



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA

**“HACIA UNA CAFETERA SOLAR”**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

ENERGÍA – SISTEMAS ENERGÉTICOS

P R E S E N T A :

**FERNANDO SOSA MONTEMAYOR**

TUTOR:

**DR. JESÚS ANTONIO DEL RÍO PORTILLA**



2007



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



## **JURADO ASIGNADO**

Presidente: Dr. José Luis Fernández Zayas  
Secretario: Dr. Jesús Antonio del Río Portilla  
Vocal: Dr. Sergio Cuevas García  
1er. Suplente: Dr. Rubén José Dorantes Rodríguez  
2do. Suplente: Dr. Oscar Alfredo Jaramillo Salgado

Lugar donde se realizó la tesis:

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA**

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Jesús Antonio del Río Portilla

---

**FIRMA**



---

# Agradecimientos

---

Especialmente al Dr. Jesús Antonio del Río Portilla, por guiarme durante esta aventura, sobre todo por tenerme tanta paciencia.

Al Dr. Oscar Alfredo Jaramillo Salgado, por todos sus valiosos comentarios, su tiempo y su paciencia.

Al Dr. José Luis Fernández Zayas, al Dr. Rubén José Dorantes Rodríguez y al Dr. Sergio Cuevas García, miembros del comité tutorial, por los comentarios que enriquecieron mi trabajo.

Al Dr. Miguel Robles Pérez, por su ayuda y su tiempo.

A todos los catedráticos, con quienes tuve la oportunidad de aprender mucho.

A todos los amigos que me acompañaron en ésta etapa, en especial a Carlos Pérez y mis compañeros de generación.

A mis amigos que me han acompañado toda la vida, Carlos López, David, Blas y Alejandro.

A todas las personas que me apoyaron y ayudaron a salir adelante en esta etapa de mi vida.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y en especial al Centro de Investigación en Energía por permitirme realizar mis estudios de maestría en sus instalaciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por brindarme el financiamiento económico para realizar mis estudios de maestría.

Al M.I. Carlos Alberto Pérez Rábago, al M.I. Víctor Hugo Gómez Espinoza y al Ing. Jesús Quiñones Aguilar, por su apoyo en la realización de los experimentos. Al Ing. Héctor Daniel Cortés González, por toda su ayuda técnica durante la maestría.



---

# Dedicatoria

---

A mi madre, mi abuela (qepd) y mi hermana, por todo su amor y su apoyo.





---

# Contenido

---

<b>Lista de Figuras</b>	<b>XI</b>
<b>Lista de Tablas</b>	<b>XIII</b>
<b>Resumen</b>	<b>XV</b>
<b>1. Antecedentes</b>	<b>1</b>
1.1. Café y energía . . . . .	1
1.2. Estado del arte . . . . .	3
1.2.1. Cafeteras . . . . .	3
1.2.2. Concentradores solares parabólicos . . . . .	7
1.3. Objetivos . . . . .	9
<b>2. Modelo teórico</b>	<b>11</b>
2.1. Procesos en la producción del café líquido . . . . .	12
2.2. Conceptos del modelo teórico . . . . .	13
2.2.1. Fenómenos ópticos . . . . .	14
2.2.2. La energía interna de sistemas termodinámicos . . . . .	16
2.2.3. Transiciones de fase . . . . .	16
2.2.4. Transferencia de calor . . . . .	18
2.2.5. Ley de Darcy . . . . .	19
2.3. Desarrollo del modelo teórico . . . . .	20
2.3.1. Modelo simplificado . . . . .	23
2.4. Comparación de los modelos teóricos . . . . .	25
<b>3. Diseño del dispositivo para el seguimiento solar</b>	<b>27</b>
3.1. Criterios de diseño y tipos de sistemas de seguimiento . . . . .	28
3.1.1. Criterios de diseño . . . . .	28
3.1.2. Sistemas de seguimiento . . . . .	29
3.2. Diseño de los sistemas . . . . .	30
3.2.1. Sistema de seguimiento . . . . .	30

---

3.2.2. Montura de la cafetera . . . . .	33
3.3. Pruebas de elemento finito . . . . .	34
3.4. Instrumentación del experimento . . . . .	38
3.5. Referenciación de los termopares . . . . .	41
<b>4. Resultados y Discusión</b>	<b>43</b>
4.1. Resultados del comportamiento térmico . . . . .	43
4.2. Discusión . . . . .	44
<b>5. Conclusión</b>	<b>51</b>
<b>Anexo A</b>	<b>53</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>65</b>

---

# Lista de Figuras

---

1.1. Diferentes tipos de cafeteras: a) Forma de los Ibrik b) Cafetera de vacío c) Percoladora. . . . .	3
1.2. Etapas de preparación de café en cafetera de “vacío”. . . . .	4
1.3. Esquema de Cafetera espresso de estufa. . . . .	5
1.4. a) Prensa francesa b) Cafetera eléctrica de goteo. . . . .	6
1.5. Máquina espresso (frente y atrás). . . . .	7
2.1. Esquema del sistema termodinámico considerado. . . . .	12
2.2. Trayectoria de un rayo reflejado y refractado. . . . .	14
2.3. Esquema de los rayos en el concentrador de foco puntual. . . . .	15
2.4. Esquema del balance de energía en la <i>Cafetera Espresso</i> . . . . .	21
2.5. Evolución teórica de la temperatura a distintas irradiancias, modelo numérico y linealizado. . . . .	26
3.1. Forma del seguimiento de una montura <i>alt-acimut</i> . . . . .	29
3.2. Plano de una montura <i>ecuatorial</i> . . . . .	30
3.3. Forma del seguimiento de una montura <i>ecuatorial</i> . . . . .	30
3.4. Diseño del sistema de seguimiento ecuatorial. . . . .	31
3.5. Diseño del sistema de seguimiento ecuatorial, continuación de la figura 3.4. . . . .	32
3.6. Diseño de la montura de la cafetera. . . . .	33
3.7. Sistema completo de seguimiento <i>ecuatorial</i> . . . . .	35
3.8. Disposición de la cafetera y el pirheliómetro. . . . .	36
3.9. Ilustración de la deformación del foco sobre la <i>Cafetera Espresso</i> . . .	37
3.10. Diagrama del diseño experimental. . . . .	38
3.11. Posición de la <i>Cafetera Espresso</i> por la mañana o tarde. . . . .	40
3.12. Posición de la <i>Cafetera Espresso</i> al mediodía. . . . .	40
4.1. Gráfica de experimento que inició a las 9:33am hora solar, $C = 8.5$ , $T_{ini} = 21.9^{\circ}C$ , $\overline{T_{amb}} = 22.9^{\circ}C$ , $\overline{G_0} = 805 \frac{W}{m^2}$ . . . . .	45

- 
- |      |  |    |
|------|--|----|
| 4.2. | Gráfica de experimento que inició a las 10:27 hora solar, $C = 9.5$ ,<br>$T_{ini} = 27.7^{\circ}C$ , $\overline{T_{amb}} = 23.4^{\circ}C$ , $\overline{G_0} = 887 \frac{W}{m^2}$ . . . . . | 46 |
| 4.3. | Gráfica de experimento que inició a las 11:10 hora solar, $C = 9.7$ ,<br>$T_{ini} = 22.7^{\circ}C$ , $\overline{T_{amb}} = 27.6^{\circ}C$ , $\overline{G_0} = 847 \frac{W}{m^2}$ . . . . . | 47 |
| 4.4. | Gráfica con la comparación de las tres corridas experimentales. . . . .  | 48 |

---

## Lista de Tablas

---

2.1. Tabla con los valores de los parámetros utilizados en la evaluación del modelo teórico . . . . .	22
2.2. Tabla con los valores intermedios de $h_r$ , tomando $\epsilon = 1$ y $T_\infty = 303.15\text{K}$ , con intervalos de 1K. . . . .	24
3.1. Tabla con los valores de las constantes de la regresión lineal. . . . .	41
4.1. Tabla con los valores promedio de las corridas experimentales. . . . .	48



---

# Resumen

---

En el ámbito mundial, en 1999, se consumían 2.25 mil millones de tazas de café por día<sup>1</sup>. En este trabajo se estudia la viabilidad de usar un sistema de concentración solar de foco puntual como fuente de energía para hacer café líquido con una *Cafetera Espresso*. Para hacer esto se describió la evolución de la temperatura del sistema termodinámico definido por el recipiente de agua de la cafetera mediante un modelo teórico, y se diseñaron un sistema de seguimiento para el concentrador de foco puntual, así como una montura para que la cafetera estuviera en el foco del concentrador.

El trabajo se divide en cinco capítulos. En el capítulo 1 se presentan los antecedentes del trabajo, dando una visión del contexto energético del problema, y presentando una breve historia de los componentes principales del trabajo. En el capítulo 2 se desarrolla el modelo teórico de la evolución de la temperatura de l sistema termodinámico. En el capítulo 3 se presenta el diseño del sistema de seguimiento y la montura para la cafetera, tanto los criterios de diseño así como las pruebas computacionales a las que fue sometido el sistema de seguimiento. En el capítulo 4 se presentan los resultados de la campaña experimental que permiten validar el modelo teórico. Por último, en el capítulo 5, se presentan las principales conclusiones del trabajo.

---

<sup>1</sup>Ponte, S., 2002. The 'Latte Revolution'? Regulation, Markets and Consumption in the Global Coffee Chain. *World Development*. 30, 1099-1122





---

# Capítulo 1

## Antecedentes

---

### 1.1. Café y energía

El mejoramiento en la calidad de vida de la humanidad, a lo largo de la historia, ha ido íntimamente ligado con las tecnologías de cada época. Por la creciente sofisticación de las tecnologías, a su vez, éstas han requerido mayor cantidad de energía para operar adecuadamente. Cada época se puede marcar por sus usos y necesidades energéticas que, como norma, con cada transición tecnológica han aumentado. En la actualidad se erogan aproximadamente un billón y medio de dólares anuales en energía primaria en todo el mundo (sin contar el costo de conversión secundaria, como producción eléctrica y refinación de combustibles) [1]. Como consecuencia del aumento en las necesidades energéticas, también se ha incrementado el uso de hidrocarburos y la sobreexplotación de estos recursos no renovables. Además, el utilizar estas tecnologías también genera efectos adversos al medio ambiente. El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio climático (IPCC) de las Naciones Unidas estimó que, durante el siglo pasado, la temperatura promedio global del aire se incrementó aproximadamente  $0.6^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ); con un aumento durante el siglo actual pronosticado de  $1.4^{\circ}\text{C}$  a  $5.8^{\circ}\text{C}$  [2]. El efecto de estos cambios tiene un impacto adverso en nuestra vida cotidiana, desde la alteración de los patrones de lluvia y temporada de secas [2, 3], hasta el deterioro de la salud de las personas [4, 5]. Uno de los problemas más importantes en la actualidad es la seguridad energética de las naciones, los lugares donde se extraen los energéticos convencionales no son los de consumo, generándose así un problema de seguridad nacional para las naciones consumidoras; hecho que, a su vez, crea tensiones entre los países desarrollados y los que están en vías de desarrollo por el acceso a las fuentes basadas en hidrocarburos que aún se encuentran disponibles [6, 7]. Por lo anterior y por muchos otros motivos, es necesario transitar a nuevas tecnologías y a los modelos sociales adecuados para utilizarlas.

Es claro que el modelo energético actual es inadecuado y se hace indispensable transitar a uno nuevo. En un mundo donde uno de los factores clave para el desarrollo de los países es la intensidad energética [8, 9] (definida como la cantidad de energía necesaria para producir una unidad de producto interno bruto) se presentan grandes oportunidades para las tecnologías que puedan incidir y cambiar los patrones de consumo energético cotidianos. Estimular el aumento del uso de medios y tecnologías con base en fuentes renovables de energía para realizar nuestras labores cotidianas, es vital dada la previsible finitud de los hidrocarburos.

Se propone el de energía solar como fuente renovable de energía. Para propósitos de esta tesis es importante hacer un repaso de las principales fuentes renovables con las que cuenta el país ya que México tiene un gran potencial. La basura, bien aprovechada, tiene un potencial interesante, en el 2001 se la producción nacional de basura fue de 31.9 millones de toneladas, de las cuales aproximadamente el 50 % era material orgánico [10]. En el territorio nacional existen muchos lugares donde todavía se utiliza la leña como fuente energética; desafortunadamente en la mayoría de estos sitios no se trabaja con plantaciones renovables, sin embargo, este tipo de plantaciones tienen un gran potencial. A nivel nacional, en el 2005, se contó con un recurso que equivale a 200PJ/año en biocombustibles [10]. En ese año, la biomasa de recursos agrícolas contó por unos 886PJ/año posibles adicionales [10]. A nivel mundial, México ocupa el tercer lugar en generación de electricidad con geoenergía (1,340MWe) [10], por debajo de Islandia y los EE.UU. No existe una estimación precisa, pero se calcula que se cuenta con un recurso eólico de aproximadamente 5,000MWe [10], tan sólo en la región de la Ventosa en Oaxaca se estima que existe un potencial de 2,000MWe [11], lo que hace a esta región la más promisoría para dicho tipo de tecnología. En materia de recurso solar, el que más importa a esta tesis, a grandes rasgos se puede decir que, la República Mexicana recibe en seis horas de exposición al Sol, la misma cantidad de energía que consumirá durante todo un año [12]. Aproximadamente en tres cuartas partes de la república mexicana se tiene una insolación media de 5.0kWh/m<sup>2</sup> al día, una de las más altas del mundo y el doble del promedio de EE.UU. [13, 14].

Una actividad humana en la cual se puede llegar a incidir de manera significativa al cambio tecnológico y cultural es el consumo de café. Esto se puede ver de modo más claro analizando los datos de consumo de café a nivel mundial, y al calcular aproximadamente las implicaciones del consumo energético que se requiere para lograr ese nivel de consumo diario.

En 1999 se consumían 2.25 mil millones de tazas de café diarias [15]. De 1999 a 2005 la importación de sacos de café, en los 28 países importadores miembros de la Organización Internacional del Café (ICO por sus siglas en inglés), que son los que más contribuyen al consumo del café en el mundo, se incrementó en un 11.3 % [16]; al considerar que la relación entre el consumo mundial de tazas de café y la importación de sacos de café de estos países es lineal, en el 2005 se consumían 2.5 mil millones de tazas de café diarias. Los datos anteriores son relevantes porque la producción de 2.5 mil millones de tazas de café diarias representa un consumo energético considerable. Una cafetera eléctrica casera promedio, de los EE.UU., consume entre 900 y 1,200 Watts [17], además el tiempo de operación típico es de cuatro minutos, por lo cual el consumo típico es de 216 a 288kJ. Nuestros resultados de laboratorio muestran que producir café con una “*Cafetera Espresso*” sobre una parrilla eléctrica consume

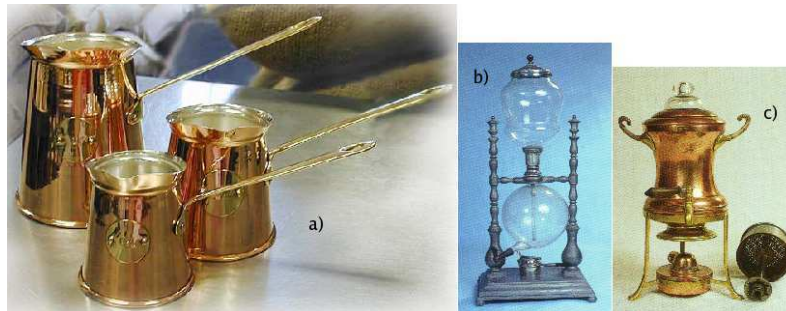


Figura 1.1: Diferentes tipos de cafeteras: a) Forma de los Ibrik b) Cafetera de vacío c) Percoladora.

148.5kJ por taza, que, si todas las tazas se produjeran así, implicaría el uso de 135.5 petajoules de energía anuales, lo es equivalente al 16 % del consumo total del sector terciario de México en el año 2005 (sector residencial, comercial y público) [18]. Como comparativo, en el 2004, las hidroeléctricas de CFE, interconectadas a la red nacional eléctrica, produjeron 90.2 petajoules [13].

Es claro que se puede tener una contribución importante a la solución los problemas energéticos que enfrentamos todos al estudiar cómo preparar café con tecnologías que usen fuentes sustentables de energía. Para comprender mejor los posibles impactos, es necesario saber cuál ha sido la evolución de las tecnologías que están involucradas en la preparación del café de manera tradicional, así como los sistemas que se proponen para reemplazar la fuente energética.

## 1.2. Estado del arte

En esta sección explicaremos brevemente cómo funcionan algunas cafeteras y una breve historia de los concentradores de foco puntual.

### 1.2.1. Cafeteras

La evolución de las tecnologías para preparar café se desarrolló de forma paralela a la revolución industrial. En un principio, los habitantes de la península arábiga preparaban su café en pequeñas jarras de cobre llamadas “Ibrik” (fig. 1.1a). Por mucho tiempo uno de los principales problemas que tuvo la preparación de café, además de la calidad del grano en sí, era mantener los granos molidos de café en el Ibrik y no trasvasar los granos a las tazas en las que se servía. Las primeras grandes modificaciones se centraron en el diseño de cafeteras que de uno u otro modo retuvieran los granos del café al servirlo. Algunas de éstas tenían vertederos largos y delgados para que los granos se atraparan ahí, otras más tenían un área grande en la base para que se asentaran los granos en el fondo. La siguiente mejora que se da al proceso es el uso de filtros [19]. Éstos normalmente eran bolsas de tela, en las que se ponía el café molido

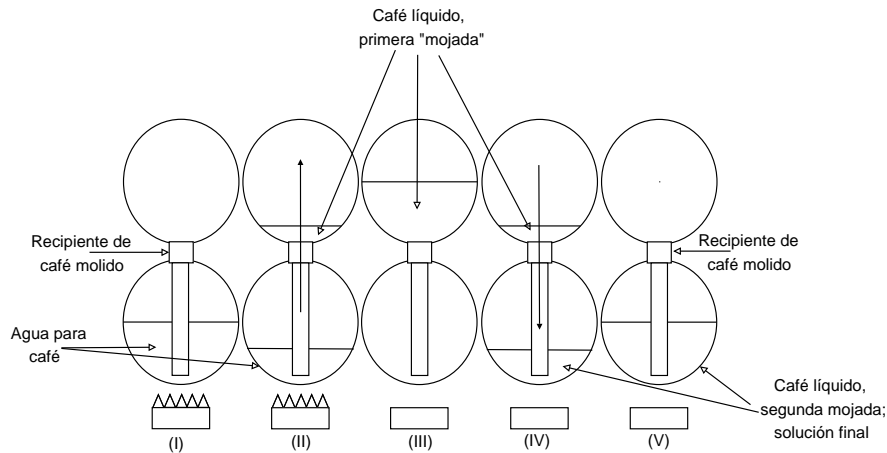


Figura 1.2: Etapas de preparación de café en cafetera de “vacío”.

y éstas a su vez en el agua caliente de la jarra donde se preparaba el café. Tenían la función de mantener los granos juntos para que, al momento de servir el café, no se traspasaran a la taza.

Posterior a la introducción de los filtros, el siguiente gran desarrollo fueron las cafeteras de vacío (fig. 1.1b). Aunque la autoría de dicho sistema es muy controvertida, éstas aparecen entre finales del siglo XIX y principios del XX [19]. Dichas cafeteras están compuestas por dos recipientes de agua, uno inferior y otro superior, un depósito para el café molido que une a los dos recipientes, y tiene un tubo que conecta el recipiente inferior al depósito de granos de café. Además, tiene una fuente de calor su parte inferior (figs. 1.1b y 1.2). Al activar la fuente de calor, el agua sube por el tubo central “mojando” el café molido a su paso antes de depositarse en el recipiente superior; esta parte del proceso genera una disminución en la presión del recipiente inferior (fig. 1.2 partes I y II). Una vez que la mayor parte del agua se encuentre en el recipiente superior, se apaga la fuente de calor (fig. 1.2 parte III). Debido a la diferencia de presión, el agua pasa a la parte inferior de la cafetera con un flujo mayor al producido únicamente por la gravedad, logrando un segundo “mojado” del café (fig. 1.2 partes IV y V). La mayoría de estas cafeteras eran de vidrio, lo cual las hacía peligrosas, ya que la calidad del vidrio en esa época era muy variable ocasionando que las explosiones e implosiones fueran comunes.

Las cafeteras conocidas en México como ‘cafetera italiana’ o ‘cafetera espresso’ (el tipo de cafetera usada en esta tesis) no tienen mucha diferencia con las cafeteras de vacío, que es (fig. 1.3). Simplemente se le añade un tubo central al recipiente superior de café – similar al de la parte inferior – logrando así que se moje el café tan sólo una vez. Esto hace que el sabor del producto final sea menos amargo y en general de mejor calidad. Las etapas de preparación son muy similares a las de la cafetera de vacío. Primero se coloca una fuente de calor en la parte inferior de la cafetera. Esto calienta el agua haciendo que suba por el tubo inferior de la cafetera y pase por el recipiente

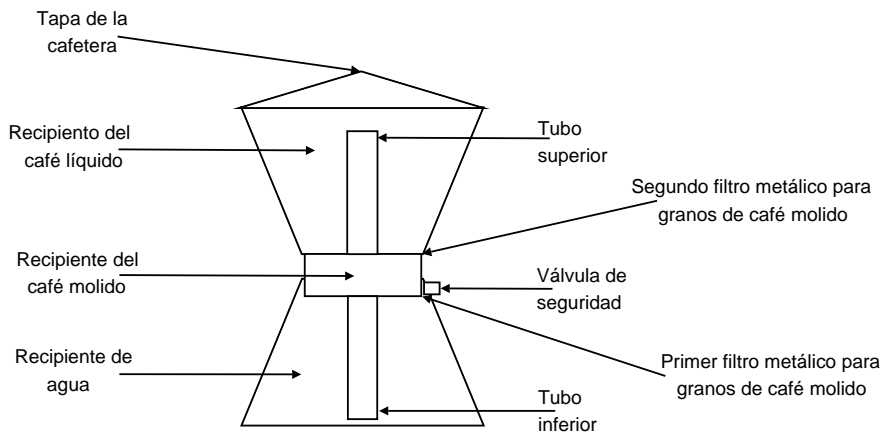


Figura 1.3: Esquema de Cafetera espresso de estufa.

del café molido; el agua sigue su curso hasta el final del tubo superior cayendo en el recipiente superior, sin posibilidad de regresar al inferior, a diferencia de la cafetera de vacío (fig 1.3). Una vez que el recipiente superior está lleno se deja de suministrar calor en la parte inferior y el café está preparado.

El siguiente implemento que se produjo en masa fueron las percoladoras (fig. 1.1c). Éstas tienen un diseño similar a las dos anteriores, sin embargo no cuentan con el recipiente superior. Al igual que la cafeteras de vacío las percoladoras se calientan en su parte inferior, originalmente esto se lograba en una estufa, actualmente la mayoría utiliza una resistencia eléctrica. El agua caliente sube por un tubo central, moja al café y cae inmediatamente al recipiente de agua caliente; el mismo café se recircula y moja constantemente los granos de café, lo cual hace que después de un tiempo, no muy prolongado, el café tenga un sabor muy amargo, de poca calidad, y hasta quemado. Este sistema es sin duda uno de los que menos calidad de café entrega si se deja funcionando por mucho tiempo. Desafortunadamente siguen en uso cotidiano, y muchas de las cafeteras de 50 o más tazas son de este tipo.

