

01178



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

POSGRADO EN INGENIERIA

CENTRO DE INVESTIGACION EN ENERGIA

COCEDOR SOLAR CON RESPALDO  
ELECTRICO.

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERIA  
AREA ENERGIA  
OPCION FOTOTERMICA  
P R E S E N T A :  
S A U L T A P I A S A L I N A S

DIRECTOR DE TESIS: DR. JESUS ANTONIO DEL RIO PORTILLA

TEMIXCO, MOR.

JUNIO - 2005

m346444



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

# Dedicatoria.

A mi *Madre*: Por enseñarme a luchar hasta conseguir los objetivos planteados.

A mi *Padre*: Por el amor que me dio.

A mi *Abuelo Toño*: Por enseñarme que la disciplina de trabajo, es un buen camino para hacer lo que uno prefiere desempeñar.

A mis *Abuelitas Juanita y María*: Por ese amor inmenso que me dieron.

Para mi *Madrina Juventina, mi Padrino Saúl y sus hijas Adriana, Alba, y también para mi primo Saúl*: Por el apoyo y cariño que me brindaron en esa etapa tan difícil de mi vida.

Para mi *Esposa Yesica*: Por soportar el sacrificio económico, y por el todo el apoyo moral que me ha dado para continuar con mi preparación.

Para mis hijas *Andrea Berenice, Ana Citlali y mi hijo Saúl*: Por el amor que me brindan cada día, lo cual me motiva, para hacer cada día mejor mi trabajo.

Para mis hermanos *Ángel, Rosalio y Fernando* y mis hermanas *Yolanda, Lety (qepd) y Faby*: Porque al compartir con ustedes momentos difíciles, me motivaron a superar cualquier obstáculo en bien de todos.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Saúl Tapia Salinas.

FECHA: 01-Julio-2005

FIRMA: Saúl Tapia

# Agradecimientos.

Le agradezco a usted Dr. Jesús Antonio del Río Portilla, por todo su apoyo, por sus valiosas sugerencias, y además por su acertada guía en el desarrollo de mi trabajo. También quiero agradecerles a quienes de forma directa han hecho valiosas sugerencias para que este trabajo tuviera un resultado tan exitoso, al Dr. Mariano López de Haro, al Dr. Oscar A. Jaramillo S., al Dr. Rubén J. Dorantes Rodríguez, al M. en C. Hugo E. de Jesús Solís C. Mi más sincero agradecimiento a todos mis compañeros e investigadores del Centro que participaron muy activamente en compartir las comidas cocinadas de los miercoles organizadas en nuestro Centro.

# Índice general

<b>1. Introducción.</b>	<b>15</b>
1.1. ¿Qué es un cocedor solar? . . . . .	15
1.2. Antecedentes. . . . .	16
1.3. Aportación de nuestro trabajo. . . . .	18
1.4. Ebullición del líquido de la comida durante la cocción de comida con caldo. . . . .	19
1.4.1. Regímenes de ebullición y descripción de la curva de ebullición. . . . .	20
1.4.2. Ebullición con convección natural. . . . .	22
1.4.3. Ebullición nucleada. . . . .	22
1.4.4. Análisis de la cocción de comida con caldo. . . . .	23
<b>2. Diseño del Cocedor Solar.</b>	<b>25</b>
2.1. Estrategia de diseño . . . . .	25
2.2. Diseño de la cámara de cocción y base de las ollas para comida. . . . .	26
2.3. Determinación del espesor del aislamiento. . . . .	28
2.4. Sistema mecánico para ajuste del ángulo de inclinación, del área de concentración. . . . .	30
2.5. Propuesta de cocedor solar con ángulo de incidencia ajustable. . . . .	33
<b>3. Modelo Teórico del Cocedor Solar.</b>	<b>35</b>
3.1. Energía de entrada al cocedor $\dot{E}_{entra,T}$ . . . . .	35
3.1.1. Modelo del día claro para energía difusa. . . . .	36
3.1.2. Evaluación de la energía directa que entra al cocedor $\dot{E}_{dir,entra}$ . . . . .	36
3.1.3. Evaluación del flujo de energía total que entra al cocedor. . . . .	39
3.2. Flujo de energía disipada hacia el ambiente $\dot{E}_{sale,T}$ . . . . .	40
3.2.1. Energía que sale por conducción $\dot{E}_{sale,cond}$ . . . . .	40
3.2.2. Energía que sale del cocedor por radiación hacia el ambiente. . . . .	42
3.2.3. Relación del flujo de energía disipada al ambiente $E_{sale,T}$ . . . . .	45
3.3. Energía acumulada en el interior del cocedor $\dot{E}_{acumulada,T}$ . . . . .	46
3.3.1. Ecuación diferencial del modelo propuesto. . . . .	47
3.4. Evaluación del comportamiento de la temperatura en el interior del cocedor solar. . . . .	48
<b>4. Evaluación Teórica del Modelo.</b>	<b>49</b>
4.1. Evaluación con Datos Calculados. . . . .	49
4.1.1. Evaluación del comportamiento térmico del cocedor el día 21 de Diciembre del año. . . . .	50
<b>5. Desarrollo Experimental.</b>	<b>57</b>
5.1. Objetivos de la medición experimental. . . . .	57
5.2. Medición de temperaturas de cocción de alimentos y parámetros físicos. . . . .	58

