

Proyecto IntiKallana
Tostador solar de café para el desarrollo de las
zonas rurales en el Perú

Julien Delcol
Luis Miguel Hadzich
Juan Pablo Perez Panduro
Sandra Graciela Vergara Dávila
Francois Veynandt

Febrero 2012 - Agosto 2012

Índice general

1. Antecedentes y estado de la tecnología	4
1.1. La situación socio-económica de las zonas rurales	4
1.2. Concentrador Solar tipo Scheffler	5
1.2.1. Funcionamiento	5
1.2.2. Aplicación	7
1.3. Café	8
1.3.1. Desde el café cerezo al café molido	8
1.3.2. Tostado/Torrefacción	8
2. Diseño del tostador solar	10
2.1. Medida de la potencia y el rendimiento del concentrador	10
2.2. Diseño Técnico	11
2.2.1. Modelo físico	11
2.2.1.1. Modelo térmico	11
2.2.1.2. Parámetros del modelo	11
2.2.1.3. Cálculos del balance energético	12
2.2.1.4. Valores de los parámetros	13
2.2.1.5. Modelo óptico	13
2.2.1.6. Resistencias térmicas	16
2.2.1.7. Resultados	21
2.2.2. Los Puntos de mediciones	23
2.2.3. Pruebas	24
2.2.4. Análisis de los resultados	25
2.3. Influencia de parámetros generales	26
2.3.1. El nivel de tostado	26
2.3.2. Influencia de la radiación	26
2.3.3. La cantidad de café	29
2.4. Especificaciones	31
2.4.1. Tamaño del tambor	31
2.4.2. Homogeneidad del tostado	33
2.4.2.1. Lluvia	34
2.4.2.2. Cama	35
2.4.2.3. Paletas	35
2.4.2.4. La rotación del tambor (velocidad)	40

2.4.3.	Sistema mecánico de rotación del tambor	41
2.4.4.	Estructura de soporte y funcionamiento	42
2.4.4.1.	Permitir la adecuación de los diferentes tamaños de prototipos:	43
2.4.4.2.	Proporcionar una base sólida y estable durante el proceso de tostado:	43
2.4.4.3.	Poseer la capacidad de variar su altura.	43
2.4.4.4.	Permitir la variación de la inclinación del eje del tambor.	44
2.4.4.5.	Soportar las condiciones climatológicas.	44
2.4.4.6.	Contar con espacio suficiente para instalar elementos extras (interruptores, motores, controladores, etc)	44
2.4.4.7.	Ser capaz de contener el sistema de enfriamiento del café.	44
2.4.4.8.	Facilitar el ingreso y la extracción de café antes y después del tostado.	44
2.4.5.	El material	45
2.4.6.	Aislante	47
2.4.7.	Vidrio	51
2.4.8.	Inclinación	51
2.4.9.	Mejora de la óptica	52
2.5.	Conclusión	57

Introducción

Este proyecto se dedica al desarrollo de un proceso de producción de café ecológico, desde su cultivo hasta su consumo en taza. Para poder llegar a esto, se concentra en el proceso de tostado del café, el cual debe contar con una tecnología accesible al sector rural: robusta, simple para un mantenimiento local y basada en energía que no dañe el medio ambiente.

La energía local tradicionalmente usada es la leña, gas, electricidad, etc. La energía solar es una fuente disponible, la cual puede ser usada para el tostado de café, a partir del conocimiento adquirido se identificó que se necesita una temperatura alrededor de 200°C para lograrlo. Un concentrador solar es la tecnología capaz de elevar la temperatura hasta dicho nivel, aprovechando la energía del sol, que cumple con las exigencias establecidas para el proyecto: es libre, robusta, simple, económica y replicable. Existen diversos tipos de concentradores para los diferentes tipos de demanda, pero el concentrador solar tipo Reflector Scheffler es el elegido, es una sección de un paraboloide formada por espejos puesto sobre una estructura metálica que gira sobre su eje, que a su vez es paralelo al eje rotacional de la tierra, permitiendo tener un foco fijo durante todos los días del año y es, en este foco fijo, donde se concentra los rayos solares. Este inteligente diseño es muy práctico para aplicaciones descentralizadas de pequeña potencia.

A partir de este concentrador, se diseñó un tostador con apoyo de la literatura, trabajos e investigaciones previas. Se contó con un modelo físico el cual ayuda a entender el comportamiento del sistema.

Capítulo 1

Antecedentes y estado de la tecnología

1.1. La situación socio-económica de las zonas rurales

En el Perú existe una enorme brecha entre el crecimiento económico y la desigualdad social. Las tasas de pobreza siguen siendo muy elevadas, especialmente en las zonas rurales: 36 % de la población vive por debajo del umbral de la pobreza y el 13 % en extrema pobreza. En la región andina, la pobreza golpea a veces hasta un 80 % de la población. Esto se debe principalmente a la falta de acceso a la participación en la toma de decisiones, la educación, la salud y los recursos productivos de la población rurales.ref: COSUDE - Perú

Para reducir las brechas sociales y proporcionar una mejor vida para los residentes rurales existen proyectos que se llevan a cabo tanto a nivel nacional e internacional. En el plano nacional, el Perú está llevando a cabo una serie de programas para apoyar la creación de empresas locales y mejorar el acceso a la educación y la comunicación (ref: PNUD PERÚ - Lucha contra la Pobreza). En el ámbito internacional existen múltiples proyectos que provienen principalmente de Estados Unidos y Europa, así como también con asociaciones de Francia, que ofrecen ayuda al Perú para la reducción de la pobreza y la lucha contra el cambio climático (ref: Francia y Perú - Francia-diplomacia-Ministerio de Asuntos Exteriores). Casi todos los programas están dedicados a las áreas rurales que son las más afectadas, estos buscan responder a las principales necesidades de estas poblaciones como son: la mejora de la calidad de vida y la adquisición de un trabajo decente que les permita acceder a la educación, la salud, la comunicación y las necesidades secundarias, alrededor del 70 % de la mano de obra rural son agricultores (ref: PERÚ Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI), con ingresos relativamente bajos.

Una contribución tecnológica a su proceso de cultivo podría reducir el trabajo

doméstico y dar valor agregado a su producción. Asociaciones como El Grupo de Apoyo al Sector Rural de la Pontificia Universidad Católica del Perú (GRUPO-PUCP) se crearon con el fin de trabajar para mejorar la situación de la sociedad peruana del sector rural.

1.2. Concentrador Solar tipo Scheffler

La concentración de energía solar, a diferencia de las otras tecnologías a partir del sol, permite alcanzar temperaturas elevadas para distintos usos y aplicaciones.

El ingeniero Wolfgang Scheffler inventó, hace 25 años, este tipo de concentrador solar. Este se diferencia principalmente del resto por la ubicación del punto focal en donde se concentra el calor, el cual se encuentra en un punto fijo fuera de la sección del paraboloide, en la mayoría de las tecnologías de concentración, el foco se mueve en función de la posición del sol, pero gracias a esta tecnología, sólo la sección del paraboloide conformada por espejos se mueve para recibir la radiación directa del sol concentrándolo en un punto fijo, lo cual representa una gran ventaja para facilitar el funcionamiento del concentrador en ciertos procesos.

Existen varios tamaños de concentradores solares tipo Scheffler y estos varían según el tipo de aplicación, el tamaño depende del área cubierta por la sección del paraboloide y puede ser de $2m^2$, $2.7 m^2$, $8m^2$, $10m^2$, etc. Para este proyecto se utilizó un concentrador Scheffler de $2.7m^2$.

1.2.1. Funcionamiento¹

El reflector es una sección lateral pequeña de un paraboloide redondo bastante más grande. Debido al trazo de corte inclinado se crea el contorno elíptico típico del concentrador Scheffler. La luz reflejada por esta sección del paraboloide incide lateralmente en el foco ligeramente alejado de ésta. El eje para el seguimiento horario se encuentra en dirección norte-sur, paralelo al eje terrestre, pasando por el centro de gravedad del reflector. Así siempre está en equilibrio y el mecanismo de seguimiento solar sólo debe ser accionado con poca fuerza para girarlo de forma sincronizada con el sol. Para que el foco no se desplace, éste se encuentra paralelo al eje de rotacional del planeta.1.2.1

La luz concentrada sólo girará alrededor de su propio centro a lo largo del día, pero no se moverá lateralmente en ninguna dirección. Es decir, el foco se mantiene fijo, lo que naturalmente resulta práctico, para diversas aplicaciones.

En el transcurso de las estaciones anuales varía el ángulo de incidencia de la radiación solar en $\pm 23,5^\circ$ en relación con la vertical respecto al eje terrestre. Todo el paraboloide también deberá inclinarse en idéntico ángulo, ya que debe mantenerse orientado hacia el sol, sino resulta imposible conseguir una concentración del foco. No obstante, el punto medio del reflector y la posición del foco no deben moverse bajo ningún concepto.1.2.2

¹Información e imágenes extraídas de <http://www.solare-bruecke.org>

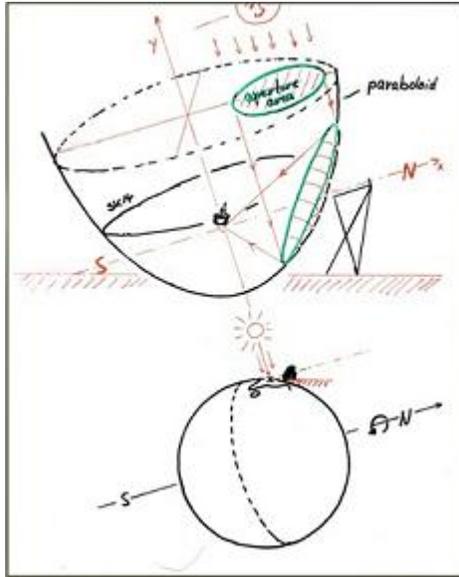


Figura 1.2.1: Paraboloide - Scheffler

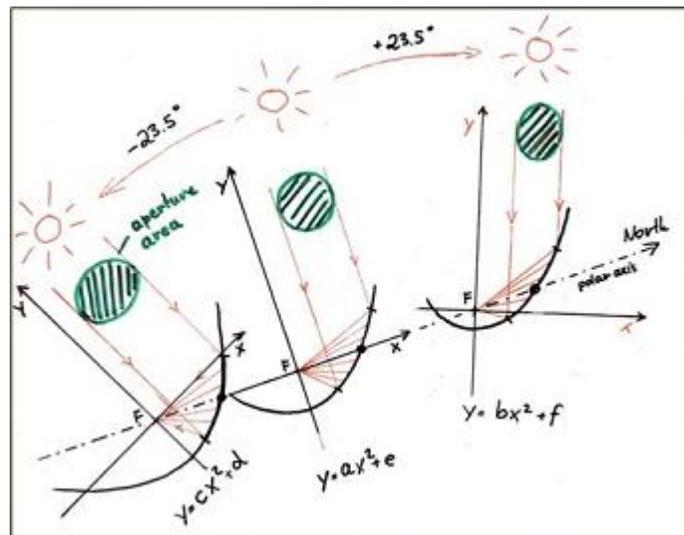


Figura 1.2.2: Ajuste estacional

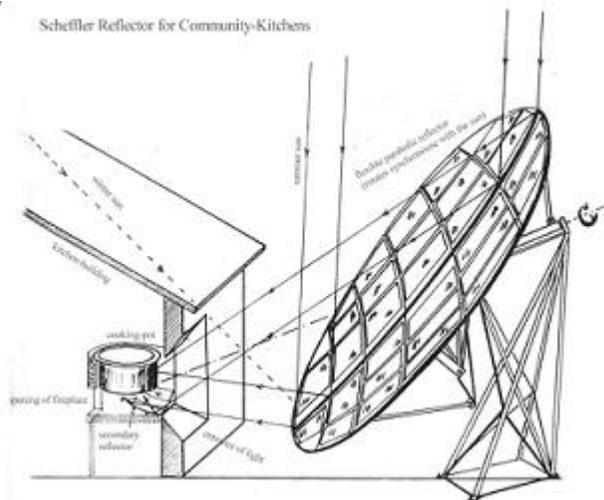


Figura 1.2.3: Cocina solar con el reflector Scheffler

Esto sólo es realizable cuando el reflector está basado para cada ángulo solar dependiente de las estaciones, esto es, para cada día del año, en una parábola diferente. O sea que el espejo debe variar su forma. El bastidor del reflector Scheffler se construye para el punto equinoccial. Así, a través de la inclinación y deformación elástica del bastidor del reflector, se pueden ajustar de forma suficientemente exacta todas las demás parábolas.

1.2.2. Aplicación

El concentrador Scheffler se utiliza principalmente para cocinar en países en vías de desarrollo en donde existen zonas que carecen de electricidad y combustibles fósiles, este principio contribuye con la reducción de la deforestación, debido a que la leña es el principal insumo que se usa para cocinar.

Se puede colocar el concentrador al exterior de una casa, la cual tendrá una abertura situada en la pared de la cocina, así que el punto focal se encontrará dentro de la casa, como se muestra en la figura. 1.2.3.

Otro uso del concentrador Scheffler es para la generación de vapor para proporcionar energía en una cocina de gran tamaño, un ejemplo notable es la construcción de la cocina solar más grande del mundo en Abu Road, en Rajastán, a cargo de Brahma Kumaris, su costo es relativamente bajo (100.000 €) para toda la instalación de la superficie reflectante de 800m² del sistema. La cocina puede ser utilizado por 18000 personas, lo que equivale a 5,5 € por persona, logrando de esta manera, ahorrar 400 litros de diésel. Adicionalmente se usa en la fabricación de mantequilla de nuez en Burkina Faso, para la acumulación de energía y generar electricidad. Desde 1987, se instaló más de 200 cocinas solares, un tercio de estas son reflectores Scheffler de 8m² en las escuelas de internado en

distintas zonas rurales del mundo.ref: Solare Brücke Die-Scheffler Reflektoren

1.3. Café

1.3.1. Desde el café cerezo al café molido

Antes de hacerse un café listo para tomar, muchos procesos son necesarios. Podemos distinguir cinco principales.

Cosecha: El primer paso es obtener los frutos de café, llamadas "cerezos" formado por dos semillas. En el Perú, la cosecha se realiza manualmente, debido a las dificultades del terreno y las máquinas de alto costo, sin embargo, con la cosecha manual se puede seleccionar los cerezos maduros con mayor precisión.

Despulpado: Los granos son extraídos de la cereza de dos modos. Por el método seco de dejar que las cerezas al sol unos días para después quitarle la cáscara o por el método húmedo con un despulpador, que elimina la pulpa y dirige los granos a una olla de agua donde se lavan y se clasifican.

Fermentación: Proceso en el cual se eliminan las trazas que quedan de mucílago después del despulpado.

Secado: El café contiene una alta humedad que se debe secar antes de tostar. Durante este proceso, el agricultor esparce el café sobre un área grande al sol y el tiempo de secado depende la radiación solar, la humedad del aire y el clima. Al final de este procedimiento el café reduce su contenido de humedad al 12%. Cuando el café está seco, se deben pelar de nuevo para quitar una cáscara más delgada que rodea cada grano.

Tostado: La torrefacción es decisiva y determina la calidad final del café. Esquemáticamente durante la cocción se implementa complejas reacciones químicas que producen, entre otras cosas, sabores y el color marrón característico del café.

Embalaje: Por último, el café se muele y se envasa al vacío para garantizar su conservación o también se puede vender a granel bien conservado para preservar aromas y sabor.

1.3.2. Tostado/Torrefacción

La torrefacción es tostar los granos para liberar los aromas del café, esta es una operación muy delicada que puede sublimar o dejar sin efecto la calidad del café. Durante el tostado el grano cambia gradualmente de verde a marrón oscuro.

Para iniciar el proceso de tostado, se introduce una cantidad de café determinada dependiendo de la potencia del tostador y el volumen del tambor. Mientras que el café se va tostando se pierde la cáscara que rodea a cada uno de los granos de café.