Un desarrollo importante es la llamada "Prensa francesa" (fig. 1.4a), que se llamó así por su supuesto origen francés. Consiste en un recipiente donde se vierte agua a la temperatura deseada, preferentemente alrededor de los  $82^{\circ}\text{C}$ , y en la parte superior se coloca el café molido en un recipiente especial que tiene una palanca que es usada para empujar como pistón el café hasta el fondo del recipiente. Éste sistema logra un rápido mojado de los granos del café, que los tradicionalistas argumentan es una de las mejores formas de producirlo.

Sin lugar a duda uno de los inventos más importantes es la *máquina espresso* (fig. 1.5). La máquina original consiste en un recipiente donde se calienta el agua que posteriormente se hace pasar a presión a través un depósito, donde se encuentran los granos de café, mediante el uso de un pistón que es empujado manualmente. En general estos aparatos son de dimensiones grandes, y al estar hechos de metal, son muy pesados.



Figura 1.4: a) Prensa francesa b) Cafetera eléctrica de goteo.

Con el tiempo distintas partes del proceso se han ido automatizando, pero para los puristas del sabor el sistema original sigue siendo el mejor de todos para preparar café. En México, como ya se dijo antes, el aparato que se conoce como “*Cafetera Espresso*” es otro que, más parecido a las cafeteras de vacío, también se denomina técnicamente “*máquina espresso de Parrilla*” o “*de estufa*”. En general éstas son muy populares por el costo, el tamaño y el peso que, en conjunto, hace posible tener una en casa. Sin embargo, como manejan presiones muy inferiores que las máquinas de pistón [19], y por lo tanto no forma espuma, se considera que el sabor del producto de las máquinas espresso originales es mejor y por eso se siguen usando de manera regular en las cafeterías de las grandes cadenas comerciales de la actualidad, aunque en sus versiones automatizadas eléctricas.

El invento que llevó al café a su consumo masivo fue la cafetera eléctrica o de goteo (fig. 1.4b). Este sistema es muy usado en oficinas y restaurantes. Consiste normalmente en un sistema que calienta el agua, mediante una resistencia eléctrica, y luego la vierte sobre un recipiente que contiene los granos molidos de café. El agua cae lentamente por goteo o pequeño chorro a una jarra que está sobre una placa caliente de metal para mantener el café caliente después de hecho.

Como se ha visto los métodos de preparación de café han cambiado con cada tecnología disponible. En la actualidad la mayor parte del café se produce mediante electricidad, ya sea en las cafeteras eléctricas o máquinas espresso. En el siguiente capítulo se desarrolla un modelo de transferencia de calor para un sistema compuesto por un concentrador de foco puntual y una *Cafetera Espresso*. En este trabajo se busca estudiar la viabilidad de sustituir la fuente de energía actual por una solar mediante un concentrador parabólico de foco puntual. Se escogió este tipo de cafetera porque, dado su diseño, es el tipo que más fácil se puede acoplar a un sistema de concentración solar para que se pueda colocar sobre su foco.

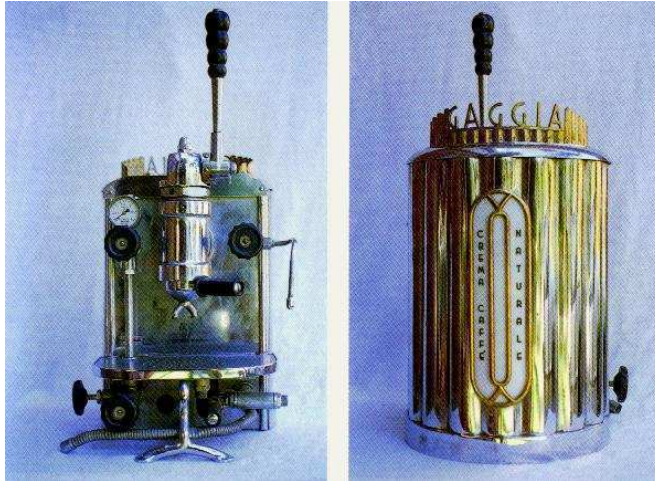


Figura 1.5: Máquina espresso (frente y atrás).

### 1.2.2. Concentradores solares parabólicos

La búsqueda de nuevas fuentes energéticas es una constante a lo largo de la historia, y en este sentido el uso de concentradores como fuente de trabajo útil no es nuevo. Tiene antecedentes históricos sólidos, desde las historias de Arquímedes y sus escudos pulidos que hundieron barcos, hasta el uso en los sistemas “Dish-Stirling” y las plantas SEGS en EE.UU. [20, 22].

Durante el siglo XIX se llevaron a cabo varios intentos para poner en operación distintos sistemas que dieran potencia a maquinaria o generaran electricidad a un nivel industrial. Existen muchos ejemplos citados por Ackermann [20] en su reporte de 1915 a la *Smithsonian Institution*. En dicho reporte Ackermann nos da un recuento muy detallado de mucho del trabajo hecho hasta ese momento en tecnologías e investigaciones solares. De entre todos los ejemplos, son tres los concentradores solares cónicos o parabólicos que destacan. El primero es el trabajo de August Mouchot, quien diseñó, construyó y patentó varios concentradores solares. Uno de estos sistemas de Mouchot fue puesto en el patio de la biblioteca de Tours. Estos dos sistemas consistían de un gran plato colector de forma cónica. En el eje central del reflector Mouchot colocó un cilindro metálico cubierto de vidrio. Éste era un recipiente de agua que, al estar en el foco del cono, calentaba el agua hasta evaporarla. El vapor se podría haber usado como fluido de trabajo en alguna máquina. El siguiente ejemplo de consideración es el de M. Abel Pifre, quien construyó un sistema similar pero con un plato parabólico. Pifre redujo el volumen del evaporador logrando así una concentración mayor. Lo más relevante del sistema de Pifre es que, a diferencia del de Mouchot, éste sí fue utilizado para hacer funcionar una imprenta. El ejemplo más importante y citado por Ackermann es el de la planta de Pasadena, California, de A.G. Eneas. Ésta fue construida en 1901 y consistió en platos receptores de forma cónica, similares a los de Mouchot pero más



grandes. Lo relevante de este último ejemplo es que se trata de una planta a gran escala dedicada a la producción de trabajo mediante sistemas de concentración solar. Es cierto que dos de los ejemplos mencionados son en realidad sistemas cónicos, pero es muy probable que se deba más bien a problemas de construcción y de costos de la época más que a ventajas técnicas de un sistema sobre el otro, en particular si consideramos la mejor concentración de los sistemas parabólicos.

El impulso en el desarrollo de las tecnologías de concentración cae después de esta época. En 1911, el entonces Primer señor del Ministerio de marina Winston Churchill tomó la decisión de cambiar, de carbón a petróleo, como combustible para la flota naval entera de la Gran Bretaña. Esta decisión se derivó de razones tanto tácticas como económicas; buena parte de la decisión la tomó auspiciado por Marcus Samuel, fundador de la Royal Dutch Shell [21]. Ello fue visto por muchos historiadores como decisivo en la aceptación mundial del petróleo como fuente de energía. La mayoría de las armadas del mundo se vieron obligadas a tomar la misma ruta tecnológica por las ventajas que ofrecía este nuevo sistema comparado con el anterior con base en carbón. Esto debido a que, por un lado, los barcos propulsados con carbón producían estelas de humo muy grandes por encima de la embarcación, lo cual las hacía visibles a grandes distancias; y por otro lado la densidad energética del petróleo permitió diseños de embarcaciones distintas a las disponibles hasta ese momento. Antes de decidir cambiar el grueso de las flotas navales del mundo a petróleo otras fuentes de energía estaban en consideración real a nivel mundial.

Es hasta la década de los setenta del siglo pasado que se da un resurgimiento del interés en este tipo de sistemas para aplicaciones solares que no fuesen simplemente caseras (calentamiento de agua para piscinas) [22]. El alto costo del petróleo a finales de esta década hace que la investigación en este tipo de tecnologías repunte. Bankston [22] cita tres tipos de tecnologías de concentración que identificó en 1989 con potencial, o en uso como la de canal parabólico de las plantas SEGS de California. Las tecnologías son: colectores sin seguimiento, canal parabólico, y plato parabólico. De éstos, la última es la de interés para nuestro trabajo, a dicha tecnología Bankston le asigna el mejor potencial para la producción de electricidad, mediante el acoplamiento de motores Stirling. Sin embargo, el reporte es claro en señalar que aún se necesita más investigación y desarrollo en muchas áreas para que los concentradores de foco puntual sean viables económicamente. En un análisis más reciente Mills [23] (2004) plantea que los motores Stirling están siendo reemplazados por micro turbinas de gas, las cuales pueden entregar electricidad con una mejor relación precio-costo. También hay otras aplicaciones que buscan desacoplar al motor o turbina del foco de la parábola, como lo demuestra el trabajo de Jaramillo y del Río [24]. Recientemente se han desarrollado sistemas de concentración puntual para aplicaciones fotovoltaicas o térmicas híbridas de baja potencia [25]. De los dos últimos ejemplos se puede apreciar que cada vez más el uso de las antenas parabólicas para generación de potencia, o para coadyuvar en esto, es cada vez más común.

A partir del renacimiento en los setenta de las fuentes renovables, se tiene además una nueva conciencia del reciclaje. Este nuevo concepto más integrado de un desarrollo sustentable se vuelve muy importante para los diseñadores. Usar partes o subsistemas baratos, fáciles de encontrar en el mercado y que no representaran una nueva fuente de contaminación se convirtió en parte integral de dicha filosofía. Esto es un elemento

más que se habrá de tener en consideración al momento de analizar y proponer este tipo de trabajos.

### 1.3. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es estudiar la viabilidad de un sistema para producir café usando un concentrador solar de foco puntual reciclado a partir de una antena de televisión satelital (DirecTV). Para lograr esto se tienen cuatro objetivos particulares: a) crear un modelo teórico de la transferencia de calor del sistema para obtener la evolución de su temperatura; b) diseñar un sistema de seguimiento solar para el concentrador; c) poner en operación el sistema y medir la variable termodinámica temperatura del agua en el recipiente de la *Cafetera Espresso*; d) analizar los resultados experimentales y teóricos para validar el modelo teórico.

La organización del trabajo se detalla a continuación:

Con base en el concentrador de foco puntual, y las características de la cafetera usada en el sistema, se desarrolló un modelo teórico de transferencia de calor en el sistema. Se planteó un balance de energía para representar el sistema en cuestión. Para resolver la ecuación diferencial no lineal planteada se utilizó la herramienta computacional de software comercial *Mathematica 5.0* tomando como datos de entrada algunas variables que se midieron durante la fase experimental.

Para hacer el seguimiento solar se diseñó un sistema de tipo ecuatorial. Este sistema se modeló en un software comercial de CAD 3D, en el que se propusieron y descartaron distintas configuraciones. Ya con un modelo aceptado se transfirió el archivo a un programa de análisis de elemento finito para tener la certeza de que el sistema propuesto tuviese la capacidad de soportar el peso del concentrador sin deformarse o sufrir alteración alguna. Una vez terminados los pasos anteriores se mandó construir el sistema.

Se llevaron a cabo más de veinte experimentos en días de buena insolación para poder obtener los datos experimentales con los cuales validar el modelo teórico. Para dichos experimentos se instrumentó el sistema con cuatro termopares que fueron conectados a un adquisidor de datos para el análisis posterior de resultados experimentales.

Una vez obtenidos tanto los datos experimentales como los teóricos se hizo un análisis de la consistencia de los resultados que arroja el modelo teórico contra los experimentales. El ejercicio se hizo para verificar la validez del modelo teórico. El resultado de éste análisis fue satisfactorio, encontrando una buena correlación entre ambos resultados.

Finalmente se presentan los resultados y las conclusiones del trabajo. Adicionalmente se plantean algunas opciones para trabajo a futuro con base en lo desarrollado aquí.



---

## Capítulo 2

# Modelo teórico

---

Para modelar y predecir correctamente la evolución de un sistema físico es fundamental entenderlo. Para esto, es importante comprender todos los procesos que ocurren en el sistema para plantear las ecuaciones que los describen. El objetivo de este capítulo es establecer el modelo teórico que permite describir la evolución de la temperatura del agua en una “*Cafetera Espresso*” cuando está acoplada a un concentrador de foco puntual como fuente de energía. Para ello es necesario entender como evoluciona el sistema y cuales son los conceptos generales involucrados en los procesos físicos. En el caso de estudio, la *Cafetera Espresso*, los conceptos detrás de los fenómenos físicos son: a) la óptica (absortancia, reflectancia, y concentración geométrica); b) la energía interna; c) la transición de fase; d) la transferencia de calor (conductiva, convectiva y radiativa) y e) la Ley de Darcy.

El modelo que eventualmente se plantea nos lleva a una ecuación diferencial no lineal, cuya solución se lleva a cabo mediante un método numérico. En este caso se utiliza *Mathematica 5.0* como la herramienta computacional para resolver la ecuación. Se escribió un código que emula la temperatura del sistema cada segundo. Como una alternativa se linealizó la ecuación diferencial por medio de la simplificación presentada en Tápia (2004) [26] y se encontró que la discrepancia en los resultados de ambas soluciones es pequeña.

A continuación se procede a dar una explicación simplificada de los procesos en la producción del café líquido, para luego hablar brevemente de los conceptos de dichos procesos, que también se utilizan en el modelo. Después de esto se desarrolla el modelo, y al final se presentan algunos de los resultados teóricos de dicho modelo junto con algunas comparaciones con la ecuación linealizada.

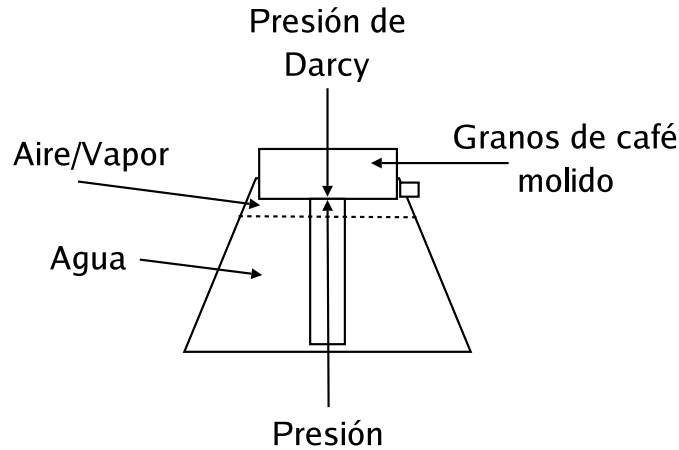


Figura 2.1: Esquema del sistema termodinámico considerado.

## 2.1. Procesos en la producción del café líquido

Antes de detallar los conceptos del modelo teórico, es pertinente dar una visión general del proceso mediante el cual se produce café líquido. Esto permite establecer los conceptos que serán utilizados en el modelo, y que se desarrollan de manera individual en esta sección.

Los fenómenos, que se toman en cuenta para el modelo, que se llevan a cabo durante el proceso de generación de café líquido (figura 2.1), visto dentro del recipiente de agua de la cafetera, son cuatro: i) la transferencia de calor de entrada al sistema; ii) las pérdidas de calor convectivas; iii) las pérdidas de calor radiativas; y iv) la transición de fase del agua en el recipiente. Estos fenómenos se llevan a cabo en tres etapas de tiempo; en la primera, entra y sale calor del sistema, pero no se transfiere masa; en el segundo, adicionalmente a la transferencia de calor hay transferencia de masa, lo cual cambia la forma de las ecuaciones que describen al sistema; en el último bloque de tiempo el sistema ya no tiene masa de agua, esta etapa ya no es de interés para este trabajo porque el café líquido ya está preparado. Las primeras dos etapas de tiempo tienen como constante la entrada de energía proporcionada por el concentrador de foco puntual.

En el tiempo cero, el sistema termodinámico, formado por el recipiente de aluminio, el agua en el recipiente y un pequeño volumen de aire, se encuentra a una temperatura alrededor de los  $20^{\circ}\text{C}$ . El recipiente de aluminio está ocupado por dos fluidos, el agua, que ocupa la mayor parte del volumen, y una pequeña capa de aire sobre el agua. Conforme avanza el tiempo, existe una entrada de calor proveniente del concentrador, por lo tanto el agua comienza a elevar su temperatura, almacenando el calor suministrado por el concentrador en forma de energía interna. La parte inferior del fluido se calienta más que la superior, ya que es en la placa inferior del recipiente donde se recibe la energía proveniente del concentrador. Esta diferencia de temperatura en el líquido

genera diferencias de presión en el agua. Dicha diferencia de presión crea celdas convectivas que transportan energía de la parte inferior del líquido a su parte superior. La diferencia en presión también permite que se generen pequeños puntos de nucleación de vapor cerca de la placa inferior de la cafetera, ya que la temperatura del líquido en esta región llega a su temperatura de saturación para la densidad disminuida de éste. Dicha transición de fase es pequeña, pero empieza a generar una presión dentro del líquido; la presión aumenta gracias a los granos molidos de café, que obstruyen el paso del agua hacia el recipiente superior. Durante estos procesos, ya que el aluminio de la cafetera se calienta, se tienen pérdidas convectivas y radiativas al medio ambiente.

Existe un punto, en el cual, la presión en el líquido supera la presión de Darcy crítica del medio poroso formado por los granos de café. A partir de este punto el agua que se encuentra en el recipiente empieza a pasar a través de los granos de café y llega hasta el recipiente superior de la *Cafetera Espresso*. Al superar la presión crítica de Darcy el agua satura a los granos molidos de café, y al hacer esto cambia la permeabilidad de dicho medio poroso; la permeabilidad de éste, cuando está saturado, es varios órdenes de magnitud menor que la permeabilidad del medio no saturado. Los procesos que se desarrollaban durante la etapa anterior siguen ocurriendo, y en esta etapa se debe tomar en cuenta que la energía interna del sistema previamente definida disminuye por la transferencia de masa de dichos procesos.

Eventualmente la presión no puede vencer a la gravedad, y por lo tanto la columna de agua se colapsa, pero, para este punto, la mayor parte del líquido ya pasó al recipiente superior. Es importante aclarar que lo que sube por el tubo de la cafetera, atraviesa los granos de café molido, y luego se deposita en el recipiente superior es agua líquida, y no vapor, la presión del vapor en la parte inferior de la *Cafetera Espresso* es lo que fuerza al agua a subir, pero el vapor en sí no sube, o sube en una fracción muy pequeña en comparación con la fracción de líquido.

En el momento en que el peso de la columna de agua iguala una vez más a la presión del gas, y por lo tanto deja de salir agua del sistema, es que se considera que se terminó de hacer el café, los fenómenos que sucedan dentro del sistema a partir de este momento ya no son de interés.

Una vez establecidos los procesos básicos que ocurren durante la producción de café líquido en la *Cafetera Espresso* detallan los conceptos de dichos procesos en la siguiente sección.

## 2.2. Conceptos del modelo teórico

Es importante entender los pilares sobre los cuales está construido nuestro modelo teórico, en este caso las áreas generales son: 1) los fenómenos ópticos en la superficie del plato reflector; 2) el cambio en la energía interna del sistema termodinámico; 3) la transición de fase del agua en la cafetera; 4) los procesos de transferencia de calor que suceden sobre la *Cafetera Espresso*; y 5) el balance entre la presión del gas generado por la transición de fase y la presión de Darcy creada por la presencia de los granos de café. No todos los conceptos se reflejan de manera obvia en la ecuación que se presenta en la sección 2.3, sin embargo todos son de vital importancia para entender lo que está sucediendo dentro de la *Cafetera Espresso*. Estos son desarrollados a continuación.

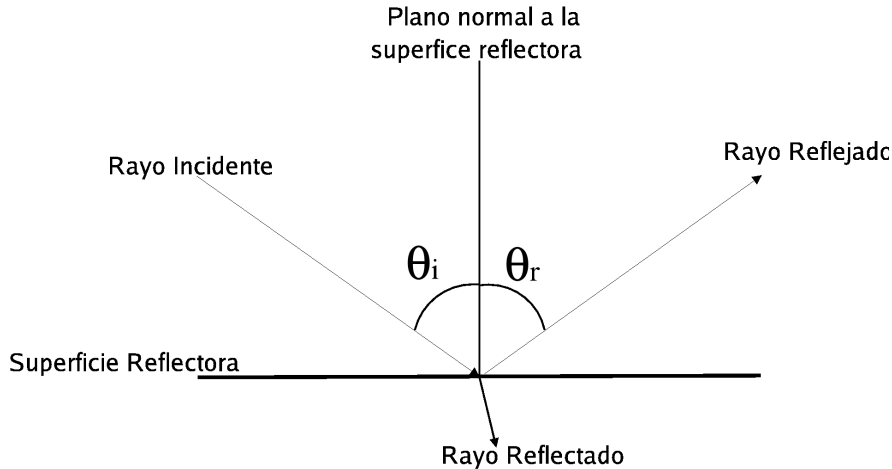


Figura 2.2: Trayectoria de un rayo reflejado y refractado.

### 2.2.1. Fenómenos ópticos

Son tres los conceptos ópticos que juegan un papel en nuestro modelo: i) la absorción, proceso de absorción de la energía luminosa incidente sobre cualquier superficie; ii) la reflectancia, proceso de reflexión de la energía luminosa incidente sobre cualquier superficie y; iii) concentración geométrica, proceso de concentración del haz luminoso incidente sobre una geometría concentradora.

Cuando los fotones inciden sobre una interfaz entre dos materiales suceden tres fenómenos: parte de ellos se rechazan (reflexión), parte de ellos se transmiten al otro material (refracción), o son absorbidos (absorción).

La absorción es el proceso de transferencia de energía, de los fotones de un haz de luz, hacia una superficie o cuerpo. Todo cuerpo real absorbe cierto porcentaje de la energía de los fotones que inciden sobre él, y rechaza el resto de ellos; el porcentaje absorbido depende de elementos como la naturaleza del cuerpo y la longitud de onda de los fotones. A la fracción de energía absorbida se le conoce como coeficiente de absorción o absorción, y cada tipo de superficie tiene su propio coeficiente.

La ley de reflexión nos dice que, para una superficie especular, el ángulo de incidencia de un rayo, respecto a la normal de la superficie especular, es igual al ángulo de reflexión, como se ve en la figura 2.2, lo que es

$$\theta_i = \theta_r. \quad (2.1)$$

donde  $\theta_i$  y  $\theta_r$  son los ángulos de incidencia y reflexión respectivamente. Las superficies que pueden formar imágenes reflejadas se les llama *especulares*, éstas son las preferidas para aplicaciones solares de concentración óptica, como en esta tesis.