5.2.1.	Medición de resistencia térmica total $R_{Total,exp}$ del cocedor solar con respaldo eléctrico. . . . .	59
5.2.2.	Temperatura de cocción de clemole de pollo. . . . .	61
5.2.3.	Temperatura del cocedor en vacío. . . . .	64
5.2.4.	Temperatura de cocción de postre de manzana. . . . .	65
5.2.5.	Cocción de pollo en mole verde utilizando respaldo eléctrico. . . . .	67
5.3.	Resumen de resultados de cocciones de alimentos en el cocedor solar. . . . .	69
5.3.1.	Análisis de los resultados experimentales. . . . .	69
<b>6.</b>	<b>Respaldo Eléctrico.</b>	<b>73</b>
6.1.	Adaptación física de las resistencias. . . . .	74
6.2.	Control eléctrico de respaldo . . . . .	74
6.2.1.	Descripción de los elementos del control eléctrico. . . . .	76
6.2.2.	Funcionamiento del sistema de control de temperatura para el cocedor solar. . . . .	78
<b>7.</b>	<b>Cocedores Solares para 2 y 6 Ollas.</b>	<b>85</b>
7.1.	Diseño del cocedor para 2 ollas de presión. . . . .	85
7.1.1.	Flujo de energía disipada hacia el ambiente $\dot{E}_{sale,T}$ . . . . .	87
7.1.2.	Evaluación del comportamiento térmico del cocedor el día 21 de Diciembre del año. . . . .	88
7.1.3.	Comentarios . . . . .	92
7.2.	Cocedor Solar para 6 Ollas de Presión. . . . .	92
7.2.1.	Diseño de la cámara de cocción y base de las ollas para comida. . . . .	92
7.2.2.	Flujo de energía disipada hacia el ambiente $\dot{E}_{sale,T}$ . . . . .	94
7.2.3.	Evaluación del comportamiento térmico del cocedor el día 21 de Diciembre del año. . . . .	94
7.2.4.	Comentarios . . . . .	96
<b>8.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>99</b>
<b>A.</b>	<b>Geometría solar.</b>	<b>103</b>
A.1.	Geometría del comportamiento del flujo de radiación solar. . . . .	103
A.1.1.	Declinación solar. . . . .	103
A.1.2.	Sistema de referencia aparente. . . . .	104
A.1.3.	Sistema coordinado con origen en el centro de la tierra. . . . .	104
A.1.4.	Representaciones de $\vec{S}$ en ambos sistemas de referencia y expresiones de los ángulos $\theta_z$ y $\gamma_s$ . . . . .	106
A.1.5.	Evaluación del ángulo de incidencia del flujo de radiación solar sobre una superficie inclinada. . . . .	107
A.1.6.	Evaluación del ángulo $\theta_p$ . . . . .	109
<b>B.</b>	<b>Concentrador de 4 espejos planos.</b>	<b>111</b>
B.1.	Diseño de los espejos norte y sur del concentrador del cocedor solar para 2 posiciones. . . . .	111
<b>C.</b>	<b>Evaluaciones térmicas del cocedor.</b>	<b>119</b>
C.1.	Evaluación del comportamiento térmico del cocedor el día 21 de Marzo del año. . . . .	119
C.2.	Evaluación del comportamiento térmico del cocedor el día 21 de Junio del año. . . . .	123
C.3.	Evaluación del comportamiento térmico del cocedor el día 21 de Septiembre del año. . . . .	127