Hay cuatro fases distintas durante el tostado, el primero es el secado de café que consiste en hacer ingresar al tambor los granos de café que contienen de 11 % a 12 % de humedad hasta reducirlo a 1 %. Para lograrlo, el café se somete a

una temperatura que aumenta a medida que el café pierde la humedad, durante este tiempo de calentamiento, el café rota constantemente en el tambor que contiene aletas con el propósito de homogeneizar el calor. Se puede distinguir el final de esta fase cuando la temperatura alcanza 160°C, por lo general, esta fase tarda 7 minutos dependiendo del tipo de café, así como su nivel de humedad antes de tostar.

En la segunda fase, se producen reacciones químicas que proporciona al café todos sus sabores y características. La temperatura del café alcanza 180 °C, haciéndolo cambiar de color a un marrón más fuerte. Se puede observar los gases que son emitidos por el café causado por estas reacciones químicas, en este punto el olor del café tostado se puede sentir con facilidad.

Después aparece la tercera fase, en donde se inicia el ruido emitido por el café, conocido como el primer “crack”, este ruido es fácilmente audible y nos informa sobre el estado del café. Por lo general, después del primer “crack” se deja al café de 2 a 3 minutos más en el tostador. En esta fase se inicia una reacción exotérmica, el propio café libera energía porque no hay formación de enlaces en el interior del grano. Para no quemar el café durante esta fase, es necesario reducir la cantidad de energía térmica entregada, de lo contrario se puede esperar altas temperaturas que traen como resultado daños en el café. Si se habla de un primer “crack”, es porque también se puede llegar al segundo. Para algunos tipos de café, es necesario llegar al segundo “crack” para un buen tostado, pero para la mayoría de tipos de café, es mejor retirarlo antes de llegar a este.

Finalmente, se entra en la última fase, que consiste en la extracción del café. Un experto es esencial para saber exactamente cuándo se debe extraer el café. Para ello, el tostador maestro, se basa en la curva de temperatura durante el proceso, el tiempo en que se llegó al primer “crack”, del color del café y el brillo.

Capítulo 2

Diseño del tostador solar

2.1. Medida de la potencia y el rendimiento del concentrador

La característica de particular interés es la potencia que puede entregar el concentrador. Como vimos anteriormente, la potencia cambia con las estaciones, debido a la variación de la apertura. La máxima apertura de la proyección de la paraboloide es el 21 de junio en el hemisferio norte y el 21 de diciembre en el hemisferio sur (2,35 m²).

El cálculo exacto de la potencia es imposible de determinar debido a las inexactitudes de la posición de los espejos, por lo que se realizó un test para medirla. La prueba consiste en colocar una olla negra de agua en el punto focal. Gracias a la variación de la temperatura, es posible de calcular la energía y por lo tanto determinar la potencia.

Existen otros factores que influyen en la prueba como la limpieza de los espejos y si se utiliza un reflector secundario. Se realizó una prueba para cada configuración con el propósito de conocer los cambios en el rendimiento del concentrador.

Se realizó un ensayo con todos los espejos limpios para reducir las pérdidas de reflexión, sin reflector secundario para no tener las pérdidas de energía por el rendimiento del reflector y un contenedor de negro para una máxima absorción. La prueba consiste en hervir 500 ml de agua en 3 minutos y 30 segundos con una irradiación directa que va desde 729W/m² a 662W/m².

La prueba se realiza de la siguiente manera: en primer lugar, se calcula la energía de los primeros 30 segundos cuando la temperatura se incrementa de 34 °C a 49 °C. Para eso, hay que multiplicar la diferencia de temperatura entre el valor calorífico y la masa:

$$E = \Delta T \cdot C \cdot m$$

$$E = (49 - 34) \times 4185 \times 0,5$$

Cuadro 2.1: Tamaño de cilindros considerados

Tambor	D (m)	L (m)	S_p (m^2)	V (m^3)
grande	0.36	0.28	0.42	0.0285
médium	0.25	0.275	0.27	0.0135
pequeño	0.2	0.23	0.18	0.0072

$$E = 31388 J$$

tenemos una energía absorbida por el agua de 31 388 Joules.

$$P = \frac{E}{t}$$

$$P = \frac{31388}{30}$$

$$P = 1046 W$$

Podemos concluir que el concentrador Scheffler puede dar una potencia de 1046W con una irradiación de 662W/m², el 22 de marzo en Lima.

2.2. Diseño Técnico

2.2.1. Modelo físico

2.2.1.1. Modelo térmico

El modelo térmico es muy simplificado, una potencia solar (P_{sol}) entra y es parcialmente absorbida (P_{abs}). Una parte de esta potencia se pierde por:

- convección por la apertura P_{cv} ,
- conducción a través del aislante y convección con el medio ambiente al exterior del cilindro P_{cd-cv} ,
- radiación por la apertura P_{ir} .

El resto P_u puede ser usado para calentar y tostar el café. El balance energético escribe así:

$$P_u = P_{abs} - (P_{ir} + P_{cv} + P_{cd-cv})$$

2.2.1.2. Parámetros del modelo

Geometría Consideramos varios tambores cilíndricos de diámetro D , de superficie de pared S_p con una apertura de superficie $S_a = \frac{\pi}{4} \times 0.2^2 = 0.0314 m^2$ a un lado.

Propiedades térmicas

Propiedades de la radiación La pared interior del cilindro está compuesta de dos partes:

- una parte reflectante, al fondo del cilindro. Tiene una reflectividad $\rho_f = 0.8$
- una parte que puede ser negra, alrededor del cilindro. Su absorptividad es $\alpha_p = 0.8$ y su emisividad $\epsilon_p = 0.8$.

Propiedades de la pared El cilindro tiene una capa de aislante de espesor e variable y de conductividad térmica $\lambda = 0.04 W/m.K$. Al exterior el coeficiente de convección con el medio ambiente es puesto a $h_p = 10 W/m^2.K$.

Propiedades de la apertura El apertura del cilindro es en contacto directo con el aire ambiente. El coeficiente de convección considerado es $h_a = 20 W/m^2.K$.

Temperaturas La temperatura ambiente es $T_{amb} = 300 K$. La temperatura al interior del cilindro T_{int} es aproximadamente la temperatura del café.

2.2.1.3. Cálculos del balance energético

Evaluación de la potencia solar absorbida La potencia del sol directo es tomada a $P_{sol} = 800 W/m^2$.

Para facilitar los cálculos se realizan aproximaciones, por ejemplo cuando el 70 % toca la pared alrededor del cilindro, la diferencia toca el fondo donde puede ser absorbido o reflejado. Si se refleja, el 80 % toca la pared alrededor y el 20 % sale del cilindro y se pierde.

Con los parámetros ópticos aproximados, podemos evaluar la potencia solar absorbida por el tostador. Añadimos un coeficiente de transmisión de esta potencia al café: 80 %. Al final tenemos $P_{abs} = 495 W$, la potencia solar útil, absorbida por el café.

Evaluación de las pérdidas

Flujo infrarrojo Las emisiones infrarrojas pueden ser evaluadas sobre la superficie de la apertura, con la temperatura interior y la emisividad definida:

$$P_{ir} = \epsilon S_a \sigma T_{int}^4$$

con $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2.K^4$ la constante de Stefan-Boltzman.

Convección por la apertura La convección por la apertura se escribe simplemente:

$$P_{cv} = h_a S_a (T_{int} - T_{amb})$$

Nombre	Símbolo	Valor (default)	Unidad
Potencia solar	P_{sol}	800	W/m^2
reflectividad	ρ	0.8	-
absortividad	α	0.8	-
factor de transmisión al café		0.8	-
Potencia absorbido por el café	P_{abs}	495.1	W
Temperatura ambiente	T_{amb}	300	K
Temperatura interior	T_{int}	473.15	K
Conductividad térmica aislante	λ	0.04	W/mK
espesor	e	0.02	m
Coefficiente de convección sobre la pared exterior	h_p	10	W/m^2K
Superficie de la pared	S_p	0.27	m^2
Perdidas cond+conv pared	P_{cd-cv}	77.9	W
Coefficiente de convección con la apertura	h_a	20	W/m^2K
Diámetro apertura		0.2	m
Superficie apertura	S_a	0.0314	m^2
Perdidas convección exterior	P_{cv}	46.0	W
emisividad	ϵ	0.8	-
sigma	σ	5.67E-08	W/m^2K^4
Perdidas IR	P_{ir}	27.63	W
Queda para el café	P_u	388.6	W

Cuadro 2.2: Valores y parámetros

Conducción y convección por la pared Las pérdidas por conducción a través la pared y convección sobre la superficie exterior se evalúan como sigue:

$$P_{cd-cv} = \frac{S_p}{\frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_p}} (T_{int} - T_{amb})$$

2.2.1.4. Valores de los parámetros

El cuadro 2.2 recapitula los valores de los parámetros y los resultados en una configuración específica.

2.2.1.5. Modelo óptico

Presentación del modelo óptico El software SolTrace permite estudiar el comportamiento óptico de varias geometrías de tostador. SolTrace es un herramienta para la simulación de radiación, que usa un rastreador de rayo fácil de usar, para la simulación óptica de los sistemas solares de concentración. Sol-

Ecuación de la parábola :		
$Z(x, y) = \frac{1}{2}(cx^2 + cy^2)$		
Distancia focal f (m)	0,8	
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

Cuadro 2.3: Parámetros de la parábola simulada como aproximación del concentrador Scheffler

Trace es desarrollado por el NREL, National Renewable Energy Laboratory de Estados Unidos.

La geometría del concentrador Scheffler se aproxima en el software por una porción de parábola similar al reflector, de sección rectangular con la misma superficie que el concentrador real. El cuadro 2.3 da los parámetros de la sección de parábola considerada. Así la forma y la potencia del cono de radiación incidente son parecidos a la realidad. La figura 2.2.1 representa el concentrador Scheffler simulado en SolTrace. El sol esta en su posición del equinoccio a mediodía, es decir con un ángulo desde la direccional vertical igual a la latitud: 12° . Su forma es gaussiana con parámetro 2.73 mrad.

Para tener propiedades ópticas cerca de la realidad, los espejos tienen una reflectividad $\rho_{espejo} = 0.8$. Los errores ópticos son de 2 tipos:

- errores de pendiente (slope error): 10 mrad
- errores de especularidad (specularity error): 15 mrad

Con esta geometría se obtiene un punto focal parecido a la realidad, permitiendo estudiar el comportamiento de varias geometrías, definidas con los parámetros enseñados sobre la figura 2.2.2:

- un pequeño tambor de 20 cm de diámetro
- un tambor mediano de 25 cm de diámetro
- un grande tambor de 36 cm de diámetro

El cuadro 2.4 da los detalles de las geometrías estudiados.

El cuadro 2.5 resume las propiedades ópticas de los materiales. El tambor tiene las propiedades típicas del acero inoxidable, con una reflectividad de $\rho_{metal} = 0.4$. Se busca evaluar el impacto de un vidrio en la parte frontal del tostador. El vidrio tiene una transmitividad $\tau_{vidrio} = 0.9$ y una reflectividad $\rho_{vidrio} = 0.1$. Los errores ópticos del metal y del vidrio son considerados bajos.

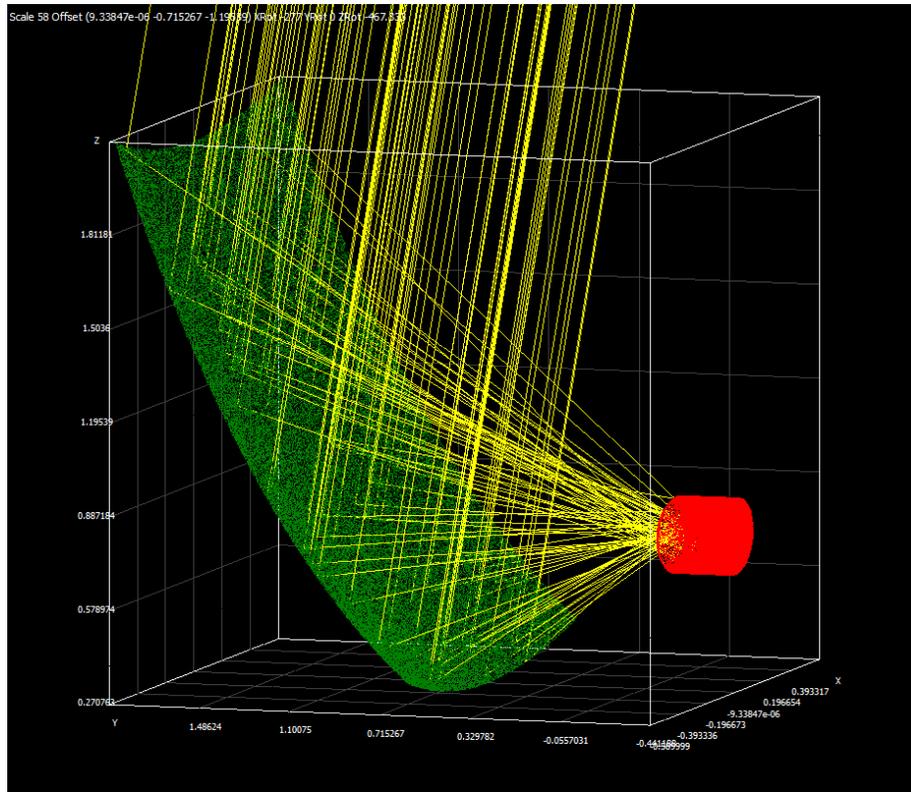


Figura 2.2.1: Vista del concentrador Scheffler (superficie verde) y del tambor (en rojo) simulados con SolTrace

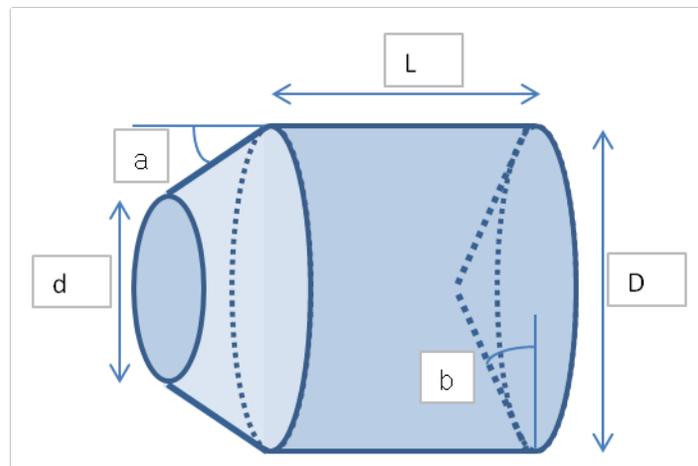


Figura 2.2.2: Geometría de los tostadores

Tamaño de tostador	Tambor			Cono adelante a (°)	Cono fondo b (°)
	D (m)	L (m)	d (m)		
Grande	0.36	0.2	0.2	45	0
Mediano	0.25	0.25	0.2	45	25
Pequeño	0.2	0.23	0.2	0	30

Cuadro 2.4: Parámetros de las varias geometrías de tostadores

Material	Reflectividad	Transmitividad	Error óptica (mrad)	
	ρ	τ	pendiente	especularidad
espejos del Scheffler	0,8		10	15
metal del tambor	0,4		0,95	0,2
vidrio	0,1	0,9	0,95	0,2

Cuadro 2.5: Propiedades ópticas de los materiales

Cada simulación es realizada con 1 millón de rayos y necesita alrededor de 10 segundos.

Resultados de las simulaciones ópticas En las simulaciones, la parábola intercepta $1875 \pm 2 W/m^2$ (la variabilidad estadística induce un error de 0.1 %), 20 % de la radiación se pierde por absorción sobre los espejos.

En comparación de la radiación normal directa (DNI) de $1000 W/m^2$,

2.2.1.6. Resistencias térmicas

A continuación se mostrará los cálculos e hipótesis para poder calcular las resistencias térmicas dentro del tostador, para luego ser usadas en el modelo físico del mismo.