Los dispositivos que tienen la propiedad de aumentar la densidad de flujo radiante se llaman concentradores ópticos; existen muchos tipos de concentradores, desde

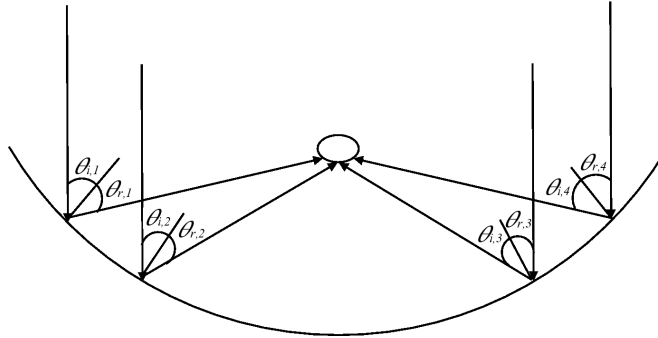


Figura 2.3: Esquema de los rayos en el concentrador de foco puntual.

dispositivos simples de un solo componente, hasta dispositivos altamente complicados compuestos de muchos subsistemas [27]. Estos son muy utilizados en aplicaciones solares por las ventajas que traen, como poder reducir el tamaño de los dispositivos, aumentar la transferencia de calor, reducir las pérdidas por convección y muchas otras. En nuestro caso se usa un concentrador de foco puntual para suministrar la energía al sistema. Una de las formas más importantes para caracterizar dichos concentradores es por su *concentración geométrica* [27], que está definida como

$$C = \frac{\text{Área del concentrador}}{\text{Área concentrada}}, \quad (2.2)$$

el área superficial del concentrador ( $m^2$ ) sobre el área en la que se logra concentrar el haz ( $m^2$ ). Esta cantidad nos dice que tanto aumenta la densidad de flujo radiante. Los concentradores de foco puntual, como se dijo en el capítulo anterior, tienen una larga historia en aplicaciones solares; la mayoría tienen forma de parábola o cono, ya sea en un solo elemento como lámina, o en múltiples elementos menores como múltiples espejos que dan la forma de una curvatura más grande. En el caso de este trabajo se utiliza un concentrador de una sola pieza, que es una antena de *DirectTV* reciclada, hecha de acero inoxidable, que se pulió para obtener un acabado espejo. Estos concentradores funcionan de manera simple, aplicando la ley de reflexión de la ecuación (2.1); los rayos se dirigen a una sola área mediante el uso de la curvatura de los concentradores (figura 2.3). Los rayos que inciden sobre la superficie del concentrador son reflejados según la *Ley de reflexión* y, gracias a la curvatura del concentrador se logra que, independientemente del punto de reflexión, estos se concentren en un área menor que el área de la superficie del concentrador. Este efecto permite que se aumente la densidad de flujo radiante y permita una transferencia energética mayor a la que se tendría sólo exponiendo el dispositivo al Sol sin concentración, aumentando así la disponibilidad de energía útil para los procesos de transferencia de calor.



### 2.2.2. La energía interna de sistemas termodinámicos

El concepto de energía es muy complicado, en realidad no se sabe que es la energía, pero si podemos observar sus manifestaciones [28]. La energía existe en muchas manifestaciones, como la térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, química y nuclear. De todas éstas, las formas de energía que se asocian con el nivel microscópico de un sistema termodinámico, su estructura molecular y su actividad a este nivel, son aquellas, cuya suma se denominan *Energía Interna* [29]; otra forma de decirlo es afirmar que la energía interna es aquella que está asociada con la temperatura de los sistemas termodinámicos [32].

Es importante entender la diferencia entre lo que es calor y energía interna. El calor sólo se reconoce en la frontera del sistema termodinámico, e n otras palabras, es energía en tránsito, únicamente como consecuencia de la diferencia de temperaturas [32].

### 2.2.3. Transiciones de fase

Las transiciones de fase implican cambios físicos en los sistemas termodinámicos, de una fase a otra. Normalmente se puede distinguir una transición porque durante ésta, suceden cambios abruptos de al menos una propiedad física del sistema termodinámico a raíz de pequeños cambios en alguna variable termodinámica [33]. Los sistemas termodinámicos, cuando no están en transición de fase, y no exista ningún tipo de trabajo, aumentan o disminuyen su temperatura al recibir o ceder calor [32], respectivamente. Cuando los flujos de calor hacia o desde un sistema termodinámico no resultan en cambios en la temperatura, se tiene una transición de fase [32].

Las transiciones de fase se entienden, a nivel microscópico, como el resultado del reacomodo de las moléculas de las sustancias, que forman a los sistemas termodinámicos, al recibir o ceder calor [32]. En el caso de los líquidos, que es el de importancia en este caso, es necesario hacer trabajo sobre las fuerzas moleculares de atracción para lograr la separación de sus moléculas [32].

Como se dijo antes, se requiere de un intercambio de calor para lograr una transición de fase. La cantidad de calor que se consume para lograr el reacomodo molecular está dada por

$$\dot{Q} = \frac{dm}{dt}L. \quad (2.3)$$

En la ecuación (2.3)  $\dot{Q}$  es el flujo de calor necesario para sostener la transición (W),  $\frac{dm}{dt}$  es la razón de formación de masa transformada de una fase a otra (Kg/s), y  $L$  se le conoce como calor latente (J/Kg), y éste va a ser distinto dependiendo de la sustancia, del tipo de cambio de fase que se dé y de la presión a la que se desarrolle el proceso [32]. Para el caso de un cambio de sólido a líquido a la  $L$  se le conoce como calor de fusión, mientras que para una transición de líquido a vapor se le conoce como calor de vaporización.

De todos los tipos de transición de fase que se pueden llevar a cabo, la transición que ocurre en el sistema termodinámico que aquí analizamos es la ebullición. Ésta ocurre cuando un líquido es puesto en contacto con una superficie que se encuentra, y mantiene, a una temperatura superior a la temperatura de saturación ( $T_{sat}$ ) del líquido [29]. El punto de saturación de un líquido está caracterizado por una temperatura

y una presión, y es aquel en el cual, cualquier adición de energía a la energía interna del líquido, resulta en una transición de fase. Se puede decir que en este punto el líquido está saturado de energía térmica, y por lo tanto ya no puede almacenar más de ésta. Un líquido se encuentra en su presión de saturación cuando la presión de éste es igual a la presión del gas con el que tiene frontera. La ebullición es un proceso que se caracteriza por la formación de burbujas en la interfase sólido-líquido, donde el sólido es la superficie caliente por encima de la temperatura de saturación del líquido. Las burbujas se forman sobre la superficie del sólido, y se desprenden de ésta cuando logran un cierto tamaño, intentando llegar a la superficie libre del líquido numerados a continuación [29].

El cambio de fase es una forma de transferencia de calor poco entendida [34]. La ebullición es un caso particular de transición de fase. Para este tipo de transferencia de calor, cuando se da por diferencia entre la temperatura sobre una pared y la temperatura de saturación de un líquido que rodea a la pared, se pueden distinguir seis regiones principales [34]:

1. El calor es transportado por líquido supercalentado que sube hasta la interfase líquido-vapor donde la evaporación tiene lugar.
2. En esta región se forman burbujas de vapor; pero en su camino hacia la superficie se condensan en el seno del líquido.
3. Se arriba a la tercera región cuando la temperatura del fluido es tal que las burbujas de vapor llegan a la interfase.
4. En esta región se observa un gran número de burbujas que, en algunas regiones, forman una película uniforme; esto dificulta la transferencia de calor. Entre la región anterior y ésta se encuentra un máximo de transferencia de calor llamado el punto crítico.
5. Esta región se caracteriza por una ebullición de película estable y uniforme.
6. En la última región se presenta un aumento en la transferencia de calor debido al alto gradiente de temperaturas, lo que implica un intercambio de calor por radiación.

Aquí adelantamos en forma cualitativa algunos resultados observados durante la preparación del café que permiten entender mejor el fenómeno. Experimentalmente se observa que la temperatura no se estaciona durante el proceso de producción de café líquido, crece de manera monótona durante la mayor parte del proceso. Sin embargo existe un punto de inflexión en la evolución de dicha temperatura, a partir del cuál la temperatura aumenta con una rapidez mayor. Ese cambio indica que algo sucede en el sistema termodinámico; probablemente en las regiones dos a cuatro descritas antes. Parece que existe una transición de fase local en puntos ubicados entre el metal y el agua. En ese punto el sistema comienza a perder masa, se encuentra a los 84°C; pero el agua no comienza a abandonar el recipiente inferior hasta que se encuentra a 94°; el tiempo en que se transita de una temperatura a otra es cuando se genera suficiente presión en el sistema para elevar la columna de agua. Consideramos que esta transición

local no es generalizada en todo el sistema termodinámico, ya que, las mediciones experimentales no presentan una meseta obvia en la evolución de la temperatura del agua en la parte inferior de la cafetera. Esto es, al seguir agregando energía al sistema, la temperatura de este sigue creciendo de manera monótona, sin estacionarse en algún intervalo de tiempo, lo que sería la indicación de una transición de fase. Por lo tanto se supone que la cantidad de masa transformada es pequeña en comparación con la masa total de agua líquida. Sin embargo, esta masa de vapor eventualmente crea suficiente presión para lograr evacuar el recipiente inferior de la cafetera.

Uno de los principales problemas para considerar los cambios de fase como transferencia de calor en el estudio de sistemas termodinámicos es que no existe una buena teoría del fenómeno [34]; para la mayoría de los casos se deben usar relaciones empíricas muy particulares para cada experimento.

Es claro que para poder comprender mejor las transiciones de fase es importante conocer como es que se da la transferencia de calor en la cafetera.

#### 2.2.4. Transferencia de calor

Existen tres tipos clásicos de transferencia de calor: a) conducción, b) convección c) y radiación. Éstas se refieren a los procesos físicos que se dan en la superficie de la *Cafetera Espresso* y que nos permiten establecer el balance de energía del sistema.

La conducción es el mecanismo mediante el cual se da la transferencia de energía térmica a través de la materia sin que haya un transporte neto de masa, por contacto de los átomos o moléculas del sistema, lo cual implica que en general los materiales sólidos son mejores conductores de calor, ya que son más densos y hay mayor cercanía entre sus átomos o moléculas. Como en todos los procesos de transferencia de calor, éste se da de una parte del sistema a mayor temperatura a uno de temperatura inferior. La ecuación que describe este fenómeno se conoce como *Ley de Fourier* [29], que definida unidimensionalmente es

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx}, \quad (2.4)$$

donde la  $\dot{Q}_{cond}$  es el flujo de calor por conducción en el sistema (W), el signo negativo de la parte derecha de la ecuación se pone por convención y es usado para indicar que el flujo de calor va del cuerpo caliente al cuerpo frío,  $k$  es la constante de conductividad térmica, que es distinta para cada material ( $\frac{W}{m \cdot K}$ ),  $A$  es el área transversal de la superficie,  $dT$  es el diferencial de temperatura entre el cuerpo caliente y el frío, y  $dx$  es el diferencial de espesor del cuerpo a través del cual se da la conducción de calor. Esta ecuación nos dice que la conducción de calor, a través del medio, es proporcional al gradiente de temperatura, a la conductividad térmica del material y al área transversal a través de la cual se da la conducción. La *Ley de Fourier* es una relación fenomenológica, es decir, surge del experimento y es válida para una muy amplia gama de materiales.

La convección se define como la transferencia de calor en medios fluidos cuando hay transporte neto de masa en ellos; en la convección natural, al variar la densidad en distintas porciones del fluido se crean *celdas convectivas* o volúmenes donde masa del fluido se transfiere de un lado a otro transportando energía térmica [29]; es muy común

que esto ocurra en el aire que rodea a una placa sólida caliente que transfiere energía al fluido que lo rodea, como es el caso de las pérdidas convectivas de calor de la *Cafetera Espresso*. Si bien los procesos involucrados en la convección son muy complicados, la expresión que la describe puede ser simple y se le conoce como la *Ley de Newton del enfriamiento* que se escribe como

$$\dot{Q}_{conv} = hA_{conv}(T_s - T_{\infty}), \quad (2.5)$$

donde la  $\dot{Q}_{conv}$  es la razón de transferencia de calor convectiva dada en Watts,  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor dado en  $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ,  $A_{conv}$  es el área superficial ( $m^2$ ) en donde ocurre la transferencia de calor,  $T_s$  es la temperatura ( $K$ ) de la superficie donde se presenta la transferencia de calor, y  $T_{\infty}$  es la temperatura ( $K$ ) de bulto del fluido al que se cede el calor.

La transferencia de calor por radiación es aquella que se pue de dar a través del vacío y ocurre cuando los cuerpos emiten radiación electromag nética al medio ambiente, normalmente en el espectro del infrarrojo, pero en ocasiones, para cuerpos muy calientes, radian en el visible también [29]; que es cuando se dice que están “*al rojo vivo*”. La transferencia de calor por radiación más obvia es la que ocurre del Sol a la Tierra durante el día. Para la mayoría de las aplicaciones térmicas, cuando el objeto estudiado llega a los  $400^{\circ}C$  la radiación empieza a crear pérdidas notables de calor en él. La ecuación que se usa para describir las pérdidas radiativas de un cuerpo hacia el medio ambiente se obtiene de la ecuación de *Stefan-Boltzmann*, la ecuación modificada está descrita por

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon\sigma A_{rad}(T_s^4 - T_{sky}^4), \quad (2.6)$$

para esta ecuación la  $\dot{Q}_{rad}$  es la razón de transferencia de calor radiativa dada en Watts,  $\epsilon$  es la emisividad de la superficie que radia, y está dada como un fracción de cero a uno adimensional,  $\sigma$  es la constante de *Stefan-Boltzmann* y tiene un valor de  $5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ ,  $A_{rad}$  es el área ( $m^2$ ) de la superficie radiante,  $T_s^4$  es la temperatura ( $K$ ) de la superficie radiante, y  $T_{sky}^4$  es la temperatura ( $K$ ) del cielo.

### 2.2.5. Ley de Darcy

La ecuación de Darcy describe el flujo de agua en medios porosos saturados, y es, como muchas ecuaciones, fenomenológica: una diferencia de potencial genera un flujo, en este caso un flujo de agua en un medio poroso. Éste fenómeno se presenta, en el caso en estudio, cuando el líquido comienza a abandonar las fronteras del sistema termodinámico, y utilizando la ley de Darcy podemos representar la resistencia o presión que ejerce el medio poroso ante el paso del fluido. En el sistema termodinámico en cuestión, el medio poroso está formado por los granos de café molido, por los cuales debe pasar el agua. Ya que, en el caso de estudio, el flujo es vertical y no horizontal como la ecuación original de Darcy, podemos reescribirla, para flujos verticales, del siguiente modo

$$Q = -A_z K \left[ \frac{dP}{dz} + \rho g \right], \quad (2.7)$$

donde  $Q$  es el flujo de agua ( $m^3/s$ ),  $A$  es el área transversal del tubo ( $m^2$ ),  $K$  es la conductividad hidráulica ( $m/s$ ),  $P$  la presión (Pa),  $\rho$  la densidad del agua ( $\frac{kg}{m^3}$ ),  $g$  la aceleración de la gravedad ( $\frac{m}{s^2}$ ), y por último  $z$  la altura de la columna de agua ( $m$ ).

Para obtener la presión que ejerce el medio poroso sobre el fluido podemos despejar  $dP$  tomando en cuenta que para este caso  $\rho g$  se asume constante; después de despejar se llega a

$$dP = -\rho g \left[ \frac{Q}{A_z K} + 1 \right] \int_{z_0}^{z_1} dz. \quad (2.8)$$

Si ahora integramos obtenemos

$$P = -\rho g \left[ \frac{Q}{A_z K} + 1 \right] \Delta z, \quad (2.9)$$

donde la  $\Delta z$  es la altura que el agua tiene que recorrer para salir del tubo al recipiente superior de la cafetera.

La presión de la ecuación (2.9), la gravedad, y la presión atmosférica, sumadas, son lo que se debe contrarrestar y vencer para lograr que el agua en el recipiente inferior de la *Cafetera Espresso* suba por el tubo, pase a través de los granos molidos de café, y se deposite en el recipiente superior.

Con los conceptos anteriores se puede avanzar a describir el modelo teórico que se usó para describir los procesos termodinámicos que suceden en la *Cafetera Espresso*.

### 2.3. Desarrollo del modelo teórico

El modelo teórico se construye con base en un balance de energía sobre la frontera del sistema termodinámico, desde el momento que se empieza a calentar hasta el tiempo en que se termina de generar el café líquido; no se analiza el sistema más allá de dicho punto. En principio el sistema termodinámico está compuesto por la parte inferior de la *Cafetera Espresso*, esto es, el recipiente junto con el agua, y los granos de café, como se presenta en la ecuación (2.15) específicamente para el cambio en energía interna del sistema; sin embargo, ya que el café molido representa muy poca masa, aproximadamente diez gramos, hace que su contribución al sistema sea pequeña comparada con la del agua y el aluminio, se desprecia y se modelan los procesos de transferencia de calor de la *Cafetera Espresso* con la ecuación (2.16). El balance de energía se puede observar en la figura 2.4, lo que es

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out}, \quad (2.10)$$

donde el término de la izquierda es el cambio en el tiempo de la energía interna de la cafetera,  $\dot{Q}_{in}$  es la energía que entra al sistema, y  $\dot{Q}_{out}$  es la energía que sale del sistema; estos términos deben tomar en cuenta los procesos ópticos y térmicos más generales; como la concentración óptica, las pérdidas conductivas, convectivas y radiativas, y el almacenamiento de energía por el agua y aluminio de la cafetera.

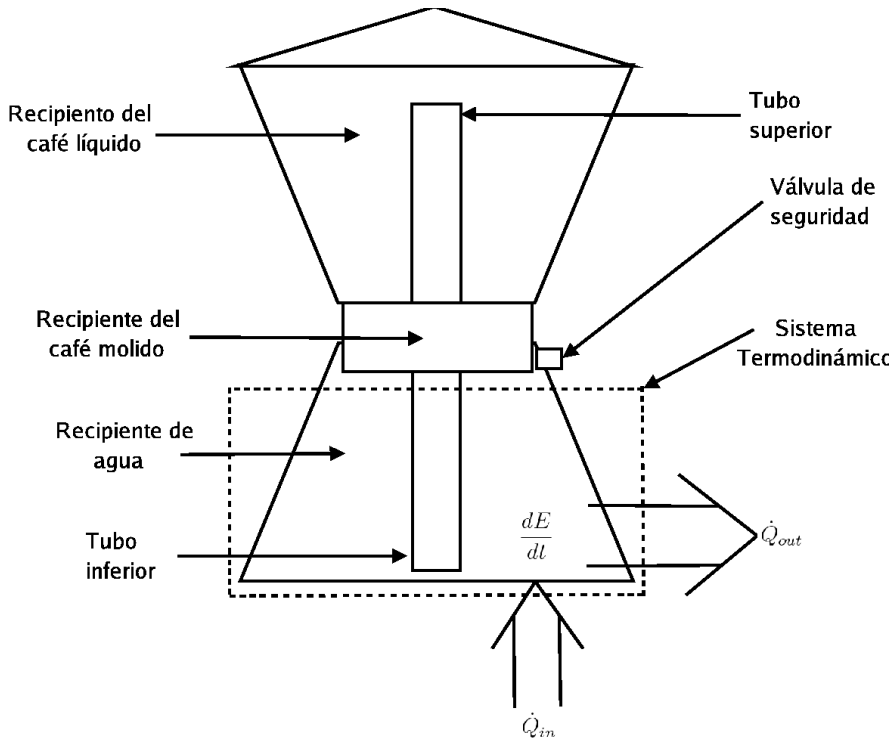


Figura 2.4: Esquema del balance de energía en la *Cafetera Espresso*.

La energía de entrada se describe a partir de la única fuente energética, la solar. Esto se da mediante el concentrador de foco puntual y la energía que este puede enfocar a la cafetera está dada por

$$\dot{Q}_{in} = C\alpha R A_s G_0(t), \quad (2.11)$$

la  $C$  representa el factor de concentración geométrico del concentrador de foco puntual que es adimensional y varía dependiendo de la hora del día, la explicación de la variación se presenta en la sección 4.1,  $\alpha$  es la absorptancia óptica de la *Cafetera Espresso*, que también es adimensional,  $R$  es la reflectancia óptica del concentrador, al igual que los dos anteriores es adimensional,  $A_s$  el área superficial ( $m^2$ ) de la placa inferior de la cafetera, y  $G_0(t)$  es la irradiancia como función del tiempo, y está dada en  $\frac{W}{m^2}$ .

Las pérdidas del sistema se pueden subdividir en tres: 1) conductivas, 2) convectivas, y 3) radiativas.

$$\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad}. \quad (2.12)$$

El término de pérdidas de calor por conducción está dado por la *Ley de Fourier*, ecuación (2.4). Como se puede observar, esta ecuación es dependiente del área de contacto entre dos cuerpos, que en nuestro caso es muy pequeña ya que son sólo dos puntos

$A_s$	$0.01 \text{ m}^2$
$A_c$	$0.02 \text{ m}^2$
$C$	Se ajusta este parámetro para los datos de cada experimento
$Cp_{agua}$	$4190 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
$Cp_{alum}$	$893 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
$G_0(t)$	Se toman de los valores medidos experimentalmente ( $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ )
$h_c$	$20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}$
$R$	$0.95$
$T_\infty$	se toma el promedio de la temperatura del medio ambiente medida experimentalmente ( $K$ )
$T_{sky}$	se toma el mismo valor que $T_\infty$ ( $K$ )
$V_{agua}$	$6 \times 10^{-4} \text{ m}^3$
$V_{alum}$	$1 \times 10^{-5} \text{ m}^3$
$\alpha$	$0.8$
$\epsilon$	$1$
$\sigma$	$5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}$
$\rho_{agua}$	$1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$\rho_{alum}$	$2707 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Tabla 2.1: Tabla con los valores de los parámetros utilizados en la evaluación del modelo teórico

donde la *Cafetera Espresso* hace contacto con el soporte que la mantiene en posición sobre el concentrador; ya que el área de contacto es muy pequeña la contribución de estas pérdidas a las pérdidas globales es muy pequeña comparada con las que se dan por convección y radiación, por lo tanto se desprecian.