# Índice de figuras

1.1. Estufa solar abierta. . . . .	17
1.2. Horno solar tipo caja. . . . .	18
1.3. Descripción de ebullición. . . . .	19
1.4. Ebullición subenfriada y saturada. . . . .	21
1.5. Esquemas de etapas de ebullición. . . . .	21
1.6. Curva de etapas de ebullición del agua. . . . .	22
2.1. Esquema de la cámara de cocción. . . . .	27
2.2. Fotografía de la cámara de cocción. . . . .	27
2.3. Esquema de la cámara de cocción aislada. . . . .	29
2.4. Estados del movimiento del cocedor. . . . .	30
2.5. Cocedor solar. . . . .	31
2.6. Mecanismo ajuste ángulo del Cocedor solar. . . . .	31
2.7. Esquema del detalle del ajustador del cocedor. . . . .	32
2.8. Fotografía del ajustador mecánico del cocedor solar. . . . .	33
3.1. Concentrador de cuatro espejos planos. . . . .	38
3.2. Esquema para evaluar los factores de vista. . . . .	42
3.3. Esquema de analogía eléctrica para la resistencia térmica radiativa. . . . .	43
3.4. Gráfica del comportamiento térmico teórico. . . . .	48
4.1. Flujo de energía que entra al cocedor el 21/Dic. . . . .	51
4.2. Comportamiento térmico ideal 21/Dic. . . . .	53
4.3. Comportamiento térmico real 21/Dic. . . . .	54
4.4. Comportamiento térmico ideal en solsticios y equinoccios. . . . .	54
4.5. Comportamiento térmico real en equinoccios y solsticios. . . . .	55
4.6. Flujo de energía que entra al cocedor en solsticios y equinoccios. . . . .	55
5.1. Desempeño térmico en vacío del cocedor con energía eléctrica. . . . .	61
5.2. Comportamiento térmico cocción de clemole de pollo 3/Dic/04. . . . .	62
5.3. Eficiencia del cocedor en cocción de clemole de pollo 3/Dic/04. . . . .	63
5.4. Comportamiento térmico en vacío del cocedor solar. . . . .	64
5.5. Eficiencia del cocedor en vacío. . . . .	65
5.6. Comportamiento térmico cocción de manzana. . . . .	66
5.7. Eficiencia del cocedor durante cocción de manzana. . . . .	67
5.8. Comportamiento térmico en operación del respaldo eléctrico. . . . .	68
5.9. Cocciones exitosas. . . . .	69
5.10. Arroz cocinado en cocedor solar. . . . .	70
5.11. Lentejas cocinadas el 13/Abril/05 en cocedor solar. . . . .	70
5.12. Pollo en mole verde cocinado el 13/Abril/05. . . . .	71

6.1. Esquema de ubicación de resistencias eléctricas. . . . .	74
6.2. Fotografía de ubicación de resistencias eléctricas de respaldo. . . . .	75
6.3. Diagrama eléctrico de control. . . . .	75
6.4. Fotografía de los elementos del control eléctrico. . . . .	76
6.5. Esquema de operación del control del cocedor, con sólo energía solar. . . . .	79
6.6. Esquema de operación del control utilizando respaldo eléctrico. . . . .	80
6.7. Fotografía del cocedor solar con respaldo eléctrico. . . . .	82
6.8. Fotografía donde se muestra el cocedor solar y ajustador de inclinación del cocedor. . . . .	83
7.1. Comportamiento de la entrada de energía al cocedor el 21/Dic. . . . .	89
7.2. Comportamiento térmico ideal cocedor 2 ollas el 21/Dic. . . . .	91
7.3. Comportamiento térmico real en cocedor de 2 ollas el 21/Dic. . . . .	91
7.4. Comportamiento de la energía que entra al cocedor de 6 ollas el 21/Dic. . . . .	95
7.5. Comportamiento térmico del cocedor de 6 ollas. . . . .	97
A.1. Declinación solar. . . . .	104
A.2. Sistema de referencia aparente. . . . .	105
A.3. Sistema de referencia desde el centro de la tierra. . . . .	105
A.4. Esquema para observar transformación de coordenadas. . . . .	106
A.5. Esquema superficie inclinada. . . . .	108
B.1. Longitud de espejos. . . . .	112
C.1. Energía que entra al cocedor el 21/Marzo. . . . .	120
C.2. Comportamiento térmico ideal del 21/Marzo. . . . .	122
C.3. Comportamiento térmico real 21/Marzo. . . . .	123
C.4. Energía que entra al cocedor el 21/Junio. . . . .	125
C.5. Comportamiento térmico ideal del cocedor el 21/Junio. . . . .	126
C.6. Comportamiento térmico real del cocedor el 21/Junio. . . . .	127
C.7. Energía que entra al cocedor el 21/Septiembre. . . . .	128
C.8. Comportamiento térmico ideal del cocedor el 21/Septiembre. . . . .	130
C.9. Comportamiento térmico real del cocedor el 21/Septiembre. . . . .	130

