectáreas. En el país, toda la cadena de producción del cacao es apoyada por diferentes entidades privadas y públicas, sin embargo, el tratamiento pos cosecha del grano de cacao es deficiente, siendo uno de los principales problemas de dicha cadena. En esta situación predomina el bajo o nulo uso de insumos tecnológicos.

### **1.3.3 Calidad del grano de cacao**

Durante la producción de un buen grano de cacao, existen diversos factores que afectan la productividad y calidad del cacao. Aquí se toman en cuenta los factores climáticos, el suelo, genética, fisiología, etc.

Los factores ambientales más importantes para la buena producción de cacao son: el clima, temperatura (temperatura media anual de 24°C), precipitaciones (entre 1 500 y 2 500 mm anuales); suelo (pH oscila entre 4.0 y 6.5); altitud (entre los 300 y 800 msnm).

De la misma manera, la correcta intervención del productor cacaocalero aplicando la tecnología de cultivo y tratamiento pos cosecha, que ayuda a la preservación y realce de la calidad del grano de cacao.

### **1.3.4 Desde el cacao fruto a pasta de cacao**

Antes de hacerse una pasta lista para procesarla a chocolate, el cacao pasa por procesos necesarios, pudiéndose notar ocho principales:

- **Selección y limpieza:** Una vez que se ha cosechado las bayas de cacao, se procede a realizar la selección de las mejores bayas y de las que estén realmente maduras. Asimismo, se limpia las impurezas u otros elementos que son propios del proceso de cosecha del cacao.
- **Fermentación:** Una vez que se ha cosechado las bayas de cacao, se procede a realizar la selección de las mejores bayas y de las que estén realmente maduras. Asimismo, se limpia las impurezas u otros elementos que son propios del proceso de cosecha del cacao.
- **Lavado:** Seguidamente, se procederá a lavar las semillas fermentadas del proceso anterior, de manera que se desprenderá por completo la pulpa de la semilla de cacao.
- **Secado:** En este proceso las semillas deberán perder el exceso de humedad que poseen (reducirán hasta un 30% su peso), este secado se realizará al sol por un tiempo aproximado de 8 días.
- **Selección:** Posteriormente se procede a seleccionar las semillas obtenidas del secado, con el objetivo de eliminar las semillas rotas e impurezas que pudieran aparecer.
- **Tostado:** Después se procederá al tostado de las semillas obtenidas del proceso anterior. Este proceso es de los más importantes ya que de acuerdo a como se realice, se define el olor y sabor del producto final.
- **Descascarillado:** Al finalizar el tostado se procederá a la separación de la semilla y la cáscara que aún posee. Asimismo se procede a limpiar la semilla por completo.
- **Molido:** Todavía caliente, los granos de cacao son molidos, resultando finalmente la pasta de cacao, lista para poner en moldes y enfriar.

En la Figura 1.9 se puede apreciar un esquema de las etapas del proceso del cacao.



**Figura 1.9:** Esquema del proceso del cacao

## 1.4 Lista de exigencias

En la Tabla 1.2 se muestra una lista con las exigencias y deseos orientados para el presente diseño.

LISTA DE EXIGENCIAS		PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU	Pág. 1 de 1
Proyecto: Tostador solar de cacao		Facultado de Ciencias e Ingeniería	Fecha: 10/06/2014
		Ingeniería Mecánica	
		Área de Energía	Autor: Félix Escalante
Característica	Deseo o Exigencia	Descripción	Responsable
PRODUCTIVIDAD	E	El tostador deberá producir 50 kg de cacao tostado en un día.	F. Escalante
GEOMETRIA	E	El tostador podrá aceptar ollas de hasta 40 cm de diámetro y 30 cm de alto.	F. Escalante
FUNCION	E	Se tostará cacao previamente secado y fermentado.	F. Escalante
ENERGIA	E	El tostador utilizará energía solar para su funcionamiento de modo que no produzca emisiones al medio ambiente.	F. Escalante
FUNCION	E	Se usará principalmente en la localidad de Huyro, La Convención, Cusco.	F. Escalante
FUNCION	D	Podrá ser aplicable a otras zonas cacaoteras rurales en el Perú.	F. Escalante

SEGURIDAD	E	Será seguro para la persona que opere el tostador.	F. Escalante
FUNCION	D	El direccionamiento de los rayos solares podrá ser regulable.	F. Escalante
FABRICACION	E	Los materiales utilizados deberán resistir las altas temperaturas involucradas.	F. Escalante
FUERZA	E	La fuerza utilizada para revolver el cacao mientras se tuesta deberá ser la suficiente.	F. Escalante
COSTOS	D	El tostador deberá ser barato y simple de usar.	F. Escalante
FABRICACION	E	La máquina podrá ser fabricada en cualquier taller con materiales del medio local.	F. Escalante
FABRICACION	D	Las piezas y partes del tostador deberán ser de fácil fabricación.	F. Escalante
TRANSPORTE	D	Su traslado deberá ser de fácil traslado, por lo que pesará no más de 30 kg.	F. Escalante
SEÑALES	D	El tostador contará con señales indicando su uso correcto y previniendo cualquier riesgo posible	F. Escalante

**Tabla 1.2:** Lista de exigencias [Elaboración propia]

## CAPITULO 2

### DISEÑO DEL TOSTADOR

En el siguiente capítulo se muestra el diseño del tostador solar siguiendo la metodología de diseño aprendida en los cursos de proyecto mecánico, siendo esta la norma alemana VDI2225. Esta metodología incluye la elaboración de la estructura de funciones, matriz morfológica, evaluación técnico económica y finalmente la obtención del proyecto preliminar óptimo.

#### 2.1 Estructura de funciones

Siguiendo con la metodología del diseño según la norma VDI2225, se desarrollan las funciones básicas que debe tener el tostador a desarrollar. Estas funciones se relacionan permanentemente con parámetros de entrada y salida que varían el trabajo de la máquina. Este conjunto de funciones parciales permiten luego obtener diferentes soluciones para el problema propuesto.

A continuación, en la figura 2.1 se muestra la estructura de funciones al problema planteado.

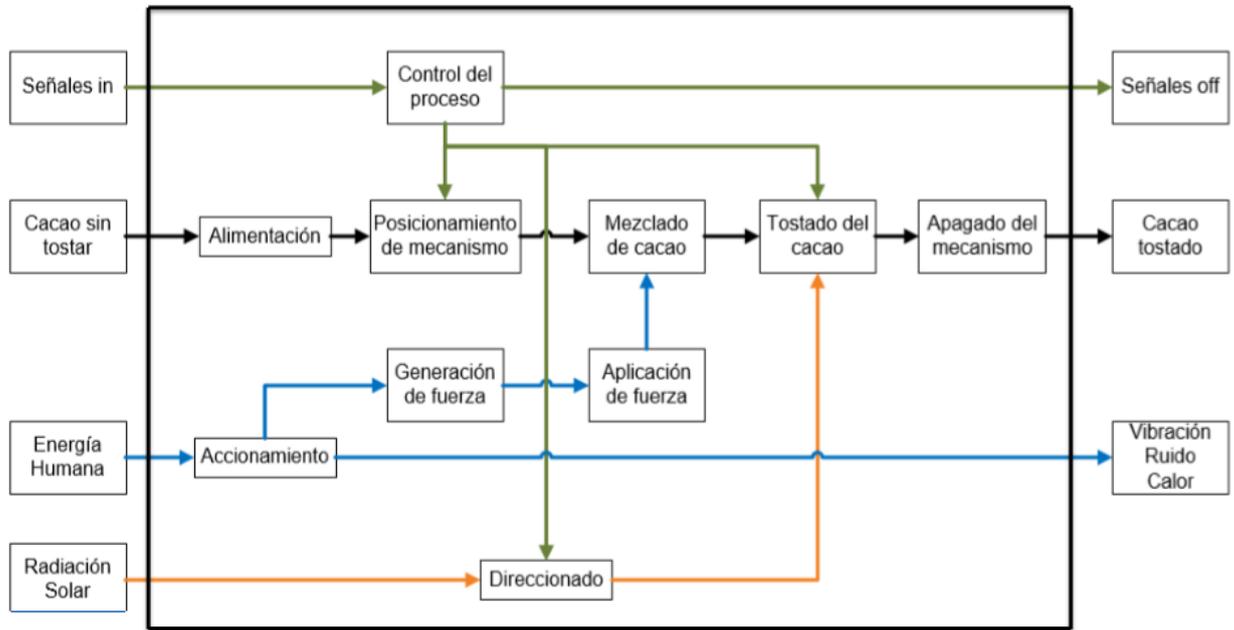


Figura 2.1: Estructura de funciones [Elaboración propia]

## 2.2 Matriz morfológica

Luego de realizar la estructura de funciones se procede a elaborar la matriz morfológica, donde se muestran tres posibles conceptos de soluciones para el tostador. La matriz se muestra en la figura 2.2.

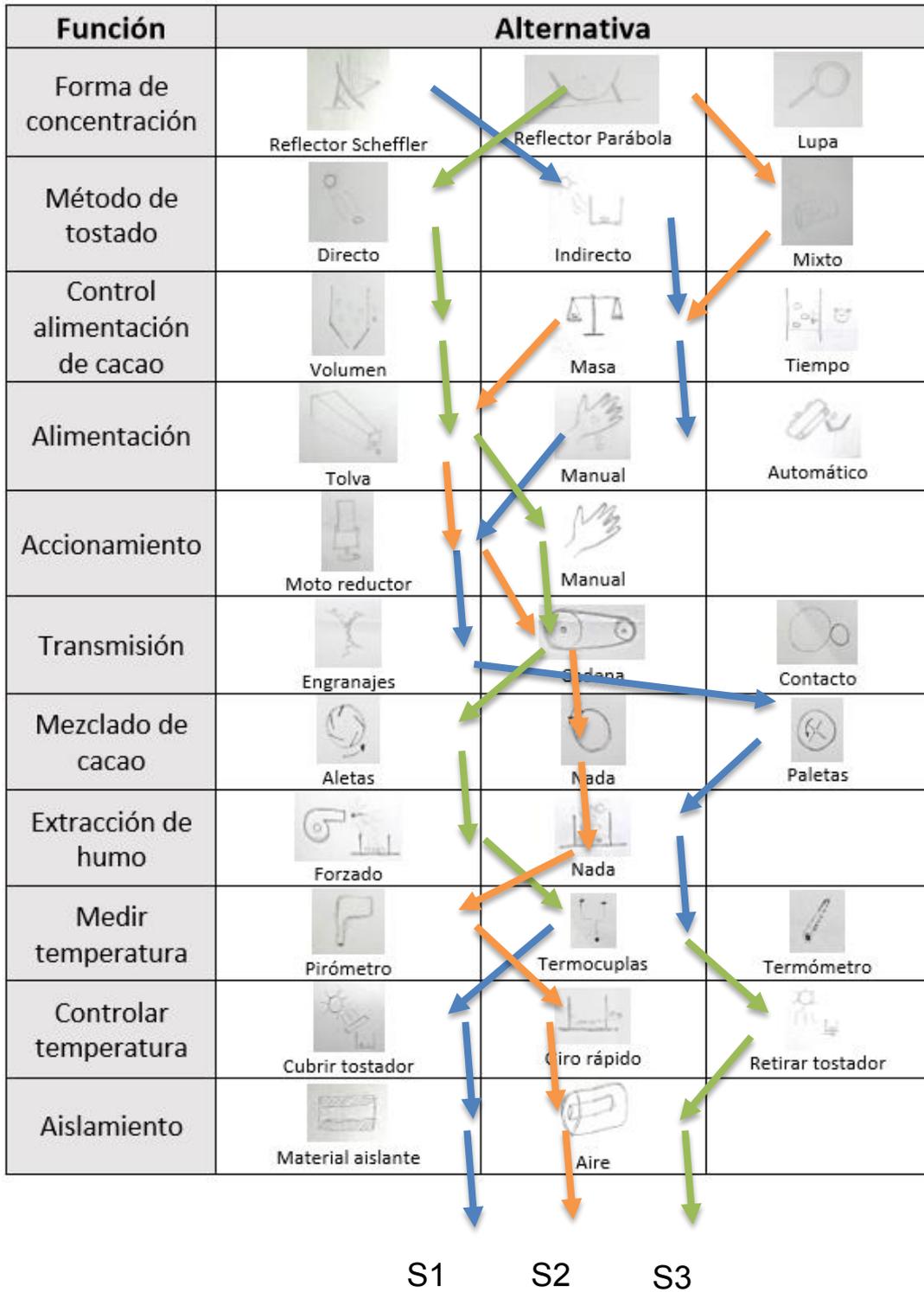


Figura 2.2: Matriz morfológica [Elaboración propia]

- Concepto de solución 1 
- Concepto de solución 2 
- Concepto de solución 3 

### 2.3 Evaluación técnico – económica

La evaluación técnica – económica se realiza siguiendo el método de evaluación de proyectos según VDI 2225. Esta evaluación se muestra en las tablas 2.1, 2.2 y figura 2.3.

DISEÑO MECANICO - EVALUACION DE PROYECTOS												
Valor técnico (xi)												
p: puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI 2225)												
0 = No satisface, 1 = Aceptable a las justas, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Muy bien (ideal)												
g : es el peso ponderado y se da en función de la importancia de los criterios de evaluación												
Criterios de evaluación para diseños en fase de conceptos o proyectos												
Variantes de Concepto / Proyecto			Solución 1			Solución 2			Solución 3		Sol. Ideal	
			S1			S2			S3		S ideal	
Nº	Criterios de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp		
1	Función	8	3	24	3	24	2	16	4	32		
2	Geometría	6	3	18	2	12	2	12	4	24		
3	Eficiencia de tostado	10	3	30	3	30	3	30	4	40		
4	Ergonomía	7	3	21	3	21	2	14	4	28		
5	Rapidez	8	3	24	3	24	3	24	4	32		
6	Fabricación	8	2	16	3	24	2	16	4	32		
7	Montaje	7	2	14	2	14	2	14	4	28		
8	Mantenimiento	8	3	24	2	16	2	16	4	32		
9	Transportabilidad	6	3	18	2	12	2	12	4	24		
10	Seguridad	8	3	24	3	24	2	16	4	32		
11	Estabilidad	7	3	21	2	14	3	21	4	28		
12	Facilidad de manejo	6	3	18	2	12	2	12	4	24		
13	Complejidad	6	3	18	2	12	2	12	4	24		
Puntaje máximo Σgp			270			239			215		380	
Valor técnico xi			0.71			0.63			0.57		1	
$x_i := \frac{g_1 \cdot p_1 + g_2 \cdot p_2 + \dots + g_n \cdot p_n}{(g_1 + g_2 + \dots + g_n) \cdot P_{max}} \leq 1$												

Tabla 2.1: Valoración técnica [Elaboración propia]

DISEÑO MECANICO - EVALUACION DE PROYECTOS											
Valor económico (yi)											
p: puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI 2225)											
0 = No satisface, 1 = Aceptable a las justas, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Muy bien (ideal)											
g : es el peso ponderado y se da en función de la importancia de los criterios de evaluación											
Criterios de evaluación para diseños en fase de conceptos o proyectos											
Variantes de Concepto / Proyecto				Solución 1		Solución 2		Solución 3		Sol. Ideal	
				S1		S2		S3		S ideal	
Nº	Criterios de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp	
1	Número de piezas	6	2	12	2	12	1	6	4	24	
2	Costos de materiales	9	3	27	2	18	2	18	4	36	
3	Fácil adquisición materiales	8	3	24	3	24	3	24	4	32	
4	Facilidad de montaje	6	3	18	2	12	2	12	4	24	
5	Facilidad de mantenimiento	6	3	18	3	18	3	18	4	24	
Puntaje máximo $\Sigma gp$				99		84		78		140	
Valor económico yi				0.71		0.60		0.56		1.00	
$y_i := \frac{g_1 \cdot p_1 + g_2 \cdot p_2 + \dots + g_n \cdot p_n}{(g_1 + g_2 + \dots + g_n) \cdot p_{max}} \leq 1$											

Tabla 2.2: Valoración económica [Elaboración propia]

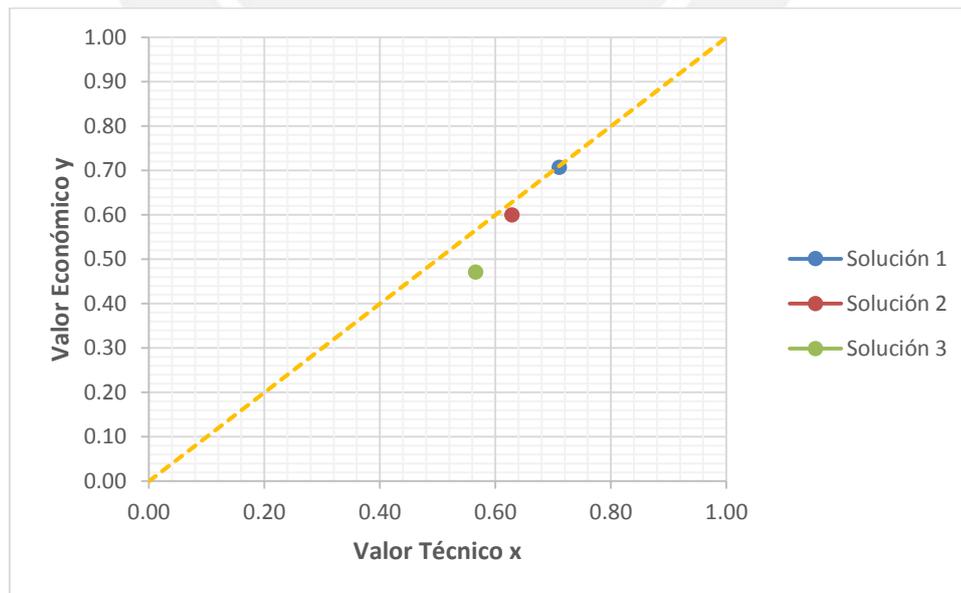
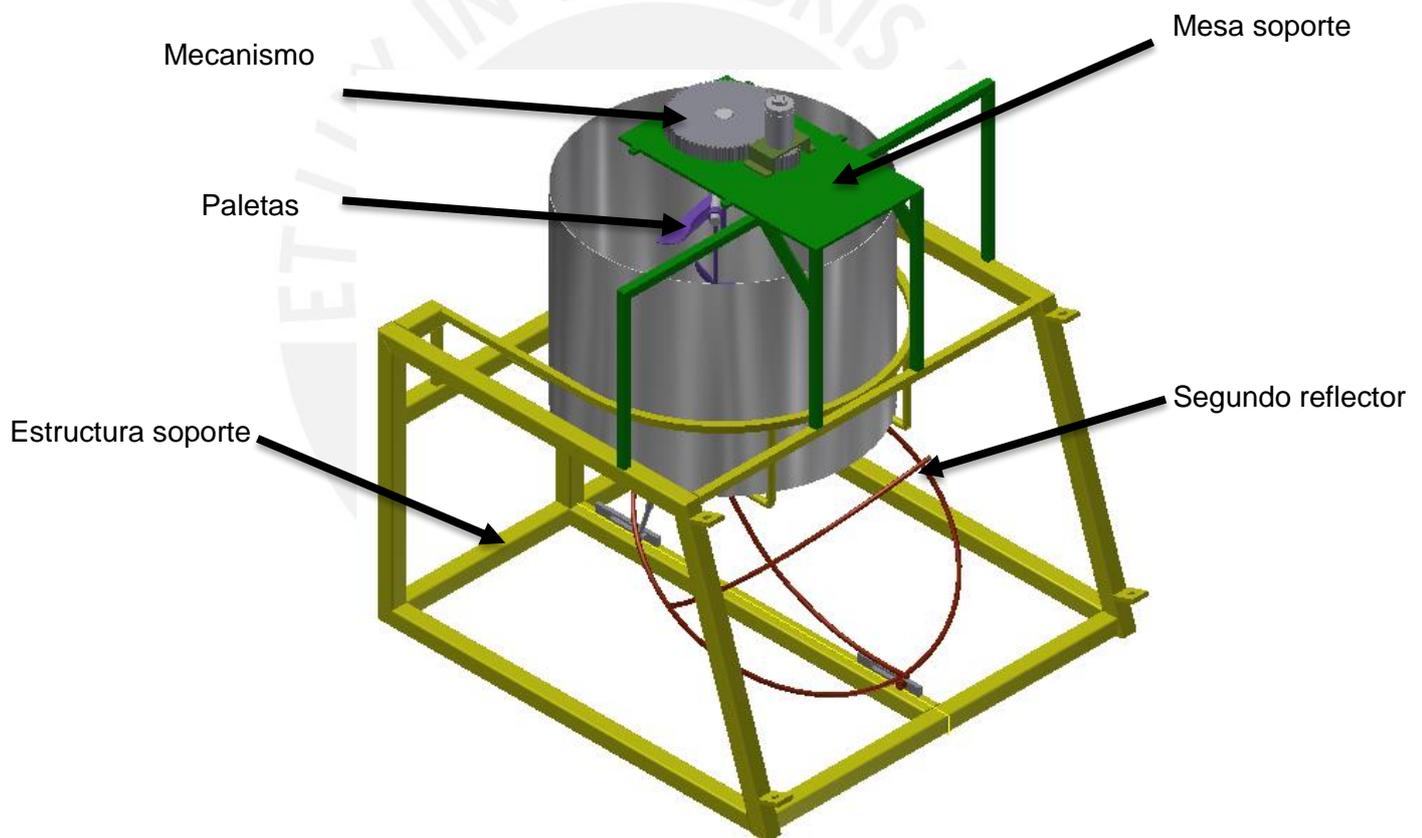


Figura 2.3: Diagrama de evaluación técnico – económico según VDI 2225 [Elaboración propia]

Analizando técnica y económicamente, se puede deducir que la solución óptima para el proyecto es la número 1 (0.71, 0.71), ya que se encuentra lo más cerca a la recta y al punto (1,1).