El segundo término, de la ecuación de pérdidas del sistema, son las pérdidas convectivas, y se construye a partir de la *Ley de Newton del enfriamiento* que ya antes se describió en la ecuación (2.5); sustituyendo la  $h$  por  $h_c$ , el coeficiente convectivo de la cafetera,  $A_c$  por  $A_{conv}$  la superficie exterior de la cafetera,  $T(t)$  por  $T_s$  que es la temperatura del recipiente inferior de la cafetera obtenemos

$$\dot{Q}_{conv} = h_c A_c (T(t) - T_\infty). \quad (2.13)$$

El término que representa las pérdidas radiativas de la cafetera se construye a través de la ecuación (2.6); sustituyendo, al igual que en la ecuación (2.13),  $A_c$  por  $A_{rad}$ ,  $T(t)$  por  $T_s$  y  $T_\infty$  por  $T_{sky}$ , llegamos a

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon \sigma A_c (T(t)^4 - T_\infty^4). \quad (2.14)$$

La expresión para el cambio en la energía interna de la cafetera tiene tres etapas, en la primera, cuando el agua en la *Cafetera Espresso* se está calentando, pero no sale del recipiente inferior, es un sistema cerrado; en la segunda, cuando el agua empieza a desplazarse al recipiente superior, es un sistema abierto; por último, cuando ya no hay agua en el recipiente inferior, regresa a ser un sistema cerrado. Esto hace que el cambio

en la energía interna sea una función de la forma

$$\frac{dE}{dt} = \begin{cases} (m_{aluminum}C_{p_{aluminum}} + m_{agua}C_{p_{agua}} + m_{Café}C_{p_{Café}})\frac{dT(t)}{dt}, & 0 \leq t < t_o, \\ (m_{aluminum}C_{p_{aluminum}} + m_a(t)C_{p_{agua}} + m_{Café}C_{p_{Café}})\frac{dT(t)}{dt}, & t_o \leq t \leq t_1, \\ (m_{aluminum}C_{p_{aluminum}} + m_{Café}C_{p_{Café}})\frac{dT(t)}{dt}, & t > t_1, \end{cases} \quad (2.15)$$

donde  $t_o$  es el tiempo en el que el agua empieza a subir al recipiente superior,  $t_1$  es el tiempo en que el agua deja de subir al recipiente superior,  $m_i$  ( $kg$ ) y  $C_{p_i}$  ( $\frac{J}{Kg \cdot K}$ ) son, respectivamente, la masa y la capacidad calorífica del elemento  $i$ , que puede ser el aluminio, el agua o el café, adicionalmente  $m_a(t)$  ( $kg$ ) es la masa del agua en el recipiente inferior de la *Cafetera Espresso* después del tiempo  $t_o$  y hasta el tiempo  $t_1$ , que es el tiempo en que el café líquido sale en la parte superior de la cafetera,  $\frac{dT(t)}{dt}$  representa el cambio de temperatura respecto al tiempo del sistema termodinámico ( $\frac{K}{s}$ ). La tercera parte de la ecuación, la que se desarrolla cuando  $t > t_1$  no se considerará ya que, para esta parte de la ecuación, el café ya está hecho, por lo tanto ya no es necesario seguir analizando la transferencia de calor y la temperatura del sistema.

Una vez que se tienen los términos de las ecuaciones (2.11) a (2.15) se puede escribir la ecuación completa que representa el balance de energía del sistema termodinámico de la figura 2.4. El balance es simple, la energía que entra al sistema (ecuación (2.11)), menos las pérdidas de energía del sistema (ecuaciones (2.13) y (2.14)) debe ser igual a la energía almacenada por el sistema (ecuación (2.15)); escribiendo lo anterior, recordando que no se resuelve para la tercera parte de la ecuación (2.15) y que se desprecia la contribución de los granos de café nos queda

$$C\alpha RA_s G_0(t) - hA_c(T(t) - T_\infty) - \epsilon\sigma A_c(T(t)^4 - T_\infty^4) = \begin{cases} (m_{aluminum}C_{p_{aluminum}} + m_{agua}C_{p_{agua}})\frac{dT(t)}{dt}, & 0 \leq t < t_o, \\ (m_{aluminum}C_{p_{aluminum}} + m_a(t)C_{p_{agua}})\frac{dT(t)}{dt}, & t_o \leq t \leq t_1, \end{cases} \quad (2.16)$$

lo cual representa la ecuación diferencial no lineal cuya solución nos da la evolución de la temperatura del sistema termodinámico.

En general, para los distintos valores de las ecuaciones (2.11) a (2.16) se utilizan los valores presentados en la tabla 2.1. El valor de  $\alpha$  se toma de los valores reportados por Ballestrin et. al [30], ya que la base de la *Cafetera Espresso* se pintó con Zynolyte. El valor para  $h_c$  se toma como un valor alto para convección natural, reportado por Incropera et. al [31], en la tabla 1.1, que van de los 10 a los 25  $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ .

### 2.3.1. Modelo simplificado

En general la ecuación (2.16) no tiene solución analítica, sin embargo para intervalos de  $T(t)$  menores a los 100°C se puede aproximar por una forma lineal que considera los efectos radiativos de una manera promedio. La técnica consiste en linealizar la parte cuártica de la ecuación como lo hizo Tápia (2004) [26]. El método es simple y consiste



$h_r [T(t) = 293.15K]$	6.01
$\vdots$	$\vdots$
$h_r [T(t) = 330.15K]$	7.21
$h_r [T(t) = 331.15K]$	7.25
$h_r [T(t) = 332.15K]$	7.28
$\vdots$	$\vdots$
$h_r [T(t) = 368.15K]$	8.66
$\overline{h_r}$	6.20

Tabla 2.2: Tabla con los valores intermedios de  $h_r$ , tomando  $\epsilon = 1$  y  $T_\infty = 303.15K$ , con intervalos de 1K.

en las siguientes consideraciones para la parte radiativa, primero se descompone de la forma

$$\epsilon\sigma A_c (T^2(t) + T_\infty^2) (T^2(t) - T_\infty^2), \quad (2.17)$$

$$\epsilon\sigma A_c (T^2(t) + T_\infty^2) (T(t) + T_\infty) (T(t) - T_\infty), \quad (2.18)$$

reordenando

$$\epsilon\sigma (T(t) + T_\infty) (T^2(t) + T_\infty^2) \cdot A_c (T(t) - T_\infty). \quad (2.19)$$

con esto podemos definir una  $h_r$  de la siguiente forma

$$h_r = \epsilon\sigma (T(t) + T_\infty) (T^2(t) + T_\infty^2) \quad (2.20)$$

A partir de la ecuación (2.20) podemos definir una  $\overline{h_r}$ . Esto se logra definiendo el intervalo de temperaturas para las cuales se va a obtener el valor de  $\overline{h_r}$ , el paso que se va a usar para llegar de un punto a otro del intervalo, y definir y fijar un valor para  $T_\infty$ . Se evalúa un valor de  $h_r$  para cada temperatura en el intervalo que esté definida por el paso, se evalúa la expresión de la ecuación (2.20) y luego se promedia para encontrar  $\overline{h_r}$ , como se puede observar en la tabla 2.2.

Con el valor de  $\overline{h_r}$  podemos escribir una ecuación linealizada para las pérdidas radiativas de la forma

$$A_c \overline{h_r} (T(t) - T_\infty). \quad (2.21)$$

Cuando se hace esto se puede reescribir la ecuación (2.16) de la forma

$$\begin{aligned} \frac{dT(t)}{dt} + \frac{A_c (h_c + \overline{h_r})}{m_{alum} C_{p alum} + m_{agua} C_{p agua}} T(t) = \\ \frac{A_c (h_c + \overline{h_r}) T_\infty + C\alpha R A_s G_0}{m_{alum} C_{p alum} + m_{agua} C_{p agua}}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Al simplificar definiendo dos constantes de la forma

$$A = \frac{A_c (h_c + \bar{h}_r)}{m_{aluminum} C_{p_{aluminum}} + m_{agua} C_{p_{agua}}}, \quad (2.23)$$

$$B = \frac{A_c (h_c + \bar{h}_r) T_\infty + C \alpha R A_s G_0}{m_{aluminum} C_{p_{aluminum}} + m_{agua} C_{p_{agua}}}, \quad (2.24)$$

donde  $A$  tiene unidades de  $s^{-1}$  y  $B$  de  $K/s$ .

De esta forma (2.22) nos queda

$$\frac{dT(t)}{dt} + AT(t) = B. \quad (2.25)$$

Tanto  $A$  y  $B$  son constantes, y por lo tanto esta ecuación diferencial si tiene solución analítica de la forma

$$T(t) = \frac{B}{A} + C_0 e^{-At}. \quad (2.26)$$

donde  $T(t)$  esta dado en grados Kelvin.

Al tomar la condición inicial de  $T(t=0) = 293.15K$  obtenemos el valor de la constante de integración y nos queda

$$T(t) = \frac{B}{A} + (293.15K - B/A) e^{-At}. \quad (2.27)$$

La ecuación (2.27) representa una solución analítica equivalente a la solución que se puede obtener, mediante métodos numéricos, de la ecuación 2.16. Como se puede observar de la figura 2.5 la diferencia entre los resultados obtenidos entre una y otra solución es muy pequeña, por lo tanto la aproximación es buena y sirve para modelar el sistema en los rangos de las variables termodinámicas que se usan en el modelo, particularmente alrededor de una temperatura de 100 °C.

## 2.4. Comparación de los modelos teóricos

En la figura 2.5 se presentan los resultados de los dos modelos teóricos propuestos, permitiendonos comparar ambos. Se usaron los datos presentados en la tabla 2.1, pero usando irradiancias promedio indicadas en la gráfica, no experimentales instantáneas. Para todos los casos se utiliza una temperatura inicial de 20°C, una masa inicial de agua de 250g, una temperatura ambiente de 25°C y una concentración geométrica de  $C=11$ . Para obtener ambas soluciones se utilizó el software comercial *Mathematica 5.0*. La gráfica de la figura 2.5 nos permite afirmar que no existe una diferencia importante entre los dos modelos presentados, ya que se puede apreciar, claramente, que la discrepancia entre el modelo resuelto por métodos numéricos, y el modelo linealizado es muy pequeña para cada valor de irradiancia. De esta forma se valida el uso de la aproximación lineal para casos donde la temperatura de la cafetera es del orden de 100°C.

Si bien el objetivo final de este capítulo es el de establecer el modelo teórico, capaz de predecir la evolución de la temperatura del sistema termodinámico, la validez

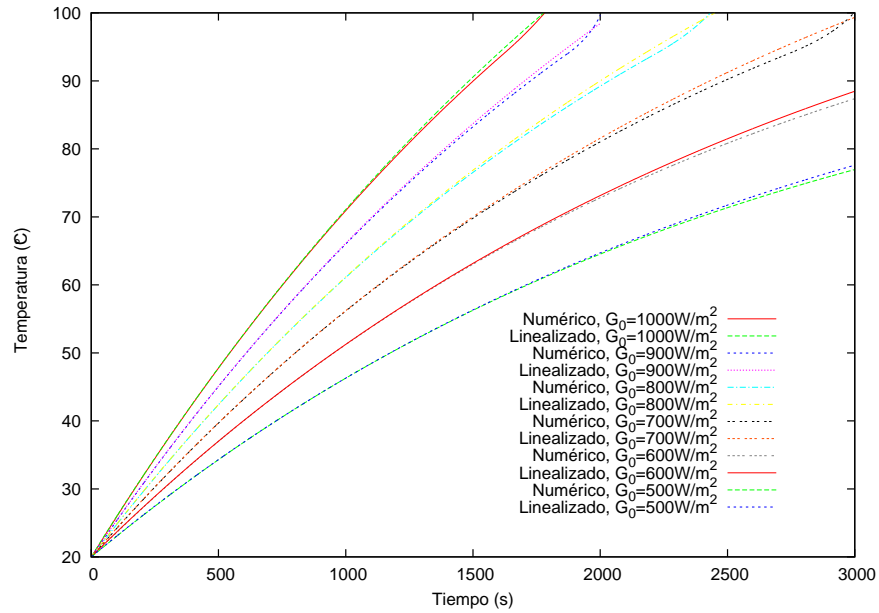


Figura 2.5: Evolución teórica de la temperatura a distintas irradiancias, modelo numérico y linealizado.

de cualquier modelo sólo puede ser establecida mediante experimentación. Para lograr validar el modelo, entonces, es necesario llevar a cabo una serie de pasos que, en este caso, incluyen diseñar al menos dos dispositivos mecánicos. Dichos dispositivos son necesarios para que el concentrador pueda hacer el seguimiento del Sol y a la vez mantener la *Cafetera Espresso* en una posición adecuada; es importante señalar que las antenas de *DirectTV* están diseñadas para apuntar a un punto fijo en el firmamento, específicamente a satélites geoestacionarios, el acto de seguir al Sol no está contemplado en la estructura de estas antenas parabólicas. De estos diseños se habla en el siguiente capítulo.

---

## Capítulo 3

# Diseño del dispositivo para el seguimiento solar

---

El diseño de cualquier dispositivo que se pretenda usar para seguir al Sol tendrá que tomar en cuenta el hecho que el Sol no se mantiene geoestacionario. Es por esto que se hace necesario usar sistemas de seguimiento solar para la mayoría de las aplicaciones solares. Si bien es cierto que para algunas aplicaciones, como los paneles fotovoltaicos, no es crucial tener dicho seguimiento, para los concentradores, sobre todo los de foco central, es vital tener un buen seguimiento del astro. En este capítulo se presenta el diseño de un sistema de seguimiento solar, para la antena reciclada de *DirectTV* que se propone como concentrador de foco puntual, la cual se desglosa en las siguientes secciones: 1) Criterios de diseño y tipos de sistemas de seguimiento, donde se discuten los criterios de diseño que se utilizaron y se presentan las formas generales de seguimiento que existen para estas aplicaciones; 2) Diseño del sistema de seguimiento: aquí se muestran algunos diseños preliminares, al igual que el diseño que se escogió, detallando sus partes y funcionamiento; y 3) Pruebas de elemento finito: en esta sección se muestran las pruebas de elemento finito que se le aplicaron al diseño estructural para cerciorarnos que pudiese tolerar los esfuerzos mecánicos a los cuales sería sometido por el peso del concentrador y la montura de éste.

Para poder diseñar un dispositivo es necesario, primero, tener idea de qué es lo que se quiere lograr con él, qué opciones existen para dicho objetivo, para posteriormente evaluar cual opción es la mejor para el trabajo que se pretende llevar a cabo. Para lograr esto es importante establecer claramente desde el principio cuales son los criterios de diseño y cuales son los diseños generales que logran estos propósitos.

### 3.1. Criterios de diseño y tipos de sistemas de seguimiento

#### 3.1.1. Criterios de diseño

Todo dispositivo tiene una función o funciones; para asegurar que éste cumpla con todo lo que se desea de él, es necesario establecer, desde el principio, qué es lo que se desea que haga. En nuestro caso es necesario tener en mente dos aspectos, primero que es necesario hacer el seguimiento del Sol durante el día, y que además se debe sostener una *Cafetera Espresso* por encima de la antena parabólica, en donde se encuentre el foco óptico de ésta. En el caso del sistema de seguimiento, se establecieron los siguientes criterios con los cuales debe cumplir el aparato final:

- Seguimiento:
  1. Debe ser capaz de seguir al Sol durante todo el día.
  2. Debe seguir al Sol con un número mínimo de movimientos.
  3. Debe poder seguir al Sol en cualquier época del año, desde cualquier latitud.
- Operación del sistema:
  1. El sistema debe ser fácil de usar.
  2. El sistema debe ser fácil de automatizar.
- El sistema debe ser capaz de soportar el peso del concentrador y su montura sin deformaciones que impacten a la seguridad del operario y la capacidad del sistema para llevar a cabo el seguimiento.

La montura para la *Cafetera Espresso* tiene un conjunto distinto de requerimientos:

- Debe ser capaz de posicionar a la *Cafetera Espresso* en el foco del concentrador a cualquier hora del día.
- El sistema debe ser fácil de usar.
- El sistema debe ser capaz de soportar el peso de la *Cafetera Espresso*.
- El sistema debe mantener la base de la *Cafetera Espresso* paralela con el plano del horizonte.

Una vez establecidos los criterios de diseño, es necesario estudiar los dispositivos que sean capaces de cumplir con las especificaciones que se impusieron.

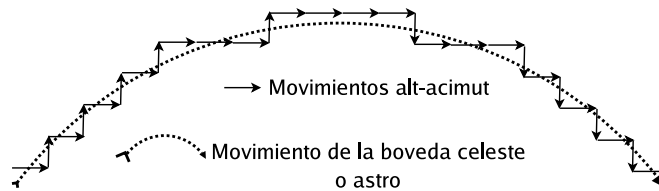


Figura 3.1: Forma del seguimiento de una montura *alt-acimut*.

### 3.1.2. Sistemas de seguimiento

El tipo de sistemas que más se parecen a lo que se estableció en los criterios de diseño son aquellos que, históricamente, se usan en la astronomía. Existen al menos cuatro tipos generales de dispositivos usadas en la astronomía: 1) los *alt-acimut*, 2) los *ecuatoriales*, 3) los *de tránsito*, y por último 4) los *fijos*. Los dos últimos tipos de sistemas tienen funciones muy específicas que no contemplan el seguimiento de la bóveda celeste, este simple hecho hace que no cumplan con las características de seguimiento necesarias para nuestro dispositivo, por lo tanto se descartan. Los sistemas *alt-acimut* hacen un seguimiento de los astros en dos movimientos; como su mismo nombre lo indica estos movimientos son el altura y acimut (izquierda/derecha). El tipo de seguimiento que hacen se puede observar en la figura 3.1. Debido a estos dos movimientos no es fácil automatizar este tipo de monturas.

Los dispositivos *ecuatoriales* logran seguir a los astros en un sólo movimiento. El nombre se toma del hecho que este tipo de montura lo que hace es poner uno de los ejes del telescopio en el mismo plano que el ecuador de la tierra; de esta forma todo lo que hay que hacer es barrer dicho plano en un arco, como se puede observar en la figura 3.2 (ya que el observador se queda fijo en un punto). Este tipo de movimiento da un ajuste muy superior al tipo de desplazamiento de la bóveda celeste, como se puede observar en la figura 3.3; por esta manera de desplazarse es fácil automatizar a éstos.

Los sistemas *de tránsito* tienen movimiento en un sólo eje, al igual que los dispositivos *ecuatoriales*, éstos se montan sobre un plano, pero en este caso el plano es el de la latitud del punto donde se encuentre el observador (rotado  $90^\circ$  respecto a los *ecuatoriales*). Este tipo de sistema tiene funciones muy específicas, para observaciones astronómicas que no tienen como objetivo el seguimiento de la bóveda celeste, por lo tanto no son de utilidad para nuestros objetivos.

Los sistemas *fijos*, tal y como su nombre indican, no tienen grados de libertad, simplemente apuntan al cielo inamovibles. Al igual que los sistemas *de tránsito*, estos tienen funciones muy especializadas, que claramente, no pueden implicar ningún tipo de seguimiento de objetos sobre la bóveda celeste, aunque sí mantiene un seguimiento de la rotación de la tierra; igual que con el sistema anterior, no es de utilidad para nosotros. El sistema que satisface, en mejor medida, los requerimientos puestos en los criterios de diseño es el sistema *ecuatorial*. El seguimiento lo cubre satisfactoriamente, y es superior a los sistemas *alt-acimut* porque logra el seguimiento en un sólo movimiento y con mejor precisión. La operación de estos sistemas es la más fácil, ya que sólo se tiene que ajustar la elevación, para ajustar al plano ecuatorial, sólo una vez al

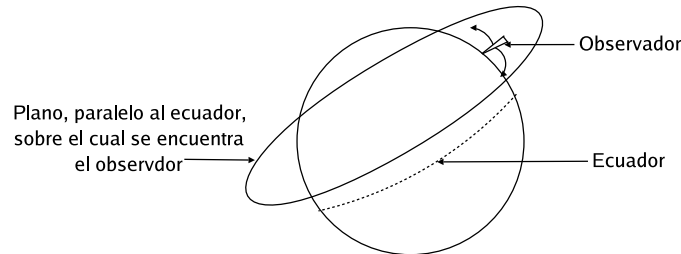


Figura 3.2: Plano de una montura *ecuatorial*.

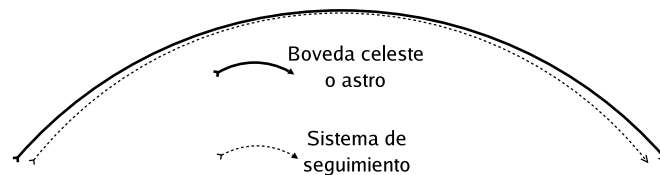


Figura 3.3: Forma del seguimiento de una montura *ecuatorial*.

día, y, con un sólo movimiento más se logra el seguimiento durante todo el resto del día; los *alt-acimut* tienen que hacer dos movimientos, a determinados pasos de tiempo, durante todo el día, lo cual complica su funcionamiento y automatización. La capacidad de carga del sistema es algo que se define, para todos los tipos de sistemas de seguimiento, con los materiales y estructura final que se usen, por lo cual no hay diferencia en este punto entre todos los sistemas; este punto sólo va a depender del diseño final del dispositivo.

## 3.2. Diseño de los sistemas

### 3.2.1. Sistema de seguimiento

El dispositivo de seguimiento se construyó usando el concepto de un sistema *ecuatorial*; sin embargo fue necesario adaptar este tipo de sistemas para que hiciera el seguimiento con un concentrador de foco puntual, y no con un telescopio. La estructura se construyó en acero. Se desarrolló este sistema diseñando una “*cuna*” (figura 3.4a) formada por dos vigas redondas torneadas para darles forma de semicírculo. Estas se conectan de manera transversal, en sus extremos, por un total de cuatro barras, dos en cada extremo, como se observa en la figura 3.4b. Esta forma permite dar el ajuste diario al plano ecuatorial. Sobre cada par de barras transversales se montan un rodamiento o chumascera (figura 3.4c). Los ejes de rodamiento de las chumasceras coinciden uno con otro, para que éstas lleven una flecha (figura 3.4d) montada de manera longitudinal. La cuna en sí está apoyada sobre una mesa (figura 3.4e) que tiene guías para disminuir los grados de libertad de la cuna (figura 3.4f). El movimiento de elevación se logra al agregar un tornillo (figura 3.5g) sin fin a la parte transversal de la cuna, a un lado de

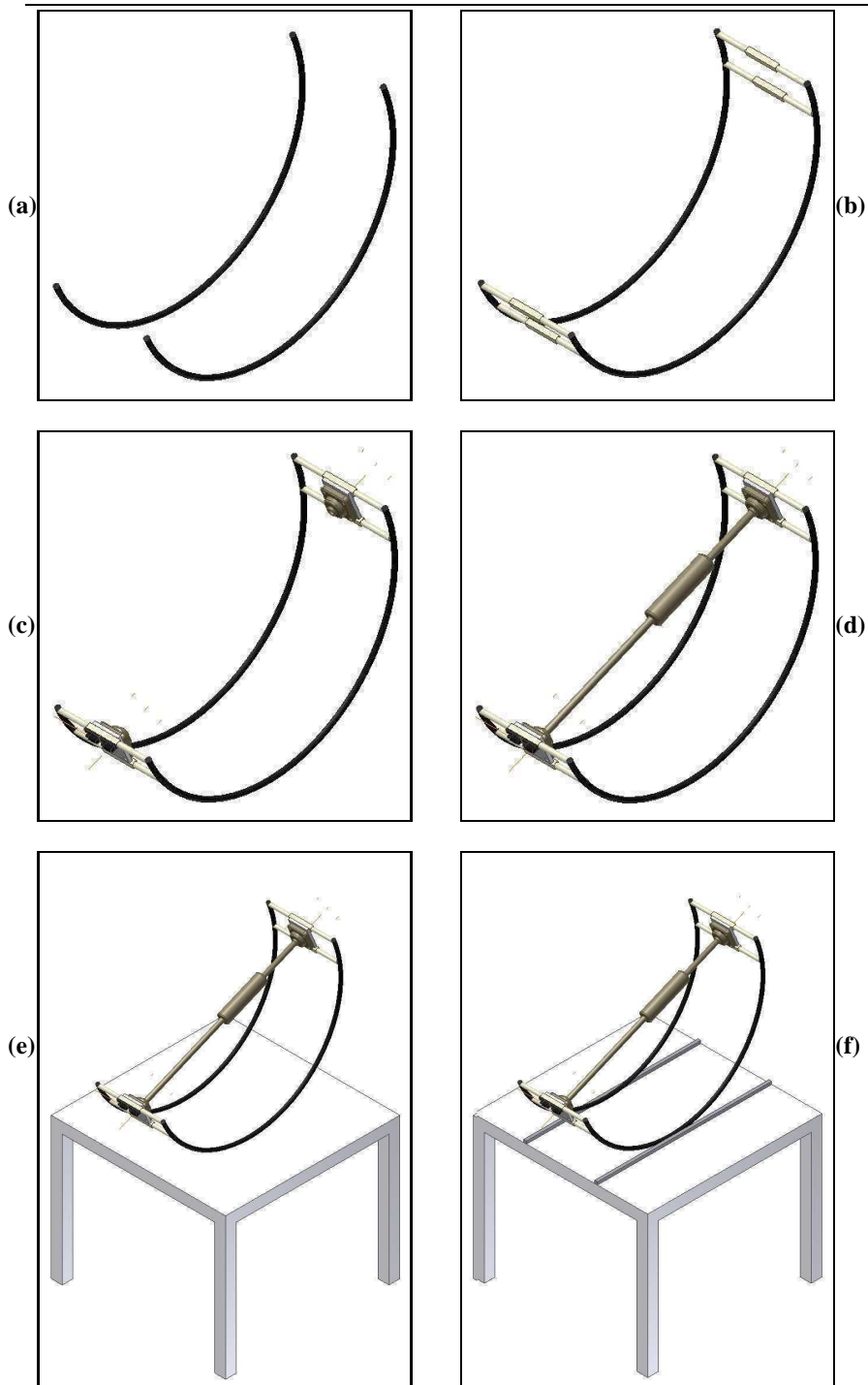


Figura 3.4: Diseño del sistema de seguimiento ecuatorial.