# Índice de cuadros

2.1. Dimensiones de la cámara de cocción . . . . .	26
2.2. Dimensiones de la cámara del cocedor y el aislamiento térmico del cocedor. . . . .	29
3.1. Valores de las constantes del modelo de día claro para estimación de la energía difusa [2]. . . . .	37
3.2. Resumen de dimensiones y parámetros físicos. . . . .	41
3.3. Resumen de resultados de evaluaciones de resistencias térmicas. . . . .	42
3.4. Tabla de evaluación del valor de $h_{rad}$ del cocedor. . . . .	45
3.5. Tabla de evaluación de capacidades individuales de los elementos que integran el cocedor. . . . .	47
3.6. Resumen de evaluación de capacidades promedio. . . . .	47
5.1. Evaluación de la resistencia térmica total del cocedor. . . . .	60
7.1. Dimensiones de la cámara de cocción para cocedor de 2 ollas. . . . .	85
7.2. Dimensiones de la cámara de cocción aislada para el cocedor de 2 ollas. . . . .	86
7.3. Dimensiones del cocedor de 2 ollas de presión. . . . .	87
7.4. Resistencias térmicas del cocedor de 2 ollas de presión. . . . .	88
7.5. Dimensiones de la cámara de cocción para cocedor de 6 ollas. . . . .	92
7.6. Dimensiones de la cámara del cocedor y el aislamiento térmico del cocedor de 6 ollas. . . . .	92
B.1. Valores del ángulo de declinación $\delta$ en los solsticios y equinoccios. . . . .	113
B.2. Resultados de las evaluaciones de $\theta_z$ , $\gamma_s$ y $\theta_p$ , en días de equinoccios y solsticios. . . . .	116

# Resumen.

En este resumen hacemos una breve descripción del diseño, modelación, evaluación experimental de la propuesta de un cocedor solar con respaldo eléctrico. Primero mencionaremos en el capítulo 1, algunos trabajos que han sido desarrollado previamente, y también algunos conceptos que utilizaremos en nuestro desarrollo. Sobre todo hicimos una introducción para describir la ebullición de líquidos, tema que es necesario para profundizar en la cocción de alimentos con energía solar. Luego en el capítulo 2, desarrollaremos el cocedor solar, y mostraremos como agregar un sistema mecánico para ajustar la máxima entrada del flujo de radiación solar incrementando su utilidad. Después desarrollamos en el capítulo 3, un modelo teórico del comportamiento térmico dentro del cocedor, donde utilizamos únicamente una medición de temperatura como parámetro del desempeño. En el capítulo 4, mostraremos la forma como realizar las evaluaciones térmicas hasta encontrar el desempeño térmico teórico, y en el capítulo 5, presentaremos los resultados de nuestras mediciones experimentales, y un análisis de la información contenida en los datos de temperatura. También mostramos como el modelo teórico desarrollado previamente resultó tener un buen concordancia con los resultados experimentales. En el capítulo 6, desarrollamos el respaldo eléctrico para nuestro cocedor solar y un sistema de control automático que podemos utilizar durante todo el año. Y en el capítulo 7, se diseño un cocedor solar para 2 ollas, y un cocedor para 6 ollas similar al de tres ollas de nuestro trabajo principal. En el apéndice A, mostraremos la geometría del comportamiento del flujo de radiación solar, muy útil para nuestro desarrollo, luego en el apéndice B, desarrollaremos un concentrador de cuatro espejos planos para un cocedor solar de dos posiciones, y en el apéndice C, realizaremos las evaluaciones complementarias del capítulo 4.

# Capítulo 1

## Introducción.

En este trabajo presentaremos el diseño y modelación del cocimiento en una nueva propuesta de cocedor solar. Primero explicaremos del nombre de cocedor, y luego haremos una revisión al desarrollo actual de las estufas y hornos solares para cocción de comida, hasta presentar nuestra propuesta.

### 1.1. ¿Qué es un cocedor solar?

De los dispositivos que existen para cocer alimentos, en el mercado mexicano, la estufa gas es el que mayor aceptación ha tenido. En los Estados Unidos de Norteamérica también la estufa eléctrica ha sido muy aceptada. Y las amas de casa han usado las estufas de gas o eléctricas para cocinar alimentos de la siguiente manera:

- Los alimentos preparados en caldo se cocinan en ollas sobre las parrillas de las estufas.
- Los alimentos preparados en seco, como pollo relleno, pavo relleno, cuete mechado, pasteles, panes, etc, se cuecen en el horno, que normalmente es parte del mismo utensilio de la estufa comercial, es decir las estufas comerciales están compuestas por estufa y horno en el mismo dispositivo.

Es mi punto de vista particular que debido a estas experiencias, cuando se les sugiere a las amas de casa, el uso de hornos solares para la cocción de alimentos, ellas tienen dudas de que el horno solar pueda ser utilizado para cocimiento de alimentos preparados en caldo.

Como nosotros proponemos que los hornos solares puedan cocinar todos los alimentos que se cuecen en estufas convencionales (excepto los alimentos fritos), deseamos asignar un nombre que no sólo sea relacionado con cocciones de alimentos preparados en seco, y hemos decidido dar un nombre diferente a nuestro dispositivo para cocción de alimentos, y este nombre es ***cocedor solar***.