## 2.4 Proyecto preliminar óptimo

La figura 2.4 muestra el modelo de proyecto preliminar óptimo



**Figura 2.4:** Proyecto preliminar óptimo [Elaboración propia]

## 2.5 Descripción del funcionamiento de la solución óptima

El tostador tendrá dos fuentes de energía para realizar dos procesos distintos pero complementarios. La energía proporcionada por el reflector Scheffler se refleja en el segundo reflector del tostador, reflejándolo hacia arriba, apuntando a la parte inferior de la olla. El calor se transfiere por la base de la olla hasta los granos de cacao, elevando su temperatura.

La otra fuente de energía es eléctrica, recibida por el motor del mecanismo. El mecanismo está conectado a un eje que mueve las paletas mezcladoras del cacao, trasladándolo de extremo a extremo y de arriba debajo de la olla, haciendo que los granos se tuesten de manera uniforme.

El mecanismo se conforma por un motor DC, ya que puede ser alimentado por una batería, y un par de engranajes. Está apoyado y soportado sobre una mesa acoplada a la estructura por medio de bisagras, de manera que pueda rotar en torno a las patas traseras y se pueda colocar y sacar la olla, similar al movimiento que hace una batidora de mesa.

El método de alimentación será manual, luego del precalentamiento, y con el mecanismo todavía apagado. Una vez que todo el cacao a tostar se encuentra dentro de la olla el mecanismo se enciende iniciando el mezclado.

Una vez terminado el tostado, se redirige el reflector Scheffler para que apunte a otro lado y se retira la olla levantando la mesa soporte.

## 2.6 Análisis Energético

A continuación se mostrarán todos los cálculos necesarios para analizar el comportamiento energético del tostador solar, desde la medición de la potencia de entrada, otorgada por el sol, hasta el análisis de las pérdidas de calor.

### 2.6.1 Comportamiento térmico del tostador

En la Figura 2.5 se puede apreciar un esquema básico de la manera en que el tostado se llevará a cabo de acuerdo a lo descrito en el acápite 2.5. Para este caso, la potencia de entrada ( $P_{ent}$ ) rebota en el segundo reflector produciendo pérdidas ( $P_{reb}$ ), permitiendo que la olla absorba una parte de esta energía ( $P_{abs}$ ).

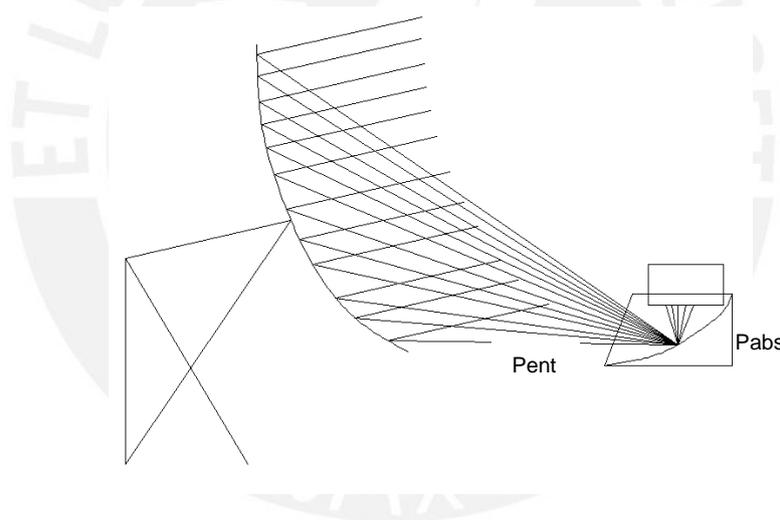


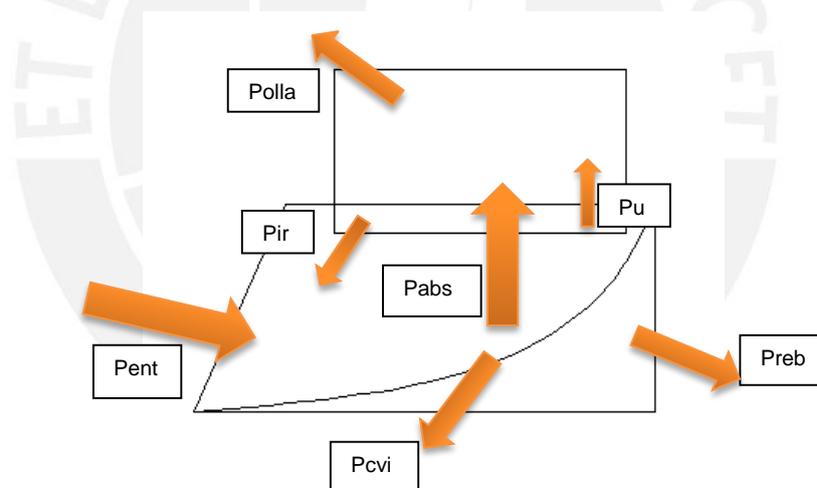
Figura 2.5: Esquema de tostado [Elaboración propia]

#### 2.6.1.1 Flujo energético

En la Figura 2.6 se esquematiza como la potencia de entrada ( $P_{ent}$ ) es descompuesta en las diferentes formas de pérdidas hasta llegar a los granos de cacao, mostrando al tostador con la olla como un solo conjunto, descritas de la siguiente manera:

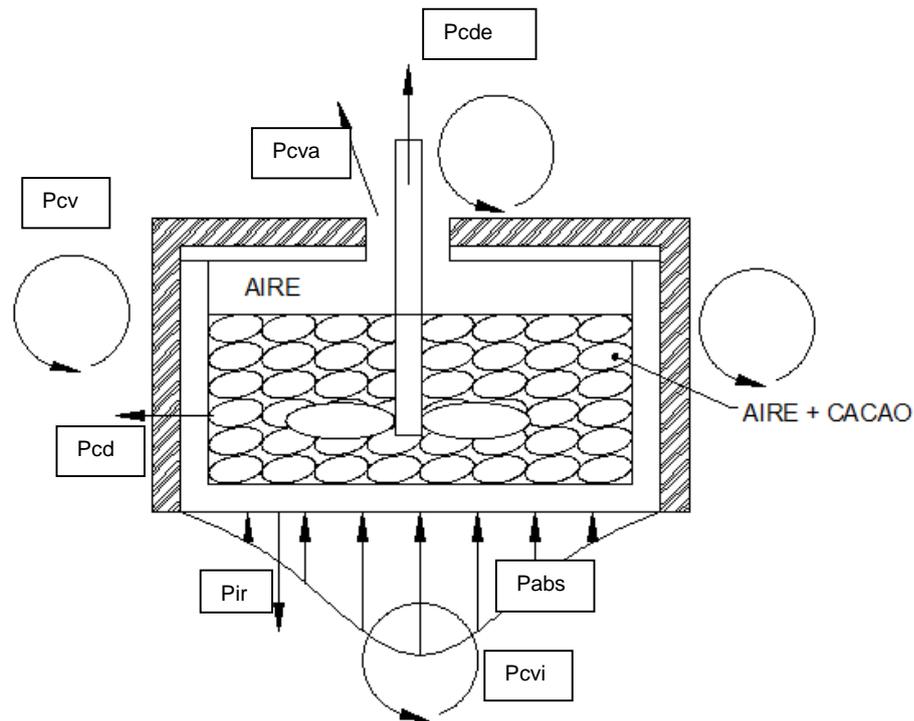
- Pérdidas:
  - Absorción de la energía por el segundo reflector ( $P_{reb}$ )

- Conducción y convección a través de todo lo relativo la olla y el ambiente ( $P_{olla}$ )
- Pérdidas por convección en el espacio que existe entre la parte inferior de la olla y el segundo reflector ( $P_{cvi}$ )
- Pérdidas por radiación debido al aumento considerable de temperatura de la parte inferior de la olla ( $P_{ir}$ )
- Potencia absorbida: Potencia que absorbe la olla de los rayos solares luego de rebotar en el segundo reflector ( $P_{abs}$ )
- Potencia útil: Potencia que finalmente llega al cacao para tostarlo, luego de atravesar todas las pérdidas de calor ( $P_u$ )



**Figura 2.6:** Flujo energético [Elaboración propia]

En la Figura 2.7 se detalla el balance energético solamente de la olla de manera que se pueda apreciar mejor las entradas y salidas de energía en el tostador. Aquí se toma en cuenta todas las formas en que se transfiere el calor para que luego se puedan calcular todas las resistencias térmicas.



**Figura 2.7:** Análisis energético de la olla con los granos de cacao [Elaboración propia]

Las ecuaciones de balance energético son las siguientes:

$$P_{ent} = P_{abs} + P_{reb} + P_{cvi} \quad (2.1)$$

$$P_{abs} = P_u + P_{olla} + P_{ir} \quad (2.2)$$

$$P_{olla} = P_{cd} + P_{cv} + P_{cva} + P_{cde} \quad (2.3)$$

Donde:

- $P_{cd}$ : Pérdidas por conducción a través de las paredes de la olla y el aislante
- $P_{cv}$ : Pérdidas por convección entre las paredes del aislante y el ambiente
- $P_{cva}$ : Pérdidas por convección a través de la apertura de la olla
- $P_{cde}$ : Pérdidas por conducción y convección a través del árbol de transmisión

### 2.6.1.2 Flujo másico

De la misma manera, se evalúa el flujo másico durante el tostado ( $m_{in}$ ), ya que la masa de cacao crudo seco al ingresar no es la misma del cacao tostado al salir. La diferencia de masas es vapor de agua ( $m_v$ ), proveniente del agua que no se secó en el proceso de secado. En la Figura 2.8 se aprecia un esquema del flujo de masa, especificando como volumen de control solamente a la olla con el cacao.

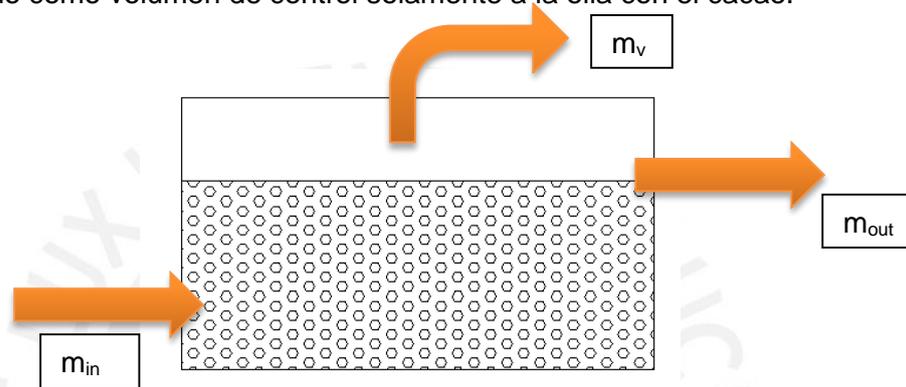


Figura 2.8: Flujo másico [Elaboración propia]

Donde:

$$m_{in} = m_{out} - m_v \quad (2.4)$$

- $m_{in}$ : masa de ingreso (kg)
- $m_{out}$ : masa de salida (kg)
- $m_v$ : masa de vapor (kg)

### 2.6.2 Cálculo de potencia solar

El sol es una fuente inagotable de energía y tiene que ser aprovechada. En este caso se utilizará para tostar los granos de cacao. La energía se calcula a partir de la irradiación solar, y esta depende de la ubicación en la Tierra y todos los parámetros que esto conlleva. Para este caso, se analizará para la localidad de Huyro, provincia de La Convención, departamento del Cusco.

### 2.6.2.1 El Sol en Cusco

La energía se puede obtener de mapas de irradiación proporcionados por el servicio nacional de meteorología e hidrología (SENAMHI). En la Figura 2.9 se muestra un mapa del departamento del Cusco para el mes de noviembre.

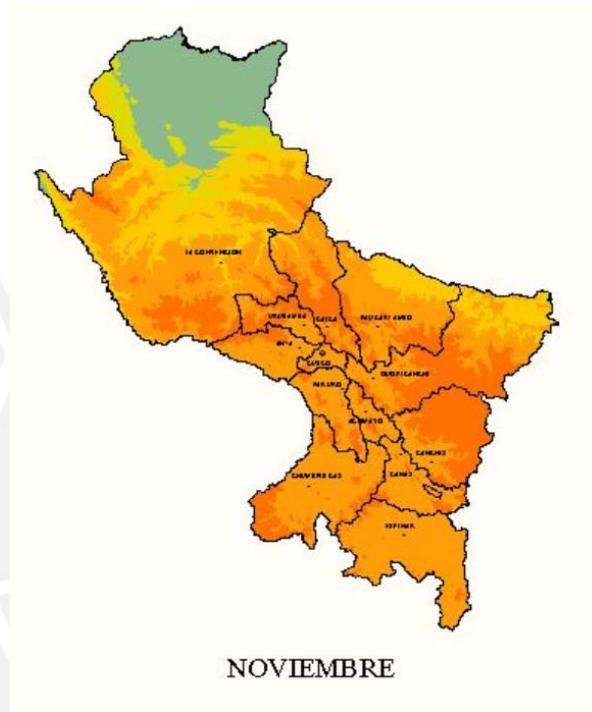


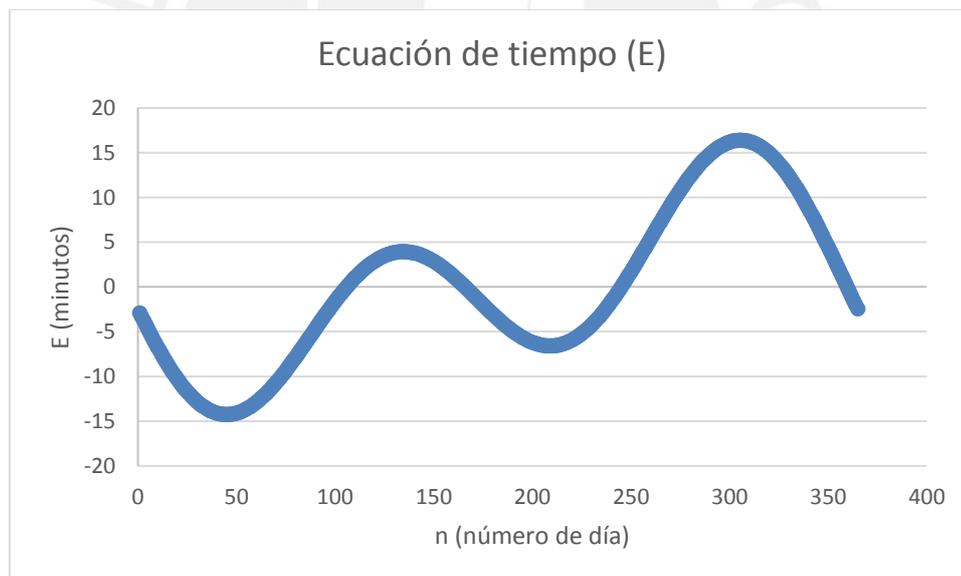
Figura 2.9: Mapa solar de Cusco [Elaboración propia]

### 2.6.2.2 Hora Solar

La irradiación solar depende de la hora solar, siendo esta diferente a la hora estándar que las personas utilizan como referencia, mostrada en los relojes convencionales. La hora solar se basa en el movimiento relativo del sol sobre el horizonte en el lugar establecido. Esta hora puede ser medida por un reloj solar, asimismo como calculada.

Para los cálculos es necesario convertir la hora estándar a la hora solar aplicando dos correcciones:

- **Corrección por longitud**, esta corrección es constante ya que es por la diferencia entre la longitud sobre el meridiano donde se encuentra el observador (en este caso el concentrador solar), y la longitud sobre el meridiano donde está basada la hora estándar.
- **Ecuación del tiempo (E)**, que toma en cuenta las perturbaciones en la rotación de la Tierra. Esto quiere decir que debido a la forma elíptica de la órbita en relación al Sol, la duración los días a los largo del año son diferentes. Por términos prácticos, se asume que el sol demora el mismo tiempo durante todo el año. Esta diferencia de tiempos da como resultado la ecuación de tiempo. La grafica de la ecuación del tiempo se puede ver en la Figura 2.10:



**Figura 2.10:** Ecuación de tiempo E en minutos en función de día del año [Elaboración propia]

Responde a la siguiente ecuación:

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \times \sin 2B) \quad (2.5)$$

Donde:

$$B = (n - 1) \times \frac{360}{365}$$

n: número de día del año ( $1 \leq n \leq 365$ )

Para calcular el tiempo solar real se utiliza la siguiente fórmula:

$$HS = \text{Hora estándar} + (4 \times (L_{st} - L_{loc}) + E)/60 \quad (2.6)$$

Donde:

- HS: Hora solar (horas)
- $L_{st}$ : Meridiano estándar de la zona horaria local.
- $L_{loc}$ : Longitud del lugar en cuestión

Así, por ejemplo, el 22 de setiembre a las 11am la hora solar en Huyro (Latitud  $13.00^\circ$  Sur, Longitud  $72.56^\circ$  Oeste) será:

$$HS = 11 + 4 \times (75 - 72.56) + 7.27 = 11.28h$$

Esto quiere decir que cuando en el reloj son las 11 de la mañana, la hora solar es 11.28, que en horas y minutos es 11:17am. Si una persona se desplaza un grado al oeste o al este, la hora sería diferente.