Identificación de las resistencias térmicas en el interior del tambor del tostador En la siguiente figura 2.2.3 se muestra el modelo que se usará para poder identificar y luego calcular las resistencias térmicas. Donde:

- T_{ib} : Temperatura de la cama de café. (K)
- T_{ia} : Temperatura del aire al interior del tambor del tostador. (K)
- T_{ic} : Temperatura de un café al interior del tambor del tostador. (K)
- T_{p1} : Temperatura de un punto interior en el tambor del tostador. (K)
- T_{p2} : Temperatura de un punto interior en la cama de café. (K)

Cálculo de las resistencias térmicas



Figura 2.2.3: Resistencias térmicas

Cálculo de la resistencia R_{ab} Se usa el número de Rayleigh, el cual debe de ser mayor a 1708 para que la transferencia de calor se de principalmente por convección.

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_{ib}-T_{ia})L^3}{\alpha\nu} > 1708$$

Donde:

- g : Aceleración de la gravedad. (m/s^2)
- L : Longitud característica, en este caso es la longitud de la cama de café. (m)
- ν : Viscosidad cinemática. (m^2/s)
- α : Difusividad térmica. (m^2/s)
- β : Coeficiente de expansión térmica, $\beta = \frac{1}{T_m} \cdot (K^{-1})$

Para el cálculo de la longitud característica, se deduce la siguiente expresión que se obtiene a partir de la igualdad de áreas:

$$\pi r_i(\Delta V - \frac{\vartheta}{360}) = -\frac{1}{2} Seno(\vartheta)$$

Donde:

- r_i : Radio interior del tambor del tostador. (m)
- ΔV : Relación de volumen entre café y aire dentro del tambor del tostador.

- ϑ : Ángulo definido por la cama de café y medido desde el interior del tostador ($^\circ$).

Luego se procede a calcular el número de Nusselt con:

$$Nu_L = 0.069Ra_L^{\frac{1}{3}}Pr^{0.074} = \frac{h_{ab}L}{k}$$

Donde:

- Ra_L : Número de Rayleigh.
- Pr : Número de Prandtl.
- L : Longitud característica.(m)
- h_{ab} : Coeficiente de convección. ($kw/m^2.K$)
- k : Coeficiente conductivo del aire. ($kw/m.K$)

La resistencia R_{ab} se calcula con:

$$R_{ab} = \frac{1}{h_{ab}A} = \frac{1}{h_{ab}LH}$$

Donde:

- L : Longitud característica. (m)
- H : Largo del tambor del tostador. (m)

Cálculo de la resistencia R_{ac} Para el cálculo de esta resistencia térmica, primero se analiza cómo se comporta un grano de café dentro del tambor del tostador y luego se realiza una aproximación para una cantidad de granos contenidos en un volumen a tostar.

Se toma en cuenta las dimensiones aproximadas de un grano de café y se asume que tiene una forma elíptica identificando su semi-eje mayor y menor (ver figura 2.2.4). Así mismo al asumir una forma elíptica, se tiene una área máxima y mínima; para los cálculos se utilizará el área máxima, ya que esta influye más en el número de Reynolds (Re_{ac}) y en el coeficiente convectivo (h_{ac}).

Con estas medidas aproximadas se calcula el diámetro hidráulico máximo del café con $D_{hcmax} = \frac{4A_{cmax}}{P_{cmax}}$, en donde:

- A_{cmax} : Área máxima de un grano de café. (m^2)
- P_c : Perímetro máximo de un grano de café. (m)

Luego se calcula la velocidad con que cae un grano de café (V_c), asumiendo que este grano cae de una altura igual al diámetro interior del tambor del tostador, $V_c = \sqrt{2gd_i}$, donde:

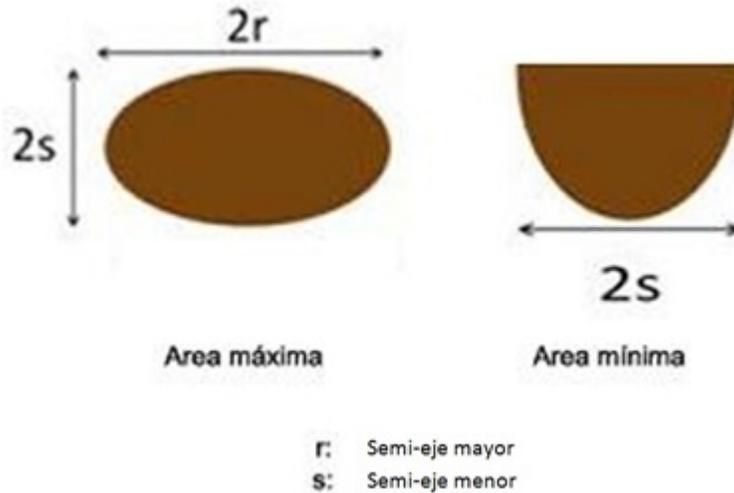


Figura 2.2.4: Dimensiones de un grano de café.

- g : Aceleración de la gravedad. (m/s^2)
- d_i : Diámetro interior del tambor del tostador. (m)

Una vez calcula la velocidad de un grano de café, se realiza el cálculo para el número de Reynolds (Re_{ac}), $Re_{ac} = \frac{\rho V_c D_{h_{cmax}}}{\mu}$, donde:

- μ : Viscosidad dinámica del aire. ($kg/m.s$)
- ρ : Densidad del aire. (kg/m^3)

Para el cálculo del número de Nusselt (Nu_{gs}) se utiliza la siguiente expresión, $Nu_{gs} = 2 + 0.58Re^{0.5}Pr^{0.33}$, y con el Nusselt calculado se podrá encontrar el coeficiente convectivo (h_{ac}), $h_{ac} = \frac{Nu_{gs}k}{D_{h_{cmax}}}$, donde:

- Pr : Número de Prandtl.
- k : Coeficiente conductivo del aire. ($kw/m.K$)

Los cálculos mostrados son para un grano de café, mientras que el interés es saber la resistencia térmica de una cierta cantidad de granos de café, para esto, se deduce la siguiente expresión con la cual se puede calcular el volumen de café (V_c) dentro del tambor del tostador. Luego con la densidad y el peso de un grano de café, se podrá hallar el número aproximado de granos de café.

$$V_c = \pi r_i^2 H(\Delta V)(\%C)$$

Donde:

- r_i : Radio interior del tambor del tostador. (m)
- H : Largo del tambor del tostador. (m)
- ΔV : Relación de volumen entre café y aire dentro del tostador.
- $\%C$: Porcentaje de volumen que aumenta el grano de café debido al calor.

Por lo tanto el número de granos ($\#GraCa$) de café en cierto volumen estaría dado por:

$$\#GraCa = \frac{(Vc)(\rho_c)}{m_{1c}}$$

Donde:

- ρ_c : Densidad de un grano de café. (kg/m^3)
- m_{1c} : Masa de un grano de café. (kg)

Para calcular la resistencia R_{ac} se deberá tomar en cuenta el número de granos de café, por eso dicha resistencia se calculará de la siguiente manera.

$$R_{ac} = \frac{1}{A_{min}h_{ac}\#GraCa}$$

Donde:

- A_{min} es el área mínima de un grano de café.

Cálculo de la resistencia R_{ap2} En el cálculo de esta resistencia, se debe tomar en cuenta la velocidad de rotación del tambor del tostador, ya que esta determinará una convección forzada, pero es necesario saber si es de régimen laminar o turbulento. Para esto verificaremos con el número de Reynolds (Re_{ap2}).

Para el cálculo de Re_{ap2} , se deberá primero calcular la velocidad tangencial en un punto interior del tambor del tostador, el cual se evalúa con: $V_t = w_t r_i$, donde:

- w_t : Velocidad angular de rotación del tambor de tostador. (rad/seg)
- r_i : Radio interior del tambor del tostador. (m)

Una vez determinada la velocidad tangencial, se usará la siguiente expresión para calcular el número de Reynolds:

$$Re_{ap2} = \frac{\rho V_t d_i}{\mu}$$

Donde:

- ρ : Densidad del aire dentro del tambor del tostador. (kg/m^3)
- μ : Viscosidad dinámica del aire dentro del tambor del tostador. ($kg/m.s$)

El número de Nusselt (Nu_{ap2}) se calculará con $Nu_{ap2} = 0.023Re_{ap2}^{0.8}Pr^{0.4}$, donde:

- Pr : Número de Prandtl.

Para calcular el coeficiente convectivo (h_{ap2}) usaremos: $h_{ap2} = \frac{Nu_{ap2}k}{d_i}$, donde:

- k : Coeficiente conductivo del aire. ($kw/m.K$)
- d_i : Diámetro interior del tambor del tostador. (m)

Y por último, la resistencia R_{ap2} será calculada con:

$$R_{ap2} = \frac{1}{h_{ap2}2\pi r_i H}$$

Donde:

- H : Largo del tambor del tostador. (m)

Cálculo de la resistencia R_{cp1} Como el café va a estar en constante movimiento, las temperaturas a lo largo de la cama de café van a ser muy parecidas. Entonces asumiendo que las temperaturas T_{ib} y T_{p1} son casi iguales, implicaría que la resistencia térmica R_{cp1} sería despreciable.

2.2.1.7. Resultados

Este modelo puede dar indicaciones sobre:

- la temperatura de equilibrio en una configuración, que es la temperatura máxima, o
- la potencia disponible a una temperatura definida.

Se puede ver la influencia de los parámetros sobre la eficiencia del tambor.

Temperatura de equilibrio de varias configuraciones La evaluación de la temperatura de equilibrio, ver cuadro 2.6, indica que solamente el pequeño tambor puede tostar sin aislante, porque se necesita llegar a 200°C. Las pruebas confirman que se puede tostar con este pequeño tambor, sin aislante. Pero no es eficiente tostar sin aislante porque la potencia útil es muy baja.

Las pruebas enseñan también que sin aislante, el tambor grande no llega a más de 120°C, lo cual tiene relación con el presente cálculo.

Con 2 cm de aislante, se nota una diferencia sustancial. El modelo predice que es posible de tostar café aun con el tambor grande.

Cuadro 2.6: Temperatura de equilibrio (Temperatura máxima) en °C de varias configuraciones

Tamaño \ Espesor de aislante (cm)	2 cm	0 cm
grande	290°C	120°C
medio	320°C	160°C
pequeño	340°C	200°C

Cuadro 2.7: Potencia util dependiente del espesor de aislante con una temperatura de café de 200°C

Tamaño \ Espesor de aislante (cm)	5 cm	2 cm	0 cm
grande	260 W	140 W	-410 W
medio	280 W	240 W	-150 W
pequeño	290 W	260 W	0 W

Influencia del aislante El aislante es necesario como se ve en el cuadro 2.7. Aún 2 cm influye en los resultados. Aumentando el espesor mejora un poco la eficiencia. Especialmente en el tambor grande la potencia útil casi llega a duplicarse con 5 cm en comparación de 2 cm. El tambor medio tiene una buena eficiencia aproximada al pequeño tambor, pero se necesita por lo menos 2 cm de aislante.

Influencia del coeficiente de convección con la apertura Si se dobla el coeficiente de 20 a $h_a = 40 W/m^2.K$, la temperatura de equilibrio en el ejemplo del cuadro 2.6 baja de 290°C hasta 230°C. La influencia es bastante importante. Evaluar más precisamente las pérdidas por la apertura es importante para obtener un modelo más preciso.

Influencia de la absortividad de la pared La potencia absorbida por el tambor P_{abs} varía bastante si la pared interior es reflectante. Con una absortividad de $\alpha_p = 0.2$ (y no 0.8) la potencia neta baja a $P_{abs} = 150 W$ (y no 495 W).

Esta análisis no toma en cuenta la absortividad del café, pero indica la importancia de absorber la luz para que no se refleja hacia afuera y perderse.

Repartición de las pérdidas Tomamos por ejemplo como caso 1 el tambor medio, a una temperatura de 200°C, con un aislante de 2 cm. Como se ve en el cuadro 2.8, aproximadamente la mitad de la potencia solar disponible es útil, 20 % se pierde por convección en la apertura, 15 % se pierde por infrarrojo y 15 % por conducción en la pared.

En el caso 2, tenemos el tambor grande en la misma configuración. Solamente las pérdidas por la pared suben de 50 % en comparación del caso 1.

Cuadro 2.8: Repartición de las pérdidas

	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	W	%	W	%	W	%
P_{abs}	500	100	500	100	500	100
P_{cd-cv}	80	16	120	24	30	6
P_{cv}	110	22	110	22	50	10
P_{ir}	70	14	70	14	30	6
P_u	240	48	190	38	390	78

En el caso 3, tenemos el tambor medio a una temperatura de 100°C. Se nota que las pérdidas infrarrojas son muy bajas (6%) así que las pérdidas por la pared (6%). La convección por la apertura contribuye a unas pérdidas de 10% de la potencia total. Casi 80% de la energía absorbida es útil.

2.2.2. Los Puntos de mediciones

Con el fin de evaluar la respuesta de café de acuerdo con diversos componentes y para calcular la eficiencia del tostador se implementó varios puntos de medición de acuerdo a la posibilidad y la pertinencia de cada uno.

Temperatura Para conocer la transferencia de calor que están presentes en el tambor, se identificaron varias temperaturas.

Para evaluar las pérdidas con el ambiente externo se debió conocer la temperatura ambiente y la temperatura de la pared exterior del tambor. Estas dos temperaturas se miden con termopares conectados a un multímetro. Se optó por este instrumento ya que estos puntos son fácilmente accesibles en el termopar.

La medición de la temperatura del café es más complicada debido a que este se encuentra en el interior del tambor girando, haciendo difícil poner un sensor de temperatura con un alambre. Por lo tanto, se eligió para medir la temperatura un pirómetro de infrarrojos. Para conocer con mayor precisión la distribución de calor en el tambor, ya sea la homogeneidad es muy respetado, y para identificar dónde están las pérdidas térmicas en el tambor se utilizó una cámara térmica. Con él, podemos identificar todos estos parámetros en la práctica.

La radiación directa, indirecta y total Es necesario medir la radiación solar, debido a que la potencia suministrada por el concentrador de Scheffler está directamente irradiado. Al igual que cualquier radiación de concentrador solar esta opera con la radiación solar directa. Para ello se utilizó una célula estándar. Así se puede saber la radiación global y haciendo sombra sobre la célula la radiación indirecta. A partir de la diferencia de estos valores se consigue la radiación directa. ($I_g = I_d + I_i$)

Peso / volumen de café Gran parte de la humedad se pierde en el café durante el tostado implicando una reducción de su masa. Durante este proceso también se puede observar que el volumen de café aumenta significativamente (50-100%). Para medir la masa del café se usa una balanza electrónica clásica, capaz de medir de 0 a 5 kg con una precisión de aproximadamente 2 g. Se ha elegido una escala de este tipo debido a que no es importante tener una medición muy precisa, sólo nos sirve para tener una idea de la masa de agua que se pierde durante el procedimiento.

En cuanto al volumen, se utilizó un cilindro graduado que permite tener una idea sobre el aumento de volumen durante el proceso. Siendo esencial para el tamaño del tostador.

Velocidad de rotación La velocidad de rotación es también importante cuando se tuesta. Esto influye en la homogeneidad de las pérdidas de calcinación y convección. Se optó por no comprar el equipo para la medición de la velocidad, ya que esta es relativamente baja, si la velocidad centrífuga es muy alta no se genera una buena mezcla ni tostado.

2.2.3. Pruebas

Organización durante la prueba La información en cada prueba será la fecha y hora, a fin de conocer la posición del sol para ese día; el tipo de café; su peso, antes y después del tueste; la temperatura; el prototipo utilizado, que incluye su tamaño, aislamiento, la forma de la aleta, etc; radiación directa, indirecta y general y finalmente la temperatura ambiente.

Durante la prueba, cada miembro del equipo tiene una o más tareas predefinidas para llevar a cabo.