Creemos que podría cuestionarse el nombre de nuestro dispositivo, por esto presentaremos las definiciones que se tiene de estufa, hornillo, cocedor, cocina, cocedero, y cocedor, y mostraremos que en realidad son sinónimos.

Las definiciones extraídas del diccionario de la Real Academia Española nos enseña que:

- *Estufa*: Armazón que se usa para secar una cosa o mantenerla caliente poniendo fuego por debajo.
- *Hornillo*: Utensilio pequeño y generalmente portátil, para cocinar o calentar alimentos.
- *Horno*: Aparato culinario cerrado, en cuyo interior se asan, calientan o gratinan alimentos.

- *Cocina*: Pieza o sitio de la casa en la cual se guisa la comida.
- *Cocedero*: Pieza o lugar en que se cuece una cosa, y especialmente el vino.
- *Cocedor*: (cocedero).- Pieza o sitio de la casa en la cual se guisa la comida.

Podemos observar con respecto a las definiciones de la Real Academia Española que:

- La palabra estufa no aplica a nuestro dispositivo, debido a no tener fuego como elemento de calefacción.
- La palabra hornillo no es aplicable debido a que nuestro dispositivo es móvil pero no portátil.
- La palabra horno es aplicable, sin embargo en México ya comentamos los posibles inconvenientes.
- La palabra cocina es aplicable, sin embargo en México cocina tiene más aceptación como el sitio de la casa en la cual se guisa la comida, que como el dispositivo o pieza en el cual se guisa la comida.
- La palabra cocedero es aplicable, pero en México es poco usual.
- La palabra cocedor es aplicable por definición, pero usada muy poco, sin embargo en su favor tiene que, el sentido común de una persona, al escuchar la palabra cocedor, relacione esta palabra con un dispositivo para cocinar o una persona que cuece algo y ambas definiciones son ciertas. Por tanto propongo el uso de esta palabra para denominar a nuestro dispositivo solar, cocedor solar y usaremos como sinonimos de cocedor solar las demás palabras, cocedor solar, cocina solar, cocedero solar, hornillo solar, o estufa solar, que en realidad describen dispositivos similares, o que cumplen la misma función.

Con esta revisión de las definiciones esperamos cubrir las dudas que se generen respecto al nombre de nuestro trabajo. A continuación presentaremos algunos de los trabajos que nos han antecedido.

## 1.2. Antecedentes.

En la actualidad existen diferentes estufas solares de diversas formas. Algunas son muy simples, como las hechas por tres caras planas, una cara de base y las otras dos formando una esquina, y este sistema de espejos concentra los rayos en un área superficial que tiene por centro el lugar donde se coloca una olla con la comida. La comida va encerrada en una bolsa de plástico transparente e inflada con el fin de formar una cámara de aire y dar una resistencia térmica hacia el ambiente. En este caso todo el dispositivo se encuentra en contacto con el aire, esto hace que un flujo de calor muy grande sea disipado por convección hacia el ambiente. Por el modo de utilización, esta estufa tiene grandes inconvenientes como:

- Baja eficiencia, debido a la gran proporción de energía disipada al ambiente.
- Baja capacidad de comida.
- Alcanza temperaturas bajas, por esto sólo se puede utilizar para cocciones de comidas suaves.
- Baja eficacia en las cocciones, debido a que la estufa es muy sensible a la disminución del flujo de radiación solar, algunos alimentos no terminan bien cocinados.

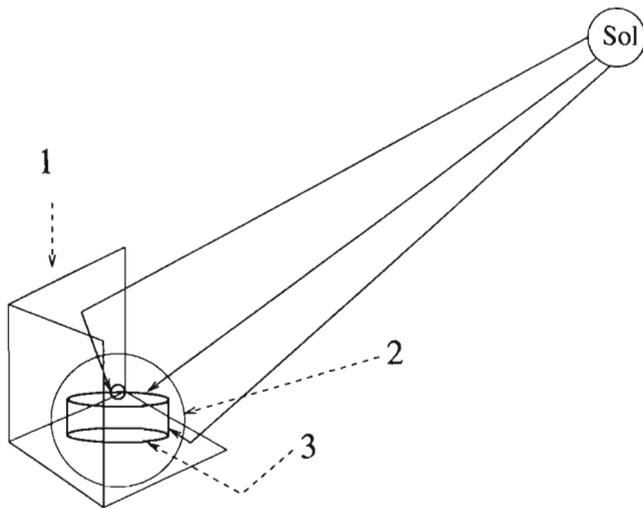


Figura 1.1: En la figura se muestra el esquema de una estufa solar abierta, las partes que la integran son: 1). Espejos fijos de tres caras; 2). Cubierta de plástico transparente; 3). Olla pintada de negro.