### 2.6.2.3 Parámetros y ángulos relativos al Sol

Lo más importante para este análisis son los rayos solares, ya que estos son los que se van a concentrar en un punto focal aumentando la temperatura. La dirección de los rayos depende de la posición relativa del sol respecto al plano donde se encuentra el concentrador. Esta posición se puede describir en términos de diferentes ángulos:

- Latitud ( $\phi$ ): Ubicación angular al norte o al sur del ecuador.  $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ . Para el caso de Huyo, como ya se mostró anteriormente, la latitud es de  $13^\circ$ .
- Declinación ( $\delta$ ): Es el ángulo que representa la posición angular del sol al medio día con respecto al plano del ecuador.  $-23.45^\circ \leq \delta \leq 25.45^\circ$ . Este ángulo es el que determina las estaciones a lo largo del año. La declinación se calcula aproximadamente con la siguiente ecuación:

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left[ \left( \frac{(284 + j)}{365} \right) \times 360 \right] \quad (2.7)$$

Donde

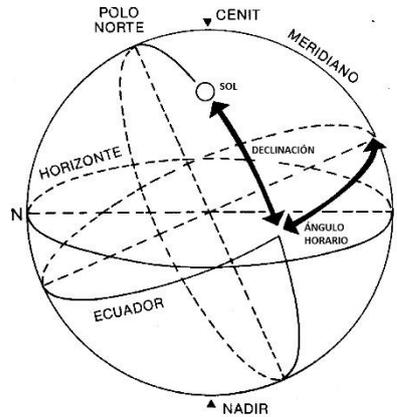
- $\delta$ : Declinación solar. ( $^\circ$ )
  - $j$ : Número de día en el año.
- Ángulo horario ( $\omega$ ): Es el ángulo que representa el desplazamiento angular del sol de este a oeste debido a la rotación de la Tierra en su eje. Este desplazamiento es de  $1^\circ$  cada 4 minutos, y puede representarse con la siguiente ecuación:

$$\omega = 15 \times (HS - 12) \quad (2.8)$$

Donde

- $\omega$ : ángulo horario ( $^\circ$ )

En la Figura 2.11 se ve un gráfico representando la declinación y ángulo horario.

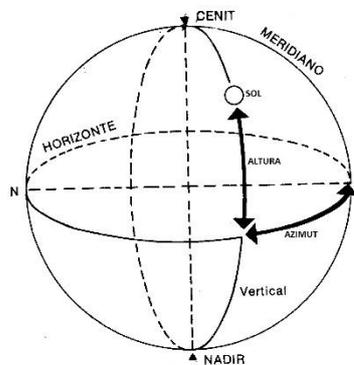


**Figura 2.11:** Gráfico declinación y ángulo horario

- Azimut ( $\gamma$ ): Ángulo que representa el desplazamiento por el sur de la proyección de la radiación directa en el plano horizontal. Los desplazamientos al este son negativos y al oeste son positivos. De la misma manera, el plano donde caen los rayos también tiene su ángulo azimut ( $\gamma_s$ )
- Altura solar ( $\alpha$ ): Es el ángulo entre el plano horizontal y la línea que apunta hacia el Sol. Este ángulo se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\sin \alpha = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (2.9)$$

En la Figura 2.12 se ve un gráfico representando la altura y el azimuth.



**Figura 2.12:** Gráfico altura y azimuth

- Inclinación ( $\beta$ ): Es el ángulo entre el plano de la superficie en cuestión y el plano horizontal. Para este caso, como el eje del paraboloide del concentrador Scheffler siempre está apuntando al Sol, este ángulo es el complemento de la altura solar. Por lo tanto:

$$\alpha + \beta = 90^\circ \quad (2.10)$$

- Zenit ( $\theta_z$ ): Es el ángulo entre la línea vertical y la línea imaginaria que apunta en dirección al Sol.

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (2.11)$$

- Ángulo de incidencia ( $\theta$ ): Ángulo entre el rayo de incidencia sobre la superficie y la normal de la misma superficie. Este ángulo está relacionado específicamente con los rayos directos. Para calcular el ángulo de incidencia se utiliza la siguiente ecuación:

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (2.12)$$

En la Figura 2.13 se muestra un gráfico representando la inclinación, ángulo de incidencia y zenit.

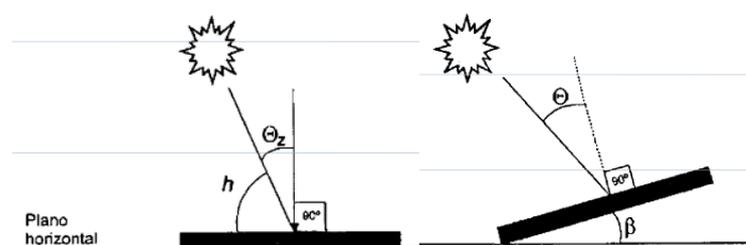


Figura 2.13 Gráfico inclinación y ángulo de incidencia

Nótese que si el valor de la inclinación es cero, el zenit y el ángulo de incidencia son iguales.

Entre todos los parámetros descritos, el más importante es el zenit, ya que con este se puede calcular la potencia que proporciona el Sol debido a su radiación.

#### 2.6.2.4 Cálculo de potencia

La irradiancia del Sol en su superficie es de  $6.33 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ , pero esta radiación se va disipando a lo largo de todo el espacio en su recorrido hacia la Tierra. En la superficie de la atmósfera, la irradiancia solar ( $I_{rrs}$ ) es, en promedio, de  $1367 \text{ W/m}^2$ . A partir de esto, la irradiancia se disipa aún más por efectos del ozono, moléculas del aire, vapor de agua, polvo, etc. (Figura 2.14). Finalmente, la irradiancia que llega a la superficie de la Tierra se puede representar analíticamente con la siguiente ecuación:

$$I_{rrd} = I_{rrs} \times \tau \quad (2.13)$$

Donde,

$$\tau = a + b \times \exp\left(\frac{-k}{\cos\theta_z}\right)$$

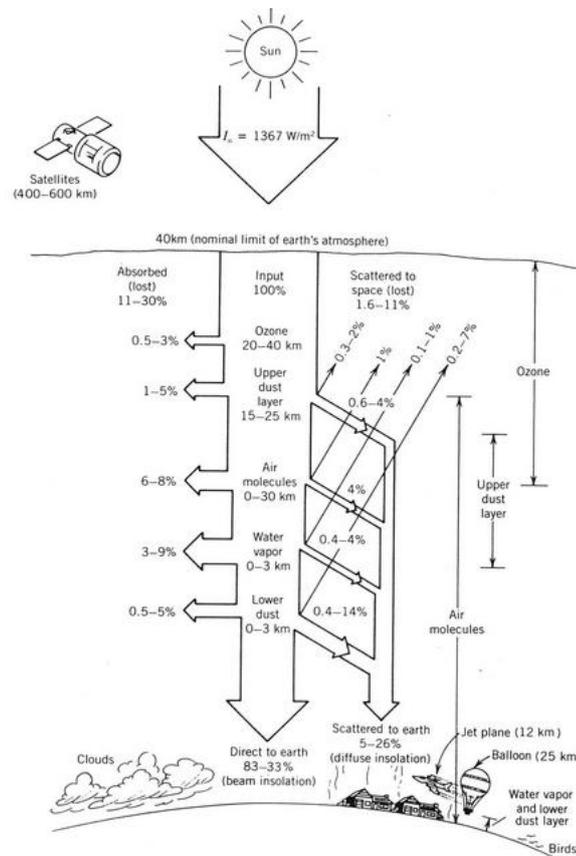
$$a = 0.4237 - 0.00821 \times (6 - A)^2$$

$$b = 0.5055 - 0.00595 \times (6.5 - A)^2$$

$$k = 0.2711 - 0.01858 \times (2.5 - A)^2$$

A: Altura sobre el nivel del mar en kilómetros

Esta radiación directa ( $I_{rrd}$ ) es la que se usará en los siguientes cálculos de potencia sobre el Scheffler y el tostador de granos de cacao.



**Figura 2.14:** Disipación de la radiación antes de la superficie terrestre [powerfromthesun.net]

En la Tabla 2.3 se muestran la irradiación solar sobre la superficie de Huyo, de algunos días del año a las doce del mediodía calculadas con las fórmulas descritas anteriormente.

Día	# Día	Irradiancia
20/01/2014	20	853.86
21/03/2014	80	848.27
21/05/2014	141	841.71
21/07/2014	202	840.98
21/09/2014	264	848.56

**Tabla 2.3:** Irradiancia en algunos días del año en Huyo [Elaboración propia]

Adicionalmente a esto, existen dos tipos más de radiación: global (Irrg) e indirecta (Irri).

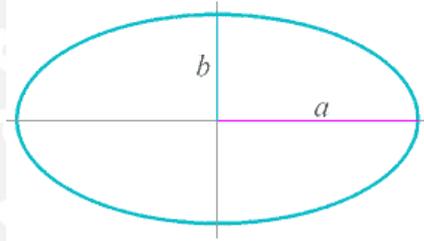
La irradiancia global se mide con un panel solar calibrado, dando este un valor en mV. Este valor se multiplica por un factor de conversión dado por el fabricante (15.038) dando como resultado la irradiancia global en unidades W/m<sup>2</sup>.

La irradiación indirecta se calcula restando la radiación global menos la radiación directa, calculadas previamente.

$$Irrd = Irrg - Irri \quad (2.14)$$

### 2.6.3 Cálculos de potencia del concentrador

Para poder calcular la potencia que entrega el concentrador, se empieza calculando el área útil que aprovecha. Al reflector se le aproxima a una elipse para poder calcular el área. En la Tabla 2.4 se aprecia el cálculo del área útil del reflector.



Dimensiones de la superficie del concentrador		Unidad
A	1.88	m
b	1.37	m
Área teórica ( Pi * a * b )	8.09	m <sup>2</sup>
Perdidas por construcción (huecos, hilo metálicos...)	20%	
<b>Área útil (área teórica * pérdidas)</b>	<b>6.47</b>	<b>m<sup>2</sup></b>

Tabla 2.4: Dimensiones de la superficie del concentrador [Elaboración propia]

Se eligió un 20% por pérdidas ya que el reflector Scheffler que se dispone también es un prototipo, por lo que tiene fallas y su concentración no es perfecta.

Para los cálculos de potencia, esta área no es la que se usa, sino la proyección sobre un plano paralelo a la superficie terrestre. Para hallar el área de esta proyección, al área útil se le multiplica por un factor de apertura, el cual es dependiente de la declinación solar y del hemisferio en el que se encuentra. Con las fórmulas mostradas en la Tabla 2.5 se puede calcular el factor de apertura.

<b>Hemisferio Norte</b>	$Factor\ de\ apertura = \cos\left(43.23^\circ + \frac{\delta}{2}\right)$
<b>Hemisferio Sur</b>	$Factor\ de\ apertura = \cos\left(43.23^\circ - \frac{\delta}{2}\right)$

Tabla 2.5: Factor de apertura [U. Oelher, 1994]

Con estas fórmulas se puede calcular la apertura de la proyección del reflector para cada día del año, para así calcular exactamente la potencia útil proporcionada por el reflector. En la Tabla 2.6 se muestra la apertura útil para diferentes días del año.

	21-ene	21-mar	21-may	21-jul	21-sep
Día del año	21	80	141	202	264
Declinación solar	-20.14	-0.40	20.14	20.44	-0.20
Factor de apertura	0.60	0.73	0.84	0.84	0.73
Apertura teórica	4.84	5.88	6.77	6.79	5.89
<b>Apertura útil</b>	<b>4.59</b>	<b>5.58</b>	<b>6.43</b>	<b>6.45</b>	<b>5.59</b>

Tabla 2.6: Apertura útil para diferentes días del año [Elaboración propia]

Teniendo la apertura útil, la potencia teórica se calcula multiplicándola por la irradiancia directa ( $I_{rrd}$ ).

$$P_{ent} = A_{p\acute{u}til} \times I_{rrd} \tag{2.15}$$

Donde

- $P_{ent}$ : Potencia entregada. (W)
- $A_{p\acute{u}til}$ : Apertura útil. ( $m^2$ )
- $I_{rrd}$ : Irradiancia directa ( $W/m^2$ )

Para los cálculos de tostado que se mostrarán más adelante se tomará esta potencia como potencia de entrada.

#### 2.6.4 Parámetros considerados

##### 2.6.4.1 Geometría

- **Estructura:** las dimensiones de la estructura son tales que el foco del concentrador Scheffler encaje y rebote sin que los rayos choquen o reflejen en otras partes. De la misma manera, tiene un espacio adecuado para que la olla calce correctamente y no se desplace mientras el mecanismo esté en pleno funcionamiento.
- **Segundo reflector:** se considera un segundo reflector de la forma de un cilindro cortado ya que tiene la propiedad de que la fuente de luz incidente rebota de forma perpendicular, recayendo en la parte inferior de la olla. Se tiene que tener en cuenta que el ángulo de incidencia tiene que ser perpendicular a la base del cilindro cortado. Esta explicación se puede apreciar mejor en la Figura 2.15.

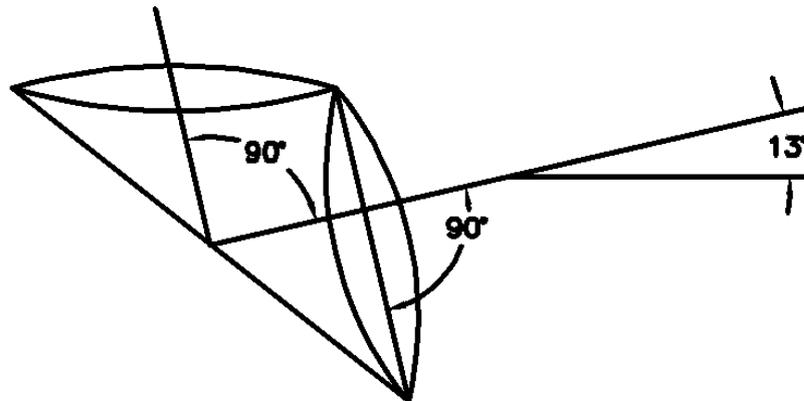


Figura 2.15: Los rayos, para este uso, se reflejan mejor en un cilindro cortado [J. Miñano, 2014]

- **Olla:** para esta tesis, se utiliza una olla comercial de 40 litros de volumen con dimensiones aproximadas: alto ( $H_o$ ): 30cm, diámetro ( $D_o$ ): 40cm. También es posible utilizar ollas de dimensiones menores de no disponer de una como la descrita anteriormente.
- **Apertura:** A la olla, de manera que se minimicen las pérdidas de calor por convección, se le colocará una tapa con un agujero en medio, por donde pasará el eje de transmisión y por donde escapará el vapor producto de la deshumidificación de los granos de cacao. El área de la apertura ( $S_a$ ) para la olla utilizada en el presente trabajo se calcula de la siguiente manera (Figura 2.16):

$$S_a = \frac{\pi}{4} \times D_a^2 \quad (2.16)$$

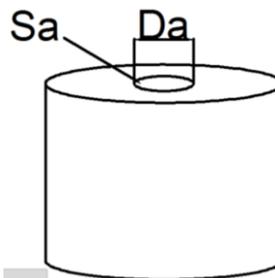


Figura 2.16: Esquema de apertura [Elaboración propia]

- **Mesa Soporte:** La mesa soporte tendrá las siguientes dimensiones: largo: 32cm, ancho: 18cm. Estas dimensiones se eligieron de manera que el mecanismo entre correctamente, sin estorbar nada, y pueda acoplarse una

tapa protectora. Las patas de la mesa tendrán un largo de 35cm para que así la olla pueda entrar sin chocar con el eje ni las paletas.

#### 2.6.4.2 Propiedades

- **Segundo reflector:** La superficie del segundo reflector tiene que ser lo más reflectante posible para que las pérdidas generadas sean lo mínimo que se pueda. Para esto se analizan distintos materiales reflectantes. Entre las alternativas de materiales se encuentran: Acero inoxidable reflectivo, aluminio anodizado, cristal, óxido de aluminio.

En la Tabla 2.7 se muestran los posibles materiales a usar en el segundo reflector con sus propiedades relevantes para su utilización, que son: Reflectividad solar y emisividad infrarroja.

Material	Reflectividad solar $\rho$	Emisividad infrarroja $\varepsilon$
Acero inoxidable reflectivo	0.6	0.08
Aluminio anodizado	0.9	0.85
Óxido de aluminio	0.8	0.2

Tabla 2.7: Propiedades de los posibles materiales para el segundo reflector

- **Olla:** La olla es de aluminio con una conductividad térmica es de 209.3 W/m.K, y es lo suficientemente resistente para la cantidad de cacao a tostar. La parte inferior externa de la olla se pinta de negro con una pintura resistente a altas temperaturas de manera que su emisividad aumente de 0.3 a 0.95 aproximadamente. La pared de la olla tiene un espesor de 1mm ( $e_0$ ), pero para evitar pérdidas por conducción muy altas se forrará alrededor con un aislante. Este aislante será de fibra de vidrio con un coeficiente de conducción de 0.05 W/m.K y su espesor se calculará más adelante.

## 2.6.5 Análisis óptico

### 2.6.5.1 Consideraciones previas

Para analizar el comportamiento de los rayos solares en el sistema de tostado de granos de cacao se utiliza el software *SolTrace*, el cual simula el trazado de los rayos en un determinado espacio y tiempo. Es desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL), EE.UU. (2012). Este programa entrega mapas de flujo y potencia absorbida por las diferentes geometrías ópticas, especialmente ligadas a la concentración solar.

En el software se construye un modelo de la geometría de reflector Scheffler a escala, de sección rectangular. Tabla 2.8 muestra los parámetros de la sección de la parábola a considerar, de manera que la forma y los rayos incidentes en el modelo son similares en la realidad. Asimismo, se representa la forma geométrica que se utiliza como segundo reflector, que es un tronco de cilindro cortado por un plano inclinado, ya que esta es la mejor forma geométrica para hacer rebotar el foco del reflector hacia la base inferior de la olla [Miñano, 2014]. Las propiedades ópticas de los materiales están descritas en la Tabla 2.7. De la misma manera, la base exterior de la olla con los granos de cacao se representa con un plano donde se simulará la recepción de los rayos solares.

Se considera que el sol se encuentra en su posición de equinoccio a mediodía, que quiere decir que el ángulo desde la vertical con la superficie de la tierra es igual a la latitud donde se encuentra el reflector. La forma es gaussiana (campana de Gauss, función estadística) con parámetro 2.730 mrd. Se asumirá que los espejos del reflector tienen una reflectividad 0.8 considerando que están sucios, cubiertos con un poco de polvo. También se tienen dos tipos de errores:

- Error de pendiente (Slope error): 10 mrad

- Error de especularidad (Specularity error): 15 mrad

Estos errores se refieren a que los rayos solares no siempre son paralelos unos de otros. Estos valores de error se asumen para que los resultados sean lo más parecidos a la realidad.

Ecuación de la parábola:		
$Z_{(x,y)} = \frac{1}{2}(cx^2 + cy^2)$		
Distancia del foco "f" (m)		0.5
Parámetro $c=1/2f$ ( $m^{-1}$ )		0.625
Sección cuadrangular de la parábola:		
	x (m)	y (m)
Punto 1	0.59	2.25
Punto 2	-0.59	2.25
Punto 3	-0.59	0.66
Punto 4	0.59	0.66

Tabla 2.8: Parámetros de simulación para el reflector Scheffler [Elaboración propia]

Con todo esto, se ingresan los datos al programa *SolTrace* de modo que el foco y el recorrido de los rayos es parecido a la realidad. Se realiza la simulación, como se muestra en la figura Figura 2.17. Cada simulación se realiza con un millón de rayos.