- Medición del tiempo de asado y una advertencia cada 30 segundos para sincronizar todas las mediciones.
- Medición de la velocidad de la tostadora (primera prueba)
- Medición de la temperatura del café (cada treinta segundos)
- Medición de la temperatura en el interior del horno de tostación (cada treinta segundos)
- Medición de la radiación solar (cada treinta segundos)
- Control de calidad de café (cada treinta segundos después de la primera grieta)
- Escribir todas las observaciones e impresiones en la tabla de medición.

Parámetros Durante las pruebas hubieron parámetros que fueron considerados para recoger toda la información: hora, tiempo, radiación global normal, radiación directa, potencia solar colectada por el Reflector Scheffler, temperatura interna del tostador (termocupla), temperatura café en el tostador (cámara IR) y temperatura café en cuchara (cámara IR). Durante las pruebas se realizaron observaciones que se consideró relevantes para los resultados.

2.2.4. Análisis de los resultados

Varios criterios deben ser analizados después de cada prueba. Esto tiene como objetivo mejorar la eficiencia en el tostado, es decir:

- Reducir el tiempo de tostado sin afectar la calidad del café.
- Usar mayor cantidad de café sin afectar su homogeneidad.
- Aumentar su simplicidad.
- Reducir los riesgos para el operario durante el proceso.

Tiempo de tostado El tiempo de cocción es importante porque afecta directamente a la calidad del café y al mismo tiempo refleja la eficacia del tostador.

El tiempo de tostado se divide en diferentes fases, la primera fase donde hay pérdida de humedad del café. Durante la segunda fase, el café comienza a tomar un color marrón claro. La tercera fase comienza por un ruido que hace el café (crack) y termina con la extracción de café. Por último, la refrigeración. Cada una de estas fases debe ser demostrada para estudiar con precisión el comportamiento de cada café.

Las curvas de temperatura La curva se realizará tomando los datos cada 30 segundos, esto nos permite comprender mejor la reacción durante las fases de la torrefacción del café. Se puede evaluar la demanda de energía en función de cada fase y reducir así el tiempo de tostado.

Salida de café Para el control de la calidad durante el procedimiento

- Evaluar el momento de reducir la potencia de calefacción, quitar el tostador de café y empezar a enfriar. Este control es principalmente debido al color de café.
- El flujo de café es muy importante para obtener una buena homogeneidad, a través del diseño y la creación de modelos de aleta para mezclar el café.
- La principal dificultad es la fuente de energía que es sólo de la radiación, esto implica que todas las superficies en la sombra no obtendrá la energía directamente.

Un segundo control se realizará al final del tostado proceder a evaluar la calidad del café para saber realmente si la tostadora está funcionando correctamente. Los criterios de calidad son los siguientes:

- Color, será de color marrón oscuro (más o menos dependiendo de la petición del cliente)
- La ausencia de puntos negros en el café, de lo contrario es un tipo de fallo que puede ser observado por varias razones.
- La ausencia de aceite, si el petróleo aparece en el café, esto significa que el café se tuesta demasiado.

- La solidez de los granos de café, tenemos que romper el café en la mano en el centro de la misma. si no es posible, esto significa que el café tostado no es suficiente. Sin embargo, si es muy fácil y se rompió en varios pedazos que significa que es demasiado tostado.

2.3. Influencia de parámetros generales

Las pruebas que hemos hecho nos indican tendencias sobre el comportamiento del tostador solar.

2.3.1. El nivel de tostado

El nivel de tostado influye en el tiempo de tostado. Un café más marrón necesita mas tiempo que un café claro.

Hemos tratado de obtener un café siempre perfecto, según la muestra de referencia de la “Tostaduría Bisetti”. Pero hay variaciones, ya que para tostar se necesita de tener experiencia y estudios acerca de cómo tostar. Por ejemplo, la prueba 12 es más tostada que la prueba 3. Y la prueba 1 es la muestra más tostada, pero al final, el nivel de tostado va a depender del gusto del consumidor.

Sobre la figura 2.3.1 se ve un promedio de 17 % de perdida de masa entre el café antes del tostado (verde seco) y el café tostado. En algunas pruebas hemos obtenido mayores pérdidas y esto es por 2 razones:

- Falla mecánica: granos se perdieron en la etapa de extracción del café del tostador,
- Mayor nivel de tostado: en la prueba 1 y 12, por ejemplo, el café fue más tostado que en la mayoría de las pruebas.

2.3.2. Influencia de la radiación

La radiación es importante a la hora del tostado, pues es la medida que nos revela la cantidad de energía que estamos obteniendo del sol en determinado momento. Siendo el sol la principal y más importante fuente de energía para nuestro proceso de tostado, es indispensable analizar el efecto de éste sobre el proceso mismo. Es necesario hacer un análisis de que tan sensible es el tostado dependiendo de la radiación solar con miras a poder determinar cuales son las condiciones mínimas necesarias para un tostado uniforme y de buena calidad.

Analizando los resultados de la prueba 11 y la prueba 15, podemos observar el efecto de la radiación, al comparar 2 pruebas que tienen la mayoría de sus parámetros similares (a excepción del material del tambor). La prueba 11 demoró 17 minutos en tostar 750g de café con una radiación de 930 W/m², mientras que la prueba 15 demoró 29 minutos en tostar la misma cantidad de café, con una radiación de 750 W/m². Ambas pruebas fueron hechas con aislante y con tambores del mismo tamaño.

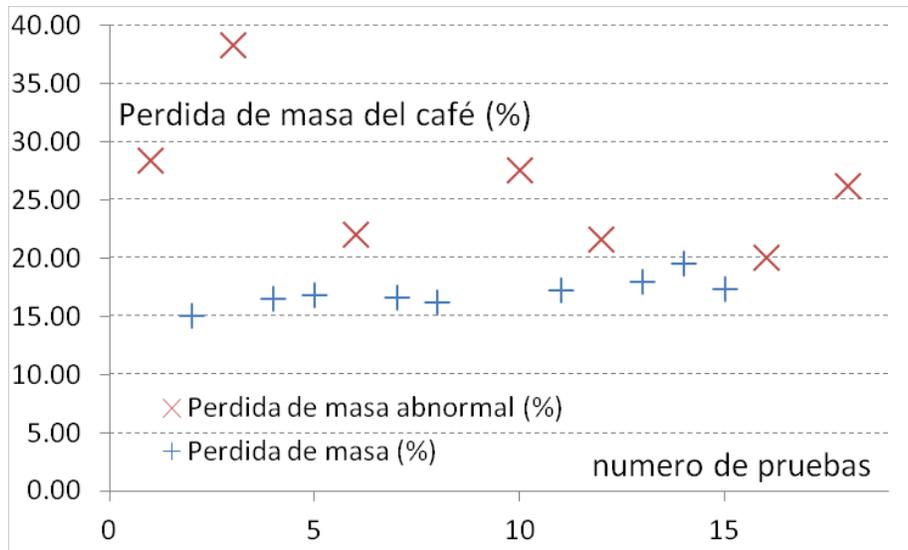
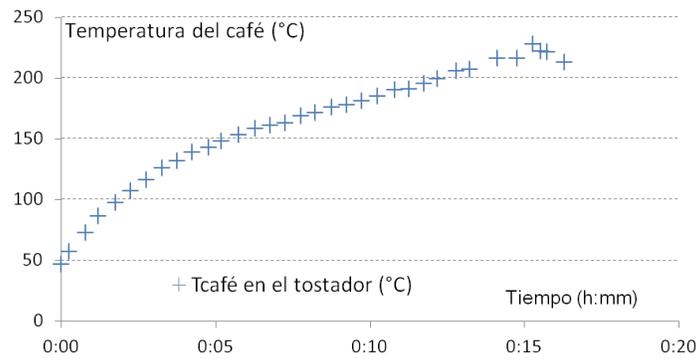
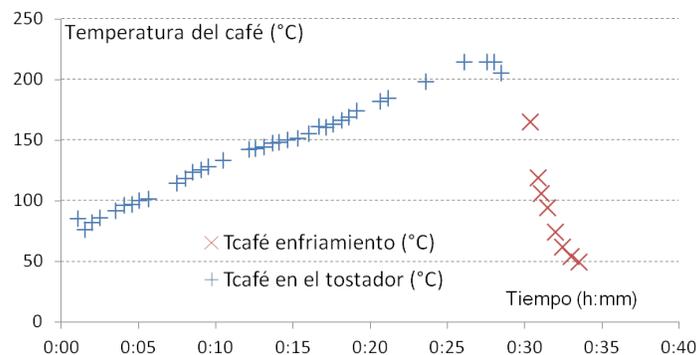


Figura 2.3.1: Perdida de masa entre el café verde y el café tostado

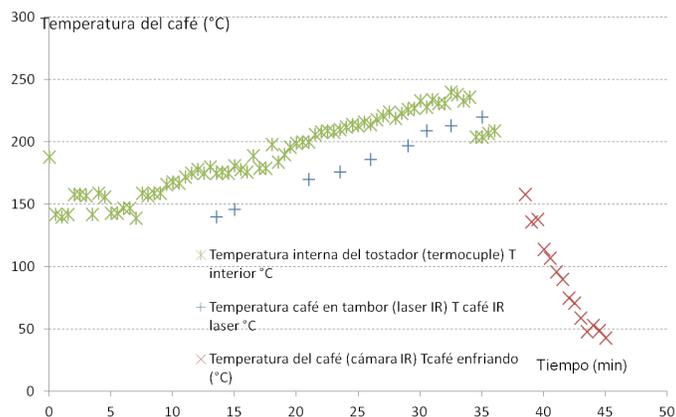


Resultados Prueba 11



Resultados Prueba 15

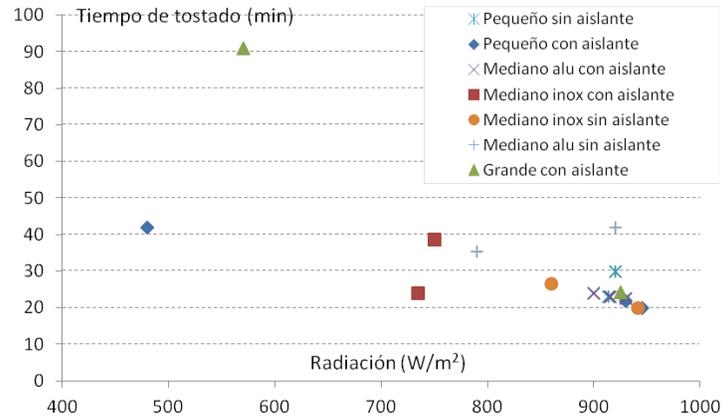
Comparando: Si comparamos ambos resultados con la prueba 13, en donde se trataron de mantener los mismos parámetros pero se aumentó el peso al doble (1500g), podemos observar que el tiempo de tostado de la prueba 13 es de 36 minutos con una radiación de 900 W/m², aproximadamente el doble de tiempo que la prueba 11. Sin embargo si comparamos la prueba 15 con la 13, podemos observar que la prueba 15 demoró solo 7 minutos menos en tostar la mitad del peso del café. Atribuimos esta diferencia, a la influencia de la radiación en la prueba.



Resultados Prueba 13

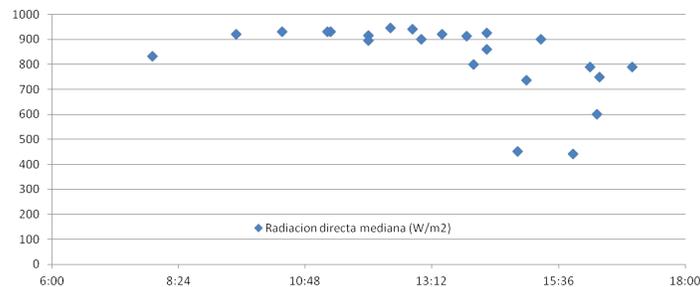
Conclusiones: En otro aspecto, hemos identificado que las pruebas hechas con una radiación menor a 600 W/m², difícilmente consiguen lograr el tostado del café, menos aún sin el uso de aislante. Aún en el caso de la prueba 17 que si lleva aislante, el tiempo de tostado de 1kg de café con una radiación 570 W/m²

fue muy dificultosa y tomo 91 minutos en tostar. Las demás pruebas sin aislante con menos de 600 W/m² de radiación, no llegaron a tostar (En la prueba 28 ni con 250g de café.). Sin embargo la prueba 18 sí logró tostar 500g con 480 W/m², debido al uso del vidrio. No obstante el uso del vidrio se descartó por cuestiones de diseño y mantenimiento.



Radiación vs Tiempo de tostado

Radiación Mediana: Cabe resaltar que la radiación registrada durante las pruebas fluctúa mayormente entre 700 W/m² y 950 W/m², lo cual proporciona un ambiente suficiente para el tostado de los granos de café. Finalmente podemos observar un cuadro con la radiación obtenida a lo largo de diferentes horas del día, usando como referencia las pruebas hechas:



Radiación mediana durante el día.

2.3.3. La cantidad de café

La cantidad de café influye en los parámetros más importantes en el tostado, es este valor el que define el tamaño de tostador a usar durante las pruebas y tiene una relación directa con la cantidad de radiación que se debe emplear

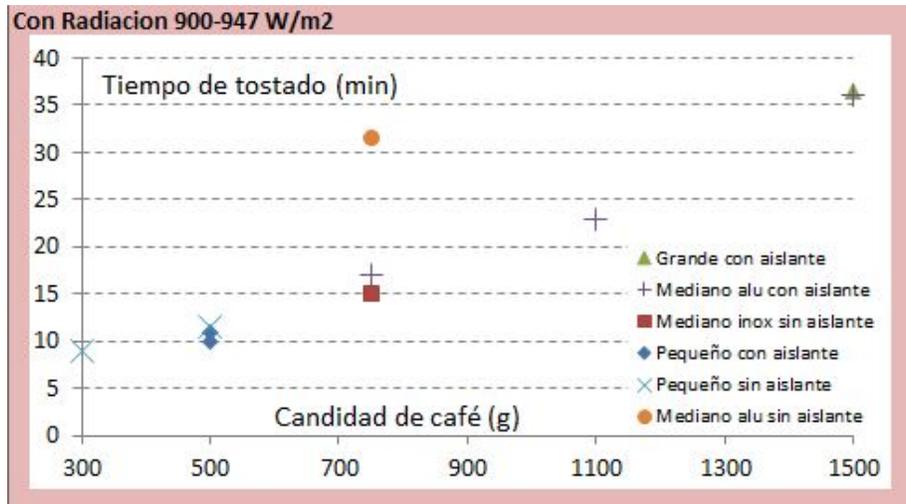


Figura 2.3.2: Tiempo para tostar (min) según cantidad de café (g), por radiación alta ($900 - 947 \text{ W/m}^2$)

para tener un tostado exitoso. A través de pruebas previas de potencia del concentrador Scheffler se pudo definir en promedio la cantidad de café a tostar partiendo de 500g por tanda. A continuación se estudian los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas en Cusco.

Como es de imaginarse la cantidad de café es un factor importante a considerar que dependiendo de este se tiene en cuenta la cantidad de tiempo de exposición a la radiación necesario, y el diseño del tambor. En la figura 2.3.2 se tiene la relación de tiempo de tostado con la cantidad de café aproximado.

La figura nos demuestra que el tiempo de tostado es directamente proporcional a la cantidad de café tostado cuando la radiación es de $900-947 \text{ W/m}^2$, que los tostadores pueden contener distintas cantidades de café dependiendo del rango pero cuando el límite superior es sobrepasado debe cambiarse por tostadores de tamaño apropiado. Los límites superiores de los tostadores pequeño y mediano son de 500 y 1100g de café. Es importante resaltar que según la gráfica existe una relación empírica de 24 min/kg de café, lo que indica que en promedio 1kg de café se tuesta en 24 minutos. El pequeño sin aislante no sigue la tendencia de la pendiente del gráfico que se puede explicar por el tamaño reducido de este tambor que limita las pérdidas térmicas, mientras que el mediano de aluminio sin aislante está totalmente fuera por necesitar más tiempo para tostar, según los resultados esto se debe a que el aluminio es mejor conductor de calor por lo tanto sí necesita aislamiento a diferencia del inoxidable.