En la figura 1.1 presentamos un esquema general del diseño de estas estufas solares. Son las mencionadas dificultades las que han hecho buscar mejorar este esquema apareciendo hornos solares.

Los hornos solares tienen la finalidad de mejorar la eficiencia de las estufas de contacto con el ambiente, y de este tipo, se han diseñado un grupo de hornos solares para cocción de alimentos. Los hornos solares se componen de un concentrador en la parte superior, un compartimento cerrado y aislado térmicamente utilizado como cámara de cocción, y en la interfaz entre este compartimento y el concentrador se usa un vidrio transparente. Este vidrio tiene el objetivo de aislar térmicamente el compartimento y el ambiente, además el vidrio permite introducir la energía radiativa a través de él, al espacio de cocción. En la figura 1.2 se muestra el esquema general de una estufa cerrada. Desde mi particular punto de vista este tipo de sistema es el que tiene más posibilidad de entregar un dispositivo de uso eficaz en la cocción, y con una eficiencia suficiente para tener un tamaño moderado. Los hornos solares tienen algunas variantes, estas variantes las podemos clasificar en función del modo de operación del sistema de concentración como:

- Hornos solares de sistema de concentración fijo durante la cocción
- Hornos solares con ajuste del sistema de concentración durante la cocción.

De los hornos solares de sistema de concentración fijo, durante la cocción existen variantes también, éstas son:

- Hornos solares de sistema de concentración fijo con dos ajustes durante el año.
- Hornos solares de sistema de concentración fijo con varios ajustes en el año.

También se pueden clasificar los hornos solares por el tipo de sistema de concentración como:

- Horno solar de concentrador parabólico.
- Horno solar de concentrador de tipo concentrador parabólico compuesto.
- Horno solar de concentrador de espejos planos.

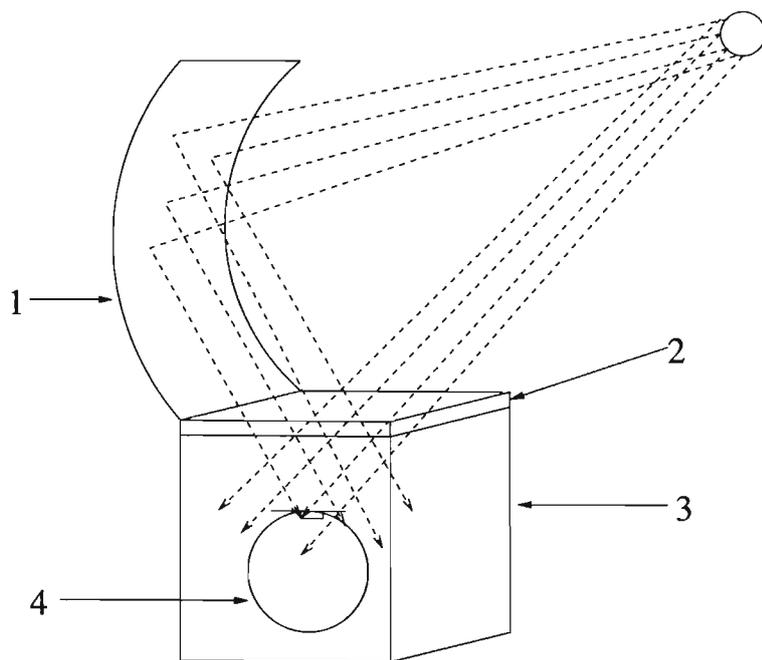


Figura 1.2: En el esquema se muestra un horno tipo caja, y las partes que lo integran son: 1). El espejo reflector; 2). El vidrio plano; 3). La cubierta externa del cocedor; 4). La olla para los alimentos.

Cada uno de los tipos de hornos presenta diferentes ventajas y desventajas propias del diseño del mismo. De estos hornos solares, el cocedor solar tipo caja de dos posiciones y con concentrador de cuatro espejos planos [5] [6], ha mostrado ser una buena alternativa de uso en la cocción de alimentos. En el Centro de Investigación en Energía ha sido realizado un modelo de este tipo, con resultados buenos en la eficacia de cocción de alimentos, sin embargo esta estufa solar presenta algunas características no deseables como:

- El horno solar está diseñado para Temixco Morelos, y se tienen que hacer cálculos para adaptarlo a otros lugares del país.
- El diseño del horno está hecho para lugares con latitud inferior a los 23 grados norte.
- El ajuste en el cambio de posición angular anual es difícil de realizar por una sola persona.

Como ya han sido realizados hornos solares en nuestro Centro, mostraremos cuales serán las aportaciones de este trabajo.