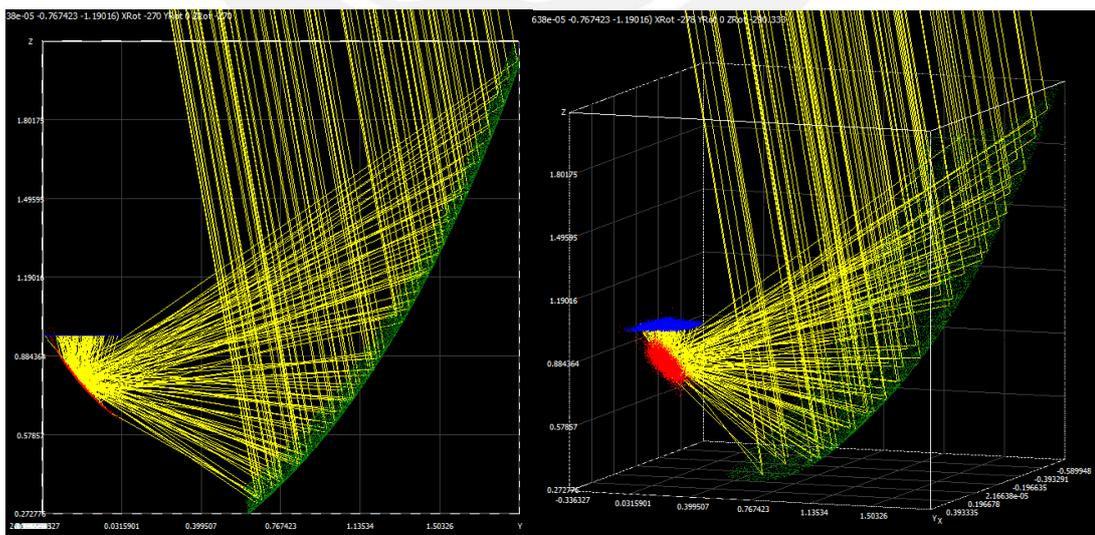


Figura 2.17: Simulación en SolTrace. Concentrador Scheffler (superficie verde), segundo reflector (superficie roja), olla (superficie azul) [Elaboración propia]

### 2.6.5.2 Resultado de la simulación

Los resultados se analizan del punto de vista óptico. La eficiencia óptica alcanzada en la reflexión del reflector Scheffler es de 94.73%, y la eficiencia alcanzada en la reflexión del segundo reflector es de 97.29%, dando una eficiencia global de 92.16%. Esto significa que los rayos solares son aprovechados casi en su totalidad. Las pérdidas posibles son causadas por imprecisiones en la fabricación de los equipos, y en la absorción de los rayos por los materiales de los reflectores. En la Figura 2.18 se puede ver que la distribución de los rayos en la base inferior de la olla se concentra mayormente en el centro, y en menor cantidad hacia el exterior de manera radial.

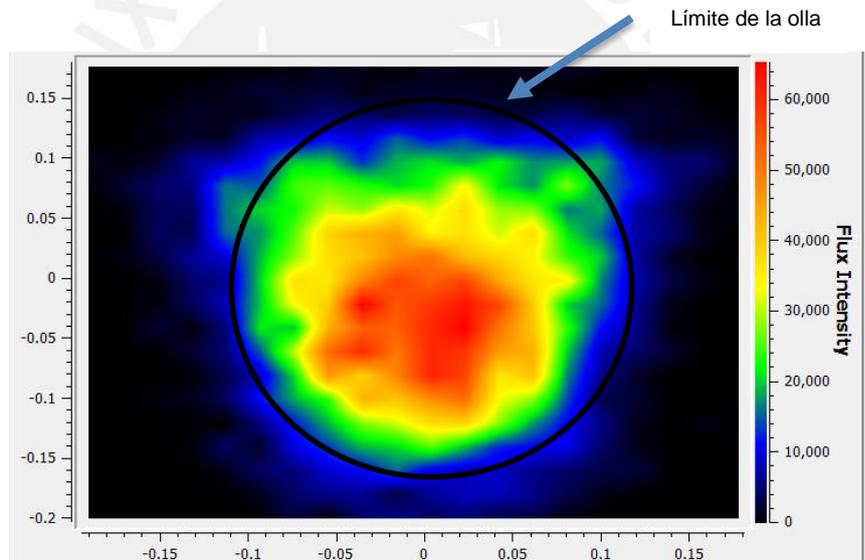


Figura 2.18: Distribución de rayos en la base de la olla [Elaboración propia]

### 2.6.6 Resistencias térmicas

En la siguiente sección se muestran las hipótesis y cálculos de las resistencias térmicas que incluye el tostador para luego poder utilizarlas en el cálculo de flujo de calor y potencia de tostado.

### 2.6.6.1 Identificación de las resistencias térmicas

En la Figura 2.19 se aprecia el modelo a usar para obtener y calcular las resistencias térmicas involucradas.

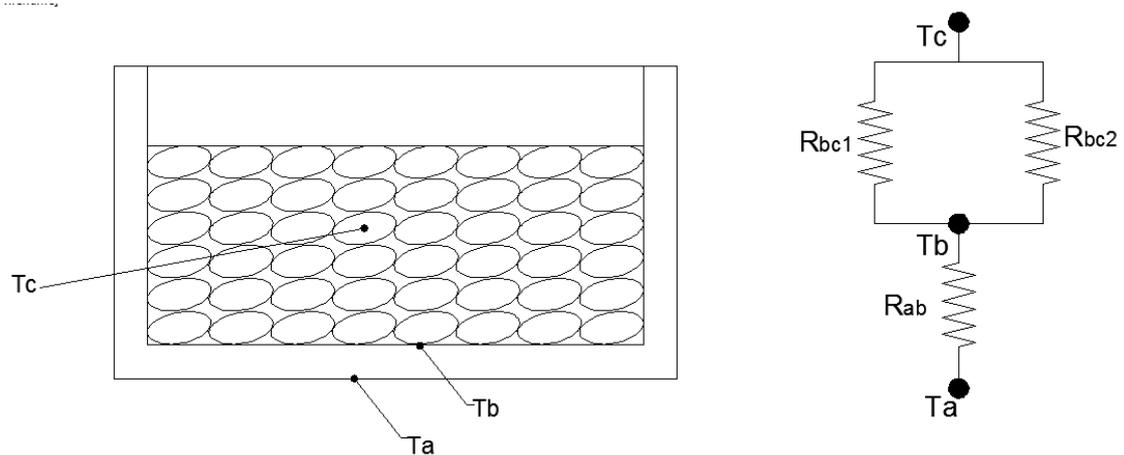


Figura 2.19: Resistencias térmicas [Elaboración propia]

### 2.6.6.2 Cálculo de las resistencias térmicas

#### 2.6.6.2.1 Resistencia $R_{ab}$

El calor se transfiere a través de la olla por conducción, por lo que la resistencia térmica se calcula con la siguiente fórmula:

$$R_{ab} = \frac{e}{k_p * A} \quad (2.17)$$

Donde

- $e$ : espesor de la olla (m)
- $k_p$ : coeficiente de conductividad térmica del material de la olla (kW/m.K)
- $A$ : Área de la base de la olla (m<sup>2</sup>)

### 2.6.6.2.2 Resistencia Rbc1

Esta es la resistencia de contacto que existe entre la base de la olla y los granos de cacao que se encuentra en contacto con esta en un instante dado. Esta resistencia involucra dos formas de transferencia de calor:

- Conducción de sólido a sólido en los puntos de contacto.
- La conducción a través de los gases que se encuentran atrapados en los espacios libres.

Este último es el que produce que la resistencia térmica sea mayor, ya que los gases tienen baja conductividad térmica.

Se puede calcular un coeficiente de transferencia a través de contacto, que depende de las propiedades térmicas de la olla y del cacao, con la siguiente expresión:

$$hc = \frac{1}{L_G} \left( \frac{Ac}{A} \cdot \frac{2 k_A k_B}{k_A + k_B} + \frac{Av}{A} k_F \right) \quad (2.18)$$

Donde:

- Ac: Área de contacto (m<sup>2</sup>)
- Av: Área libre (m<sup>2</sup>)
- L<sub>G</sub>: Espesor promedio del espacio vacío (m)
- K<sub>F</sub>: Conductividad térmica del gas
- K<sub>B</sub>: Conductividad térmica del cacao

Luego la resistencia de contacto es:

$$Rc = \frac{1}{hc \times A} \quad (2.19)$$

### 2.6.6.2.3 Resistencia $R_{bc2}$

Esta resistencia representa el calor que se transfiere a través del aire que se calienta hacia los granos de cacao. En este caso, el calor se transfiere por convección libre del aire a la superficie de los granos, y por conducción desde la superficie de los granos hacia el centro del grano. Para calcular la transferencia de calor producida se asume lo siguiente:

- El material del grano es homogéneo e isotrópico
- La temperatura inicial del grano es uniforme
- El volumen del cacao es constante
- El grano de cacao es tostado por convección libre por la siguiente condición:

$$\frac{Gr}{Re} \gg 1 \quad (2.20)$$

Para el cálculo del número de Reynolds se asume una velocidad del aire de 0.02m/s ya que el movimiento del aire es debido sólo a la rotación de las paletas.

Para el caso de convección libre, el número de Nusselt (Nu) depende del número de Grashof (Gr), de Prandtl (Pr), la geometría y las condiciones del contorno del grano.

En este caso se asume que el grano de cacao tiene una forma elipsoide con dimensiones aproximadas de:  $r=10\text{mm}$ ,  $s=5\text{mm}$ . La forma del grano se puede ver en la Figura 2.20.

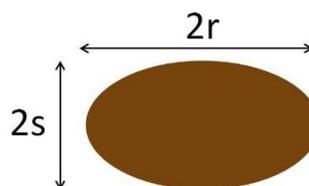


Figura 2.20: Forma y dimensiones del grano [Elaboración propia]

Para el cálculo del Nu, para este caso, se utiliza la siguiente expresión:

$$Nu = ((Nu_l)^6 + (Nu_t)^6)^{1/6} = \frac{h \times L}{k} \quad (2.21)$$

Donde:

$$Nu_l = 2 + 0.878 \times K \times Ra^{\frac{1}{4}} \quad (\text{Componente laminar})$$

$$Nu_t = 0.11 \times Ra^{\frac{1}{4}} \quad (\text{Componente turbulento})$$

### 2.6.7 Evaluación de pérdidas

Con los parámetros previamente descritos se calculan las pérdidas involucradas en el proceso de tostado.

#### 2.6.7.1 Convección por la apertura

Para calcular las pérdidas de calor por convección por la apertura de olla se tiene que calcular primero el coeficiente de transferencia por convección ( $h_a$ ). Para este efecto se utiliza la siguiente correlación [U. Leibfried]:

$$Nu = 0.106Gr^{\frac{1}{3}} \left( \frac{T_w}{T_{inf}} \right)^{0.18} \cdot \left( 4.256 \frac{S_a}{S_{cav}} \right)^a f(\theta') \quad (2.22)$$

$$a = 0.56 - 1.01 \left( \frac{S_a}{S_{cav}} \right)^{1/2}$$

Para calcular esto, previamente se calcula el número de Grashof (Gr) con la siguiente fórmula:

$$Gr = \frac{g\beta(T_w - T_{\infty})L^3}{\nu^2} \quad (2.23)$$

Donde:

- $T_w$ : Temperatura de pared (°K)

- $T_{inf}$ : Temperatura del ambiente ( $^{\circ}K$ )
- $S_a$ : Area de apertura ( $m^2$ )
- $S_{cav}$ : Area de cavidad ( $m^2$ )
- $g$ : aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )
- $\beta$ : Coeficiente de expansión térmica
- $L$ : Longitud característica
- $\nu$ : Viscosidad cinemática ( $m^2/s$ )

La función  $f(\theta')$  se refiere al ángulo  $\theta$  que es el ángulo de inclinación de la olla (en caso estuviera inclinada), por lo que esta correlación puede utilizarse en otras aplicaciones.

Para este caso, el ángulo correspondiente para la olla es de  $-90^{\circ}$ . Para definir la función  $f(\theta')$  se siguen una serie de pasos. Primero se define el ángulo  $\theta'$ :

$$\theta' = \frac{\theta + 90^{\circ}}{\theta_{max} + 90^{\circ}} \quad (2.24)$$

Luego se define el ángulo  $\theta$  máximo:

$$\theta_{max} = -23^{\circ} - 260^{\circ} \times \frac{S_a}{S_{cav}} \quad (2.25)$$

A la hora de aplicar esta ecuación, existe una recomendación en la que  $S_a/S_{cav} \leq 2$

La función  $f(\theta')$  se define como:

$$f(\theta) = \frac{1}{h_0} \{2 - 0.01 \times (\theta_{max} + 90^{\circ}) \times [1 + \cos(\theta'^{0.9} \times \pi)]\} \quad (2.26)$$

Donde:

$$h_0 = 1 - \cos[\theta'(\theta = 0)^{0.85} \times \pi]$$

Se tomará en cuenta que la longitud característica ( $L$ ) es el alto de la olla.

Una vez calculado el número de Nusselt (Nu) se aplica la siguiente igualdad:

$$Nu = \frac{h_a \times L}{k_a}$$

Donde se obtendrá el coeficiente de transferencia por convección ( $h_a$ ).

Finalmente, las pérdidas por convección a través de la apertura se calculan de la siguiente manera:

$$P_{cva} = h_a \times S_a \times (T_w - T_{inf})$$

### 2.6.7.2 Conducción y convección por paredes

Para calcular las pérdidas a través de la pared y aislante, y por convección sobre la superficie exterior e interior de la olla se elabora un modelo térmico representando las resistencias térmicas a través de la pared. El modelo térmico se muestra en la Figura 2.21

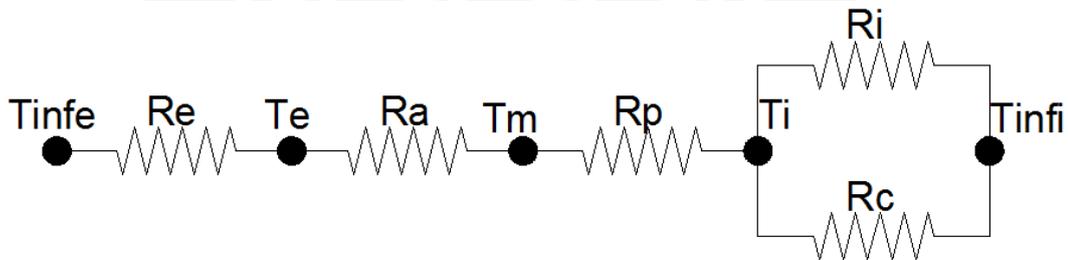


Figura 2.21: Resistencias térmicas a través de la olla [Elaboración propia]

Donde:

$$Re = \frac{1}{h_e A_e} \text{ (Resistencia exterior), } Ra = \frac{\ln \frac{r_a}{r_e}}{2\pi k_a H_o} \text{ (Resistencia del aislante), } Rp = \frac{\ln \frac{r_e}{r_i}}{2\pi k_o H_o}$$

(Resistencia de pared),  $Ri = \frac{1}{h_i A_i}$  (Resistencia interior),  $Rc = \frac{1}{hc A_i}$  (Resistencia de contacto)

- $h_e$ : coeficiente de transferencia por convección exterior
- $h_i$ : coeficiente de transferencia por convección interior
- $h_c$ : coeficiente de transferencia de contacto
- $A_e$ : Área exterior
- $A_i$ : Área interior
- $A_c$ : Área de contacto
- $r_a$ : radio exterior del aislante
- $r_e$ : radio exterior de la olla
- $r_i$ : radio interior de la olla

Con esto se puede definir el calor transferido y el espesor del aislante ( $e_a$ ). Para esto se tendrá en cuenta se tiene que transferir la menor cantidad de calor posible sin utilizar tanto material, para no aumentar tanto el costo del equipo. También se tiene en cuenta que la superficie exterior no tenga una temperatura muy elevada por seguridad, ya que si lo es, cualquiera que toque la olla podría sufrir quemaduras. En la Figura 2.22 se muestran los radios que intervienen en el cálculo de las resistencias.

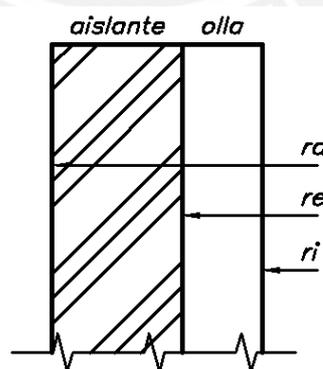


Figura 2.22 Radios involucrados [Elaboración propia]

Se procede al cálculo de las resistencias térmicas

### 2.6.7.2.1 Cálculo de Rc

Rc es la resistencia de contacto entre la pared interior de la olla y los granos de cacao.

El coeficiente de transferencia hc se calcula con la siguiente expresión:

$$h_c = \frac{1}{L_G} \left( \frac{A_c}{A} \cdot \frac{2 k_A k_B}{k_A + k_B} + \frac{A_v}{A} k_F \right) \quad (2.27)$$

Donde:

- Ac: Área de contacto (m<sup>2</sup>)
- Av: Área libre (m<sup>2</sup>)
- LG: Espesor promedio del espacio vacío (m)
- KF: Conductividad térmica del gas
- KB: Conductividad térmica del cacao

Luego la resistencia de contacto es:

$$R_c = \frac{1}{h_c \times A} \quad (2.28)$$

### 2.6.7.2.2 Cálculo de Ri

La resistencia Ri representa la transferencia del calor por convección al interior de la olla. Para esto se considera que la convección es libre en un espacio cilíndrico interno vertical cerrado. La correlación que se utiliza es la siguiente:

$$Nu = 0.55 Ra^{0.25} = \frac{h_i H_o}{k} \quad (2.29)$$

Tomando en cuenta que  $3/4 < H_o/D < 2$ , Numero de Rayleigh (Ra)=Gr.Pr

### 2.6.7.2.3 Cálculo de Rp

La resistencia Rp representa el calor transferido por conducción a través de la pared de la olla de aluminio. Se calcula directamente con la expresión mostrada anteriormente:

$$Rp = \frac{\ln \frac{re}{ri}}{2\pi k_o Ho} \quad (2.30)$$

#### 2.6.7.2.4 Cálculo de Ra

La resistencia Ra representa el calor transferido por conducción a través del aislante de fibra de vidrio. En este caso, el diámetro exterior es una de las variables que se desconoce y se necesita calcular. La expresión para calcular esta resistencia es la siguiente:

$$Ra = \frac{\ln \frac{ra}{re}}{2\pi k_a Ho} \quad (2.31)$$

#### 2.6.7.2.5 Cálculo de Re

La resistencia Re representa la transferencia de calor por convección al exterior de la olla. Para esto se considera convección libre en una superficie externa de forma cilíndrica vertical. La correlación que se utiliza es la siguiente:

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 = \frac{he Ho}{k} \quad (2.32)$$

Tomando en cuenta que  $D/Ho \geq 35/Gr^{0.25}$ , Numero de Rayleigh (Ra)=Gr.Pr.

Ya que no se tienen todos los datos a la mano, se tiene que realizar suposiciones sobre valores de temperaturas y el espesor del aislante. Luego de hacer los cálculos, realizando todas las iteraciones necesarias variando las temperaturas involucradas, se llega a calcular el espesor necesario del aislante y calor total transferido a través de la pared de la olla. Esto último se calcula con la siguiente expresión:

$$P_{cv} + P_{ca} = \frac{1}{Req} \times (T_{int} - T_{inf}) \quad (2.33)$$

Donde:

- $R_{eq}$ : Resistencia equivalente del modelo térmico

### 2.6.7.3 Radiación

Las emisiones por radiación producidas por el aumento considerable de la parte inferior de la olla, por donde se recibe la energía, pueden ser calculadas de la siguiente manera:

$$P_{ir} = \varepsilon \times A_o \times \sigma \times T_i^4 \quad (2.34)$$

Donde:

- $\varepsilon$ : Emisividad de la parte inferior de la olla
- $\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann.  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 k^4}$

### 2.6.7.4 A través del árbol de transmisión

Para el cálculo de las pérdidas por conducción a través del árbol de transmisión por el contacto con los granos de cacao se asume como si el árbol se comporta como una aleta, el calor entra por un extremo del árbol y se transfiere uniformemente hasta llegar al otro extremo. Esto se puede ver en la Figura 2.23.

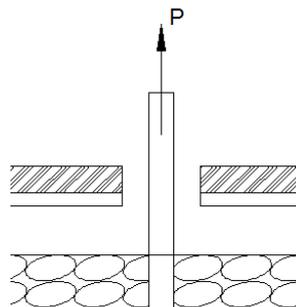


Figura 2.23 Conducción a través del árbol [Elaboración propia]

También se considera la convección en el extremo que está fuera de la olla y en contacto con el ambiente. Como el flujo de calor es el mismo, es suficiente con

calcular uno de los calores descritos previamente. Las pérdidas se calculan de la siguiente manera:

$$P_{cde} = \frac{k_a \times A_a \times \Delta T}{L_a} \quad (2.35)$$

Donde:

- $A_a$ : Area transversal del árbol ( $m^2$ )
- $L_a$ : Longitud del árbol (m)
- $k_a$ : Conductividad térmica del árbol (W/m.K)

### 2.6.8 Valores de los parámetros

En la Tabla 2.9 se muestran los resultados de los parámetros calculados anteriormente necesarios para determinar los flujos de calor, tanto útiles como pérdidas. Para esto se toma en cuenta una potencia genérica en un momento del día de  $800W/m^2$ , una temperatura ambiente de  $20\text{ }^\circ\text{C}$  y una temperatura interior de la olla de  $140\text{ }^\circ\text{C}$ .