2.4. Especificaciones

2.4.1. Tamaño del tambor

Es imperativo un tambor de buen tamaño para un buen rendimiento y obtener un buen tostado. Si el tamaño del tambor es muy pequeño el café puede caer a través de la apertura que permite la entrada de la luz, el volumen de café ocupará todo el espacio impidiendo una buena mezcla de café para una buena homogeneidad. Por el contrario, si el tamaño es demasiado grande se generará más pérdida debido a que el área de la superficie en contacto con el exterior será mayor y se necesitará mayor potencia no sólo para tostar el café sino también para calentar el aire en su interior. Así pues, para conocer el tamaño del tambor se debe tener en cuenta la cantidad de café la cual está directamente relacionada con la potencia disponible por el Scheffler. Las principales limitaciones en el tamaño del tambor son:

- La apertura del tambor que no puede ser inferior a 20 cm de diámetro (área de enfoque).
- El volumen debe ser relativamente grande, de modo que el café no puede caer.
- Se debe proporcionar una buena mezcla de café.
- No debe ser demasiado grande para no generar pérdida de calor.
- El café puede duplicar su volumen al ser tostado.

A partir de los ensayos anteriores obtuvimos que la potencia entregada por Scheffler era de 1 kW con lo cual según comparación con otros equipos en el mercado nos permitía tostar hasta 500g de café en 18 minutos aproximadamente, sin embargo, con un mejor diseño, aislamiento y aumentando el tiempo de exposición se podría tostar 1 kg, y con el nivel de radiación en Cusco se podría llegar a tostar 1500g aproximadamente. Para comprobar las hipótesis se adaptó un tambor pequeño comprado con medidas específicas (medidas: $\phi 20.9\text{ cm} \times 24\text{ cm}$) que en posición horizontal con vidrio se podía cargar hasta 250 gramos, identificado como prototipo pequeño, construyéndose luego prototipo mediano y prototipo grande.

Para el dimensionamiento se realizó un diseño básico orientado de forma horizontal para que los granos de café no caigan por la apertura como se puede apreciar en la figura 2.4.1, la constante r ya definida por el foco del Scheffler, mientras que el radio exterior del cilindro se identifica como la variable R y profundidad del cilindro como la variable L .

$$V_{café} = \frac{M_{café}}{\rho_{café}} \quad (2.4.1)$$

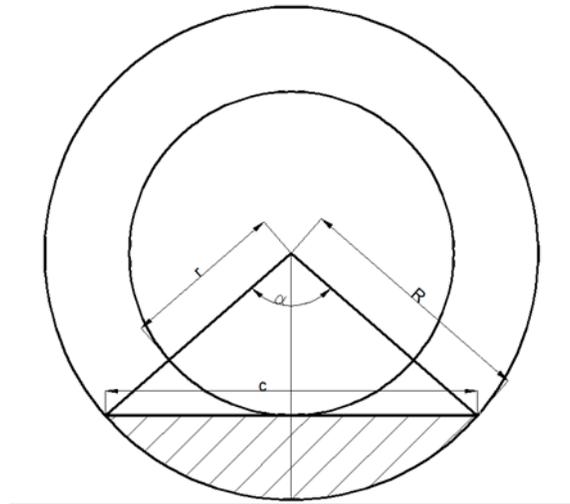


Figura 2.4.1: Dimensionamiento del tambor del tostador

$$L = \frac{V_{café}}{\left[\frac{\pi \cdot R^2 \cdot \left[2 \cdot \arcsin \left(\frac{\sqrt{R^2 - r^2}}{R} \right) \right]}{360} - \frac{\sqrt{4R^2 - 4r^2}(r)}{2} \right]} \quad (2.4.2)$$

Donde:

- Vcafé: volumen de café (m³)
- Mcafé: masa de café (kg)
- ρ: densidad de café (kg/m³)

Para definir las variables “R” y “L” se identifica la cantidad de café a ser tostado y debe considerar que la profundidad no debe ser muy corta ya que los rayos podría ser reflejados al exterior y no muy grande porque podría haber mayor pérdidas al interior del tambor. Se obtiene:

	R	L
Prototipo 2 (750 g)	25	25
Prototipo 3 (1000 gr)	36	28

Debido a que no se realizaron suficientes pruebas de los tambores sin inclinación y sin aislante se obtiene el gráfico 2.4.2 con influencia de esas variables,

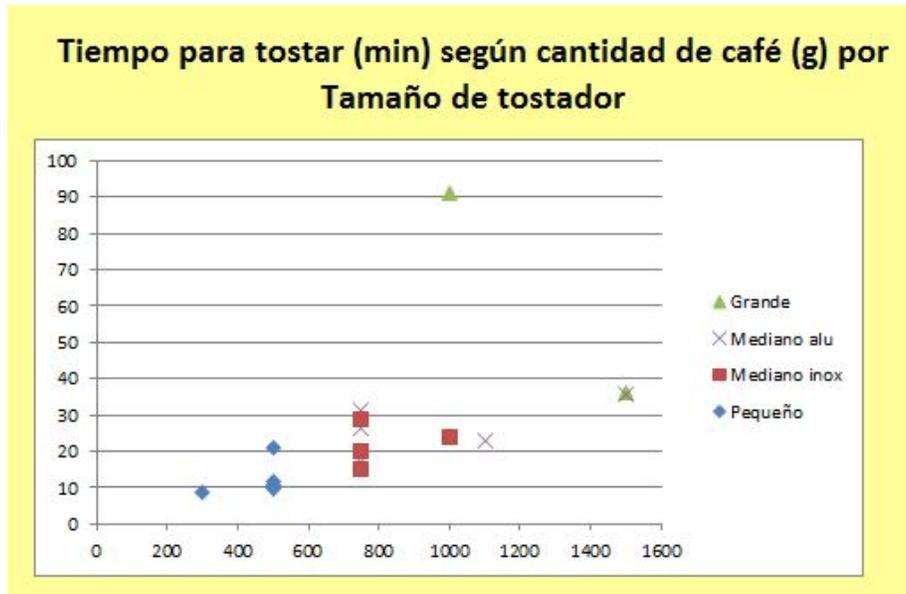
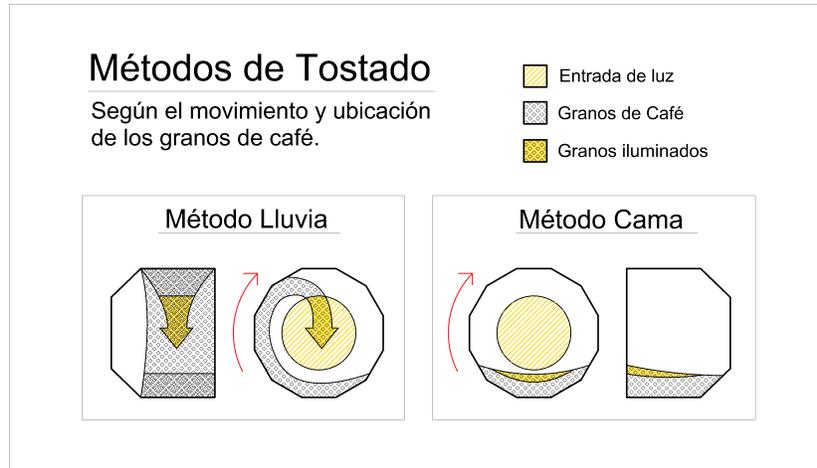


Figura 2.4.2: Tiempo para tostar vs radiación según tamaño de tostadores

se puede observar en esta gráfica, que a mayor tamaño hay una tendencia a más tiempo para el tostado y en los puntos en donde el tiempo es el mismo para distintos tamaños de prototipos se debe a la influencia de la inclinación que aumenta la capacidad de cantidad de café en el tambor.

2.4.2. Homogeneidad del tostado

Para lograr tostar los granos de café de manera homogénea, aumentando la eficiencia del sistema y aprovechando al máximo la energía solar que proviene del concentrador, se han planteado diferentes alternativas de movimiento, cada una con sus ventajas y desventajas respectivas. Para cada una de estas alternativas, se hicieron cálculos teóricos y se desarrollaron prototipos a escala real que fueron probados y validados con el concentrador tipo Scheffler de 2.7 metros cuadrados.



2.4.2.1. Lluvia

Este método consiste en posicionar los granos de café de manera constante y homogénea sobre el área de mayor concentración focal (Diámetro de 20cm ubicado en la parte central del cilindro). Para lograr este posicionamiento dentro del cilindro giratorio, es necesario trasladar los granos desde la base del cilindro hasta la parte superior, permitiendo su caída libre a través el área focal.

Con este movimiento, se busca que los granos de café estén mas dispersos dentro del tambor giratorio y estén en movimiento constante, evitando que puedan atascarse y por consiguiente, tostarse de manera dispereja. Al posicionar los granos en el área focal, se podrá aprovechar con mayor eficiencia la radiación directa del concentrador y el hecho que los granos se encuentren en constante movimiento ayudan a generar el efecto de fluidización que homogeneiza el calor en los granos de café. Para lograr este efecto, se realizaron pruebas con paletas interiores que permitieran el desplazamiento de los granos. Ver 2.4.2.3

Luego de varias pruebas, decidimos que este método no era muy eficiente, pues al momento de caer, los granos tenían un contacto muy fugaz con el área focal en donde se concentra la energía, asimismo, el tiempo requerido para trasladar los granos desde la parte inferior hasta la parte superior era tanto en comparación al tiempo de caída que los granos estaban mas tiempo en la sombra que bajo la luz. Esto no solo logra que el calor obtenido durante la caída se pierda durante el traslado a la posición superior, sino que el grano permanece demasiado tiempo en el mismo lugar, dando cabida a que el calor conducido por las paredes interiores del tambor solo incida en un mismo lugar durante todo el recorrido a la posición superior. Además, los granos no transferían el calor entre ellos tanto, debido a que estaban muy separados al momento de caer.

2.4.2.2. Cama

El objetivo de este método es el de mantener los granos de café en la parte inferior del cilindro, en constante movimiento y distribuidos de manera homogénea en la superficie.

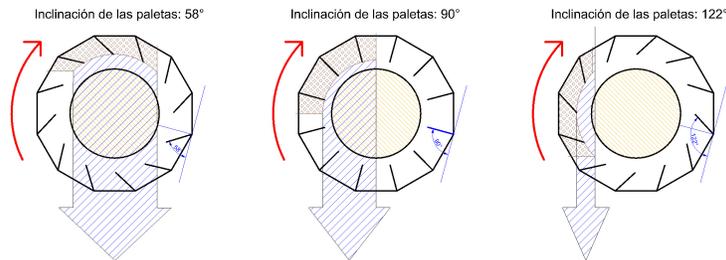
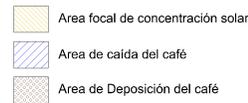
Con este movimiento, se busca un mejor control del flujo de los granos dentro del cilindro, evitando pérdidas por el agujero de entrada de calor y lograr que el área expuesta a la radiación sea de mayor superficie para aprovechar más la energía solar concentrada. Además, al estar en mayor contacto con la superficie interior del cilindro, se puede aprovechar la energía almacenada por el material del cilindro y transmitirlo hacia los granos de café por conducción. Los resultados obtenidos mediante este método fueron mas prometedores, pero fue necesario inclinar el tambor ligeramente para acumular los granos al fondo, donde el área focal incide mejor. Con este método, los granos se mantienen más tiempo siendo irradiados por el sol, al mismo tiempo que permanecen mas juntos, conduciendo calor inclusive entre ellos mismos. Otro beneficio de este método es que pueden obtener calor mediante la radiación directa al mismo tiempo que mediante las paredes interiores del tambor. No obstante, durante las pruebas, nos dimos cuenta que los granos de café que estaban más cerca al fondo del tambor, absorbían mas calor que los que estaban mas cerca a la entrada de luz. Por esta razón, decidimos que era óptimo un diseño de paletas que permitiera el traslado de los granos de café de atrás para adelante y de adelante para atrás. Ver 2.4.2.3. Solo de esta manera lograríamos una uniformidad en el tostado y en la distribución de calor.

2.4.2.3. Paletas

Inicialmente se diseñaron paletas simples que lograran trasladar los granos de café eficientemente desde la base del tambor, hasta la parte superior. Se realizaron cálculos para determinar la capacidad de estas paletas y la inclinación necesaria para lograr que en el método tipo lluvia (Ver 2.4.2.1) los granos cayeran aproximadamente en el área focal de incidencia de luz. El peso de café tomado como referencia para estas pruebas fue de 1kg.

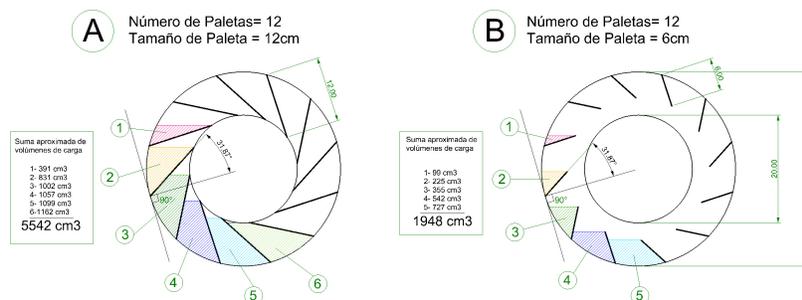
Area de caída según ángulo de inclinación de las paletas

**Este diagrama no contempla el movimiento inercial de los granos de café.



Cálculo de volumen de carga de café aproximado, según tamaño de paletas.

Volumen por 1KG de café tostado= 3460 cm³
(para una densidad aparente de café tostado de 289 kg/m³)



No obstante, cada prototipo, al tener un diámetro diferente y profundidades distintas, traía consigo unos requerimientos especiales para la elaboración de las paletas.

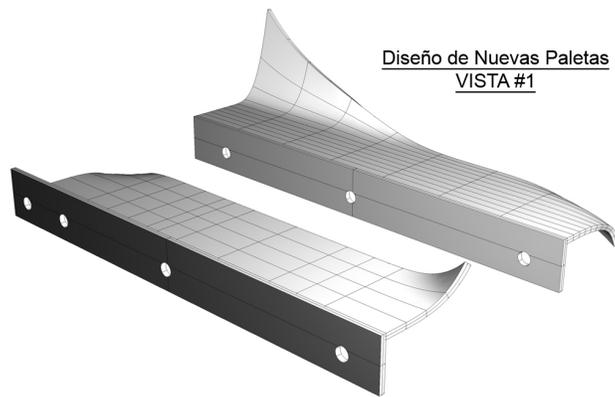
Las paletas calculadas en los diagramas anteriores fueron diseñadas para el prototipo mas grande, con el fin de probar la eficiencia de los métodos “lluvia” y “cama”, ya que las mismas paletas servían para ambas pruebas, dependiendo de la dirección de giro. En una dirección, las paletas levantaban los granos del café y éstos caían justo atravesando el área focal. Al girar el sentido de rotación,

las paletas actuaban como elementos que removían los granos de café en vez de levantarlos, creando una turbulencia adecuada, sin dispersar tanto los granos. Perfecto para probar el método tipo cama.

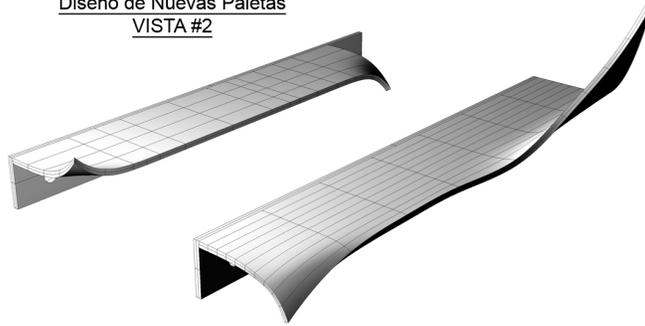
Como ya hemos visto anteriormente, nuestras pruebas nos llevaron a descartar el tipo “lluvia” y optar por el tipo “cama”.