### 1.3. Aportación de nuestro trabajo.

En nuestro trabajo nos proponemos llevar a cabo los siguientes objetivos:

1. Hacer el diseño optogeométrico, mecánico, térmico y de un sistema de respaldo eléctrico automático para una nueva propuesta de cocedor solar para cocción de alimentos.
2. Diseñar un sistema para ajustar el ángulo de incidencia de los rayos solares sobre el vidrio plano interfaz del cocedor solar.

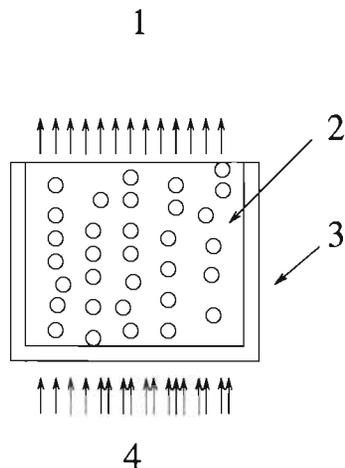


Figura 1.3: En la figura mostramos las partes que forman el sistema de un líquido en ebullición para el tipo piscina, y que son: 1). La atmósfera; 2). El líquido; 3). El recipiente; 4). El flujo de calor.

3. Desarrollar la metodología de diseño, para desarrollar hornos solares eficaces en la cocción de alimentos.
4. Aplicar la metodología de diseño a nuestro desarrollo en particular.
5. Diseñar un sistema de respaldo eléctrico, que a su vez sea un apoyo para hacer una cocción convectiva (que se tenga movimiento del fluido dentro de las ollas) en el interior de la olla de los alimentos.
6. Construir el cocedor solar con respaldo eléctrico, mostrando el desarrollo de cada una de las etapas que integran la construcción.
7. Realizar cocciones de alimentos con energía solar, y utilizando el respaldo, para evaluar el desempeño experimental del cocedor.
8. Hacer comparaciones entre el modelo teórico, y el comportamiento térmico experimental.
9. Usando la metodología desarrollada en diseño para hornos solares, aplicarla para diseñar otros tamaños de hornos de cocción de alimentos.

En la cocción de alimentos el transporte de energía por convección de los líquidos mezclados con la comida sólida es uno de los procesos fundamentales para lograr un buen mezclado de la comida, y con esto lograr una cocción uniforme en la comida sólida, y por lo mismo un sabor más agradable al gusto de las personas. Por tanto presentaremos una descripción del fenómeno de la ebullición, para comprender su influencia sobre el transporte de energía desde la superficie externa del recipiente hasta el fluido interno.

#### 1.4. Ebullición del líquido de la comida durante la cocción de comida con caldo.

Para explicar la ebullición, tenemos que situarnos en el sistema formado por el recipiente y el líquido contenido en este recipiente. En la figura 1.3 podemos observar que el sistema para

describir la ebullición se compone de un recipiente que contiene un líquido, por simplicidad hemos supuesto que la energía se recibe en el recipiente en la pared inferior, también por simplicidad en la descripción supondremos que la superficie del líquido se encuentra en contacto con el ambiente.

Luego siguiendo a Junus A. Çengel [11], el fenómeno de la ebullición tiene su origen en la interfase sólido-líquido, cuando un líquido es mantenido a la temperatura  $T_s$ , suficientemente arriba de la temperatura de saturación a la presión de la olla. Cuando cocinamos decimos que el agua está hirviendo hasta que aparecen las burbujas en la superficie libre del líquido. El proceso de ebullición es complicado, porque se involucra un gran número de variables, y el movimiento del fluido tiene trayectorias difíciles de predecir debido al movimiento de las burbujas de vapor.

Como una forma de flujo de calor de convección, el flujo de calor de ebullición de la superficie del sólido al fluido es expresada por la ley de Newton para enfriamiento-calentamiento como:

$$\dot{q}_{ebullicion} = h_{sol-liq}(T_s - T_{sat}) = h_{sol-liq}\Delta T_{exceso} \quad (1.1)$$