Descripcion	Simbolo	Valor	Unidad
Temperatura ambiente	$T_{infe}$	298	K
Temperatura interior	$T_{inf\ i}$	413	K
Conductividad térmica del cacao	$k_c$	0.3	W/m.K
Conductividad térmica de la olla	$k_{al}$	209.3	W/m.K
Conductividad térmica del aislante	$k_{ai}$	0.05	W/m.K
Espesor del aislante	$e$	0.05	m
Superficie de la pared	$A_p$	0.4750	$m^2$
Diámetro de apertura	$D_a$	0.08	m
Superficie de la apertura	$A_a$	0.0050	$m^2$
Emisividad de base de olla	$\varepsilon$	0.95	
Constante de Boltzmann	$\sigma$	$5.67 \times 10^{-8}$	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>

Tabla 2.9: Valores de parámetros [Elaboración propia]

Con los datos obtenidos se calculan los coeficientes de transferencia y las resistencias involucradas en el flujo de calor. Los resultados se muestran en la Tabla 2.10 y Tabla 2.11.

Conducción por la base			
espesor	e	0.001	m
Diámetro	Do	0.04	m
Área	Ao	0.00125664	m <sup>2</sup>
Resistencia térmica	R <sub>ab</sub>	0.00380208	W/K

Contacto con la base			
Area de contacto	Ac	0.03483398	m <sup>2</sup>
Area libre	Av	0.09082973	m <sup>2</sup>
Espesor vacio	Lg	0.001	m
Conductividad gas	kf	0.0342062	W/m.K
Coefficiente de convección	hc	190.806188	W/m <sup>2</sup> K
Resistencia térmica	R <sub>bc1</sub>	0.04170592	W/K

Entre los granos			
Longitud Característica	L	0.01	m
Grashof	Gr	7696.68	
Rayleigh	Ra	5359.96795	
	K	0.5167571	
Nusselt laminar	Nul	5.8821429	
Nusselt turbulento	Nut	0.94120285	
Nusselt global	Nu	5.88215935	
Coefficiente de convección	hi	17.7965025	W/m <sup>2</sup> K
Resistencia térmica	R <sub>bc2</sub>	44.71523	W/K

Tabla 2.10: Resistencias térmicas referentes al flujo de calor útil [Elaboración propia]

Conveccion por apertura			
Longitud Característica	L	0.209	m
Grashof	Gr	72499759.72	
Rayleigh	Ra	50249031.84	
Nusselt	Nu	7.28168819	
Coefficiente de convección	h	1.092169611	W/m <sup>2</sup> K

Transferencia por paredes			
Longitud Característica	L	0.3	m
	D/L	1.68 >35/Gr <sup>0,25</sup>	
Grashof	Gr	69666188.07	
Rayleigh	Ra	49271411.51	
Nusselt	Nu	49.48907903	
Coefficiente de convección	hi	4.366875093	W/m <sup>2</sup> K
Resistencia térmica	Re	0.482089382	K/W
Resistencia térmica	Ra	2.190174763	W/K
Resistencia térmica	Rp	6.25888E-05	W/K
Longitud Característica	L	0.3	m
	L/D	0.75	
Grashof	Gr	9189720	
Rayleigh	Ra	6322527.36	
Nusselt	Nu	27.57943525	
Coefficiente de convección	hi	3.144625594	W/m <sup>2</sup> K
Resistencia térmica	Ri	0.843528842	W/K
Area de contacto	Ac	0.018443009	m <sup>2</sup>
Area libre	Av	0.35854811	m <sup>2</sup>
Espesor vacio	Lg	0.008	m
Conductividad gas	kf	0.0342062	W/m.K
Coefficiente de convección	hc	7.730465643	W/m <sup>2</sup> K
Resistencia térmica	Rc	0.343133584	W/K
Resistencia equivalente	Req	0.243913575	W/K

Tabla 2.11: Cálculo de coeficientes de convección y resistencias térmicas referente a las pérdidas [Elaboración propia]

Finalizando con los cálculos térmicos se muestran en la Tabla 2.12 los resultados de las potencias calculadas:

Descripción	Simbolo	Valor	Unidad
Potencia solar	Psol	800	W/m <sup>2</sup>
Potencia de entrada	Pent	5160	W
Potencia absorbida	Pabs	4755.456	W
Potencia útil	Putil	3895.433	W
Pérdidas irradiación	Pir	729.684	W
Pérdidas por la apertura	Pap	82.349	W
Pérdidas por la pared	Pcv+Pcd	41.149	W
Pérdidas por árbol de transmision	Pcde	6.841	W

Tabla 2.12: Potencias en la olla [Elaboración propia]

Se observa que la mayor cantidad de pérdidas que se producen son por la radiación la parte inferior de la olla, ya que la temperatura es muy alta y el área de exposición también es grande. De la misma manera la emisividad, dado que es igual en valor a la absorptividad, es elevada por lo que esto es determinante para que las pérdidas por este medio también sean altas. Aunque esto produzca la mayor cantidad de pérdidas durante el tostado, solo representa aproximadamente el 15% de la potencia.

### 2.6.9 Primeras pruebas

Las pruebas realizadas consisten en calentar agua en una olla hasta llegar a su punto de ebullición. De esta manera se calcula la potencia recibida y la eficiencia del tostador. Para estas pruebas existen diversos factores que influyen, estos son: la limpieza de los espejos, el correcto direccionamiento de los reflectores, etc.

Durante las pruebas se hirvió 5 litros de agua, se hicieron medidas de la radiación directa, indirecta, temperatura, tiempo cada minuto. Asimismo, se calculó la irradiancia por el método analítico. En la Tabla 2.13 se muestran los datos de radiación y apertura para el día que se realizó la prueba.

	24-jul
Día del año	205
Declinación solar	19.82
Factor de apertura	0.84
Apertura teórica	6.76
Apertura útil	5.41

Tabla 2.13: Datos del día de la prueba [Elaboración propia]

La potencia absorbida por el agua se calcula tomando la energía los primeros 60 segundos. Para el cálculo se utilizan las siguientes fórmulas:

$$E = \Delta T \times C \times m \quad (2.36)$$

Dónde:

- $E$ : Energía entregada. (J)
- $\Delta T$ : Diferencia de temperaturas. ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $C$ : Capacidad calorífica del agua. ( $\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ )

$$P_{\text{ent-R}} = \frac{E}{t}$$

$$n = \frac{P_{\text{ent-R}}}{P_{\text{ent-T}}} \times 100$$

Dónde:

- $P_{\text{ent-R}}$ : Potencia entregada real. (W)
- $t$ : Tiempo en llegar a la temperatura deseada. (s)
- $n$ : Eficiencia. (%)

Se debe notar que el lugar de esta primera prueba (Huyro) se ubica a 1600 msnm, por lo que el agua hierve a  $94^{\circ}\text{C}$ .

empo (mm:ss)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Irradiancia directa (W/m <sup>2</sup> )	Energía (J)	Potencia útil (W)	Potencia entrada (W)	Rendimiento (%)
01:06	0	26	850.62			4601.13	
01:07	60	28	850.71	41850	697.5	4601.59	0.15
01:08	120	33	850.79	104625	1743.75	4602.04	0.38
01:09	180	39	850.87	125550	2092.5	4602.48	0.45
01:10	240	44	850.95	104625	1743.75	4602.91	0.38
01:11	300	49	851.03	104625	1743.75	4603.33	0.38
01:12	360	54	851.11	104625	1743.75	4603.74	0.38
01:13	420	59	851.18	104625	1743.75	4604.15	0.38
01:14	480	64	851.25	104625	1743.75	4604.54	0.38
01:15	540	68	851.33	83700	1395	4604.93	0.30
01:16	600	72	851.40	83700	1395	4605.31	0.30
01:17	660	75	851.46	62775	1046.25	4605.68	0.23
01:18	720	77	851.53	41850	697.5	4606.05	0.15
01:19	780	81	851.60	83700	1395	4606.40	0.30
01:20	840	84	851.66	62775	1046.25	4606.75	0.23
01:21	900	86	851.73	41850	697.5	4607.09	0.15
01:22	960	88	851.79	41850	697.5	4607.43	0.15
01:23	1020	90	851.85	41850	697.5	4607.76	0.15
01:24	1080	91	851.91	20925	348.75	4608.08	0.08
01:25	1140	93	851.97	41850	697.5	4608.40	0.15
01:26	1200	94	852.02	20925	348.75	4608.71	0.08

Tabla 2.14: Resultados de primera prueba [Elaboración propia]

En la Tabla 2.14 se muestran los resultados de la prueba realizada. Con los datos de potencia entregada por el sol, y la potencia que absorbe el agua es posible obtener el rendimiento del tostador a cada instante de tiempo.

## 2.7 Análisis Mecánico

En la presente sección se muestra el diseño y cálculos de las diferentes partes mecánicas del tostador.

### 2.7.1 Paletas

Las paletas con una parte muy importante en el tostador ya que de ellas depende que el tostado de los granos de cacao sea uniforme y homogéneo. El recorrido del cacao tiene que ser del centro al exterior de la olla, así como también de la parte inferior a la superior y viceversa. El recorrido descrito se puede apreciar en la Figura 2.24.

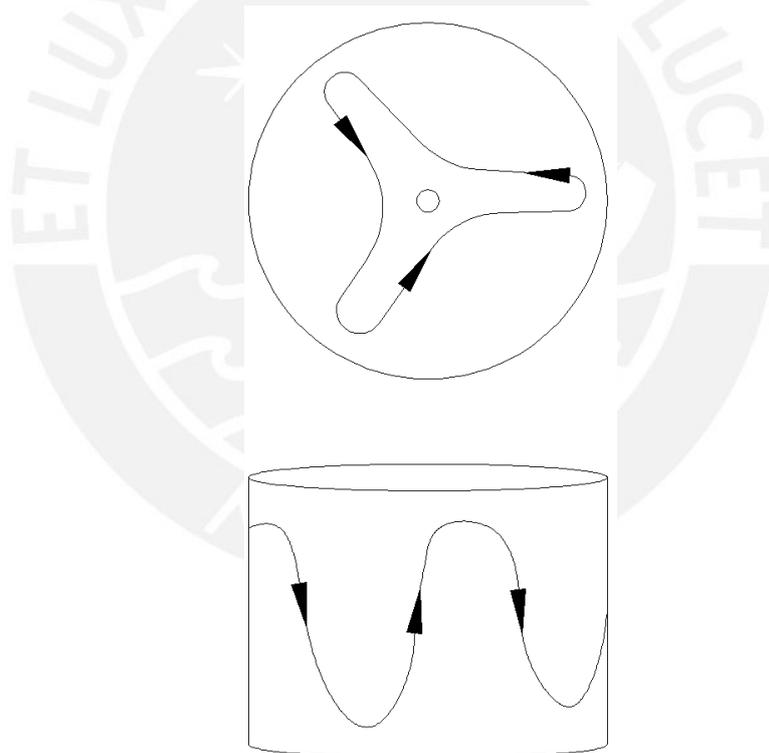


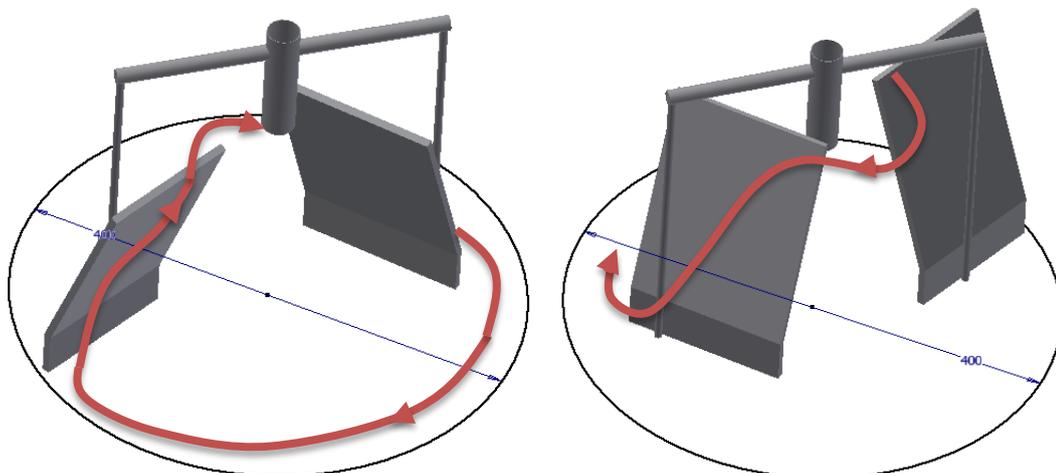
Figura 2.24: Recorrido de un grano de cacao durante el tostado [Elaboración propia]

Las paletas giran en torno al eje del mecanismo y, durante su movimiento no deberán tocar la olla, ni por la pared, ni en la base. Es por eso que las dimensiones tienen que ser precisas. La olla a utilizar tiene las dimensiones, como se explicó en el acápite 2.6.4.1, diámetro de 40cm y alto de 30cm. En el caso que no se disponga de una olla

de estas dimensiones, sino una de menor tamaño, las paletas son regulables de manera que también pueda adecuarse a ollas más pequeñas. El material será de acero inoxidable SS316 ya que es lo suficientemente resistente y puede estar en contacto con el cacao sin contaminarlo.

Las paletas están conectadas a un collarín mediante brazos soldados lo suficientemente resistente a la fuerza que implica mover la masa de todos los granos de cacao. El collarín se une al eje de manera que la potencia se transmite por medio de un prisionero.

En la Figura 2.25 se puede ver el diseño de las paletas y el recorrido del cacao relativo a las paletas. De la misma manera, en la Figura 2.26 se observan las paletas en funcionamiento, mezclando el cacao. Las paletas se definieron para que el mezclado correcto ocurra cuando el giro sea en sentido anti horario.



**Figura 2.25:** Paletas del tostador [Elaboración propia]



**Figura 2.26:** Paletas en funcionamiento [Elaboración propia]

Se realizó una pequeña prueba para verificar el recorrido de los granos. Para esto se pintó uno de los granos de color blanco y se puso en funcionamiento las paletas.

Efectivamente, el recorrido del grano cumplió con lo esperado.

A continuación se muestra una simulación de las paletas de manera que se pueda comprobar la resistencia de las mismas. Para esta simulación se utilizó el programa Autodesk Inventor 2014, propiedad de la compañía Autodesk Inc. Se representan las fuerzas ejercidas por el cacao como si cada paleta moviera la mitad de toda la masa de granos en la olla en ese momento. Se calcula para una capacidad máxima de cacao de 25kg aproximadamente. Cabe resaltar que el tostador no funcionará necesariamente con esta capacidad, ya que solo se requiere llegar a tostar 6kg en una hora. En la Figura 2.27 se aprecia el resultado de la simulación.

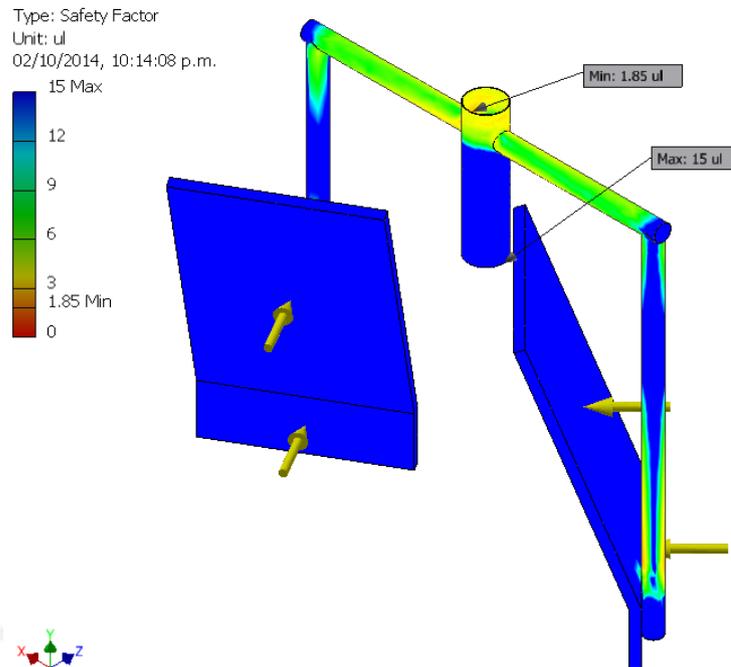


Figura 2.27: Simulación mecánica de las paletas [Elaboración propia]

Luego de la simulación, el factor de seguridad resultante es de 1.85. Se considera aceptable ya que se evaluó en el caso más extremo de mayor carga.

### 2.7.2 Sistema de rotación

La velocidad con que giran las paletas determina el tiempo en que cada grano estará en contacto con la fuente de calor, en este caso, la parte inferior de la olla. Cuando las revoluciones son bajas, parte los granos de cacao estará más tiempo expuesto al calor provocando que se caliente y tueste más rápido que el resto. Este tiempo es muy importante, ya que si el grano se está calentando por mucho tiempo moviéndose muy poco, el grano se empieza a tostar por un solo lado, produciendo que el tostado se produzca de forma dispereja entre los granos, de manera superficial sin penetrar en el grano. Esto puede producir quemaduras superficiales lo que reduce considerablemente la calidad del producto final.

Por otro lado, si las revoluciones son muy rápidas, los granos se alejan muy rápido de la fuente de calor dejando de recibir la energía necesaria para su correcto tostado. Asimismo, por la abertura de la olla, el calor perdido por convección aumentaría, elevando las pérdidas de calor.

La velocidad de giro de las paletas debe permitir que el mezclado de los granos de cacao sea lo más uniforme que se pueda. Esta velocidad debe ser constante y relativamente no muy alta. No obstante, si se varía la cantidad de cacao, deberá ser necesario que la velocidad de giro sea más rápido o más lento. Por lo que se necesita que el giro pueda ser variado. De acuerdo a máquinas tostadoras ya existentes en el mercado, las velocidades de giro durante el mezclado varían entre 20 y 30 RPM.

Para calcular la potencia necesaria para hacer girar las paletas se asumirá que la olla está completamente llena de granos de cacao. Usando las expresiones a continuación, se calculará la potencia de giro ( $P_{giro}$ ).

$$P_{giro} = T_{giro} \times \omega_t \quad (2.37)$$

El torque necesario para el giro ( $T_{giro}$ ):

$$T_{giro} = I_{granos} \times \alpha_p \quad (2.38)$$

Para efectos prácticos, la inercia ( $I_{granos}$ ) es calculada como si todo, paletas y granos de cacao, fueran como un solo bloque girando en torno al eje.

La velocidad angular se calcula con las siguientes expresiones:

$$\omega_t = \omega_0 + \alpha_p \times t_{giro} \quad (2.39)$$

$$\omega_t^2 = \omega_0^2 + 2 \times \alpha_p \times \theta \quad (2.40)$$

Dónde:

- $\omega_t$ : Velocidad angular de las paletas (rad/s)
- $\omega_0$ : Velocidad angular inicial de las paletas (rad/s)
- $\alpha_p$ : Aceleración angular de las paletas (rad/s<sup>2</sup>)
- $\theta$ : Ángulo girado (rad)
- $I_{granos}$ : Momento de inercia de los granos en la olla (kg.m<sup>2</sup>)

Con las expresiones expuestas, se considera una velocidad angular final de las paletas de 2.62 rad/s (25 RPM) y que esta velocidad se alcanza en una vuelta de las paletas. Con estos datos se determina un torque de giro de 1.13 N.m y una potencia de giro de aproximadamente 3W.

A continuación, con la potencia calculada se procede a seleccionar el motor adecuado para realizar el giro. Para esto se considera utilizar un motor de corriente continua de 24V, de manera que puede funcionar con una batería, y esta, a su vez, ser cargada por paneles solares manteniendo la condición de ser una máquina totalmente solar. Se selecciona el motor TD3150G-24F-9K24F de la marca japonesa TOKUSHU DENSO. En la Figura 2.28 se puede apreciar el motor utilizado.