No obstante encontramos que si bien el café se trasladaba de lado a lado en una turbulencia adecuada, no había un movimiento adecuado de atrás hacia adelante, lo cual causaba que los granos de café se dividieran en tres diferentes franjas de temperatura dentro del tambor. Esto generaba que los granos de café no se tostaran todos al mismo tiempo, llegando al extremo de tener granos verdes en una franja mas cercana a la entrada de luz y granos tostados en el fondo del tambor.

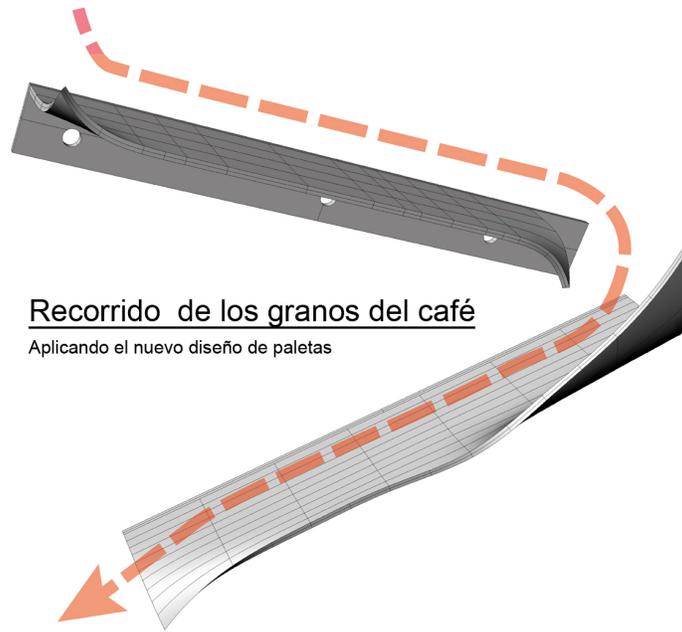
Conociendo ya este problema, para los últimos dos prototipos, se diseñaron paletas especiales que se encargarían de mover los granos de café tanto lateralmente como horizontalmente, eliminando las franjas de temperatura y homogeneizando el tostado. Se tomó como referencia características de las paletas construidas inicialmente para el primer prototipo (base ancha, inclinación vertical, dobleces en los extremos), las cuales en las pruebas demostraron excelente homogeneidad en el resultado. También se recogió la experiencia y las ventajas de las paletas del segundo prototipo, que demostraron ser mas fáciles de producir y calzar con mas precisión (evitando atascos de los granos de café, entre las paletas y el tambor).



Diseño de Nuevas Paletas
VISTA #2



Las nuevas paletas trajeron resultados positivos, reduciendo diferencias térmicas en el café y manteniendo el café en constante movimiento para evitar defectos en el tostado. Además, contribuyeron en desplazar la mayor cantidad de café hacia el fondo del tambor donde se concentra la incidencia de luz, pero al mismo tiempo traerlo hacia adelante cada cierto tiempo para que no se asiente en el fondo. Otro punto a favor de esto, es que posibilita el ingreso de más cantidad de café, pues la mayoría de los granos están siendo constantemente alejados de la entrada, evitando pérdidas y caídas de granos al exterior.



Recorrido de los granos del café
Aplicando el nuevo diseño de paletas



Fotografía de las paletas en acción, durante la tuesta de café.



Fotografía de las paletas en acción, durante la tuesta de cacao.

2.4.2.4. La rotación del tambor (velocidad)

La velocidad de rotación del tambor es la que determina por un lado la dirección y el trayecto que tendrán los granos de café, mientras que al mismo tiempo determina el tiempo durante el que estarán expuestos los mismos granos a la radiación solar concentrada. A medida que las revoluciones bajen, el café permanecerá mas tiempo en la zona de incidencia de la luz, provocando que reciba mas radiación y por lo tanto se tueste mas rápido. Este tiempo es muy importante, pues si está en contacto con la radiación por mucho tiempo sin moverse, el grano empezará a tostarse unicamente por el lado que apunta al reflector, logrando un tostado disparejo y acelerado que en muchas ocasiones no llega a penetrar el grano. Esto puede causar quemaduras superficiales que no solo afecten a un único grano, sino a todos aquellos que lo rodean.

Otro factor importante es el efecto de la velocidad en el movimiento de los granos, pues de ser muy rápida la rotación, los granos se quedarían pegados a las paredes internas del tambor debido a la fuerza centrífuga, manteniendo la misma posición durante el todo recorrido y exponiéndose a recibir calor unicamente por el lado que está en contacto con la pared interna. Esto podría causar el mismo efecto de quemaduras superficiales e igualmente afectar a los granos que lo rodean. Asimismo, para el método de tostado tipo “cama” es indispensable que los granos se mantengan en la base del tambor, pero en constante movimiento y turbulencia gracias a las paletas.

En las pruebas no hemos encontrado mucha diferencia en cómo la variación en RPM afectan el tostado del café, debido a que el margen de revoluciones entre los que podíamos trabajar era entre 9 RPM y 13 RPM, siendo la diferencia no muy significativa. Una velocidad mayor a 13 RPM pondría en riesgo el desplazamiento de los granos desde la base del tostador, empujándolo hacia las paredes donde la radiación no llega directamente. Por el contrario, una velocidad menor a 9 RPM no garantiza que el café eleve su temperatura interna al mismo tiempo que la externa, pues la incidencia de radiación sería muy súbita y superficial.

2.4.3. Sistema mecánico de rotación del tambor

Como se ve en los capítulos anteriores, el tambor debe girar para permitir que la mezcla de café en el tostado se realice lo más uniforme posible. La velocidad de rotación debe ser constante y relativamente baja durante el tostado. Sin embargo, debería ser posible tener un rango de ajuste de la velocidad, ya que si se varía las aletas utilizadas y la cantidad de café, es necesario que se gire más rápido o más lento. Después de varias pruebas en un modelo de cartulina que mide la velocidad adecuada para una buena mezcla de café, Se encontró un rango entre 1,5 a 11 RPM.

Motor alimentado por sistema fotovoltaico Es posible girar el eje del tambor del tostador por un motor y con esto se pondría garantizar una velocidad constante. Sin embargo, el sistema es más complicado y caro. Para tratar de reducir estos aspectos negativos vamos a ver cuál es la solución más barata y más fácil de instalar. Asimismo, se establecerá un sistema para generar electricidad para hacer funcionar el motor sin tener que depender de la red eléctrica, ya que en algunas regiones donde se produce el café es difícil tener acceso a la electricidad.

Dimensionamiento del motor

Calculo de la potencia de salida En primera lugar para saber qué motor se va elegir es imprescindible conocer la potencia que se necesita para hacer girar el eje. Esta potencia (P_u) es igual a:

$$C.P_u = \Omega$$

Donde:

- P_u : Potencia de salida (W)
- C : Torque (N.m)
- Ω : velocidad angular (rad / s)

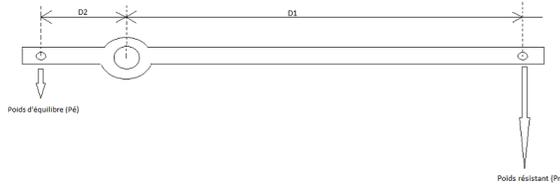


Figura 2.4.3: Calculo del torque del motor

En cuanto al torque:

$$C = F.d$$

Donde:

- F : Fuerza. (N)
- d : Distancia (m)

Para medir el torque, se instala un brazo de palanca sobre el eje del tambor, éste debe ser equilibrado horizontalmente, para lo cual se necesita colocar un peso Pe que equilibra el brazo de palanca. A continuación, se debe colocar un segundo peso Pr en el extremo del brazo de palanca. Este peso debe ser capaz de romper este equilibrio.

Para conocer el torque será suficiente multiplicar el peso Pr por la longitud del brazo de palanca D_1 . Así pues, tenemos el torque Cr en N.m. Véase la siguiente figura 2.4.3.

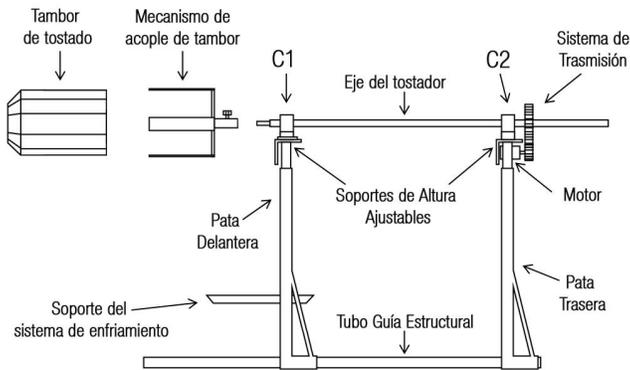
En nuestro caso $D_1 = 55\text{cm}$ y $Pr = 0,240\text{g} * 9,81$ $C = 2,35 * 0,55 = 1,29\text{N.m}$

Ahora con la velocidad angular del tambor y se obtiene la potencia requerida en el eje:

$$C.Pu = 1,29 * 1,15 = * = 1,5W$$

2.4.4. Estructura de soporte y funcionamiento

La estructura tiene como objetivo principal apoyar el sistema de giro del tambor (eje de rotación y motor). Sin embargo, fue diseñado para atender también a otras necesidades, entre las cuales se encuentran:



Esquema de los elementos del tostador

2.4.4.1. Permitir la adecuación de los diferentes tamaños de prototipos:

Para lograr esto, los diferentes prototipos de tostadores poseen un sistema único de conexión. Cada sistema cuenta con unos brazos en forma de “L” que se adecúan al diámetro del cilindro facetado y terminan al otro extremo en un único tubo redondo. Por el lado de los brazos, estos agarran el cilindro por cuatro extremos, a presión. Por el otro lado, el tubo redondo se inserta en el eje y se ajusta con 2 pernos que atraviesan un lado del tubo y ejercen presión sobre el eje.

2.4.4.2. Proporcionar una base sólida y estable durante el proceso de tostado:

La estructura está formada por tubos de sección cuadrada de 1” y 1,2mm de espesor. Estos tubos configuran una estructura tipo caja, que adquiere un largo de 120cm de profundidad, en la misma dirección del eje. A esta estructura se le insertan tubos de sección cuadrada de 7/8” y 1,2mm de espesor de manera horizontal, que actuarán de forma telescópica para regular el la distancia entre los dos extremos de la caja estructural. El ajuste es a través de pernos que se atraviesan por un lado del tubo exterior y ejercen presión sobre el tubo interior a medida que se roscan.

2.4.4.3. Poseer la capacidad de variar su altura.

Asimismo, para regular la altura de las chumaceras del eje, se utiliza el mismo sistema telescópico pero de manera vertical. Los tubos son igualmente de 7/8” y 1,2mm de espesor. Estos soportes tienen un rango de altura desde 50cm hasta 110cm. Es el mismo sistema de ajuste que se utiliza para los extremos de la caja estructural.

2.4.4.4. Permitir la variación de la inclinación del eje del tambor.

Para poder aumentar la cantidad de café a tostar y sobretodo poder tener mayor absorción de la radiación solar en los granos, se vió necesario hacer un sistema de inclinación del eje del tambor, dicho sistema se diseño con un sistema pivotante en uno de sus extremos y al otro una platina que regula la inclinación.

2.4.4.5. Soportar las condiciones climatológicas.

La estructura ha sido tratada con una pintura antioxidante y engrasada para facilitar el movimiento telescópico y el ajuste de las piezas. Debido a que está conformado por varios elementos independientes, en caso de deteriorarse alguna pieza, no es necesario reemplazar todo el sistema, solo la pieza deteriorada.

2.4.4.6. Contar con espacio suficiente para instalar elementos extras (interruptores, motores, controladores, etc)

Gracias a que la estructura es de tipo lineal (configurado con tubos y no con bloques), se logra una base sólida sin necesidad de ocupar mucho espacio físico, lo cual deja una amplitud de espacio entre las piezas para colocar diversos elementos, sin interrumpir el desempeño general del tostado de café. Además, se pueden utilizar los tubos como elementos de soporte y/o agarre para pequeños sistemas o soportes que sean necesarios de implementar.

2.4.4.7. Ser capaz de contener el sistema de enfriamiento del café.

Si bien el sistema de enfriamiento es totalmente independiente de la estructura del tostador, se ha diseñado un mecanismo de acople integrado a la estructura, que facilita el apoyo de éste sistema y al mismo tiempo le proporciona libertad de giro necesaria para mayor comodidad a la hora del enfriamiento. Este mecanismo de soporte está completamente integrado a la estructura principal y cuenta con un pequeño seguro (con un pasante) que permite asegurar el soporte en la posición inicial para recibir el café caliente, y al retirarlo, permite el giro de aproximadamente 180° para poder desencajar con mayor facilidad el sistema de enfriamiento. La altura de este soporte, está diseñada para poder recibir el café de cualquiera de los 4 modelos de tostador fabricados durante este proyecto.

2.4.4.8. Facilitar el ingreso y la extracción de café antes y después del tostado.

El ingreso del café al tambor se logra mediante una herramienta especial, externa a la estructura. No obstante, la extracción del café de cualquiera de los tambores es clave durante el proceso, ya que resulta dificultoso y peligroso manipular el tambor en la etapa final del tostado debido a su elevada temperatura. Tomando esto en consideración, las patas de la estructura que soportan las chumaceras han sido diseñadas para permitir que el café se pueda retirar de los

tambores sin necesidad de manipularlos. El diseño consiste en permitir que la chumacera mas cercana al tambor (C1) tenga cierta libertad de giro, utilizando una bisagra de mariposa tradicional. Por el otro extremo, la chumacera mas lejana al tambor (C2) permite su desprendimiento temporal de la estructura fija. C2 está sobre un ángulo que se encaja sobre la superficie de las patas traseras y tiene pestillos de ambos lados, para soltarse o asegurarse a la estructura fija. De esta manera, logramos que el eje pueda rotar sobre C1 y el usuario sólo manipule el extremo del eje más cercano a C2, reduciendo además su esfuerzo gracias al principio de palanca y el peligro de quemaduras o lesiones. Cabe resaltar que el sistema de transmisión del motor al eje es a través de engranajes que se montan uno sobre otro, de esta manera no es necesario desconectar la transmisión, pues al levantar C2 los engranajes dejan de tocarse y cesa el movimiento del eje. Este es un mecanismo de seguridad, sin embargo para mayor seguridad y reducción de riesgos, nunca debe desengancharse C2 si el motor y la transmisión están en funcionamiento.