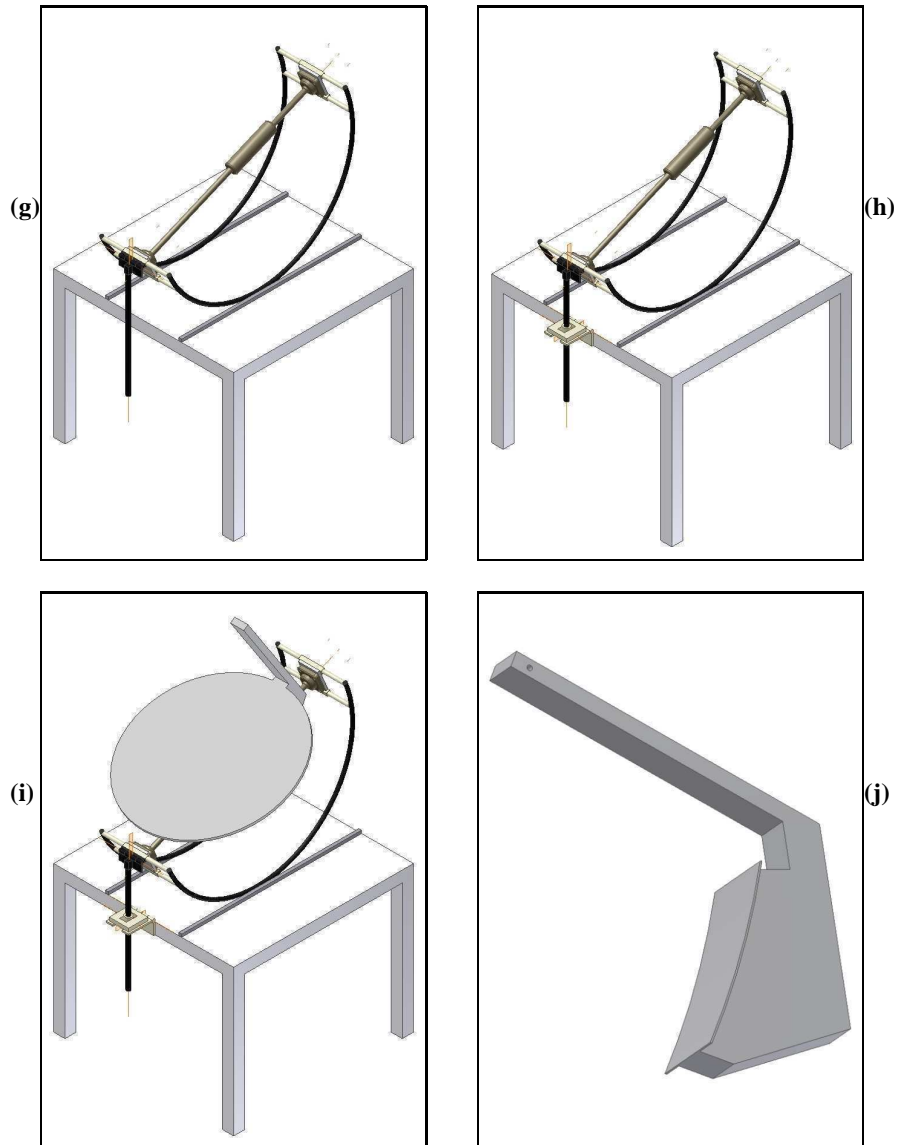


Figura 3.5: Diseño del sistema de seguimiento ecuatorial, continuación de la figura 3.4.

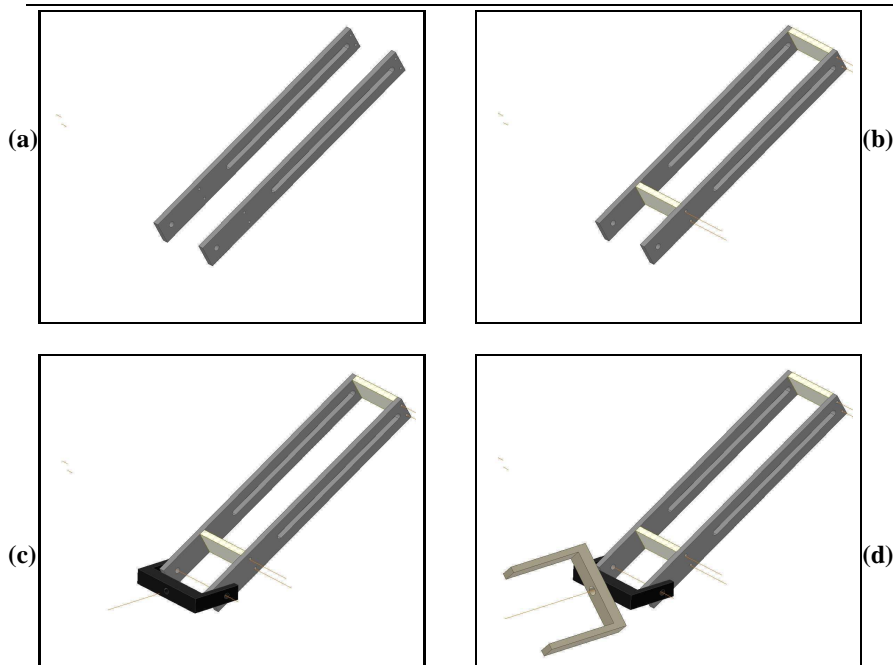


Figura 3.6: Diseño de la montura de la cafetera.

una de las dos chumaseras. Este tornillo a su vez se inserta en un mecanismo (figura 3.5h) que, al hacerlo girar como una tuerca, hace que toda la cámara cambie de posición, subiendo o bajando, dando el ajuste al plano ecuatorial; mientras que la flecha permite el seguimiento de oriente a poniente de dicho plano. Sobre la flecha se monta la antena de *DirectTV* (figura 3.5i) junto con su montura original (figura 3.5j), dicha montura se acopla al eje de la flecha para así lograr que la antena pueda dar el seguimiento correcto.

### 3.2.2. Montura de la cafetera

La montura de la cafetera es el sistema que se encarga de mantener la base de la *Cafetera Espresso* paralela con el plano horizontal de la Tierra. Esto es necesario ya que, si se fijara la cafetera a la antena, la cafetera sólo podría mantener el agua dentro de sí misma en las horas próximas al medio día solar. Para que el sistema pueda funcionar durante un intervalo de tiempo más amplio es necesario darle más grados de libertad a la cafetera. Se construyó en aluminio. Esto se logra mediante un segundo dispositivo que tiene tres grados de libertad.

El sistema consiste en dos barras largas y angostas de aluminio, perforadas de modo que se forma un riel interno (figura 3.6a). Dichas barras están unidas por otras dos barras del mismo ancho pero más cortas (figura 3.6b); una barra corta en un extremo, y lo otra un poco antes del otro extremo. En el extremo no ocupado se coloca una pieza

en forma de  $C$  (figura 3.6c) con ángulos rectos, de modo tal que los dos extremos de la  $C$  se unen, por medio de tornillos, a la estructura original. En la parte larga de la  $C$  se acopla una segunda  $C$  (figura 3.6d) mediante un tornillo al centro de ambas. En esta segunda  $C$  es donde se coloca la *Cafetera Espresso*.

Los dos diseños, como se puede observar en las figuras, son novedosos. En particular el diseño de *cuna* es susceptible a deformaciones ya que deberá soportar un peso importante, formado por la flecha, la montura de la antena y la antena en sí. Es importante cerciorarse que la estructura sea capaz de resistir los esfuerzos a los que será sometida.

### 3.3. Pruebas de elemento finito

El análisis de elemento finito es una técnica numérica para realizar cálculos que de otra forma serían imposibles de realizar; dicho de una manera muy simplificada, consiste en resolver un conjunto de ecuaciones simultáneas cuya solución describe algún comportamiento del cuerpo en estudio, ya sea propiedades mecánicas, de transferencia de calor, dinámica de fluidos, etcétera. Para realizar los análisis de elemento finito es necesario establecer una malla tridimensional, que no necesita tener una estructura simétrica o repetitiva, que se asemeje a la forma del objeto o área que se desea analizar. A cada punto, nodo, o elemento de la malla, se le deben asignar ecuaciones que describan el comportamiento de dicho elemento, como ecuaciones de equilibrio y relaciones constitutivas, entre muchas opciones dependiendo del tipo de estudio que se desea realizar. El conjunto de ecuaciones simultáneas, de todos los puntos es resuelto por la computadora, para poder predecir propiedades o fenómenos en el objeto que se analiza. Si bien el método es una aproximación, se puede aumentar la precisión de los cálculos incrementando el número de nodos en la malla.

La aplicación más común del análisis de elemento finito es el estudio de desplazamientos y de esfuerzos en estructuras mecánicas para verificar la seguridad estructural de dispositivos y construcciones. En nuestro caso se usa ya que el sistema de seguimiento va a ser sometido a una serie de esfuerzos ocasionados por el peso que deberá soportar. Antes de sufragar el costo de construcción del dispositivo es importante verificar que éste será capaz de tolerar las cargas a las cuales se le someterá.

Para construir las ecuaciones simultáneas que se deben resolver es importante entender que, cuando se aplican cargas a un objeto, este experimenta desplazamientos, esfuerzos y tensiones. Los esfuerzos se definen como la fuerza por unidad de área, mientras que las tensiones son proporcionales a los esfuerzos a través del módulo de Young y la razón de Poisson. Una relación muy importante es que, matemáticamente, el esfuerzo es la primera derivada de los desplazamientos. Es por esto que el comienzo de todo análisis de elemento finito mecánico es plantear las relaciones de desplazamiento del objeto en estudio; esto se da mediante la relación entre las fuerzas y los desplazamientos

$$F_i = k_{ij} \cdot u_j, \quad (3.1)$$

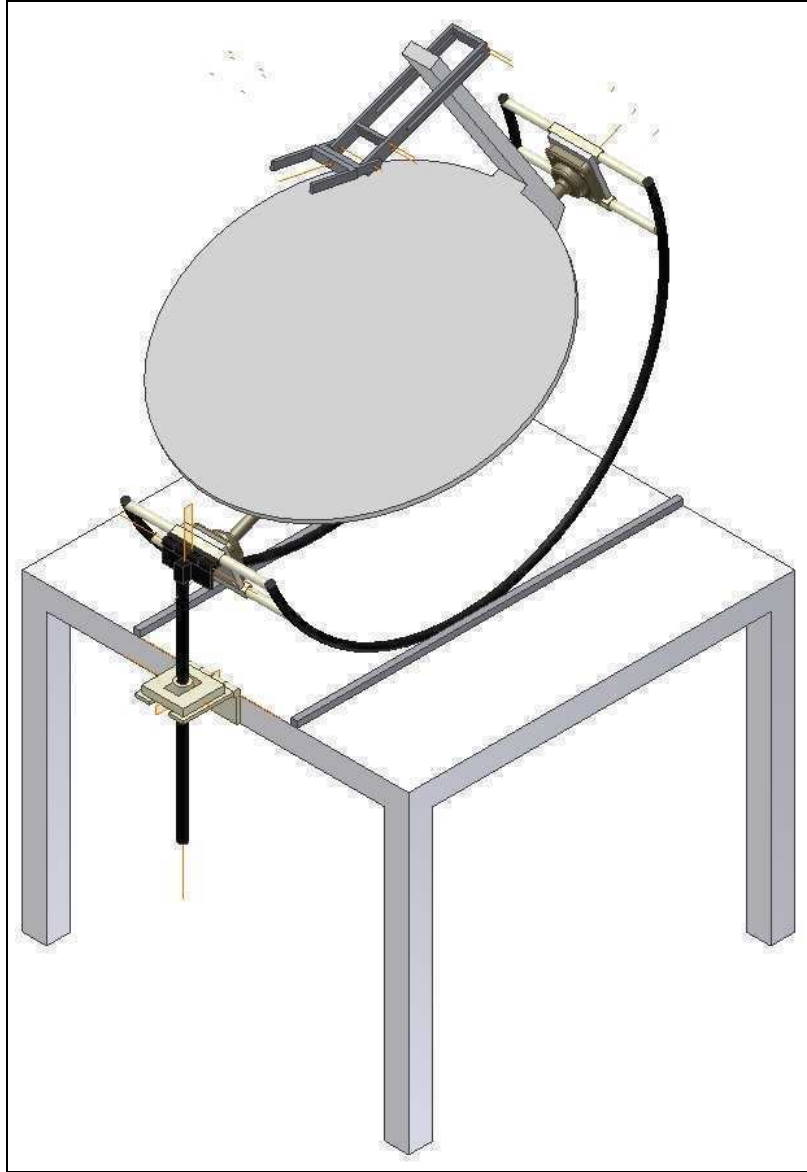


Figura 3.7: Sistema completo de seguimiento *ecuatorial*.

donde  $F_i$  es la fuerza  $i$ -ésima,  $k_{ij}$  es el coeficiente de rigidez que relaciona a  $F_i$  y  $u_j$ , y  $u_j$  es el desplazamiento en la dirección  $j$ . Es también posible ver a  $F_i$ ,  $k_{ij}$  y  $u_j$  como tensores, donde el primero sería el tensor de fuerza aplicada al objeto en estudio, la segunda la matriz de rigidez, y el último el tensor de desplazamientos del objeto.



Figura 3.8: Disposición de la cafetera y el pirheliómetro.

Una vez construida la ecuación (3.1) es posible derivarla, para así poder obtener la información de los esfuerzos y tensiones.



Figura 3.9: Ilustración de la deformación del foco sobre la *Cafetera Espresso*.

Para cerciorarnos que el sistema, formado por la *cuna*, las chumaseras, la flecha, y la antena, fuese capaz de soportar los esfuerzos a los que sería sometido, se llevaron a cabo dos análisis de casos extremos de la posición del sistema. El primero con el sistema totalmente vertical y el segundo con el sistema totalmente horizontal. En ambos casos se fijaron los extremos apropiados, y se hizo la indicación de la dirección de la gravedad (rotada  $90^\circ$  de un experimento a otro) para simular el contacto con la mesa. Todas las simulaciones se llevaron a cabo con un software comercial de análisis de elemento finito.

En la primera simulación, la vertical, se le indicó al programa que todo el peso estaba en los puntos extremos y elevados de las vigas torneadas; creando así una situación extrema que no se da en la realidad. Esta simulación tuvo como resultado una deformación máxima de 1.5 milímetros.

La segunda simulación, la horizontal, fue hecha de modo tal que se simuló todo el peso combinado de la antena y su montura a la mitad de la flecha. Una vez más ésta es una situación extrema que no se da en la realidad. Esta simulación resultó en una deformación máxima de 1 milímetro de la forma de la estructura.

El resultado de ambas simulaciones dejó claro que el sistema sería capaz de soportar el peso total del sistema en las dos situaciones extremas sin presentar una deformación importante que cambiara el funcionamiento de éste o pusiera en peligro la seguridad estructural del mismo. Por lo tanto, se procedió a construir las piezas del

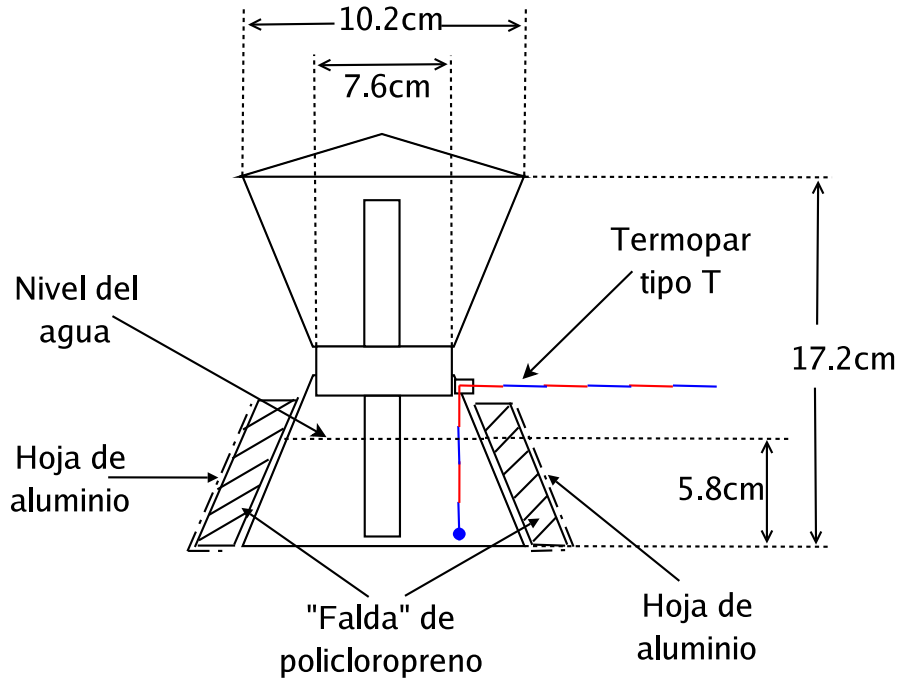


Figura 3.10: Diagrama del diseño experimental.

sistema y armarlo.

En la figura 3.8 se presenta la forma en que se instrumentaron los experimentos, y en la 3.9 se ve la forma del foco sobre la *Cafetera Espresso*. Los resultados y las conclusiones de los experimentos se presentan en el siguiente capítulo.

### 3.4. Instrumentación del experimento

Se instrumentó el experimento para medir las cantidades necesarias para validar el modelo: la temperatura ambiente ( $T_{\infty}$ ), la irradiancia instantánea ( $G_0(t)$ ), la temperatura del agua en el recipiente inferior de la *Cafetera Espresso* ( $T(t)$ ) y la masa de agua inicial ( $m_{agua}$ ). La medición de  $T(t)$  se hizo con un termopar tipo  $T$  calibre 24 (0.51 mm de diámetro), ya que este tipo de termopares, al tener poca masa y por lo tanto una inercia térmica pequeña, puede medir cambios en la temperatura con mayor rapidez que otros tipos de termopares; otra razón por la cual se usó dicho tipo de termopar es porque son delgados, lo cual facilitó posicionarlo dentro del recipiente inferior de la *Cafetera Espresso*. Para medir  $T_{\infty}$  se utilizó un termopar tipo  $J$ , éste se colocó a la sombra. La irradiancia instantánea se midió usando un pirheliómetro. Los dos termopares y el

pirheliómetro se conectaron a un sistema de adquisición de datos automatizado marca *Agilent*, modelo 34970A (figura 3.8), con una tarjeta de 20 canales.

La medición de  $T(t)$  se hizo colocando la punta del termopar  $1\text{cm}(\pm 2\text{mm})$  de la base de la *Cafetera Espresso*, y  $2\text{cm}(\pm 1\text{mm})$  de la pared del recipiente inferior. Se logró fijar la posición del termopar usando resina epóxica comercial. Se colocó en éste lugar el termopar por considerarlo como un buen lugar para medir la temperatura del agua en la cercanía de la placa inferior de la *Cafetera Espresso* sin ser la temperatura de dicha placa.

Las dimensiones de la *Cafetera Espresso* son  $17.2\text{cm}$  de altura,  $10.2\text{cm}$  de radio mayor y  $7.6\text{cm}$  de radio menor, como se puede apreciar en la figura 3.10. El recipiente inferior de la *Cafetera Espresso* se pintó con una pintura especial de resistencia a altas temperaturas, color negro, marca *Zynolyte* que tiene una absorptancia del 0.95 [30]. Se colocó un recubrimiento de policloropreno en forma de falda sobre la parte inferior de la *Cafetera Espresso* para minimizar las pérdidas convectivas. Adicionalmente, al policloropreno se le revistió de una hoja de aluminio para reflejar el haz concentrado de la antena, esto debido a que el policloropreno comienza a quemarse al poco tiempo de exposición al haz concentrado. La válvula de seguridad (figura 3.10) de la *Cafetera Espresso* fue substituida por un “pasa muros” que nos permitió introducir el termopar al recipiente inferior y así poder medir la temperatura correspondiente a  $T(t)$ .

Durante cada experimento se pesó el recipiente inferior para saber la masa de agua usada, y posteriormente se colocó la *Cafetera Espresso* en la montura de la cafetera, como se puede observar en la figura 3.8, se apuntó la antena al Sol y se posicionó la superficie inferior de la *Cafetera Espresso* en el foco de dicha antena. Al momento de tener la *Cafetera Espresso* en posición se comenzó a registrar los datos con ayuda del adquisidor de datos, con el cual se tomó el tiempo de duración de cada experimento.