Figura 2.28: Motor DC a utilizar [Elaboración propia]

En la Tabla 2.15 se puede observar los datos del motor seleccionado.

Voltaje	24 V/DC
Máx. corriente de carga	7.2 A
Velocidad en vacío a 24V	64.5 rpm
Velocidad con carga	62.7 rpm
Torque nominal	100 kgf*cm
Relación de transmisión	1/5 ~ 1/150
Dimensiones	∅84 x 223mm
Diámetro del eje	12mm

**Tabla 2.15:** Especificaciones técnicas del motor seleccionado

Como se ve en los datos del motor, la velocidad angular del motor con carga ( $\omega_m$ ) es de 62.7, pero la velocidad de giro de las paletas es de 25 rpm por lo que se selecciona un juego de engranajes para poder alcanzar esta velocidad y también poder transmitir el torque necesario para mover todos los granos de cacao. Con las siguientes expresiones se puede calcular el módulo y el número de dientes de los engranajes que

se necesitan, resultando un engranaje de 79 dientes, junto con un piñón de 34 dientes, ambos de módulo 2.

$$\frac{\omega_m}{\omega_p} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (2.41)$$

$$M = \frac{D_p}{Z} \quad (2.42)$$

Donde:

- $\omega_m$ : Velocidad angular del motor. (rad/s)
- $\omega_p$ : Velocidad angular de las paletas (rad/s)
- M: módulo de los engranajes
- $D_p$ : Diámetro primitivo del engranaje
- Z1: Número de dientes del engranaje de entrada
- Z2: Número de dientes del engranaje de salida.

### 2.7.3 Sistema de alimentación

Para continuar con la premisa que el tostador tiene que funcionar con la energía proporcionada por el sol, la alimentación eléctrica para el motor será por medio de un panel solar que otorgue suficiente energía para que el motor funcione correctamente.

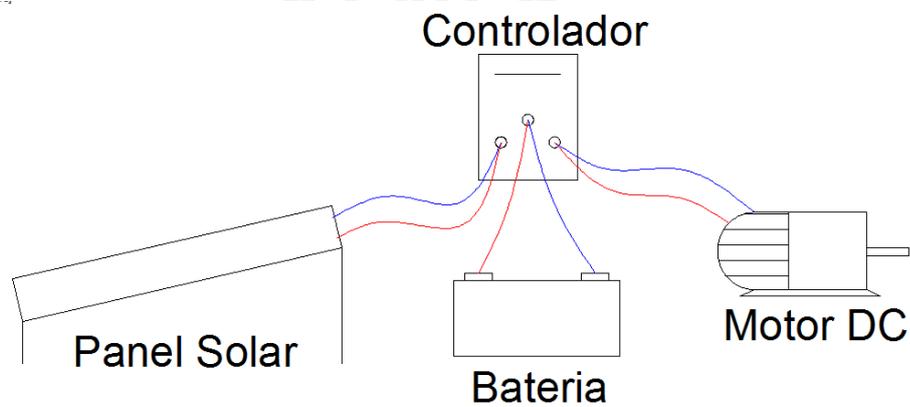
Para este caso se usará un panel de 12W a 12V

Como se utilizará la energía del sol para tostar, es evidente que también habrá suficiente energía solar para que el panel pueda alimentar al motor mientras se tuesta el cacao.

De la misma manera, se contará con una batería que funcione como acumulador de la energía, de manera que si en algún momento pasa una nube y la radiación solar disminuye temporalmente, el motor no deje de girar a la velocidad y con la fuerza necesaria.

Asimismo, a manera de protección se utilizará un controlador que regule el paso de la energía, de modo que si la batería está completamente cargada, se use directamente el panel, en el caso que no haya suficiente sol, se utilice solo la batería.

En la Figura 2.29 se muestra un esquema de funcionamiento del sistema de alimentación. De la misma manera, en la Figura 2.30 se muestra una foto del sistema que se utilizará.



**Figura 2.29:** Esquema del sistema de alimentación [Elaboración propia]



**Figura 2.30:** Sistema de alimentación a usar [Elaboración propia]

### 2.7.4 Cálculo de árbol de transmisión

El árbol es el encargado de transmitir la potencia otorgada por el motor eléctrico, a través del sistema de transmisión, hacia las paletas que mezclan los granos de cacao durante el tostado. En la Figura 2.31 se ven los elementos del árbol de transmisión.

Como primer paso, se esquematiza el diagrama de cuerpo libre (Figura 2.32) y de fuerzas internas (Figura 2.33) y a partir de este se formulan las ecuaciones de equilibrio que permitan definir posteriormente los diámetros correctos a lo largo del árbol y en los cambios de sección.



Figura 2.31: Elementos de árbol [Elaboración propia]

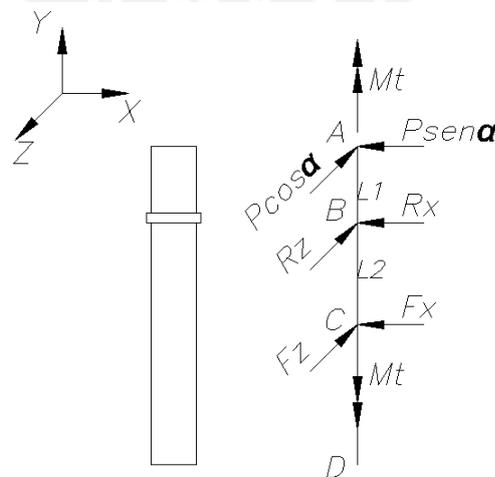


Figura 2.32: Diagrama de cuerpo libre [Elaboración propia]

$$\sum F_x = 0: P \sin \alpha + R_x + F_x = 0 \tag{2.43}$$

$$\sum F_z = 0: P \cos \alpha + R_z + F_z = 0 \tag{2.44}$$

$$\sum M_{cx} = 0: P \sin \alpha \times (L_1 + L_2) + R_x \times L_2 = 0 \tag{2.45}$$

$$\sum M_{cz} = 0: P \cos \alpha \times (L_1 + L_2) + R_z \times L_2 = 0 \tag{2.46}$$

Para este cálculo se presentan los datos iniciales y resultados en la Tabla 2.16

Mt	1.13 N.m
Ángulo de presión: $\alpha$	20°
Diámetro primitivo de engranaje	158 mm
L1	36 mm
L2	48 mm
Rx	9.11 N
Rz	25.03 N

Tabla 2.16: Datos para equilibrio de árbol [Elaboración propia]

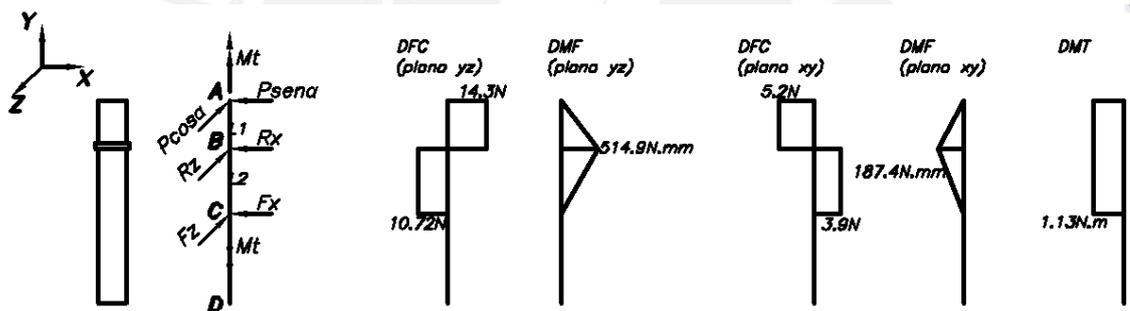


Figura 2.33: Diagramas de fuerzas internas [Elaboración propia]

Se observa que el punto con mayor sollicitación es el punto B, donde  $M_f=547.98 \text{ N.mm}$  y  $M_t=1130 \text{ N.mm}$ .

La flexión es alternante puro, tomando un diámetro de árbol de 12mm:

$$\sigma_{fa} = \sigma_{fs} = \frac{32 \times M_f}{\pi \times d^3} = 3.23 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{fm} = 0$$

La torsión:

$$\tau_{tm} = \tau_{ts} = \frac{16 \times M_t}{\pi \times d^3} = 3.33 \text{ N/mm}^2$$

En la tabla Tabla 2.17 se muestran los valores a considerar en el cálculo por resistencia a la fatiga. Se elige el material acero SS304 ya que estará en contacto en

el cacao, que es un alimento. En la misma tabla se muestran los coeficientes que influyen en la resistencia a la fatiga.

$\sigma_B$	540 MPa
$\sigma_{alt}$	250 MPa
$\sigma_F$	300 MPa
$C_s$	0.89
$C_t$	0.82
$C_{temp}$	1.025
$C_{carga}$	1
$C_c$	1
$\beta$	1.49

Tabla 2.17: Parámetros para cálculo de fatiga

Los esfuerzos equivalentes son los siguientes:

El esfuerzo medio según Von Mises:  $\sigma_{m eq} = \sqrt{\sigma_{fm}^2 + 3 \times \tau_{tm}^2} = 5.77 \text{ N/mm}^2$

Flexión:  $\sigma'_{fa} = \frac{\beta}{C_s \times C_t \times C_{temp} \times C_{carga} \times C_c} \times \sigma_{fa} = 6.17 \text{ N/mm}^2$

Torsión:  $\tau'_{ta} = \frac{\beta}{C_s \times C_t \times C_{temp} \times C_{carga} \times C_c} \times \tau_{ta} = 0$

El esfuerzo alternante según Von Mises es:  $\sigma'_{a eq} = \sqrt{\sigma'_{fa}{}^2 + 3 \times \tau'_{ta}{}^2} = 6.17 \text{ N/mm}^2$

El factor de seguridad a la fatiga es:

$$\frac{1}{FS} = \frac{\sigma_{m eq}}{\sigma_B} + \frac{\sigma'_{a eq}}{\sigma_{alt}}$$

$$FS = 29$$

El factor de seguridad a la fluencia es:

$$\sigma_{s eq} = \sqrt{\sigma_{fs}^2 + 3 \times \tau_{ts}^2} = 6.61 \text{ N/mm}^2$$

$$FS = \frac{\sigma_F}{\sigma_{seq}} = 46$$

Con estos cálculos se puede decir que con un eje de 12mm de diámetro de 150mm de largo no falla por fatiga ni fluencia. A pesar que los FS salen muy altos, de reducirse el tamaño ya no sería tan comercial y la construcción sería más complicada.

### 2.7.5 Cálculo de estructura

En la Figura 2.34 se observa la estructura metálica donde se soportará tanto la mesa soporte con el mecanismo y paletas, y la olla con todos los granos de cacao a tostar.

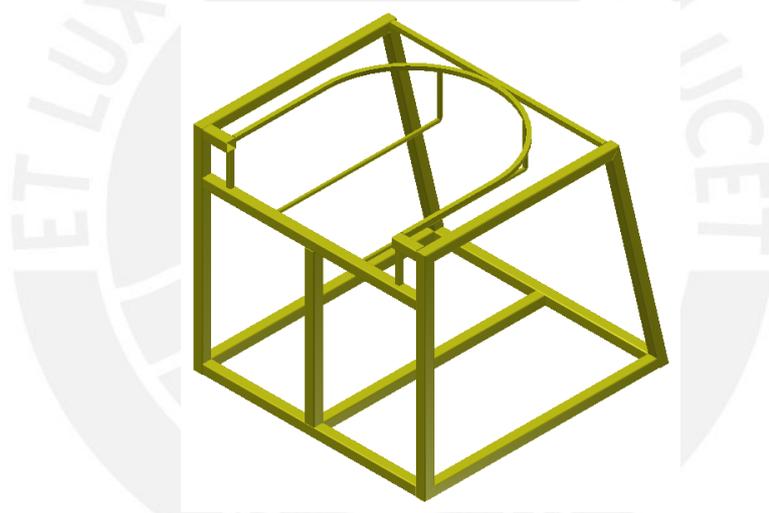


Figura 2.34: Estructura metálica [Elaboración propia]

La estructura está construida con barras cuadradas y circulares, y tubos cuadrados soldados de acero estructural ASTM A36. Tiene que ser lo suficientemente resistente para soportar todas las cargas y la temperatura a las que está expuesta mientras el tostado se está realizando. Al igual que las paletas, esto se verificó realizando una simulación en el programa Autodesk Inventor 2014. Para esto se eligieron los puntos de mayor sollicitación, en este caso, donde se apoya la olla con todos los granos de cacao. Esta parte está hecha de barras circulares dobladas de 10mm de diámetro. En

la Figura 2.35 se muestra la simulación entregando como resultado más importante el factor de seguridad de 1.48.

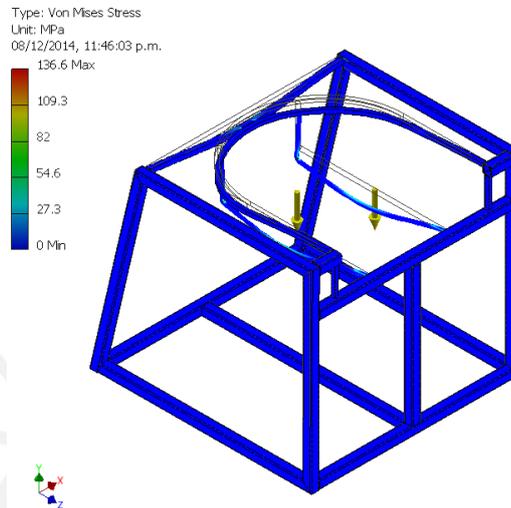


Figura 2.35: Simulación de resistencia de estructura [Elaboración propia]

La estructura en las imágenes aparecen descubiertas, pero al momento de construirse estará cubierta con planchas de acero ASTM A36 de 0.8mm de espesor por todos sus lados laterales excepto por el lado en que se reciben los rayos solares. La razón de esta cobertura es para proteger el segundo reflector, ya que es la parte más sensible del tostador.

### 2.7.6 Cálculo de mesa soporte

En la Figura 2.36 se muestra la mesa soporte.

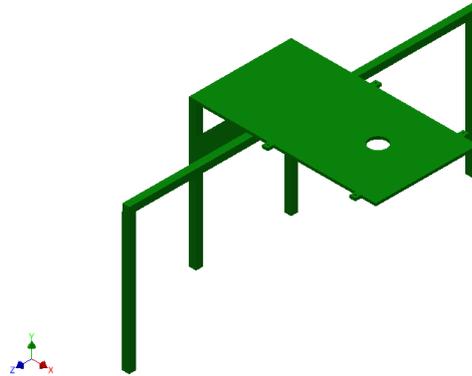


Figura 2.36: Mesa soporte [Elaboración propia]

Como su nombre lo dice, tiene que soportar el peso del motor, engranajes, árbol de transmisión y paletas. La mesa está construida con barras cuadradas y una plancha de 4mm de espesor con un agujero de 1 pulgada de diámetro. Para esto, la zona de mayor sollicitación se encuentra donde se apoya el eje. Se procedió con la simulación y en la Figura 2.37 se puede observar el resultado.

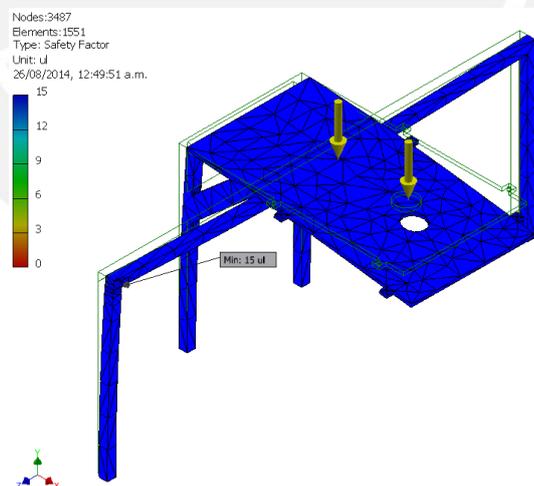


Figura 2.37: Simulación de resistencia de la mesa soporte [Elaboración propia]

Como resultado más importante resultó un factor de seguridad de no menor a 15, por lo que resistirá con un alto margen todo el peso del sistema de transmisión.

Adicionalmente, en el agujero nombrado anteriormente, se ubica una bocina acoplada con un ajuste de apriete a la plancha. En esta bocina se apoya el eje vertical, por lo

que tiene que resistir el peso y la torsión transmitidos por el árbol de transmisión.

Asimismo, el material de la bocina es de bronce SAE 62, suficientemente resistente al calor al que estará expuesto. También lo suficientemente resistente al desgaste, pero no más que el árbol ya que es mejor que se gaste la bocina y cambiarla, a cambiar todo el árbol de transmisión.

De la misma manera que las partes anteriores, se simula con el programa Autodesk Inventor la resistencia a la compresión de la bocina. En la Figura 2.38 se puede apreciar la simulación.

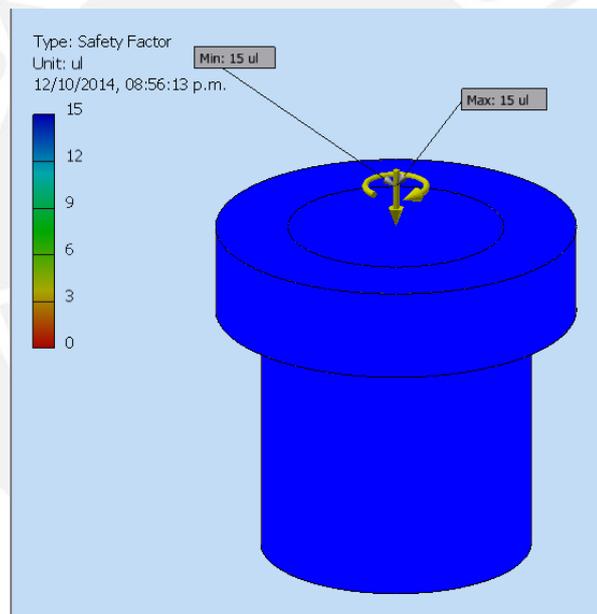


Figura 2.38: Simulación de resistencia de la bocina [Elaboración propia]

Dando como resultado más significativo un factor de seguridad no menor a 15.

### 2.7.7 Cálculo de estabilidad

Se verifica la estabilidad de la estructura para saber si esta puede voltearse a la hora de su funcionamiento o manipulación. Para determinar esto, se considera que el centro de gravedad del equipo siempre se encuentre dentro de los apoyos, en este caso la base que está en contacto con la tierra. En la Figura 2.39 se muestra el centro

de gravedad en la posición de funcionamiento. Se puede ver que está dentro de los límites de la base.