Pasos para retirar los granos de café

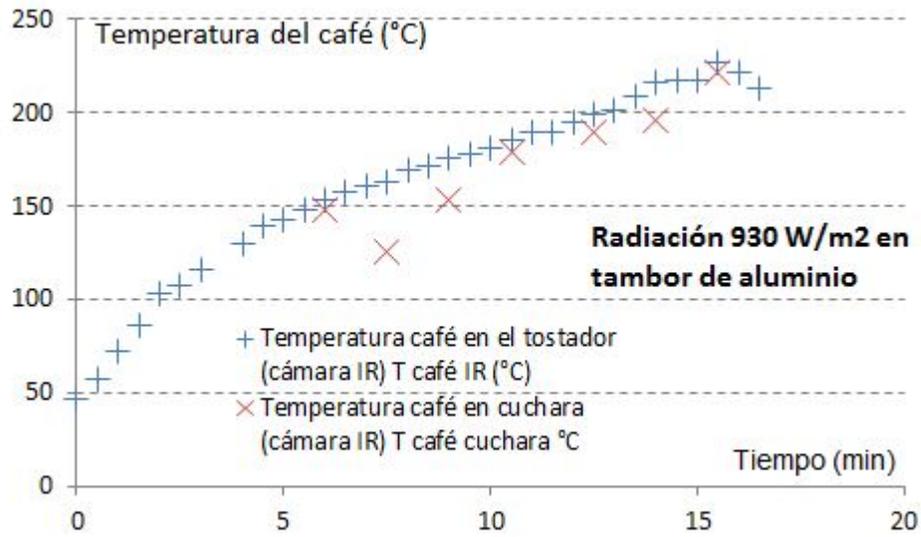


2.4.5. El material

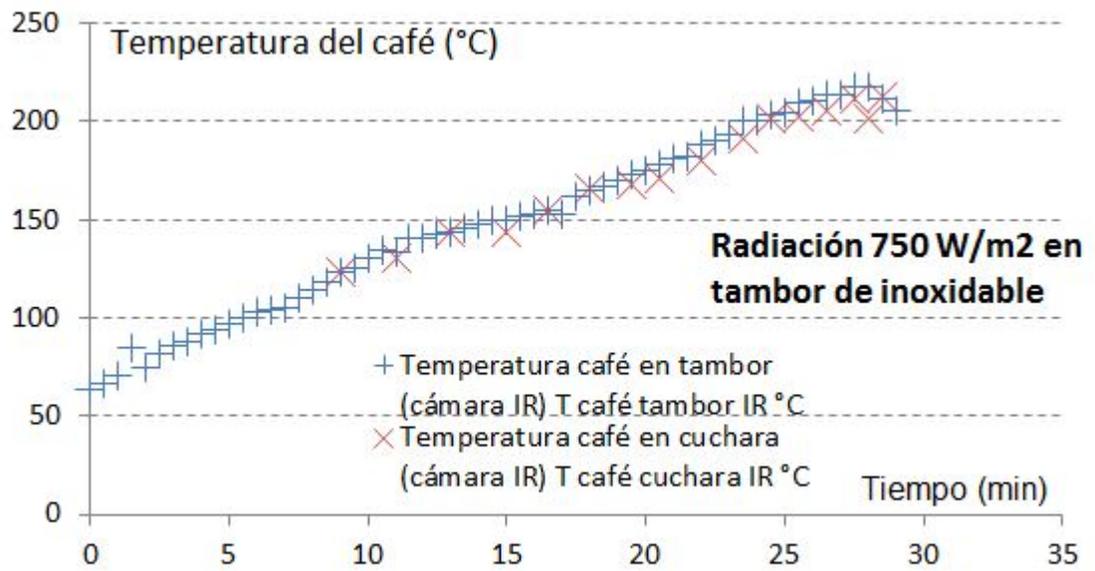
El material seleccionado para el tostador puede influir en su rendimiento. Entre los materiales estudiados están el metal que es adecuado por su estabilidad a alta temperatura y por su poder de conducción y el cerámico que podría utilizarse como un recubrimiento al metal. Se optó por el material más simple que es usar planchas de acero inoxidable y aluminio. El acero inoxidable es la referencia para los procesos con comida, su estabilidad y neutralidad garantizan una comida de alta calidad. El aluminio se usa también con comida, conduce mejor el calor en toda su superficie pero es susceptible de migrar en la comida y dañar la salud. Por sus características de buen conductor de calor (conductividad térmica $\lambda_{alu} = 250 W/m/K$ contra $\lambda_{inox} = 19 W/m/K$ por el acero inoxidable), podemos estudiarlo. Entonces vamos a comparar un tostador de acero inoxidable y un tostador de aluminio.

Se puede comparar las pruebas:

- Se puede observar en la figura 2.4.4 la comparación de las pruebas con diferente material y con diferente nivel de radiación $930 W/m^2$ contra $750 W/m^2$.



(a) Prueba 11



(b) Prueba 15

Figura 2.4.4: Comparación de pruebas con aluminio e inoxidable

Como se aprecia ambas curvas tienen la misma tendencia sin embargo la primera de ellas se da en un tiempo menor para la misma cantidad de café, esto se puede deber a las dos variables, la cantidad de radiación y el material.

- Se puede observar en la figura 2.4.5 la comparación de las pruebas con diferente material, con aislante el aluminio y sin aislante el inoxidable y radiación cercana entre sí de 930 W/m^2 y 941 W/m^2 .

Se puede apreciar que el tiempo de tostado es casi igual para 750 gr de café, sin embargo el tambor de aluminio tenía aislante mientras que el de inoxidable no. En cuanto al tiempo necesario para tostar, podemos concluir que el tambor de acero inoxidable es más óptimo que el aluminio debido a que para dar los mismos resultados no existe la necesidad de utilizar aislante.

En cuanto a la calidad, se tendrá que verificar con el resultado de pruebas de cata si existe alguna diferencia notable entre los cafés tostados en diferente material.

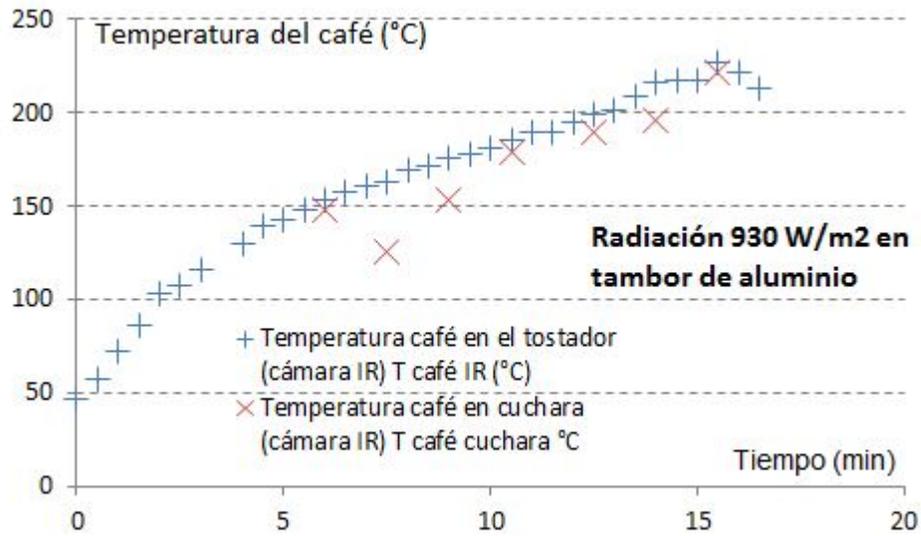
Comparación acero inoxidable y aluminio sin aislante La comparación de las pruebas 7 (inoxidable) y 10 (aluminio) nos enseña el tiempo para tostar 750g en un tambor mediano sin aislante, inclinado de 15° . La radiación era parecida, respectivamente 940 W/m^2 y 920 W/m^2 . En 15 minutos tostó el tambor de acero inoxidable, pero demoró 31.5 minutos en lo de aluminio. Es probable que una parte del tiempo suplementario es debido a problema de ajustamiento del concentrador Scheffler. Pero el aluminio parece menos eficiente en esta configuración sin aislante.

Según el modelo físico básico, el efecto de tener un tambor de aluminio puede influir la temperatura de equilibrio del sistema por culpa de mejor conducción del calor al ambiente en el caso del aluminio. Para tener un orden de magnitud, con una eficiencia térmica de 80 % la temperatura de equilibrio está 277°C , pero si la eficiencia térmica baja a 60 %, la temperatura de equilibrio no está más de 216°C , o sea 60°C menos. Este tipo de efecto puede justificar la dificultad de tostar con el tostador de aluminio.

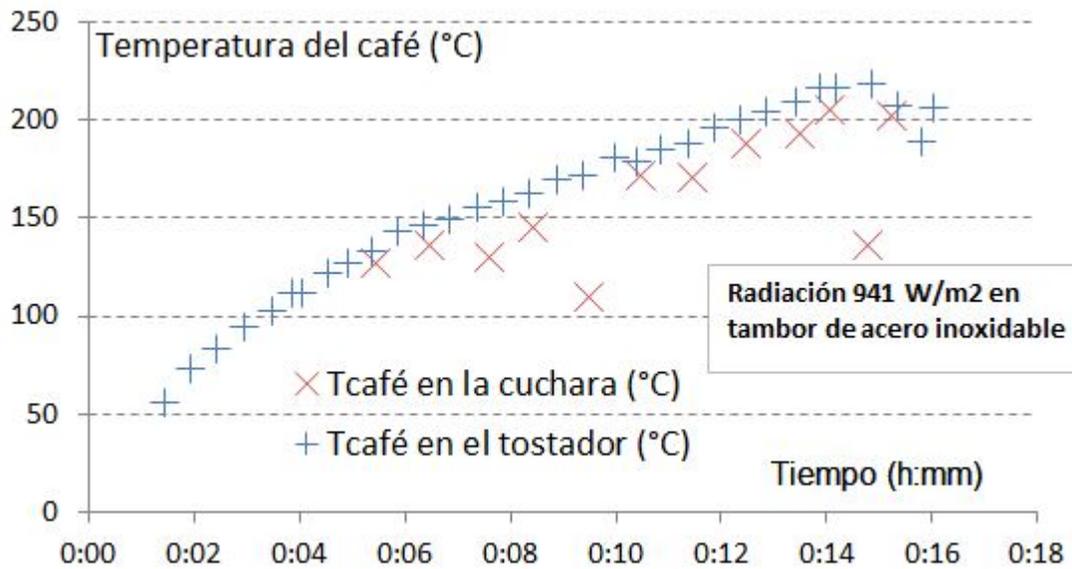
2.4.6. Aislante

Un tema muy importante durante el proceso de tostado con energía solar, es el de las pérdidas térmicas. Utilizando el modelo físico, se determinó que era conveniente el aislamiento exterior de los tambores para tostado, con miras a reducir las pérdidas de calor y hacer un uso más eficiente de la energía obtenida por el concentrador. A continuación comparemos los resultados del efecto del aislante en los diferentes tamaños de tambores.

En el pequeño: Utilizando como referencia las pruebas 2 y 6, podemos observar que la prueba sin aislante (Prueba 2) demoró 11.5 minutos en tostar 500g de café, mientras que la prueba con aislante (Prueba 6) demoró 10 minutos en tostar la misma cantidad de café. Cabe resaltar que ambas tuvieron una radiación similar, entre 900 y 950 W/m^2 . Una diferencia de 1.5 minutos.

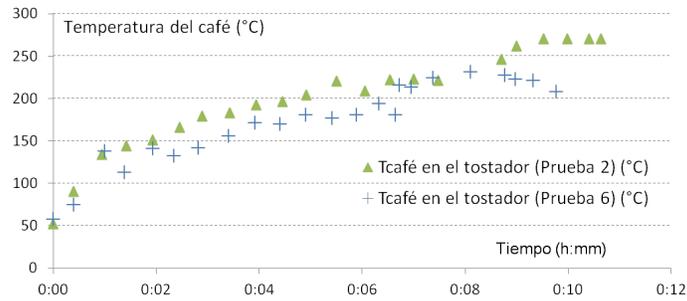


(a) Prueba 11

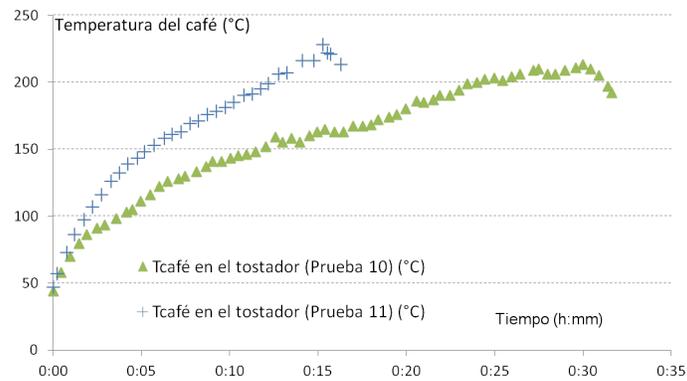


(b) Prueba 7

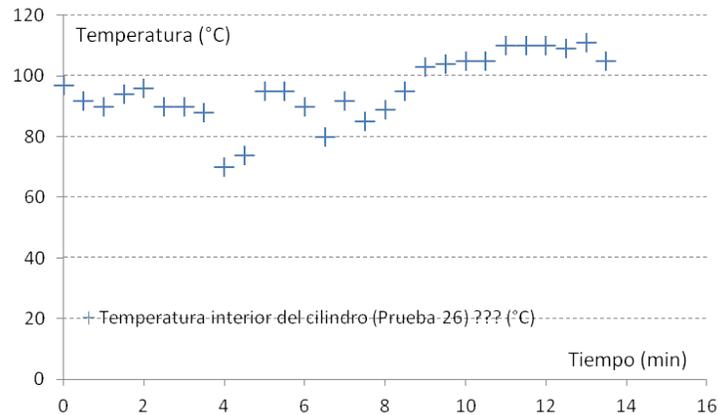
Figura 2.4.5: Comparación de pruebas con aluminio e inoxidable



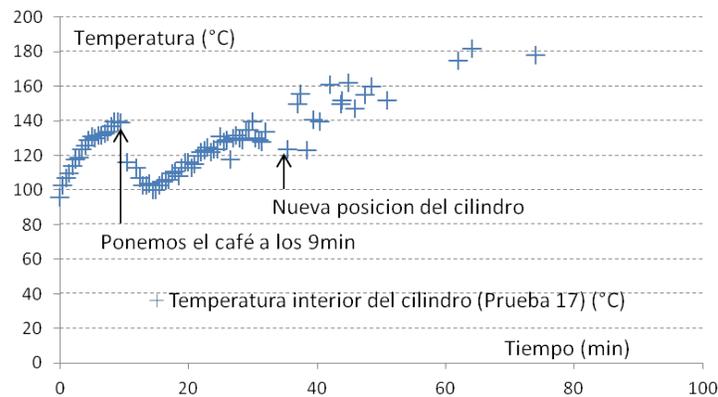
En el mediano de aluminio: Utilizando como referencia las pruebas 10 y 11, podemos observar que la prueba sin aislante (Prueba 10) demoró 31.5 minutos en tostar 750g de café, mientras que la prueba con aislante (Prueba 11) demoró 17 minutos en tostar la misma cantidad de café. Ambas tuvieron una radiación similar, entre 920 y 930 W/m². Una diferencia de 14.5 minutos.



En el grande: Utilizando como referencia las pruebas 26 y 17, podemos observar que la prueba sin aislante (Prueba 26) no logró tostar 500g de café, mientras que la prueba con aislante (Prueba 17) demoró 91 minutos en tostar 1kg de café. Ambas tuvieron una radiación similar entre 520 y 570 W/m². La diferencia en este caso es en el mérito de lograr tostar el doble de cantidad de café con una radiación tan baja, gracias al uso del aislante.



Prueba 26



Prueba 17

En conclusión: Podemos observar que el uso del aislante se hace mas indispensable en relación al tamaño del tambor, debido a que mientras más grande es, mas superficie tiene en contacto con el exterior, por lo tanto emana mas calor hacia afuera. Además, como las paredes los lados del cilindro están separados por un diámetro más grande, es más difícil la transferencia de calor entre las mismas paredes, mientras que en el caso del prototipo pequeño éstas están mas juntas (porque el diámetro es más pequeño). Podemos observar que el aislante acelera el proceso de tostado dependiendo del diámetro, pero también puede ser una herramienta que nos permita tostar café con una radiación menor a 600 W/m², sacrificando el tiempo de tuesta. Finalmente en términos de eficiencia energética, el aislante ha probado ser determinante para los propósitos del tostado de café y se recomienda su uso en la búsqueda del diseño óptimo o en condiciones climatológicas adversas.

2.4.7. Vidrio

Hemos visto que las pérdidas de calor son proporcionales a la superficie del tambor en contacto con el área circundante. Así para reducir las pérdidas también podría reducir el tamaño del tambor. Pero, si se reduce el volumen del tambor, el café caerá a través de la abertura que deja pasar la luz. Así que si sería interesante poner un vaso sobre la abertura para permitir que la luz pase por cualquier café en la prevención de caídas.