La concentración geométrica se usa como un parámetro de ajuste, y por lo tanto se modifica para ajustar los resultados teóricos con los experimentales. Independientemente de esto, la concentración geométrica varía ya que, para que no se salga el agua de la *Cafetera Espresso*, es necesario que el plano de la base de la *Cafetera Espresso* se mantenga paralelo al plano de la horizontal. Sin embargo, ya que la antena tiene que hacer el seguimiento del Sol a lo largo del día, el ángulo que se forma entre el plano de la antena y los otros dos planos cambia a lo largo del día. Lo cual cambia la región, de la *Cafetera Espresso*, sobre la cual incide el haz concentrado, como se puede observar en las figuras 3.11 y 3.12. Adicionalmente, como se puede observar en la figura 3.12, durante las horas de la mañana y la tarde una parte importante del haz concentrado cae sobre el recubrimiento de policloropreno, lo cual disminuye aún más la cantidad de energía que entra al sistema termodinámico. Esto último debido a que el concentrador tiene una aberración muy grande.



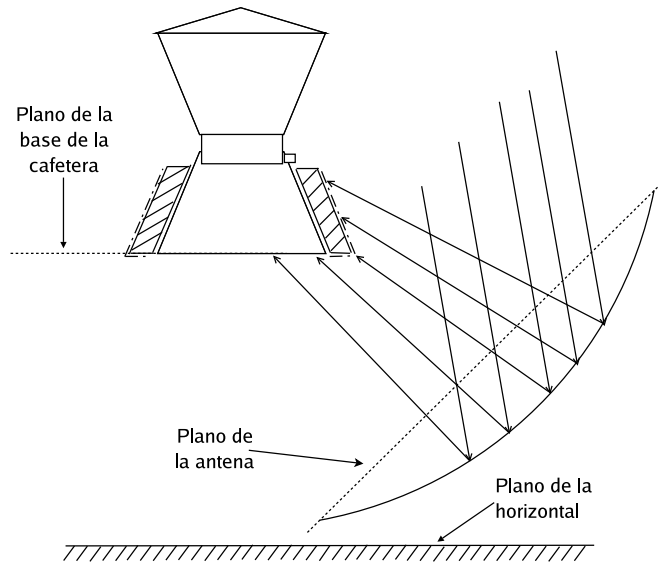


Figura 3.11: Posición de la *Cafetera Espresso* por la mañana o tarde.

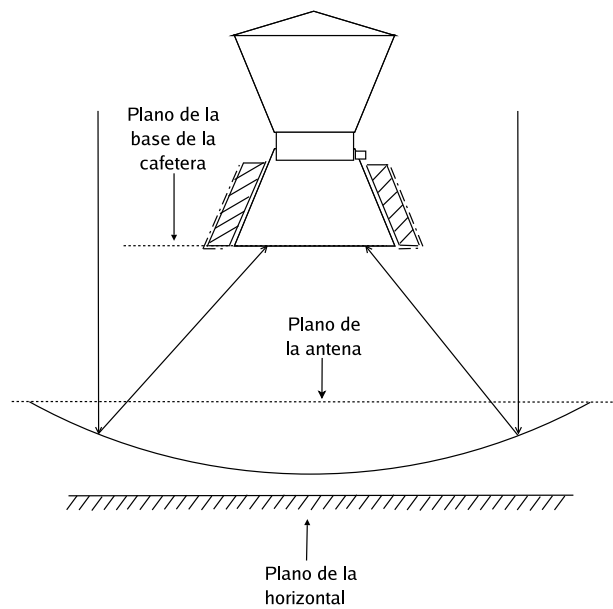


Figura 3.12: Posición de la *Cafetera Espresso* al mediodía.

### 3.5. Referenciación de los termopares

Los dos termopares usados fueron referenciados con un termopozo marca *Hart Scientific* modelo *9100S*. Los datos de la temperatura del termopozo fueron colectados conectando una computadora al puerto RS-232 del termopozo, usando un software de comunicación propietario del termopozo. Los datos de temperatura de los dos termopares fueron colectados usando el mismo adquisidor de datos *Agilent* usando en los experimentos.

Con los datos colectados se hizo una regresión lineal para cada termopar. Para esto el procedimiento fue el siguiente, se tomaron treinta y tres datos cuando el termopozo indicaba una temperatura de 30°C, luego se tomaron treinta y tres datos cuando el termopozo indicaba una temperatura de 35°C, y así sucesivamente en pasos de cinco grados hasta llegar a los 95°C. Con esos datos se procedió a construir una regresión lineal para cada termopar, los valores de  $a$  y  $b$  para cada regresión se muestran en la tabla 3.1. La ecuación de la regresión lineal esta dada por

$$Y = bX + a, \quad (3.2)$$

donde  $Y$  es el valor corregido de la temperatura,  $X$  es el valor medido de la temperatura,  $a$  y  $b$  son los valores de la tabla 3.1.

	Termopar T	Termopar J
a	2.6	1.9
b	1	1

Tabla 3.1: Tabla con los valores de las constantes de la regresión lineal.

Los resultados que se obtuvieron con el arreglo experimental se presentan en el siguiente capítulo.



---

## Capítulo 4

# Resultados y Discusión

---

### 4.1. Resultados del comportamiento térmico

En el presente capítulo se presenta el análisis termodinámico de una cafetera solar, a través de gráficas donde se muestran los resultados experimentales a un lado de los resultados teóricos correspondientes a los datos de cada experimento. El análisis de los resultados arroja una concordancia adecuada entre el modelo teórico desarrollado, y los resultados experimentales. De manera adicional al análisis de resultados, se presentan algunas ideas para futuros trabajos que retomen éste tema.

Es importante recalcar que, como ya se dijo en la sección 3.4, es necesario el ajuste de la concentración geométrica debido al cambio en la forma en que el haz incide sobre la *Cafetera Espresso* a lo largo del día.

Si bien se realizaron más de veinte experimentos, a continuación sólo se presentan los resultados y su comparación con el modelo teórico de tres experimentos representativos del comportamiento de la *Cafetera Espresso*. Se introducen los datos pertinentes medidos en el modelo teórico, que se presentan en la tabla 2.1. Para cada experimento se usa el factor de concentración geométrico para ajustar la curva del modelo teórico a la curva experimental.

En las figuras 4.1 a 4.3 se observa una buena concordancia entre los datos experimentales y los resultados del modelo teórico. Para construir los resultados del modelo teórico, presentado en la ecuación (2.16), se introducen al programa la serie de datos medidos cada segundo para la irradiancia, el promedio de los datos medidos para la temperatura ambiente, y la temperatura del sistema termodinámico en el tiempo cero como condición inicial del sistema. Para cada corrida del programa el único parámetro que se ajusta es la concentración geométrica  $C$ , todos los demás datos del modelo están dados por la tabla 2.1.

Las gráficas se presentan individualmente para cada corrida experimental, y se pre-

sentan los resultados del experimento, los resultados del modelo teórico, la irradiancia medida y la temperatura ambiente; para los resultados experimentales se presentan los datos medidos cada 25 segundos, aunque se cuentan con mediciones para cada segundo del experimento, el presentar todos los datos hace que la gráfica sea imposible de interpretar. Para dar una mejor idea de las condiciones en las cuales se desarrolló el experimento se menciona en el pie de cada gráfica cual fue la hora solar a la cual comenzó el experimento, cuales fueron la temperatura inicial y ambiente promedio, que fueron usadas como datos en el modelo. Además se menciona cual fue la irradiancia promedio durante el experimento, pero es importante recalcar que al programa se le introdujeron los datos de la irradiancia instantánea, no la promedio, se escribe el dato sólo para dar una idea de las condiciones generales del recurso solar durante el experimento y poder hacer comparaciones entre las distintas gráficas. Las barras de error que se presentan en las gráficas son de  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ , dato que se obtuvo como parte de la referenciación de lo termopar pertinente.

Otro punto importante a enfatizar es que el programa tiene dos módulos. El primero calcula la evolución de la temperatura del sistema termodinámico como si no existiese, en ningún momento, pérdida de masa de agua. Una vez resuelto éste módulo se obtienen el punto del tiempo,  $t_o$ , de la ecuación (2.16) en el cual el sistema llega a la temperatura donde se dan los puntos de nucleación de vapor en la base de la cafetera. Con este tiempo como condición inicial se corre un segundo módulo, idéntico al primero, sólo que este empieza del tiempo  $t_o$  y como condición inicial la temperatura del sistema en el mismo tiempo  $t_o$ . Una vez obtenidos los datos de los dos módulos se unen, en el tiempo  $t_o$ , para crear la gráfica teórica de la evolución de la temperatura. La temperatura que se introduce en el programa como la de cambio de fase se obtuvo de un análisis visual de las gráficas experimentales, y es de  $84^\circ\text{C}$ ; esta temperatura se puede visualizar porque existe un punto de inflexión en la gráfica a partir del cual la temperatura del sistema comienza a aumentar con mayor rapidez, dicho punto se puede observar en la mayoría de las gráficas presentadas.

Se puede observar claramente en las figuras 4.1 a 4.3 que la coincidencia que se obtiene entre los datos medidos experimentalmente y aquellos obtenidos mediante la simulación es muy buena, de esto se habla en la siguiente sección.

## 4.2. Discusión

Es claro que, a pesar de lo simple del modelo teórico, éste es capaz de capturar y reproducir muy bien el fenómeno físico que se presenta dentro de la *Cafetera Espresso*. Aún cuando el modelo es global, ya que sólo toma la temperatura del sistema, la irradiancia y la temperatura ambiente, logra describir los fenómenos que se llevan a cabo en la cafetera. En éste sentido es importante notar que el modelo es capaz de reproducir el fenómeno del punto de inflexión en la evolución de la temperatura que, a primera vista puede resultar contraintuitivo, pero que sin embargo se presenta tanto en los datos experimentales como en los resultados del modelo teórico. El punto se presenta alrededor de la temperatura de  $84^\circ\text{C}$  en todos los experimentos, siguiendo la lógica de la teoría presentada en el capítulo 2 es en este punto que se comienzan a formar los puntos de nucleación en la parte inferior del recipiente de agua de la *Cafetera*

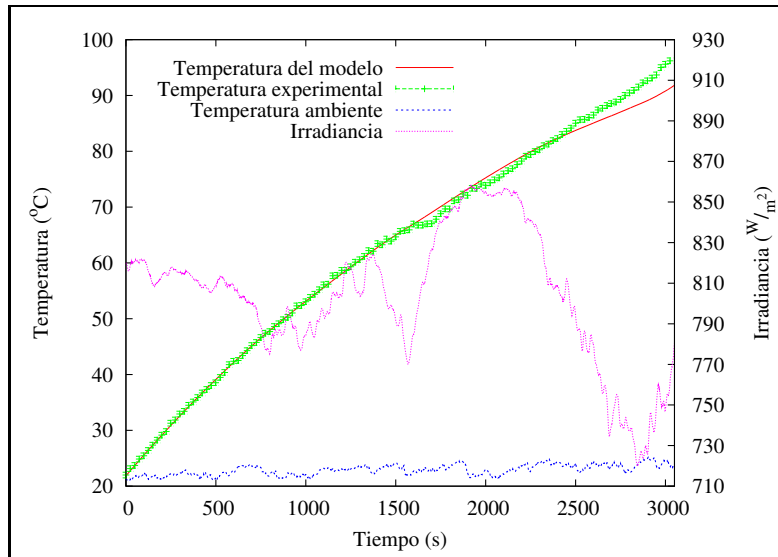


Figura 4.1: Gráfica de experimento que inició a las 9:33am hora solar,  $C = 8.5$ ,  $T_{ini} = 21.9^{\circ}C$ ,  $T_{amb} = 22.9^{\circ}C$ ,  $\overline{G_0} = 805 \frac{W}{m^2}$ .

*Espresso*. Es probable que este punto se presente porque, al existir un a menor masa de agua en el sistema, la cual representa la mayor carga de inercia térmica, sea más fácil aumentar la energía interna, y por ende la temperatura, de la masa de agua restante.

Cualquier otro detalle que el modelo no considera es menospreciado, estos son absorbidos al ajustar el modelo con el parámetro de ajuste  $C$ . Esto incluye las aberraciones que tiene el concentrador, además del error en la estimación del coeficiente de pérdidas convectivas y la reflectancia del concentrador.

La gráfica 4.1 presenta los resultados de un experimento que comenzó a las 9:33am, hora solar. Como ya se explicó en la sección 3.4, el hecho que el experimento se desarrolle tan temprano tiene implicaciones fuertes para la concentración geométrica. El cantoneo que se requiere hacer entre la antena y la *Cafetera Espresso* hace que el valor de dicha  $C$  se disminuya considerablemente. Adicionalmente a esta hora generalmente se tiene una irradiancia menor que a horas más cercanas al medio día solar. Se puede observar en la figura 4.2 que una hora después la concentración geométrica aumenta, de 8.5 a las 9:33am, a 9.5 a las 10:27am. En la gráfica 4.1 se puede observar que hacia el final de experimento la irradiancia disminuyó considerablemente, sin embargo esto no tuvo un efecto significativo sobre la evolución ascendente de la temperatura del sistema termodinámico. En la gráfica también se puede observar oscilaciones en la temperatura ambiente, lo cual indica pequeñas ráfagas de viento, lo cual implica que éste experimento tuvo pérdidas por convección mayores a las que tuvo el experimento presentado en la figura 4.2, lo cual también tiene un efecto sobre el tiempo de evolución del experimento.

En la gráfica 4.2 se presentan los resultados de un experimento que comenzó a las 10:27am, hora solar, y que tuvo una irradiancia promedio de  $883 \frac{W}{m^2}$ . La concentración geométrica de éste experimento es de 9.5, lo cual es 10.5 % mayor a la concentración geométrica del experimento anterior; la variación en la concentración geométrica, y el aumento en la irradiancia, por la hora del día, hace que en éste experimento se logre hacer el café en un tiempo menor que en el experimento de la figura 4.1. Se puede observar también que la irradiancia fue más estable en éste experimento. La temperatura ambiente fue muy estable durante éste experimento, esto es, no existieron ráfagas de viento, lo que disminuyó las pérdidas por convección en comparación con los otros dos experimentos. Esta corrida experimental fue la que se completo en el menor tiempo (tabla 4.1), lo que se debe principalmente a la mayor irradiancia que tuvo en comparación con el tercer experimento, y se tiene que tomar en cuenta la mayor concentración geométrica al compararlo con el primer experimento presentado.

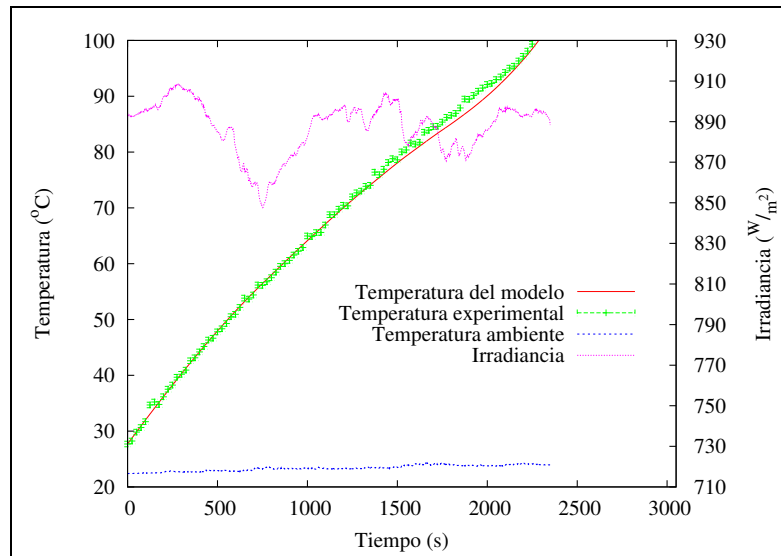


Figura 4.2: Gráfica de experimento que inició a las 10:27 hora solar,  $C = 9.5$ ,  $T_{ini} = 27.7^\circ C$ ,  $\overline{T_{amb}} = 23.4^\circ C$ ,  $\overline{G_0} = 887 \frac{W}{m^2}$ .

La figura 4.3 presenta los resultados de un experimento que comenzó a las 11:10am, hora solar, y que tuvo una irradiancia promedio de  $847 \frac{W}{m^2}$ . Éste experimento tuvo un aumento de 2 % en la concentración geométrica respecto al experimento de la figura 4.2, y un aumento de 12.4 % respecto a la concentración de la gráfica 4.1. La irradiancia fue estable durante éste experimento. Se puede observar, a través de los datos de temperatura ambiente, que éste experimento tuvo pequeñas ráfagas de viento, aumentando las pérdidas convectivas. Éste experimento tiene una duración mayor que el anterior

(tabla 4.1), esto tiene que ver principalmente con la disminución de la irradiancia, aunque también influyeron las pérdidas convectivas, que fueron mayores por las ráfagas de viento.

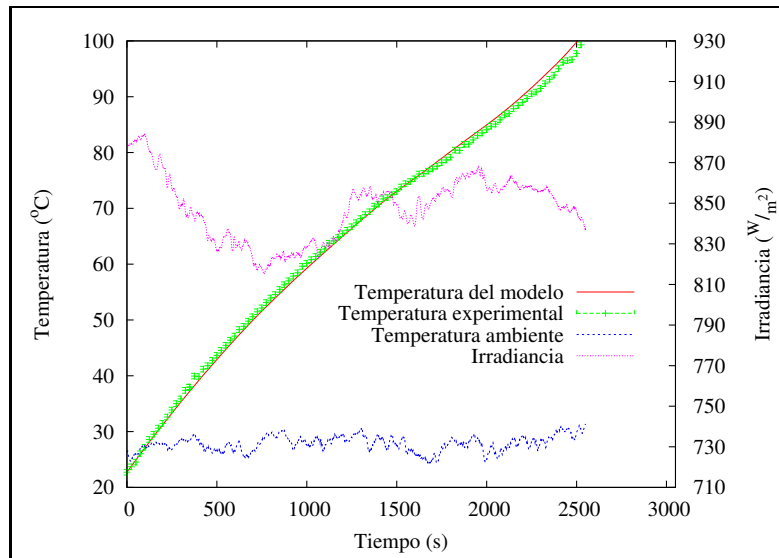


Figura 4.3: Gráfica de experimento que inició a las 11:10 hora solar,  $C = 9.7$ ,  $T_{ini} = 22.7^{\circ}C$ ,  $\overline{T}_{amb} = 27.6^{\circ}C$ ,  $\overline{G}_0 = 847 \frac{W}{m^2}$ .

En la grafica 4.4 se presentan los resultados experimentales de las tres corridas presentadas, éstos se complementan con los datos presentados en la tabla 4.1. Se puede observar en la tabla 4.1 que existe una correlación directa entre la hora solar y el valor de la concentración geométrica; empezando desde un valor de 8.5 en el experimento de las 9:33am, aumentando a 9.5 a las 10:27am, y terminando en 9.7 a las 11:10am. Sin embargo los tiempos de preparación del café no siguen ese patrón, el primer experimento se lleva a cabo en 51 minutos, el segundo en 39, y el último en 43 minutos, esto puede parecer erróneo o contrario a lo previsible por el aumento en el factor de concentración geométrico, pero esto es muy lógico si observamos que la irradiancia promedio del segundo experimento es mayor por  $36 \frac{W}{m^2}$  que la irradiancia promedio del tercer experimento. El hecho que el tercer experimento se ajuste mejor a una concentración geométrica mayor que la del segundo experimento, a pesar de la menor irradiancia durante el experimento, indica que el argumento de que el cantoneo a horas extremas del día causa una baja en la concentración geométrica es correcto. La aparente discrepancia entre el segundo y tercer experimento nos dice además que el modelo teórico es capaz de reproducir resultados correctos en todos los casos estudiados, aún cuando se tenga variaciones como aumentos en la concentración geométrica acompañados de disminuciones en la irradiancia.



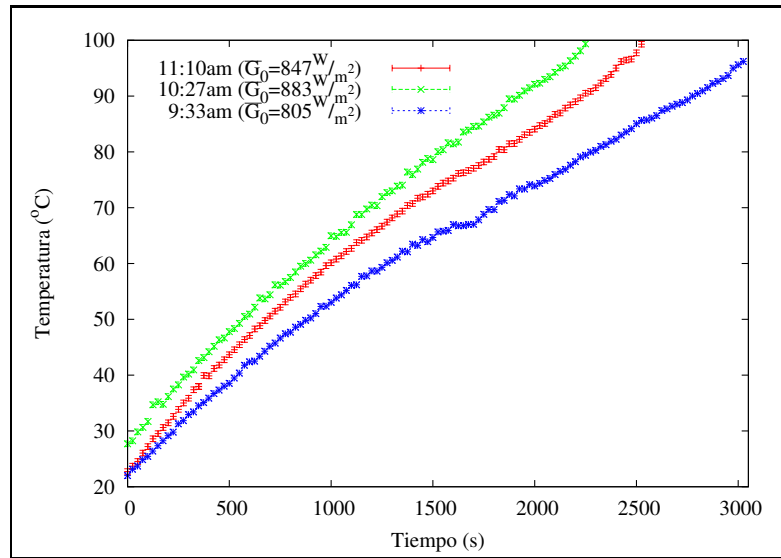


Figura 4.4: Gráfica con la comparación de las tres corridas experimentales.

Hora solar	$C$	$G_0$ ( $W/m^2$ )	$T_{amb}$ ( $^{\circ}C$ )	$t_{tot}$ (min)
9:33am	8.5	805	22.9	51
10:27am	9.5	883	23.4	39
11:10am	9.7	847	27.6	43

Tabla 4.1: Tabla con los valores promedio de las corridas experimentales.

Desde el punto de vista práctico, para uso cotidiano, el sistema no es el óptimo. Como se puede observar en la tabla 4.1 el tiempo que le toma al sistema producir café líquido no es adecuado para un uso cotidiano de un usuario final normal. Esto se debe principalmente a que la concentración geométrica del concentrador de foco puntual es pobre. El concentrador es una antena de  *DirecTV*  reciclada, que, aunque se pulió hasta dejar la superficie de ésta lo más especular posible no es una superficie de calidad óptica. La antena fue diseñada para operar en frecuencias al rededor de los 12.2GHz, que es una longitud de onda de 2.46cm; a dicha longitud de onda la superficie de la antena es lisa, mientras que a las longitudes de onda del visible (380 a 750nm) y el infrarrojo (750 a 1,400nm) la superficie de la antena es rugosa, hay una diferencia de tres a cuatro órdenes de magnitud, lo cual hace que un análisis de trazado de rayos sea inútil. Es pertinente recalcar que la idea de usar la antena de  *DirecTV*  se hizo con un doble propósito, por un lado reciclar un elemento que es cada vez más común encontrar en desuso, y por otra parte usar un componente barato, que no presenta los costos que los concentradores de calidad óptica tienen.

Es posible que añadir un cuarto grado de libertad a la montura de la cafetera, que permita su desplazamiento a la izquierda o la derecha sobre el plano de la horizontal logre un aumento de la concentración geométrica. Esto sería más notable a las horas más extremas del día, como en el primer experimento, al conseguir que al menos parte de la energía que ahora cae sobre la falda de policloropreno se logre aprovechar sobre la base de la  *Cafetera Espresso* , problema que se tiene actualmente y que se representa en la figura 3.11.

El hecho de que el sistema no sea práctico en su presente forma no es crítico, ya que el modelo teórico se validó muy bien con los datos experimentales. Con el modelo se hace mucho más fácil proponer modificaciones al sistema que permitan que éste eventualmente sea de verdadera utilidad.