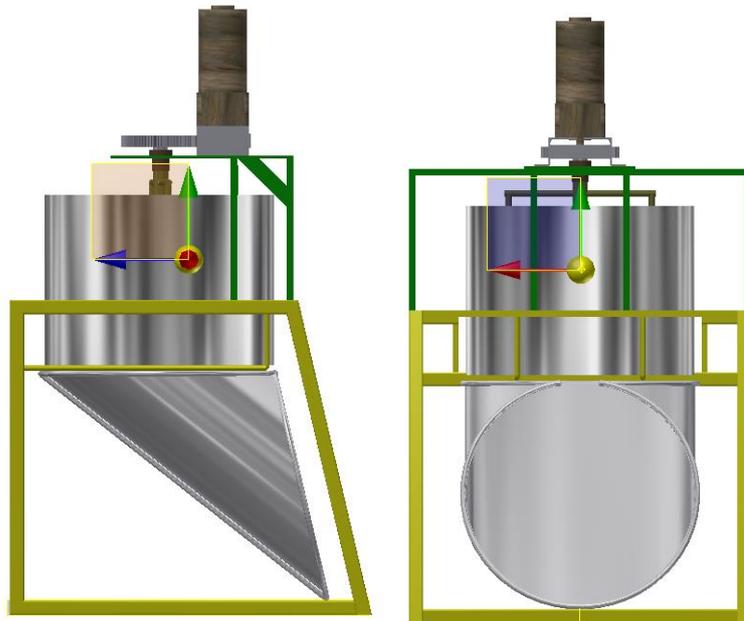


Figura 2.39: Centro de gravedad de tostador [Elaboración propia]

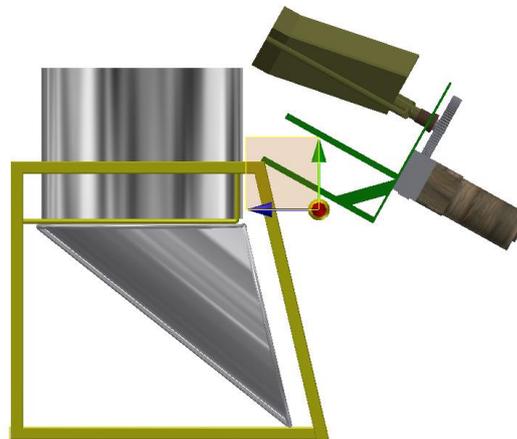


Figura 2.40: Centro de gravedad en posición crítica [Elaboración propia]

En la Figura 2.40 se puede ver a la máquina al momento de colocar o sacar la olla. Esta posición se considera crítica ya que es en la que el centro de gravedad se encuentra lo más al extremo, pero sin sobresalir de los límites de la base. A pesar de esto, se toma en cuenta que el tostador se encontrará en esta posición solo unos instantes y estará sostenido por el operario.

## CAPITULO 3

### PRUEBAS

En este capítulo se mostrarán las pruebas de tostado realizadas con un programa realizado para simular el tostado y con el prototipo de tostador construido. Los resultados se podrán comparar y con esto se podrá definir si se cumple con el objetivo de tostar 50 kg de granos de cacao en un día. Además se podrá analizar el costo que involucra construir el equipo.

#### 3.1 Pruebas de simulación

Se utilizó un programa de simulación del tostado, elaborado por el Dr. François Veynandt con las aplicaciones Visual Basic y Microsoft Excel, para poder verificar previamente la secuencia de tostado y el comportamiento de los granos de cacao en el tiempo a lo largo de todo el proceso.

El programa consiste en ingresar todos los datos de la olla utilizada, datos de los granos de cacao, los datos ambientales y todos los que se refieren a la óptica. Se aplican las fórmulas de transferencia de calor para calcular la potencia útil y las pérdidas en función de las temperaturas y el tiempo, de manera que se calculen cada potencia (útil o de pérdidas) a lo largo del tiempo. Como la temperatura va cambiando a cada periodo de tiempo, las propiedades de los granos de cacao y del aire también cambian por lo que es necesario realizar iteraciones y recalculando dichas propiedades también a cada periodo de tiempo.

Con todo lo establecido previamente, luego de la simulación es posible ver la tendencia de cada una de las potencias a cada momento que la temperatura se va elevando. De la misma manera, con esto se puede notar por donde se produce la

mayor cantidad de pérdidas y así tomar decisiones para posibles mejoras en el tostado, tales como un mejor recubrimiento o una mejor selección de materiales.

En la Tabla 3.1 se ven los parámetros iniciales para la simulación. Varios de estos son valores asumidos, que son los mismos asumidos en los cálculos mostrados anteriormente.

RESUMEN PARAMETROS INICIALES		
Radiación promedio	900	W/m <sup>2</sup>
superficie útil Scheffler	6.67	m <sup>2</sup>
reflectividad espejos	0.8	-
pérdidas por desbordamiento	0.45	-
pérdidas por reflexión a fuera del tambor	0.83	-
Temperatura ambiental	298	K
conductividad térmica aislante	0.005	W/m/K
emisividad tambor	0.95	-
Temperatura cacao	298	K
Masa cacao	6	kg

Tabla 3.1: Valores iniciales para simulación [Elaboración propia]

Con estos valores se procede a la simulación, resultando en una gráfica mostrada en la Figura 3.1.

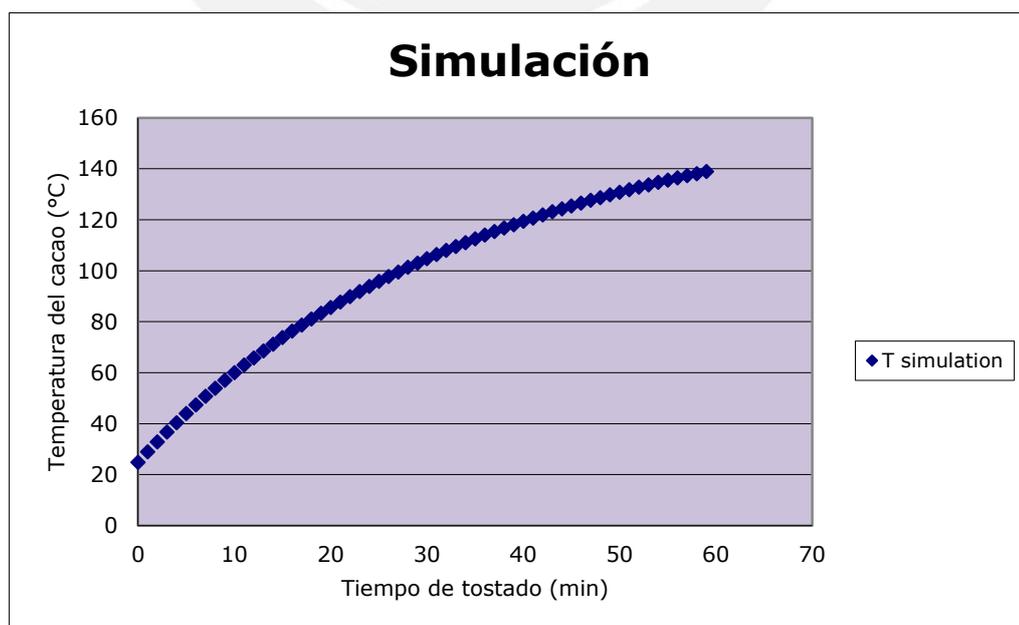


Figura 3.1: Simulación de tostado de cacao [Elaboración propia]

Además para la simulación se tomó la premisa de que el cacao tuesta cuando los granos alcanzan la temperatura de  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

En la gráfica previa se puede notar que la tendencia de la temperatura es subir la temperatura casi constantemente, y cuando se acerca a la temperatura de tostado, la pendiente va disminuyendo. Es necesario recordar que para la simulación se consideró una radiación constante a lo largo del tiempo, lo cual no necesariamente puede suceder en durante el tostado real.

En la Figura 3.2 se muestran las tendencias de las potencias involucradas en la simulación.

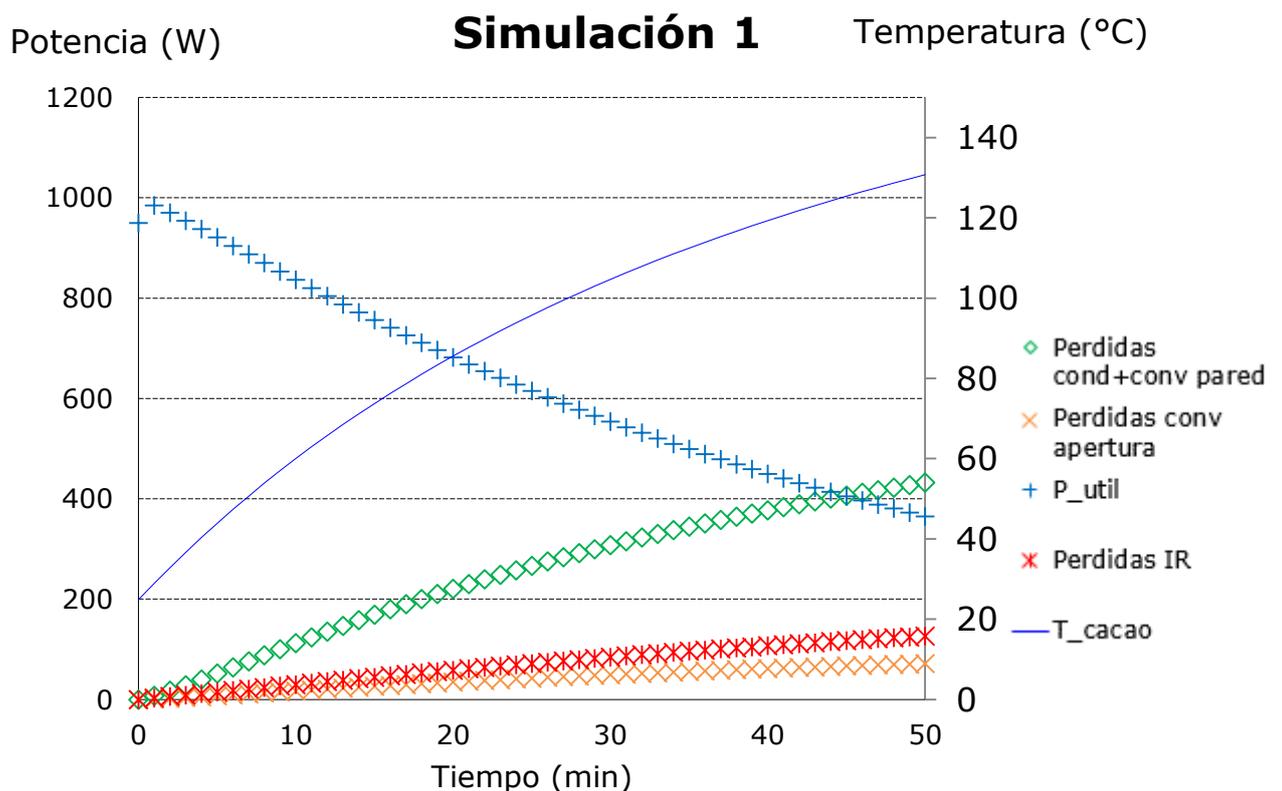


Figura 3.2: Gráfica simulación 1 [Elaboración propia]

Se puede notar que la potencia útil va disminuyendo conforme la temperatura va en aumento. De la misma manera, las pérdidas van aumentando, cada una a diferente ritmo, a medida que la temperatura también lo va haciendo. La mayor cantidad de pérdidas son producidas a través de las paredes.

De la misma manera, se procede a simular con una cantidad diferente de cacao, en este caso de 3 kg, pero con los demás parámetros similares. El resultado se puede ver en la Figura 3.3.

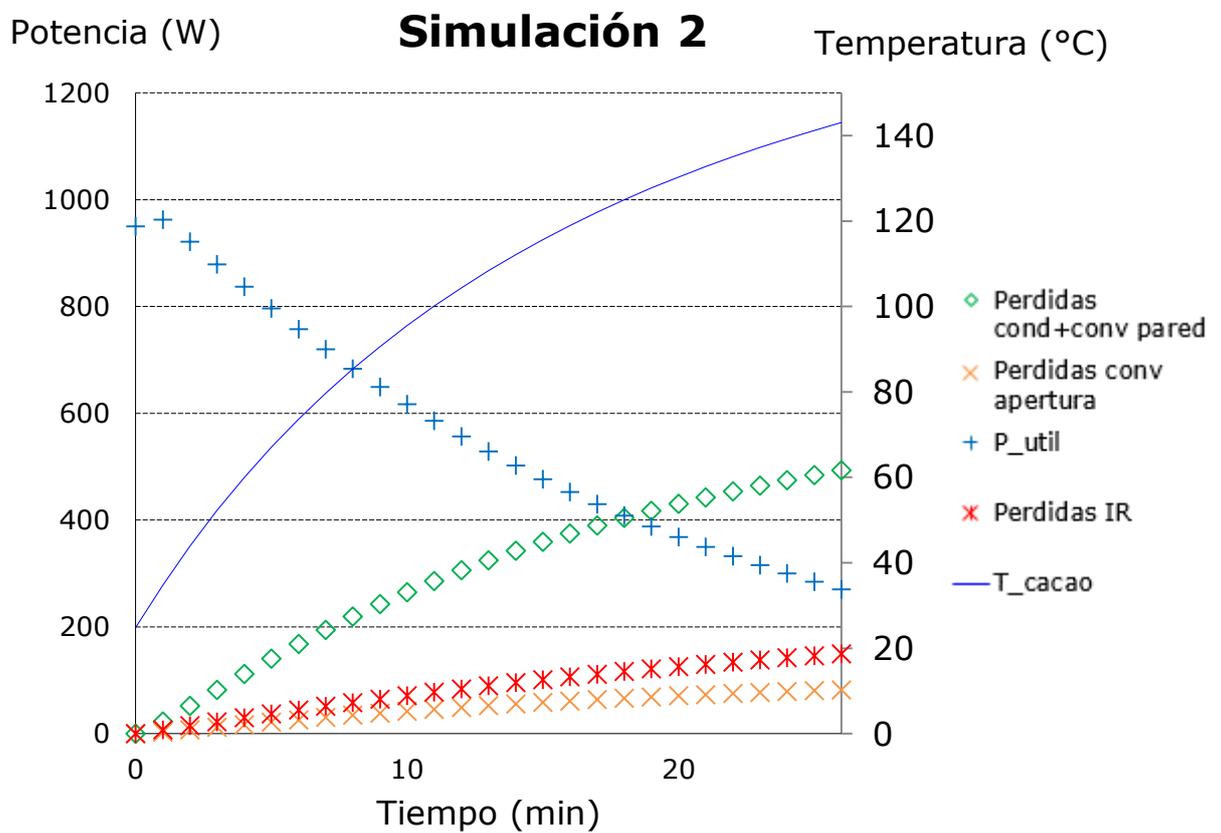


Figura 3.3: Gráfica simulación 2 [Elaboración propia]

### 3.2 Análisis de simulación

A grandes rasgos, se puede ver que en los dos casos, las propiedades evaluadas siguen la misma tendencia, por lo que esto no variará con la variación de la cantidad de cacao.

Lo primero que se puede concluir de las simulaciones es que el tostar la mitad de masa, también va a durar aproximadamente la mitad de tiempo. De la misma manera, cuando se tuesta menor cantidad de granos de cacao, las pérdidas tienden a aumentar y la potencia útil disminuye. Esto se debe a que al haber menos masa que absorba la energía proporcionada, esta energía se disipa, ocasionando un aumento de pérdidas a lo largo del tiempo.

### 3.3 Pruebas con el tostador

Antes de empezar con las pruebas, se tiene que orientar el reflecto Scheffler con dirección norte-sur solar. Para esto se utiliza una herramienta especial ya que el norte-sur solar es diferente al norte-sur magnético que nos indicaría una brújula. Luego de esto, con un pedazo de plancha se ubica de la mejor manera posible el foco del reflector, asegurándose que todos los rayos solares estén debidamente concentrados (Figura 3.4). Para este efecto, es necesario utilizar implementos de seguridad, tales como gafas oscuras (de preferencia de soldador).

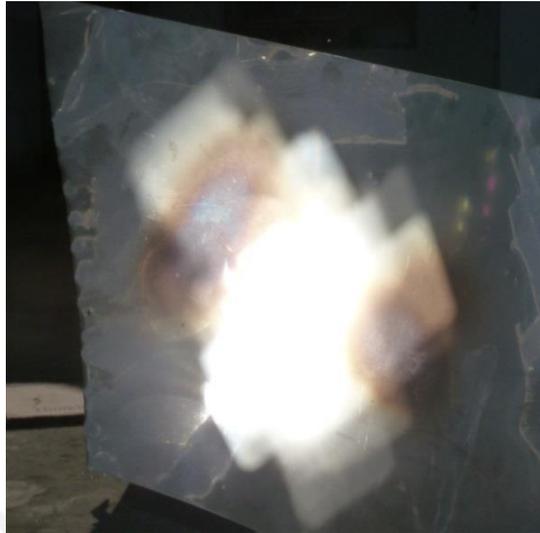


Figura 3.4: Ubicación del foco del reflector Scheffler [Elaboración propia]

Luego de obtener un foco de aproximadamente 35 cm de diámetro, se coloca el tostador en una mesa de manera que el foco del reflector Scheffler se encuentra en el segundo reflector de la máquina. Se coloca la olla en el tostador y ya se está listo para empezar con las pruebas. Se puede apreciar este paso en la Figura 3.5.



Figura 3.5: Foco del Scheffler en el tostador [Elaboración propia]

Luego de enfocar el Scheffler en el segundo reflector del tostador, con la olla ya puesta, se espera un tiempo de precalentamiento de aproximadamente 5 minutos, hasta que la basa de la olla supere los 200 °C. Luego de esto, se coloca la cantidad de granos de cacao que se tostará para la prueba y se enciende el motor. Se espera el tiempo conveniente para que se tueste todo de la forma correcta. Una vez terminado

con este proceso, se retira la olla y con los granos todavía calientes ya se tiene el producto tostado para seguir con su procesamiento hasta convertirse en chocolate.

### 3.3.1 Parámetros a considerar

Durante las pruebas hay parámetros que se deben tomar en cuenta. Estos son los siguientes:

- La ubicación donde se realizan las pruebas. Para este caso, todas las pruebas realizadas fueron en Huyro-Cusco.
- La fecha, específicamente la hora y el mes.
- La hora inicial y final de la prueba.
- Peso inicial y final del cacao.
- Velocidad de rotación de las paletas.
- Temperaturas en la base de la olla y en los granos de cacao al momento del tostado. Esto se mide con Termocuplas y un medidor infrarrojo.
- Irradiancia global e indirecta medidas con un radiómetro.
- Tiempo del crack y tiempo final del tostado medidos con un cronómetro.

Todos estos datos se recopilan en tablas de manera que luego puedan ser procesados. Para este caso se utilizaron dos tablas. En la primera se colocan todos los datos generales como: ubicación, fecha, hora de inicio y fin, peso inicial, velocidad de rotación de las paletas, temperatura inicial. En la segunda se colocan los datos tomados a lo largo del tiempo como: temperatura del cacao, de la base de la olla, irradiancias, tiempo.

Para el caso de la toma de los tiempos, primero se veía la temperatura e inmediatamente el tiempo, para así tener un valor de temperatura en el tiempo exacto.

En la Tabla 3.2: Datos de prueba 1 [Elaboración propia] se ve un ejemplo de los datos iniciales y los datos durante la prueba que se toman en una prueba. Para este caso, estos datos son de la prueba número 1.

PRUEBA 1	
Ubicación	Cusco-Huyro
Fecha	11/11/2014
Hora	10:08
Peso inicial	3 kg
Revoluciones (rpm)	27

Tiempo min	T prom. de granos °C	T prom de olla °C	Irrd promedio W/m <sup>2</sup>	Comentarios
1.00		248	888.75	Pre calentamiento
2.00		255	888.75	Pre calentamiento
2.50		263	888.75	Pre calentamiento
3.33		272	888.75	Pre calentamiento
7.00			888.75	Ingreso de cacao
9.00	54.67	235		
11.75				
12.50	82.67	242.5	899.27	
14.50	86.33			Olor
15.58	90.33			
16.42	96.00			
17.50	99.00	263		
19.17	103.50			
20.50				Crack
21.25	112.00	275		
22.67	115.00			
23.33			938.37	Crack
25.67	124.67	279.5		
27.42	126.00			Crack
28.83	129.50			
31.00	135.50		933.86	Crack
33.00	140.00			Crack
34.67	143.50			Termino de prueba

Tabla 3.2: Datos de prueba 1 [Elaboración propia]

Los datos tomados en cuenta son las temperaturas de la olla en el precalentamiento, y en los granos de cacao durante el tostado. Asimismo se tomaba nota de la radiación solar cada cierto tiempo y se agrega algún comentario según sea necesario.

Se puede notar que en el precalentamiento se superó los 270 °C en la olla. También se empezó a sentir un olor muy fuerte muy pronto se ingresó el cacao, y se escucharon varios sonidos de crack casi toda la segunda mitad del proceso.