Nosotros compramos un vaso que puede soportar temperaturas cercanas a los 400 ° C y se han instalado en el prototipo para las pruebas con el cristal. Pero ha demostrado ser ineficaz porque el vidrio no deja que la luz plena. Además, este vidrio que pueden soportar temperaturas a una tasa relativamente alta de transparencia más bien baja. Para tener una idea de las pérdidas causadas por el cristal, que mide la radiación global en un día brillante, con y sin el cristal. Hemos encontrado una pérdida de 25 %. Puede ser posible obtener un vidrio con un mayor nivel de transparencia, pero los productores de café tienen un mucho más difícil de conseguir. Además, en las pruebas se observó la creación de niebla en el cristal, que reduce aún más su índice de transparencia. Por otro lado, el vidrio no permite reciclar el área que se encuentra en el tambor que es esencial, especialmente durante la primera fase del es el proceso de secado. Café pierde 11 % de humedad durante el tostado, todo esto el agua debe ser eliminada para facilitar el secado. El ahumado se producen durante la segunda fase, no puede salir tan fácilmente suceder también para dar sombra a la luz desde el centro. Observamos también que en los ensayos sin el cristal ahumado también transporta una cantidad pequeña de la piel que rodea el café (piel de plata). Y se encontró que ligeramente interrumpe la piel es muy delgada porque asados asar que sea mucho más rápido que la semilla misma, por lo que termina tostado al final del proceso y ligeramente puede dañar el café. En vista de esto, se excluyó la posibilidad de instalar una ventana en el tambor.

Otra solución, entonces debe ser considerada para disminuir el volumen del tambor a la escasez de las pérdidas térmicas y reducir el coste del tambor.

2.4.8. Inclinación

Ya que una desventaja es la poca capacidad del tostador debido a la apertura en el centro, se consideró inclinar el tambor para aumentar dicha capacidad. Dicha inclinación tiene límites, uno de ellos se debe a la disminución de la entrada de luz al tambor como se puede observar en la 2.4.6 en donde si el tambor aumenta su ángulo de inclinación empezarán a haber pérdidas de los rayos por no entrar a través de la apertura y por otro lado a mayor inclinación existen las posibles pérdidas por convección. Esta decisión influyó en el diseño de las paletas que deben tener una forma inclinada para poder enviar los granos de café del posterior al frente del tambor generando de esa manera un tostado más homogéneo.

Como se ven la siguiente figura 2.4.7la inclinación del tambor en el caso del prototipo mediano puede ser hasta 19° permitiendo tostar 1500 gr de café,

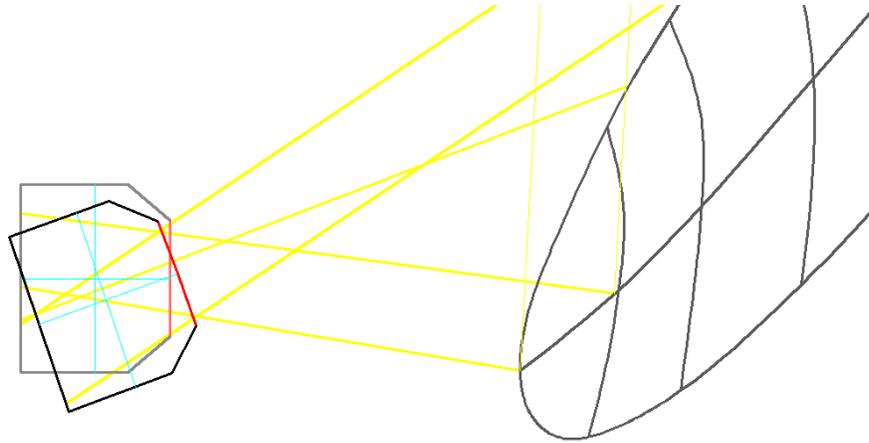


Figura 2.4.6: Inclinación 20° tambor

como se mencionó anteriormente 1kg de café se tuesta aproximadamente en 24 minutos y esta gráfica constata eso. Durante las pruebas se observó que a mayor inclinación no se aprovechaba el foco entregado por el Scheffler y mayor cantidad de humo.

En conclusión la inclinación máxima de los tambores diseñados es de 20° en algunos casos, aumentando la capacidad en el tambor pequeño de 250 gr a 500 gr, en el mediano de 750 gr a 1500 gr y en el caso del tostador grande de 1000 gr el máximo fue de 1500 gr, este límite se debe a la potencia entregada por el Scheffler, que impedía aumentar la cantidad de café.

2.4.9. Mejora de la óptica

El cono al fondo Utilizando el programa SolTrace, se hizo un estudio detallado de la trayectoria de los rayos solares desde la fuente (el sol), su reflejo en el concentrador solar Scheffler y su incidencia en los diferentes tambores del tostador. Con miras a aprovechar la mayor cantidad de rayos solares durante el proceso de tostado, se simuló la trayectoria de los rayos para poder determinar el porcentaje aproximado de pérdidas y desviaciones. Para ello, se tuvieron que desarrollar sólidos referenciales que se ajusten a las medidas reales de los prototipos, así como también la forma del concentrador solar. Este es el ejemplo de uno de los modelos desarrollados en el programa SolTrace, en donde se pueden apreciar tanto el ingreso de los rayos solares, la superficie del concentrador Scheffler y uno de los tambores recibiendo los rayos solares.

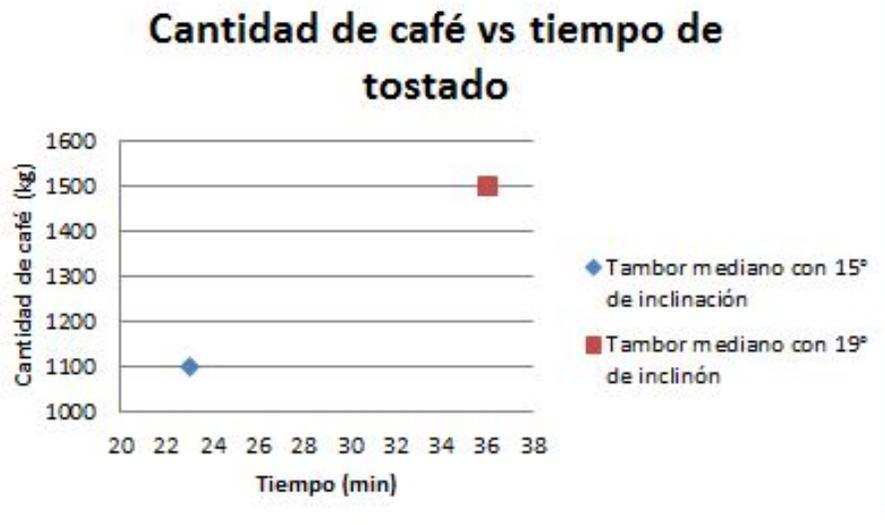
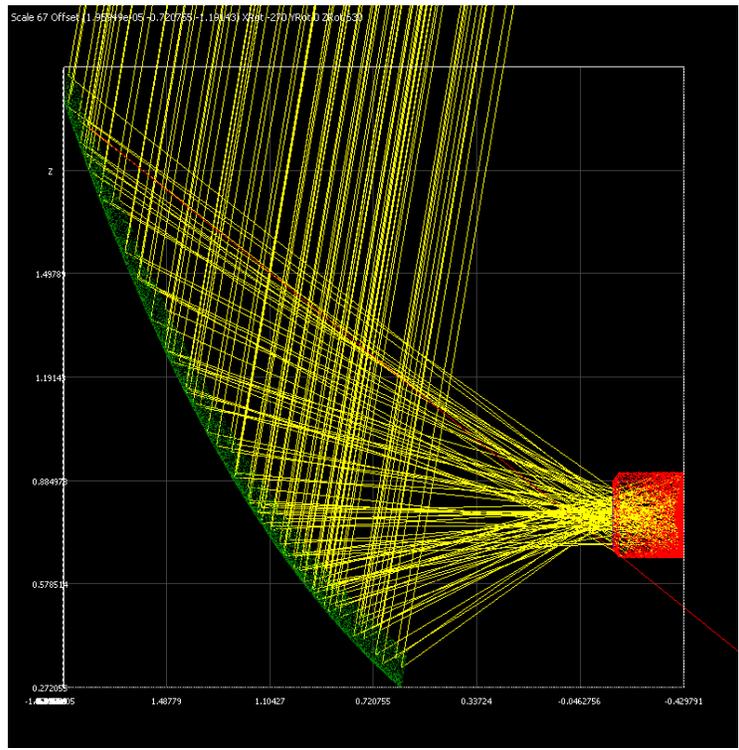
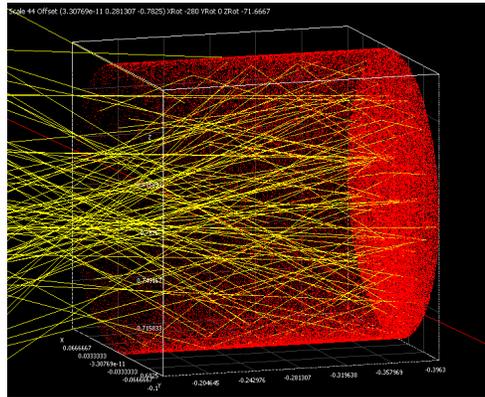


Figura 2.4.7: Gráfico de café vs tiempo de tostado con tambor mediano con diferente inclinación

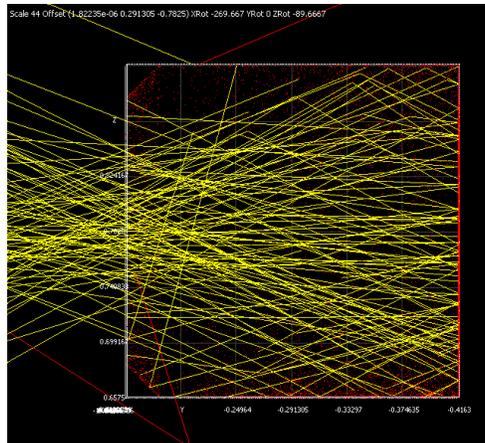


Captura de imagen del programa SolTrace

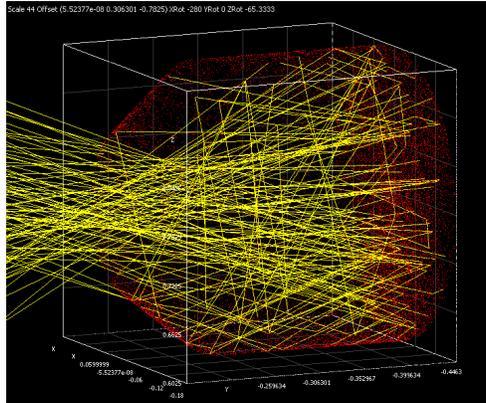
Simulación inicial: Entre los resultados principales, encontramos que la superficie al fondo de los tambores, al ser completamente plana y brillante, tenía tendencia a perder un porcentaje de los rayos solares, reflejándolos fuera del tambor. Los resultados de las pérdidas respectivas a los diferentes modelos de tambor se muestran a continuación:



Tambor Pequeño: 13 % de pérdida.



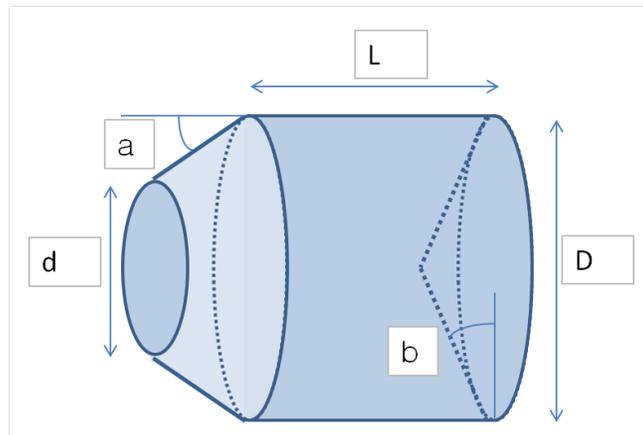
Tambor Mediano: 11 % de pérdida.



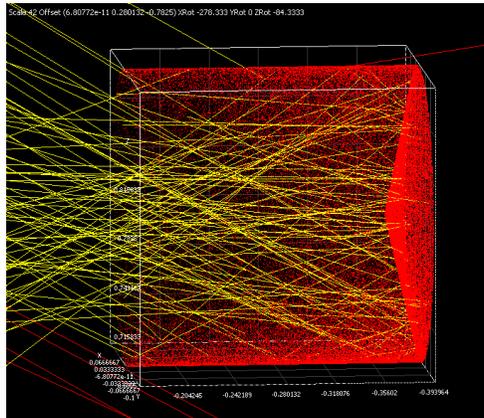
Tambor Grande: 8 % de pérdida.

Reduciendo las pérdidas: Con el objetivo de reducir estas pérdidas, se determinó que sería conveniente implementar una superficie que por su misma forma ayude a distribuir los rayos solares dentro del tambor, en vez de reflejarlos al exterior. De esta manera se determinó que una superficie cónica podría ser efectiva, ya que desviaría los rayos a las paredes laterales del tambor, dando la posibilidad de que este absorba más energía. Se implementó este cono solamente en el prototipo pequeño y el mediano, utilizando los siguientes parámetros:

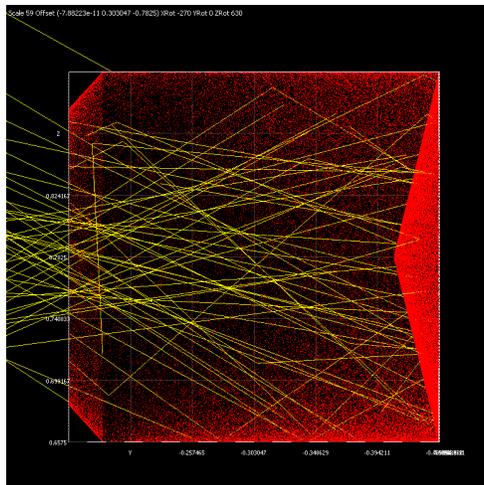
Tamaño de tostador	Tambor			Cono adelante	Cono fondo
	D (m)	L (m)	d (m)	a (°)	b (°)
Grande	0.36	0.2	0.2	45	0
Mediano	0.25	0.25	0.2	45	25
Pequeño	0.2	0.23	0.2	0	30



Resultados Obtenidos:



El Prototipo pequeño redució sus pérdidas de 13 % a aproximadamente 4 %, aumentando su rendimiento de captación radiativa de 82 % (sin cono) a 95 % (con cono).



El Prototipo mediano redución sus pérdidas de 11 % a aproximadamente 4 %, aumentando su rendimiento de captación radiativa de 85 % (sin cono) a 95 % (con cono).

Conclusiones: Si bien es cierto que la implementación del cono al fondo del tambor muestra un aumento significativo en la captación de rayos solares, cabe resaltar que una vez introducidos los granos de café en el contenedor, éstos también absorben parte de los rayos solares, aumentando el rendimiento del sistema aún más. Es quizás por estar razón que no se identificaron grandes variaciones en los resultados del tiempo de tostado en las pruebas CON y SIN cono, pues el café mismo absorbe la mayoría de los rayos aún así no existiese el cono. De todas maneras, con esta simulación, podemos asegurar que con

presencia del cono, nos aseguramos que el rendimiento no dependa de la cantidad de café insertada en el modelo, sino del diseño mismo del tostador, reduciendo nuestros riesgos, al controlar mejor nuestras variables durante el proceso de tostado.

2.5. Conclusión

Este proyecto ha permitido principalmente demostrar que es posible tostar usando la concentración solar. Esta tecnología puede ser reproducible en las zonas rurales, es fácil de manejar y no requiere energía eléctrica o fósil. Después de los ensayos con la población, se observó una gran curiosidad e interés por esta tecnología, se rescató, la facilidad de operación, velocidad de tostado y la economía en el combustible.

El proyecto por lo tanto, permitió abrir un rango de aplicaciones posibles con el concentrador Scheffler para el desarrollo de las zonas rurales. La tecnología Scheffler es todavía joven, pero gracias a la investigación de muchos proyectos como este, dicha tecnología evoluciona cada vez más. En este proyecto se vio particularmente el tostado de café, pero exitosamente se tostó otros productos como el cacao y maíz.

Este sistema de tostar tiene una capacidad limitada por la potencia que puede dar el concentrador, pero para futuras investigaciones se puede usar concentradores de mayor escala, como un Scheffler de 10m^2 .