---

## Capítulo 5

# Conclusión

---

El objetivo primario que se planteó para el trabajo fue el de estudiar la viabilidad de producir café líquido mediante un sistema solar compuesto por un concentrador de foco puntual reciclado. El objetivo primario se dividió además en objetivos intermedios, que fueron:

1. Desarrollar un modelo teórico de la transferencia de calor en el sistema termodinámico en estudio.
2. Diseñar un sistema de seguimiento solar para el concentrador de foco puntual.
3. Llevar a cabo una campaña experimental en la cual se midió la temperatura, que es la variable termodinámica que se usa en el modelo teórico, para usar esos datos en la validación del modelo.

El desarrollo del modelo teórico se llevó a cabo en cuatro pasos. Primero se dio una visión general del proceso termodinámico dentro del sistema durante el proceso de producción de café líquido. Con esa idea general se desarrolló cada concepto individual, para lograr comprender cada fenómeno que participa en el proceso general; aquí se explicaron los conceptos ópticos, energéticos, de transición de fase, de transferencia de calor, y de la Ley de Darcy que forman la base de lo que sucede en la cafetera. Con estos cimientos se desarrolló un balance de energía, que nos conduce a una ecuación diferencial no lineal, cuya solución describe la evolución de la temperatura promedio del sistema termodinámico. Adicionalmente se simplificó el modelo anterior para buscar una solución analítica que lograra describir la evolución de la temperatura sin tener que recurrir a métodos numéricos. Se encontró que la solución del modelo simplificado tiene una muy buena coincidencia con los resultados de la solución numérica del modelo original.

El diseño del sistema de seguimiento se hizo en un programa de CAD 3D, donde se modelaron varias opciones y finalmente se escogió un diseño. Se verificó en el

programa que los movimientos de las piezas no interfirieran entre sí, y que se lograra el movimiento que se busca de éste. Nos cercioramos que este diseño fuera capaz de resistir todos los esfuerzos a los que sería sometido mediante un análisis de elemento finito que también se hizo en computador sobre el modelo diseñado en 3D. Una vez seguros de que el sistema fuese capaz de hacer lo que se buscaba de él y además poder resistir los esfuerzos se construyó.

Se desarrolló una campaña experimental con el sistema de seguimiento completo. Se llevaron a cabo más de veinte experimentos en días de buena insolación. Para la campaña se instrumentó el sistema mediante el uso de un pirheliómetro para medir la irradiancia solar directa, un termopar tipo J para medir la temperatura ambiente, y un termopar tipo T para medir temperatura en la *Cafetera Espresso*.

La información colectada en los experimentos fue analizada y se usó para validar el modelo teórico. Se presentó dicho análisis en tres casos representativos del comportamiento de todas las corridas experimentales. Se puede observar en las gráficas que hay una muy buena concordancia entre los resultados experimentales y teóricos. Es claro del análisis de los resultados que la concentración geométrica del sistema es pobre (tabla 4.1). Estos resultados motivan el mejoramiento de la cafetera solar y en particular justifican el gasto necesario para diseñar un espejo concentrador de alta calidad.

Existen dos puntos generales de trabajo a futuro que se proponen. Por un lado está lo relacionado a mejorar el dispositivo de seguimiento solar, y por el otro se encuentra realizar mediciones de presión del sistema termodinámico.

El punto referente a mejorar el diseño del sistema de seguimiento se puede descomponer en los siguientes dos temas:

1. Modificar el diseño de la montura de la *Cafetera Espresso* para disminuir las imprecisiones en el momento de colocarla en el foco óptico de la antena, representadas en la figura 3.11.
2. Mejorar el concentrador de foco puntual usado. Esto se puede lograr cambiando por completo la antena, recubriéndola con una capa de material de mejores propiedades reflectivas que la placa de metal actual, o hasta poniendo pequeñas secciones de espejos que también tengan mejores propiedades reflectivas.

El punto de trabajo sería medir la presión del sistema termodinámico. Esto ayudaría a avanzar en la caracterización del sistema, y abriría una ventana a un fenómeno que no se estudió en el presente trabajo.

---

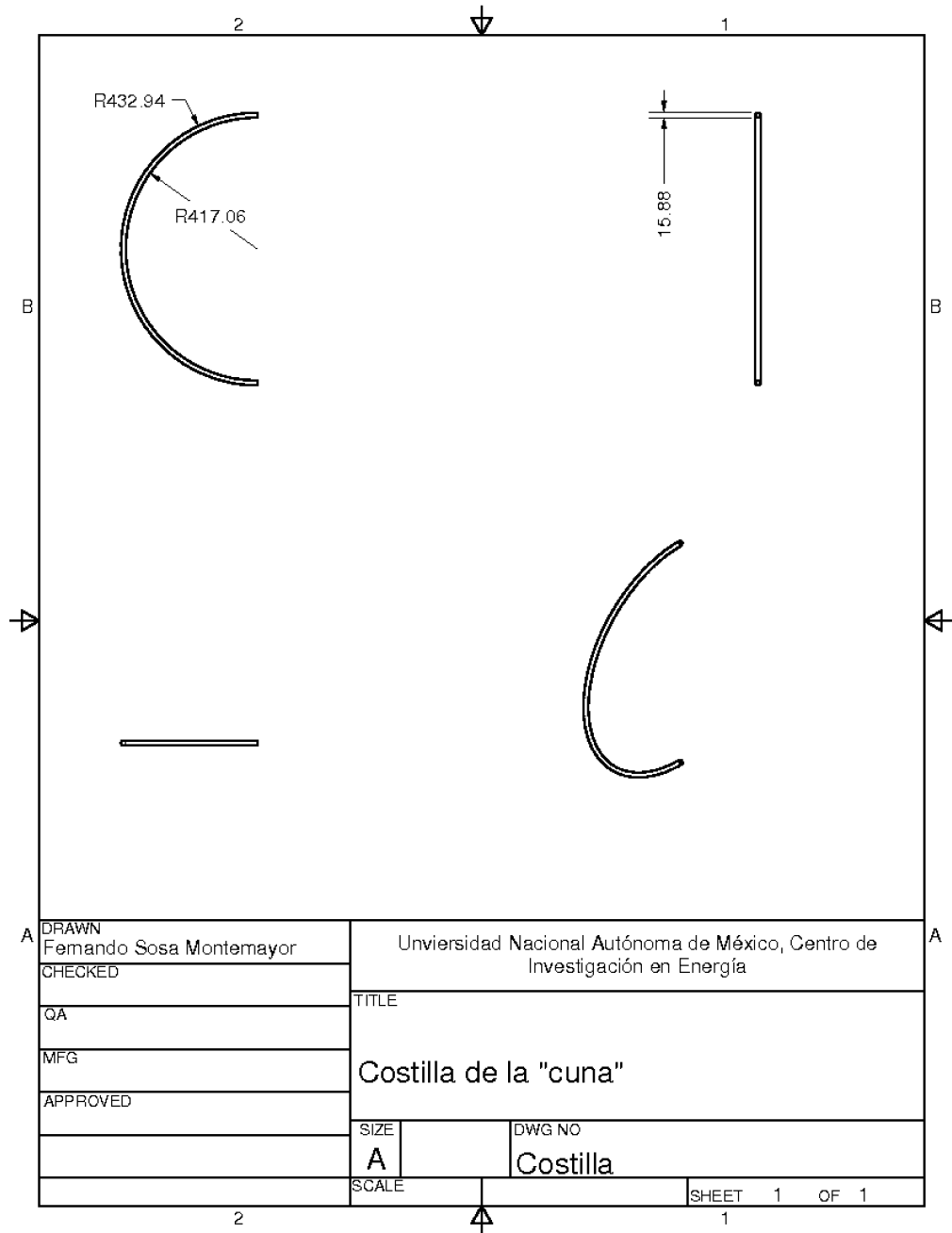
## Anexo A

---

A continuación se presentan los planos de la piezas relevantes del sistema de seguimiento. Todas la unidades presentadas son en milímetros.

Las primeras seis piezas corresponden al sistema de seguimiento. La primera pieza, la costilla de la cuna, corresponde a la figura 3.4a. La segunda, el tirante entre costillas, figura corresponde a 3.4b. La tercera, la base del rodamiento, a 3.4c. La cuarta, el eje de la cuna, a la figura 3.4d. La quinta corresponde a parte de la bisagra que conecta al tornillo sin fin con el resto de la cuna, y es la figura 3.4g. La sexta, corresponde a la base del volante de elevación, y es la figura 3.4h.

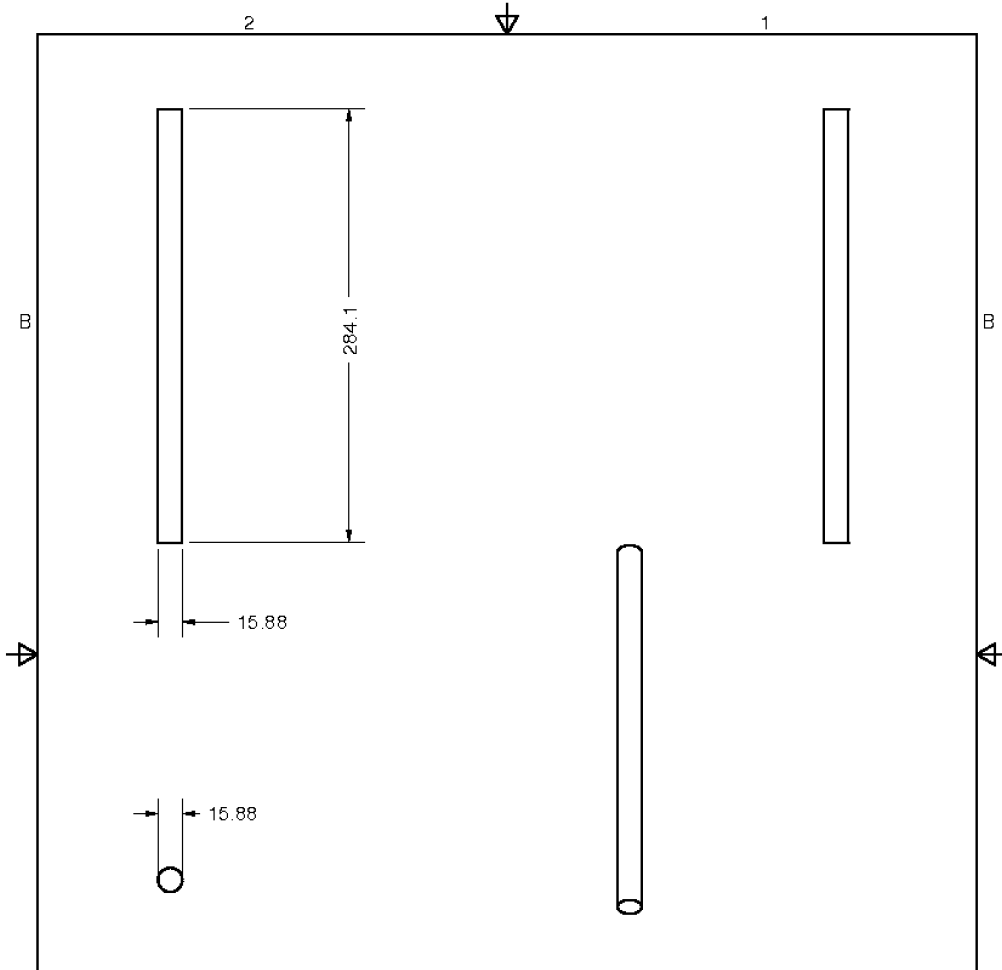
Las últimas cuatro piezas corresponden a la montura para la *Cafetera Espresso*. El séptimo plano corresponde al riel presentado en la figura 3.6 a. El octavo plano corresponde a la barra que separa a los rieles, y se presenta en la figura 3.6b. El noveno plano presentado es el que se presenta en la figura 3.6c. El último plano presentado es la base donde se monta la *Cafetera Espresso*, y corresponde a la figura 3.6d.



A	DRAWN Fernando Sosa Montemayor	Unviersidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigación en Energía		A
	CHECKED			
	QA	TITLE		
	MFG	Costilla de la "cuna"		
	APPROVED	SIZE	DWG NO	
	A	Costilla		
	SCALE		SHEET 1 OF 1	

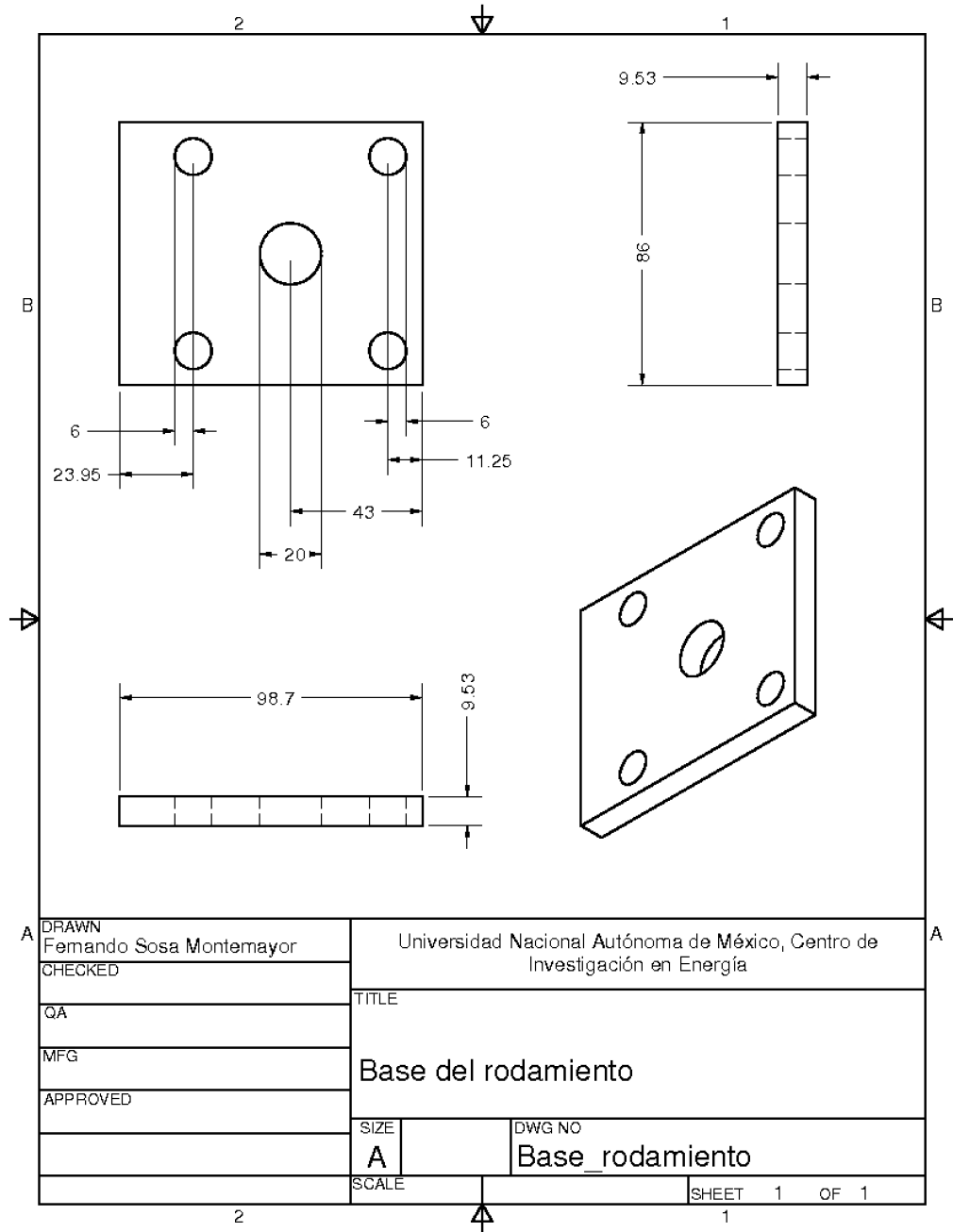
2

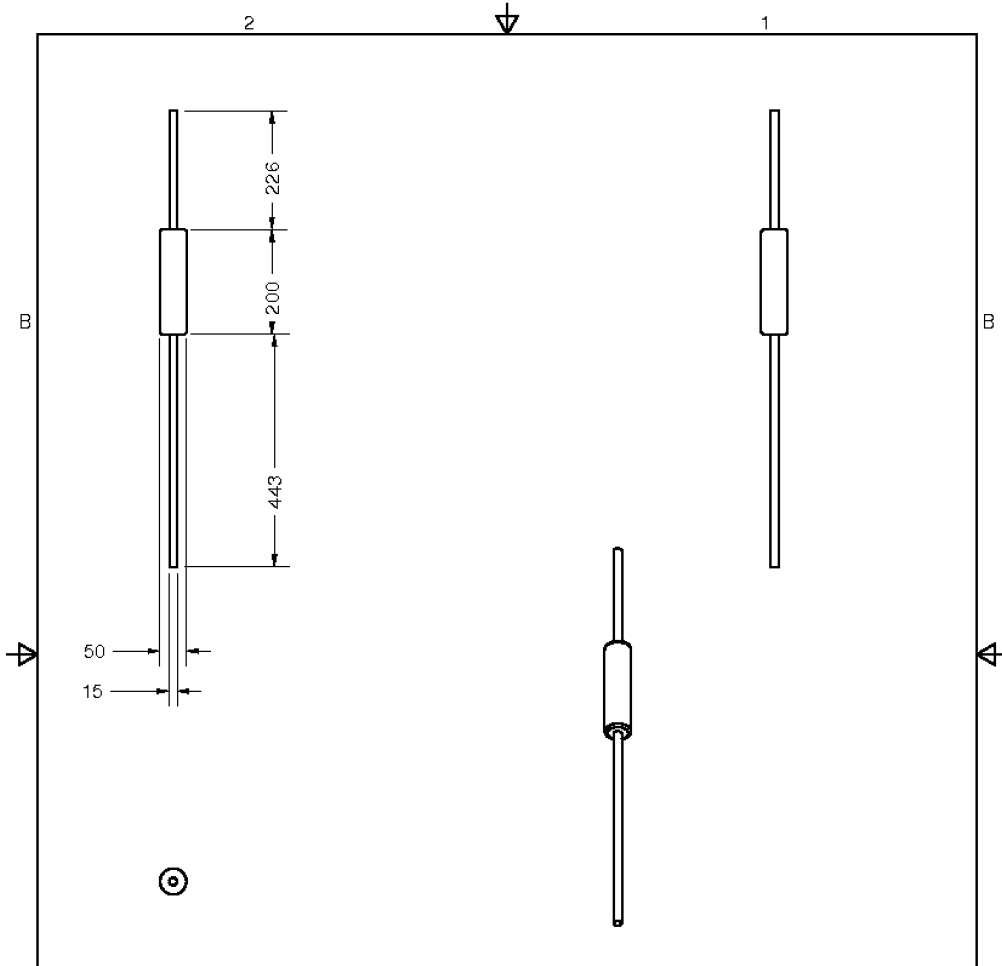
1



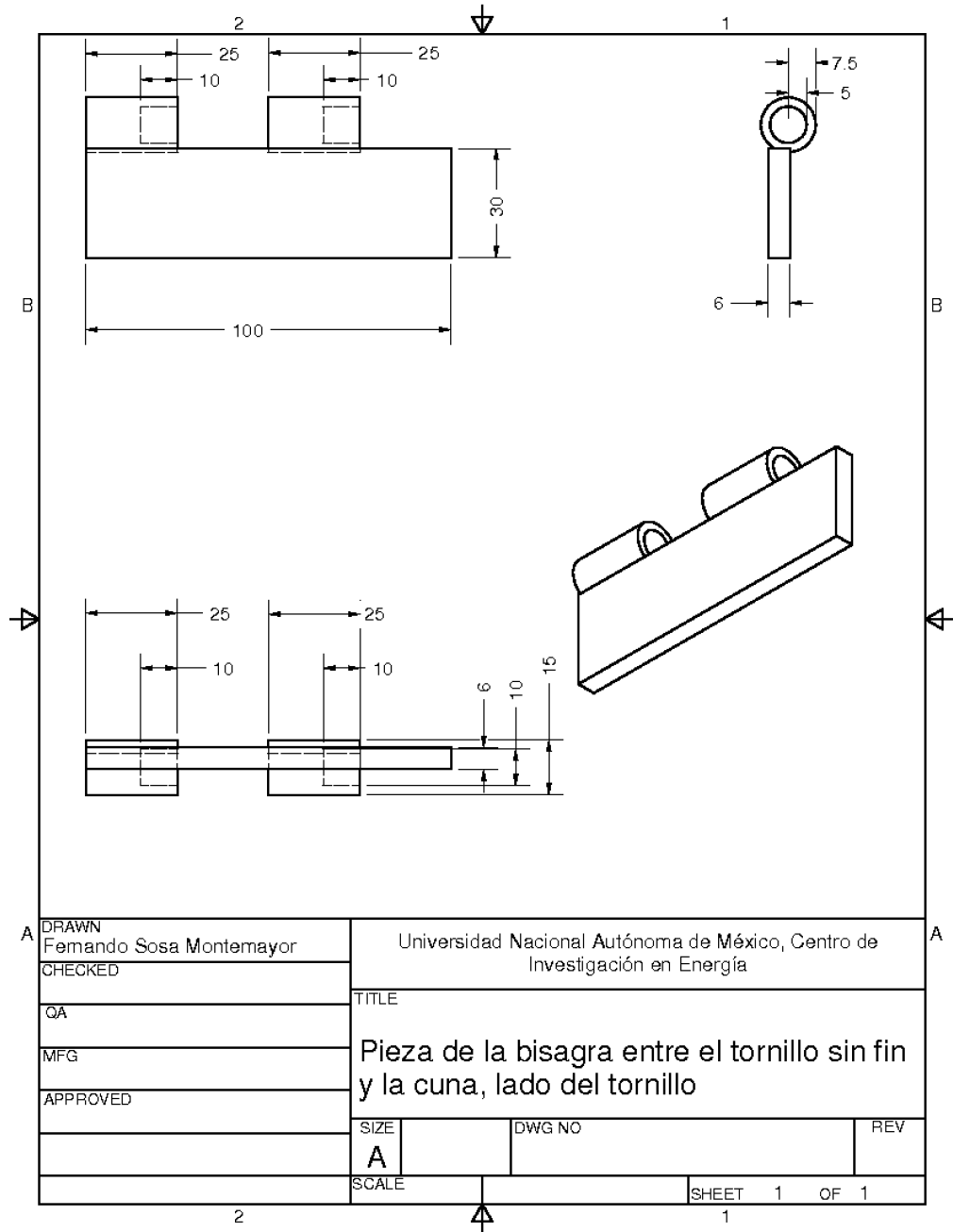
DRAWN Fernando Sosa Montemayor	Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigación en Energía	
	TITLE	
CHECKED	Tirante, pieza entre costillas	
QA	SIZE	
MFG	A	DWG NO
APPROVED	Tirante	
SCALE		SHEET 1 OF 1