De la misma manera, se realizó una prueba con datos iniciales similares, pero con el doble de masa, 6 kg. Los datos se muestran en la Tabla 3.3

Tiempo	Temperatura promedio de los granos	Temperatura promedio de la olla	Irradiancia directa promedio	Comentarios
min	°C	°C	W/m <sup>2</sup>	
1.33333333		<b>196</b>	<b>932.36</b>	Precalentamiento
3.25		<b>255</b>	<b>932.36</b>	Precalentamiento
5.16666667		<b>277</b>	<b>932.36</b>	Precalentamiento
7			<b>941.38</b>	Ingreso de cacao (6kg)
8.83333333	<b>40.67</b>			
10.75	<b>49.33</b>			
12	<b>53</b>			
14	<b>54.5</b>			Problemas con mecanismo
20	<b>67</b>			
21.16666667	<b>68.83</b>			
22.25	<b>72.95</b>			
23.5	<b>75</b>			
24.83333333		<b>224</b>		
25.66666667	<b>81.2</b>		<b>923.33</b>	
27	<b>84.17</b>			
28.41666667	<b>84.03</b>			
29.66666667	<b>89.77</b>			
31.33333333	<b>93.9</b>			
33.25	<b>96</b>			
35.5	<b>98</b>		<b>920.33</b>	Olor
38.58333333	<b>102.8</b>			
40				Crack
41	<b>108</b>			

43.3333333	<b>110.5</b>			
44.6666667	<b>113.5</b>			Olor, humo
46.4166667	<b>114.25</b>			
48.1666667	<b>116.5</b>			
50	<b>117.5</b>			Acomodo de Scheffler
52.8333333	<b>118.5</b>			
<b>54.5</b>	<b>119.5</b>			
56.75	<b>122.5</b>			
59.1666667	<b>127.5</b>			
61.5	<b>128.5</b>		<b>903.78</b>	
64.5833333	<b>132</b>			Problemas con mecanismo
70	<b>139.5</b>			
72	<b>141</b>			Fin de tostado

Tabla 3.3: Datos prueba 2 [Elaboración propia]

En esta prueba se tuvo algunos inconvenientes, ya que el mecanismo empezó a rozar la tapa y no la dejaba en una posición fija, sino que rotaba junto con las paletas.

También, como esta prueba duró poco más de una hora, el reflector Scheffler tuvo que ser acomodado para el foco siga apuntando directamente al segundo reflector del tostador. Hay que tener especial atención a esto para tratar de no perder la utilización de ningún rayo solar. A pesar de esto la prueba fue exitosa y los granos de cacao llegaron a ser tostados.

### 3.4 Análisis de pruebas

Para poder analizar los resultados se elabora curvas sobre los datos recogidos. Estas curvas se realizan tomando los datos en función del tiempo (Figura 3.6 y Figura 3.7)

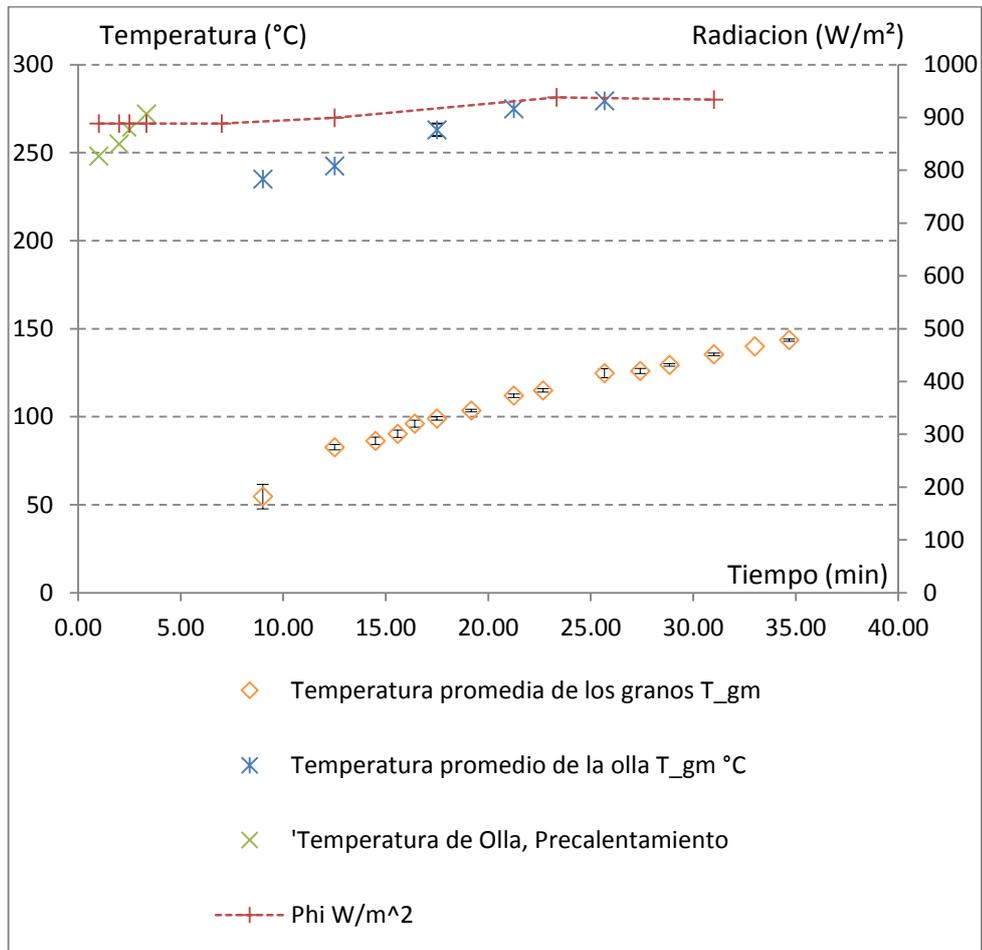


Figura 3.6: Gráfico prueba 1 [Elaboración propia]

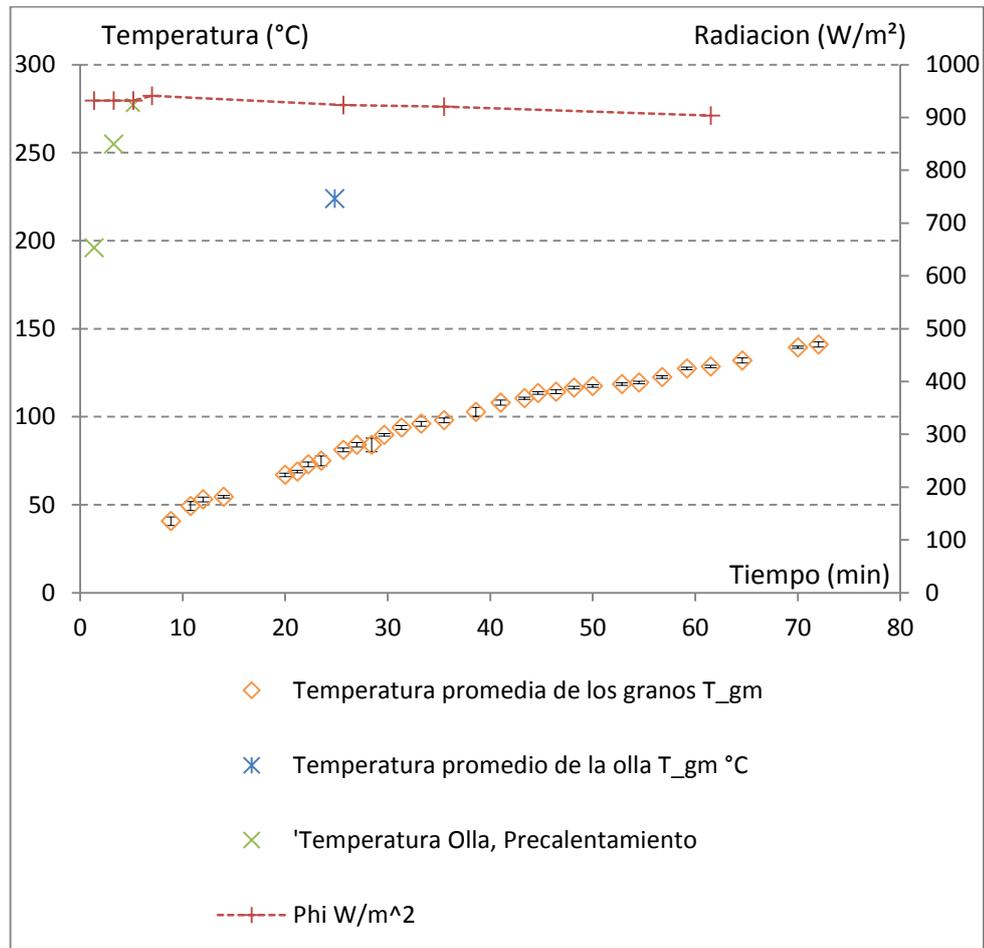


Figura 3.7: Gráfico prueba 2 [Elaboración propia]

En ambas figuras, las líneas negras junto a los puntos naranja que representan la temperatura de los granos, representan la variación de la temperatura de los granos, ya que en cada medición se mide la temperatura a por lo menos tres granos. Con esto se puede notar que a lo largo del tiempo, todos los granos de cacao elevan su temperatura uniformemente.

De la misma manera, se puede ver que la temperatura de la olla durante el precalentamiento se eleva muy rápidamente, casi de igual manera en ambas pruebas. Esto tiene que ver con que el material de la olla utilizado es el mismo en las dos pruebas, y es un buen conductor.

En la prueba 1 se midió la temperatura promedio de la olla durante el tostado. Se puede ver que la temperatura aumenta casi con la misma pendiente que con la que aumentan los granos de cacao.

También se puede ver que la radiación a lo largo de las pruebas es casi constante, siendo en promedio  $900\text{W/m}^2$  lo que facilita el tostado haciéndolo un proceso más estable.

### 3.5 Efecto de la radiación

Como última prueba, se intentó tostar 3 kg de cacao, pero la prueba no fue exitosa. Esto fue debido a la presencia de nubes durante el proceso, que disminuyen considerablemente la radiación directa. En la Figura 3.8 se muestra un gráfico con los datos medidos en función del tiempo de esta tercera prueba.

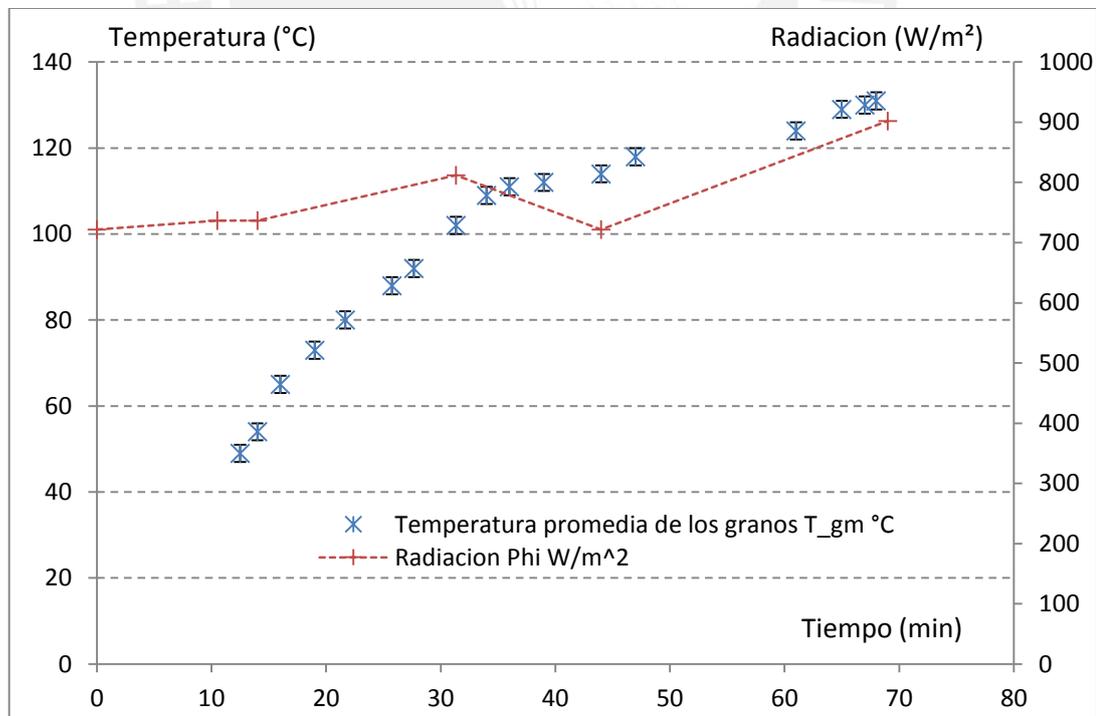


Figura 3.8: Gráfico prueba 3 [Elaboración propia]

Se puede notar que la radiación no es uniforme a lo largo del tiempo, esto debido a que habían muchas nubes en el cielo bloqueando los rayos solares, provocando en algunos casos que la radiación directa disminuya considerablemente. Además, como la radiación es menor respecto a las pruebas anteriores, la pendiente del aumento de la temperatura también es menor. Con esto se puede decir que a mayor radiación solar, más rápido será el tostado de los granos de cacao. De la misma manera, se puede aproximar a que si se tiene una radiación menor a  $700 \text{ W/m}^2$ , difícilmente se podrá llegar a un tostado correcto.

### 3.6 Comparación simulación-pruebas

Se toman los datos de la simulación y de la prueba donde se tostaron 6kg de cacao y se comparan con un gráfico (Figura 3.9). Sin tomar en cuenta el tiempo de precalentamiento, se ve que los valores de uno con el otro son parecidos siguiendo la misma tendencia.

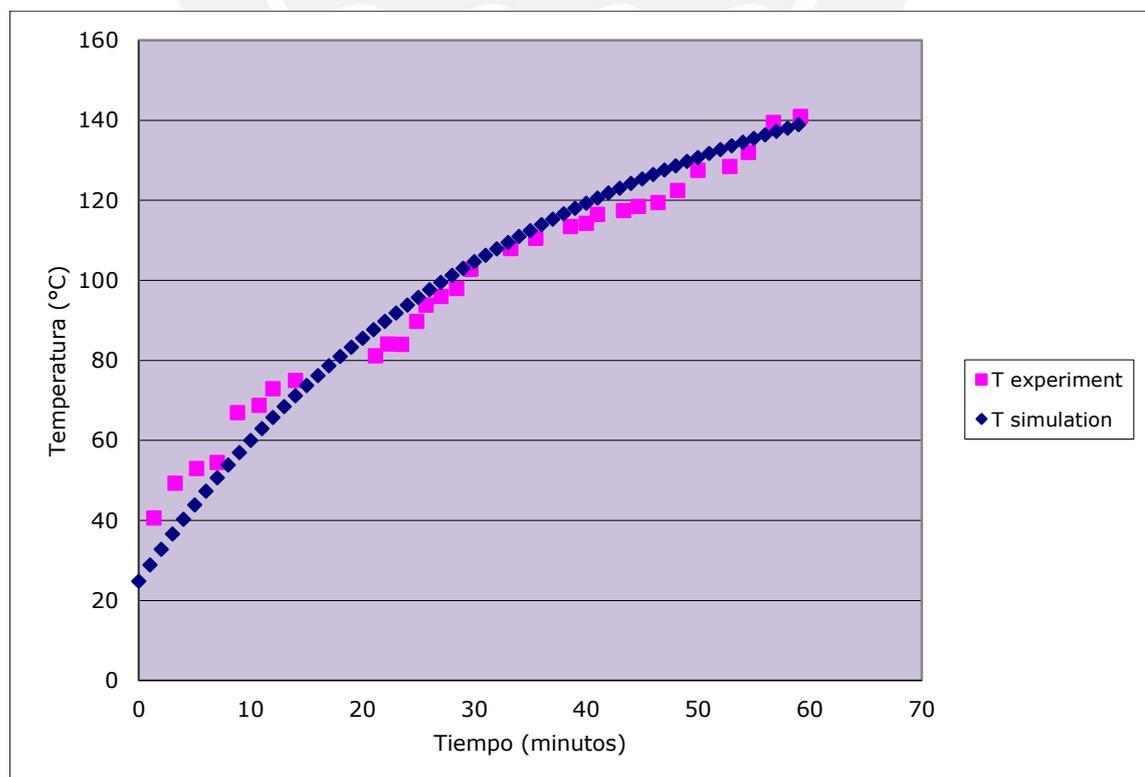


Figura 3.9: Comparación simulación-prueba [Elaboración propia]

## CONCLUSIONES

- i. Con este trabajo de tesis se demuestra que se puede tostar granos de cacao con energía solar concentrada. En este caso se llegó a tostar 3kg en aproximadamente una 30 minutos (sin contar el tiempo de precalentamiento), así como también 6kg en aproximadamente una hora.
- ii. El tostador cumple con la condición de funcionar con energía solar, ya que tanto que tostado, como el mecanismo de mezclado funcionan con esta forma de energía. De esta manera el equipo puede ser utilizada en zonas donde no es fácil conseguir otras fuentes de energía.
- iii. El tostador ha sido diseñado para que pueda ser fabricado y ensamblado en talleres de metalmecánica, ya que todos los componentes son fácil de fabricar y/o adquirir en el mercado local.
- iv. La máquina es de fácil utilización, pero es necesario tener implementos de seguridad como lentes oscuros y guantes de soldador, a fin de evitar quemaduras y problemas con la vista del operario.
- v. La buena selección de materiales permite aprovechar al máximo la energía disponible, tanto de la olla como del aislante. La fibra de vidrio como recubrimiento fue la mejor opción debido a su fácil disponibilidad, bajo costo y fácil amoldamiento a la olla. De la misma manera, el material del segundo reflector, aluminio anodizado, resulto ser un excelente reflector ya que produce una mínima cantidad de pérdidas ópticas y energéticas.
- vi. A pesar de que se pudo tostar 6kg en una hora, lo ideal es tostar en pequeñas cantidades, ya que existe la posibilidad de que aparezcan nubes e imposibilite la

continuidad del tostado. Así se asegura que se va tostado correctamente todo el cacao que se tiene.

- vii. La comparación entre la simulación vs las pruebas del tostado de granos de cacao indican que en este caso, la teoría se acerca mucho a la realidad.



## REFERENCIAS

PLUA, Juan

2008 “Diseño de una línea procesadora de pasta de cacao artesanal”.  
*Revista tecnológica ESPOL*. Guayaquil, Ecuador. Consulta: 4 de  
junio de 2014.

<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/2400/1/4740.pdf>

SCHEFFLER, Wolfgang

2014 [http://www.solare-  
bruecke.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2&Itemid  
=2&lang=es](http://www.solare-bruecke.org/index.php?option=com_content&view=article&id=2&Itemid=2&lang=es) (último acceso: 15 de junio de 2014)

OELHER, Ulrich

“The use of indigenous materials for solar conversion” *Solar energy  
materials and solar cells* 33, Basel, Suiza 1994: 379-387.

RATTIGAN, Dan

<http://rehappening.com/?p=1604> (último acceso: 10 de noviembre de  
2014)

STINE, William

Power from the Sun.

<http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter02/chapter02.html> (último  
acceso: 15 de octubre de 2014)

DUFFIE, John A.

2013 “Solar Engineering of Thermal Processes” Cuarta Edición. Hoboken,  
New Jersey: John Wiley & Sons, Inc

VEYNANDT, Francois

2012 Design of a solar coffee roaster for rural áreas. Version 1

MINISTERIO DE AGRICULTURA

2003 “Caracterización de las zonas productoras de cacao en el Perú y su  
competitividad” Informe Final. Lima: Pro amazonia

E. Toolbox

2013 The Engineering Toolbox.  
[http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\\_429.html](http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html)  
(último acceso: Noviembre de 2014)

RUSSELL, Fraser

2008 “Mass and Heat Transfer”. New York: Cambridge University Press

LEIBFRIED U

1995 “Convective Heat Loss from Upward and Downward-Facing Cavity  
Solar Recivers: Measurements and Calculations”. Lorrach Asme,  
Journal of Solar Energy Engineering. Volumen 117, pp. 75-84

MIÑANO, Juan

2014 Óptica Anidólica. Curso Libre presentado por la Sección Física.  
Consulta 29 de setiembre del 2014.

FABBRI, Angelo

2011 “Numerical modeling of heat and mass transfer during coffee roasting  
process”. Journal of Food Engineering 105, pp. 264-269