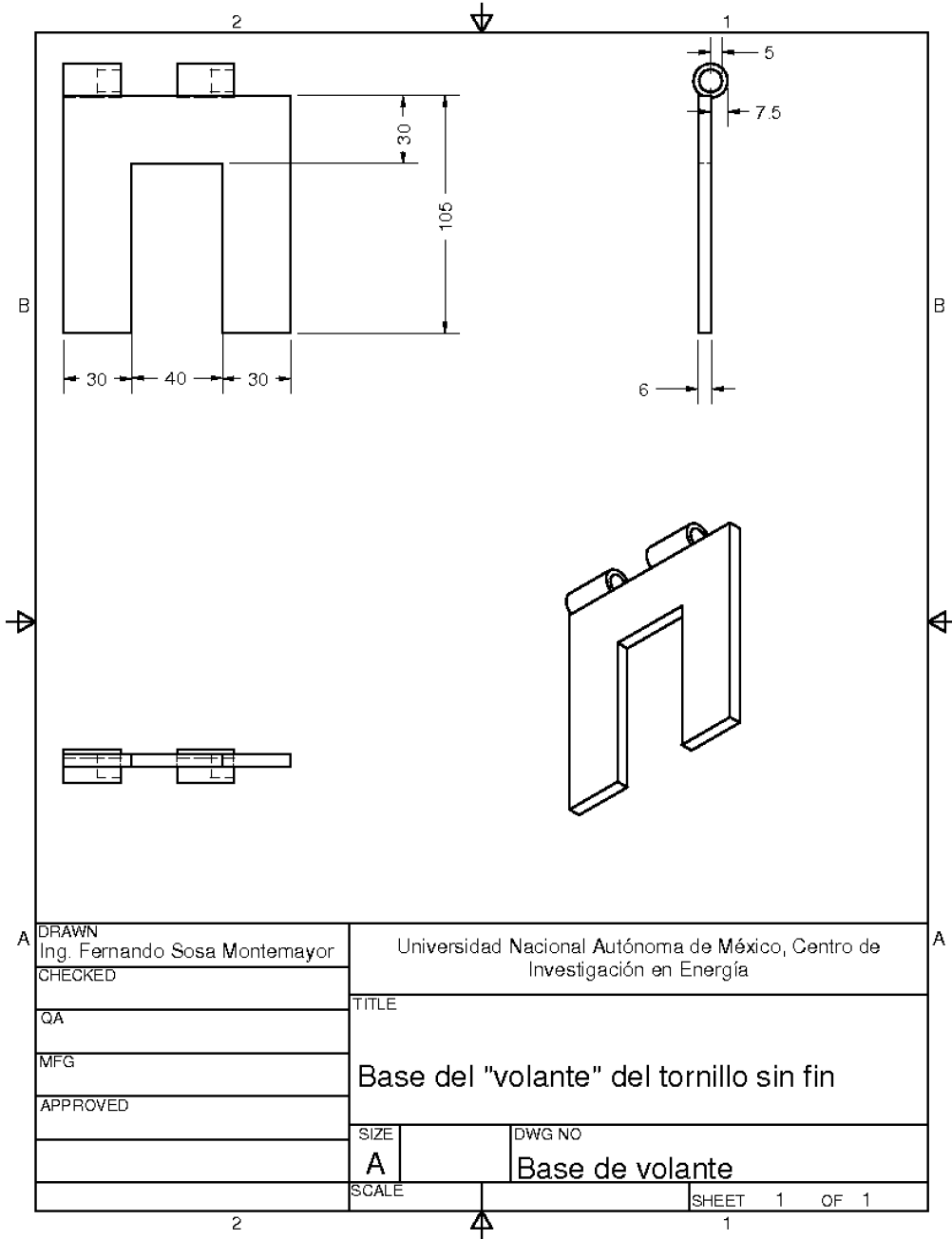




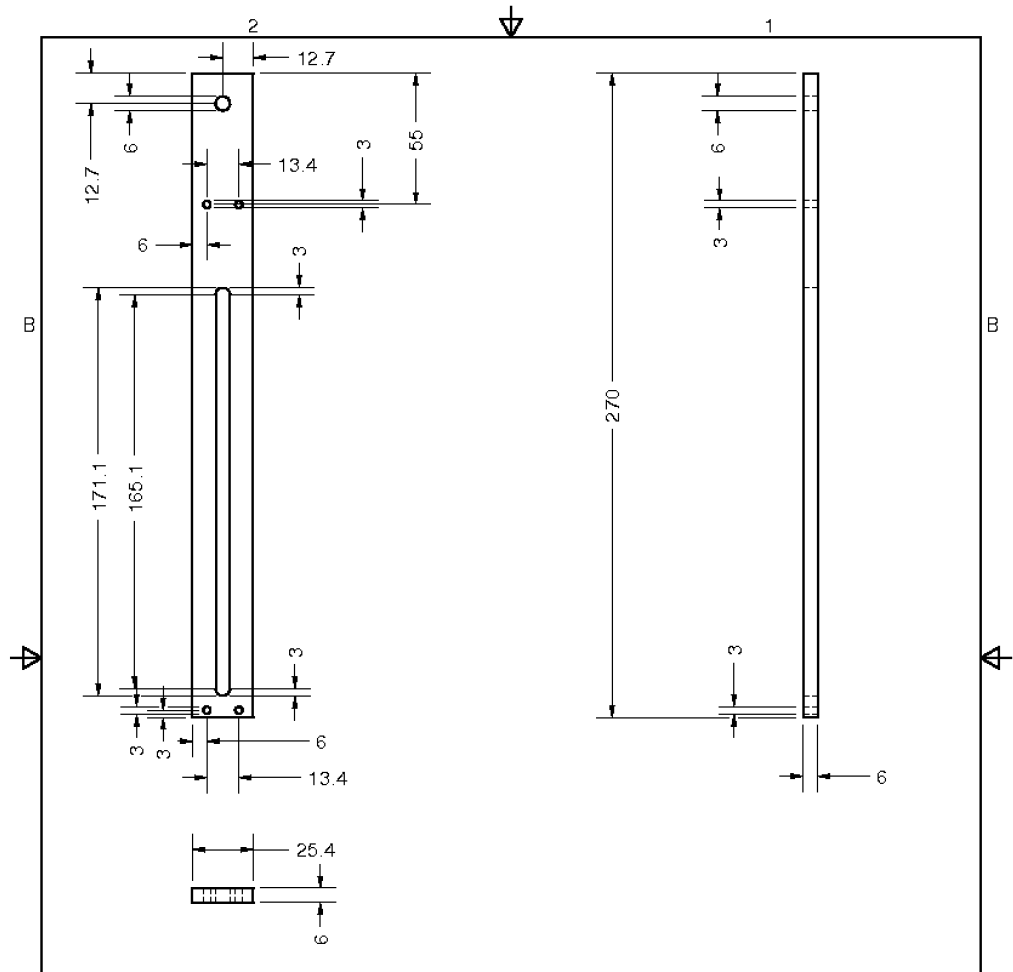


DRAWN Fernando Sosa Montemayor	Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigación en Energía	
	TITLE	
CHECKED	Eje de la cuna	
QA	SIZE	DWG NO
MFG	A	Eje
APPROVED	SCALE	SHEET 1 OF 1

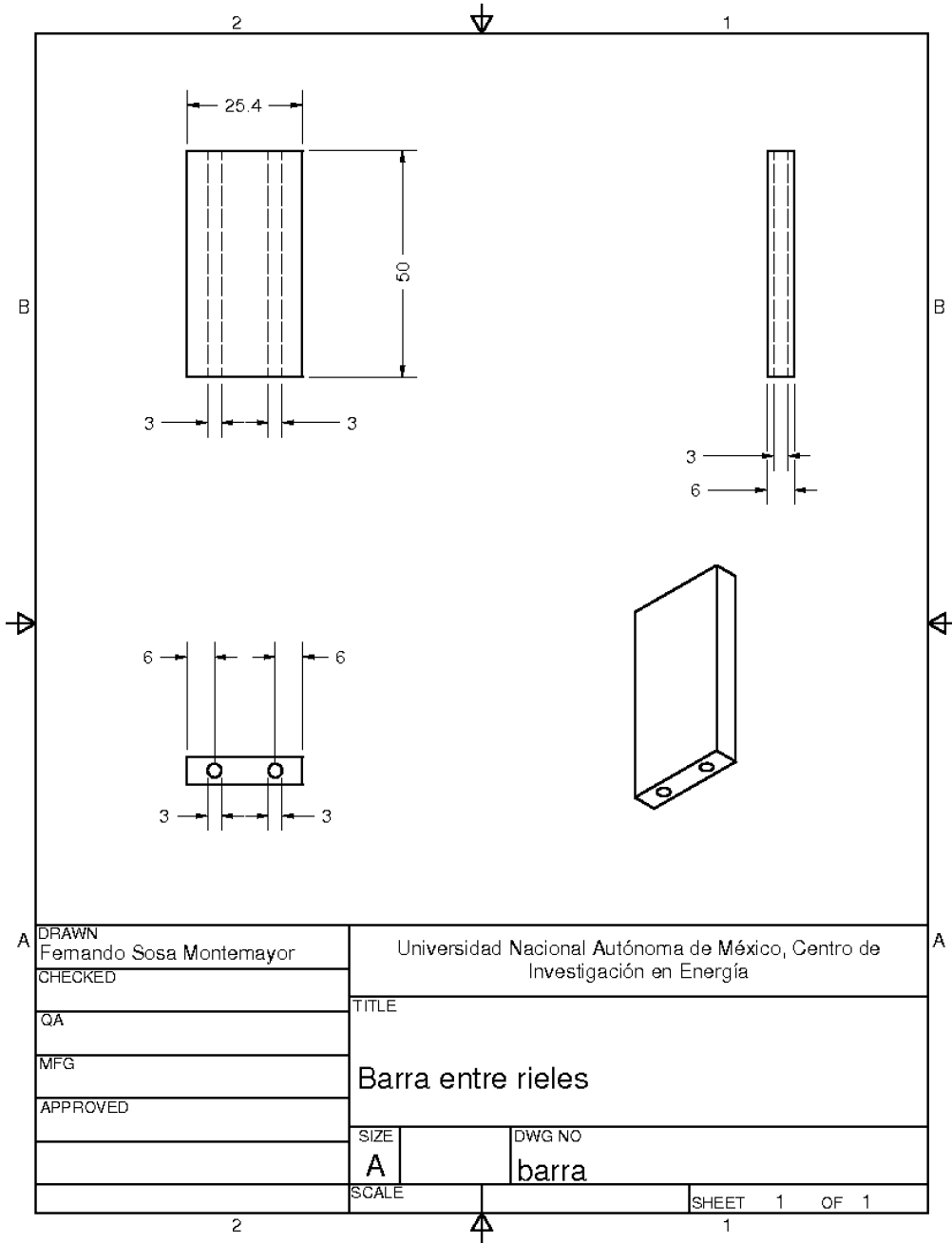




DRAWN Ing. Fernando Sosa Montemayor	Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigación en Energía	
	TITLE	
CHECKED	Base del "volante" del tornillo sin fin	
QA	SIZE	DWG NO
MFG	A	Base de volante
APPROVED	SCALE	SHEET 1 OF 1

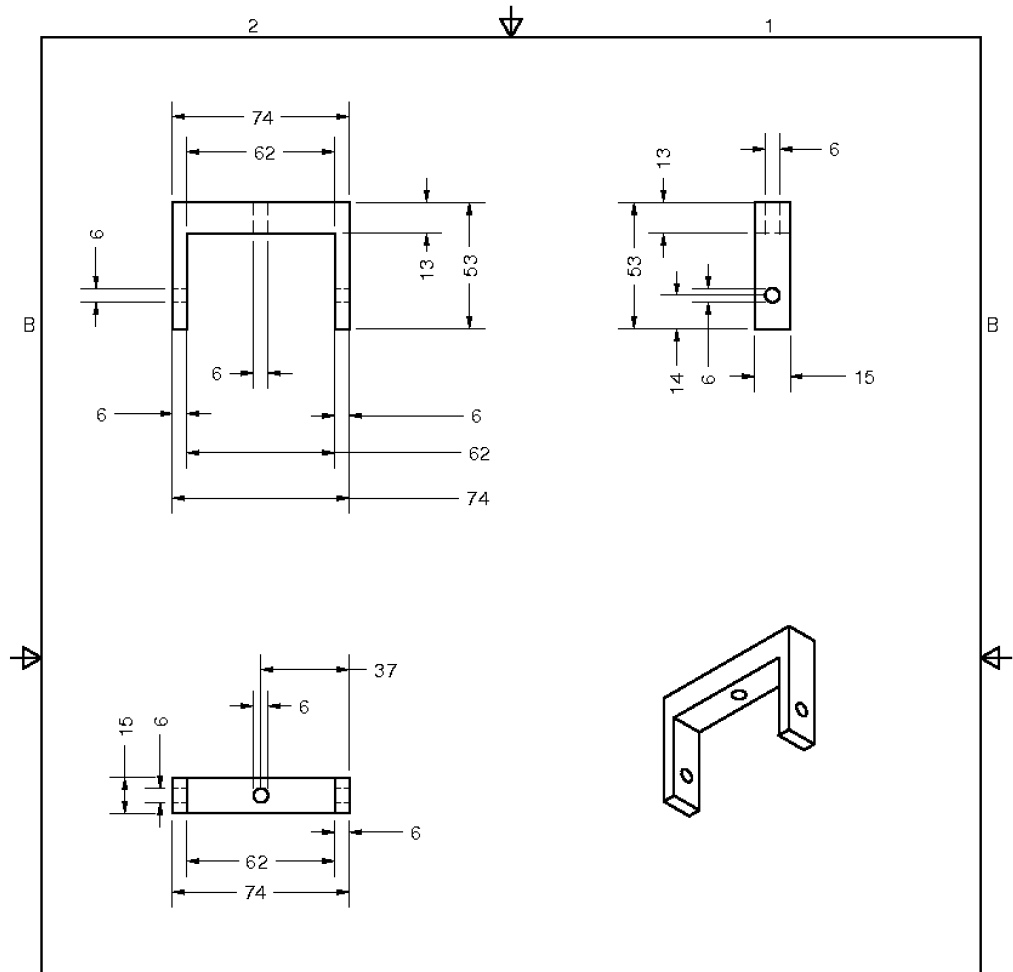


DRAWN Femando Sosa Montemayor	Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigación en Energía	
	TITLE Riel de la montura de la Cafetera Espresso	
CHECKED	SIZE A	DWG NO riel
QA	SCALE	
MFG	SHEET 1 OF 1	
APPROVED		

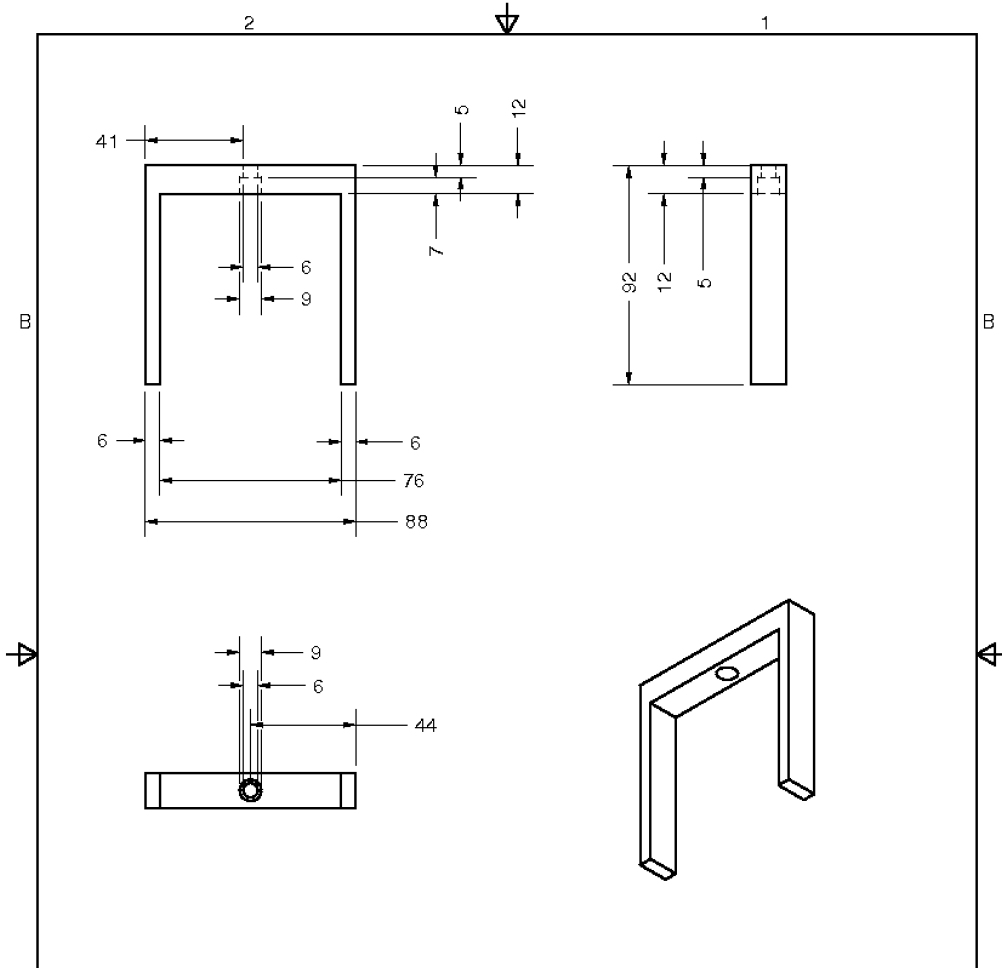


DRAWN	Fernando Sosa Montemayor
CHECKED	
QA	
MFG	
APPROVED	

Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigación en Energía	
TITLE	
Barra entre rieles	
SIZE	DWG NO
A	barra
SCALE	SHEET 1 OF 1



DRAWN Femando Sosa Montemayor	Unviersidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigación en Energía	
	TITLE	
CHECKED	Pieza "C"	
QA	SIZE	DWG NO
MFG	A	pieza_C
APPROVED	SCALE	SHEET 1 OF 1



DRAWN Fernando Sosa Montemayor	Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigación en Energía	
	TITLE	
CHECKED	Pieza donde se coloca la Cafetera Espresso	
QA	SIZE	DWG NO
MFG	A	soporte_cafetera
APPROVED	SCALE	SHEET 1 OF 1





---

# Bibliografía

---

- [1] Goldemberg, J., 2006. The promise of clean energy. *Energy Policy*. 34, 2185-2190.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate change 2001: the scientific basis*. Cambridge University Press, New York, 2001 pp. 2-13.
- [3] Huntington, T.G., 2006. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*. 319, 83-95.
- [4] McMichael, A.J., Woodruff, R.E., Hales, S., 2006. Climate change and human health: present and future risks. *The Lancet*. 367, 859-69.
- [5] Haines, A., Patz, J.A., January 7 2004. Health Effects of Climate Change. *JAMA*. 291, 99-103.
- [6] Williams, P.A., 2006. Projections for the geopolitical economy of oil after war in Iraq. *Futures*. 38, 1074-1088
- [7] Costantinia, V., Gracceva, F., Markandya, A., Vicini, G., 2006. Security of energy supply: Comparing scenarios from a European perspective. *Energy Policy*. ARTICLE IN PRESS
- [8] Geller, H., Harrington, P., Rosenfeld, A.H., Tanishima, S., Unander, F., 2006. Policies for increasing energy efficiency: Thirty years of experience in OECD countries. *Energy Policy*. 34, 556-573.
- [9] Ürge-Vorsatz, D., Miladinova, G., Paizs, L., 2006. Energy in transition: From the iron curtain to the European Union. *Energy Policy*. 34, 2279-2297.
- [10] *Prospectiva sobre la utilización de las Energías Renovables en México, Una visión al año 2030*. SENER, México. 2005.
- [11] Jaramillo, O.A., Borja, M.A., 2004. Windspeed analysis in La Ventosa, Mexico: a bimodal probability distribution case. *Renewable Energy*. 29, 1613-1630.

- [12] Las Energías Renovables en México y el mundo, Semblanza. CONAE. México, pp. 10. 2006
- [13] POISE 2005-2014 Documento Ejecutivo. CFE. 2005
- [14] Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México 2006, SENER-GTZ, México. 2006
- [15] Ponte, S., 2002. The 'Latte Revolution'? Regulation, Markets and Consumption in the Global Coffee Chain. *World Development*. 30, 1099-1122
- [16] International Coffee Organization. [www.ico.org](http://www.ico.org). 2006
- [17] A consumer's guide to energy efficiency and Renewable Energy. US Department of Energy. [http://www.eere.energy.gov/consumer/your\\_home/appliances/index.cfm/mytopic=10040](http://www.eere.energy.gov/consumer/your_home/appliances/index.cfm/mytopic=10040). 2006
- [18] Balance Nacional de Energía 2005. SENER. 2005
- [19] <http://www.gardfoods.com/coffee/coffee.brewings.htm>. 2006
- [20] Ackerman, A.S.E., 1915. Annual Report Smithsonian Institution.
- [21] Global Policy Forum. <http://www.globalpolicy.org/security/oil/2003/0425byzantine.htm>. 2006
- [22] Assessment of Solar Energy Technologies, Annual Report. American Solar Energy Society. 1989, 21-24.
- [23] Mills, D., 2004. Advances in solar thermal electricity technology. *Solar Energy*. 74, 19-31.
- [24] Jaramillo, O.A., del Río, J.A., 2002 . Optical fibres for a mini-dish/Stirling system: thermodynamic optimization. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 35, 1241-1250.
- [25] Kribus, A., 2006. A miniature concentrating photovoltaic and thermal system. *Energy Conversion and Management*. ARTICLE IN PRESS
- [26] Tápia Salinas, S. *Cocedor solar con respaldo eléctrico, Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería*. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigación en Energía, Temixco, morelos, 2004.
- [27] Duffy, J.A., Beckman, W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, Inc, New York, 1991.
- [28] Feynman, R.P., Leighton, R.B., Sands, M. *The Feynman Lectures on Physics, Volume I*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1977.
- [29] Çengel, Y.A. *Heat Transfer, a practical approach, second edition*. McGraw-Hill Higher Education, Boston, 2003.

- 
- [30] Ballestrina, J., Ulmerb, S., Moralesa, A., Barnesc, A., Langleyc, L.W., Rodríguez, M., 2003. *Systematic error in the measurement of very high solar irradiance*. Solar Energy Materials & Solar Cells. 80, 375-381.
- [31] Incropera, Frank K.P., DeWitt, Donald P. *Fundamentos de transferencia de calor*, 4<sup>a</sup> edición. Ed. John Wiley & Sons, Inc., 1999 pp. 8.
- [32] Serway, R.A. *Física, tomo I*. McGraw-Hill, México, 1993.
- [33] Enciclopedia en línea Wikipedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Phase\\_transition](http://en.wikipedia.org/wiki/Phase_transition). 2006
- [34] Ramos Mora, E. *Principios de transferencia de calor; Notas del Curso de Actualización en Energía Solar*. Universidad Nacional Autónoma de México, Laboratorio de Energía Solar, Temixco, Morelos, 1994.