donde hemos denominado el exceso de temperatura como  $\Delta T_{exceso} = T_s - T_{sat}$ ,  $h_{sol-liq}$  es el coeficiente de transferencia de calor del sólido al líquido,  $T_s$  es la temperatura de la superficie del sólido,  $T_{sat}$  es la temperatura de saturación del fluido a la presión que se encuentra el fluido. El proceso de ebullición en la práctica no ocurre en condiciones de equilibrio, normalmente las burbujas no están en equilibrio termodinámico con el líquido vecino. La temperatura y presión en la burbuja son distintas a las del líquido, y la diferencia de presión entre el vapor y el líquido están balanceadas con la tensión superficial de la interfase. La diferencia de temperaturas entre el vapor de la burbuja y la temperatura del líquido es la causa del flujo de calor entre burbuja y líquido. Cuando el líquido tiene menor temperatura que el vapor, se tiene condensación en la burbuja y la burbuja se colapsa. Cuando la temperatura del líquido es mayor que la temperatura del vapor de la burbuja, se tiene por efecto que el flujo de calor sea transferido del líquido a la burbuja, con lo cual la burbuja crece y se eleva por la fuerza de flotación. El tipo de ebullición en el que se tiene el sistema que describimos se conoce con el nombre de ebullición tipo piscina. En este sistema el movimiento del fluido es estacionario, y se debe a convección natural del fluido, y el movimiento de las burbujas a la influencia de la flotación.

En nuestro caso se tienen dos posibilidades de transferencia de calor: el primero es la forma subenfriado. Éste se da cuando la masa del fluido se encuentra a menor temperatura que la temperatura  $T_{sat}$  del líquido, esto se muestra en la figura 1.4 en el inciso a). La segunda posibilidad se da cuando la temperatura del fluido se encuentra a la temperatura  $T_{sat}$  del fluido, con lo cual tenemos una ebullición en estado saturado, esto lo ejemplificamos en el inciso b) de la figura 1.4.

Hemos ya realizado una discusión general sobre este esquema de ebullición, ahora haremos una descripción más en detalle de la evolución del proceso desde  $\Delta T_{exceso} = 0$  hasta la ebullición desarrollada tipo película. En la figura 1.5 se muestra la evolución en esquema. Y en la figura 1.6 se muestra la evolución de la ebullición en una gráfica. En la figura 1.6 se representa cómo se comporta la ebullición, considerando el flujo de calor  $\dot{q}_{ebullicion}$  con respecto al exceso de temperatura  $\Delta T_{exceso}$ , y también se distinguen las etapas desarrolladas. A continuación describiremos este desarrollo.

#### 1.4.1. Regímenes de ebullición y descripción de la curva de ebullición.

De acuerdo con Junus A. Çengel [11], el trabajo pionero en ebullición fue de S. Nukiyama en 1934, quien utilizó calentamiento eléctrico por medio de alambres de nicromel y platino inmersos en líquidos en sus experimentos. Nukiyama reportó que diferentes formas de ebullición tiene lugar, el tipo de ebullición depende del exceso de temperatura  $\Delta T_{exceso}$ . Cuatro diferentes regímenes fueron observados: ebullición con convección natural, ebullición nucleada, ebullición de transición y ebullición de película, ilustradas en la figura 1.6. En la curva de la figura 1.6 se puede observar el flujo de calor  $\dot{q}_{ebullicion}(W/m^2)$  con respecto al exceso de temperatura  $\Delta T_{exceso}(K)$ . La curva es

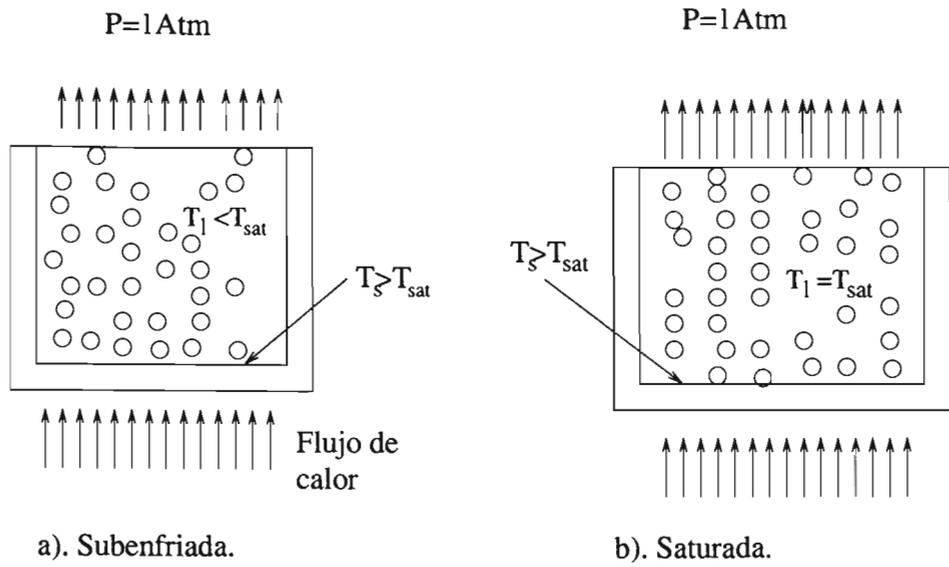


Figura 1.4: En la figura se muestran dos formas de ebullición dependiendo de la temperatura del líquido, a). Subenfriada, b). Saturada.

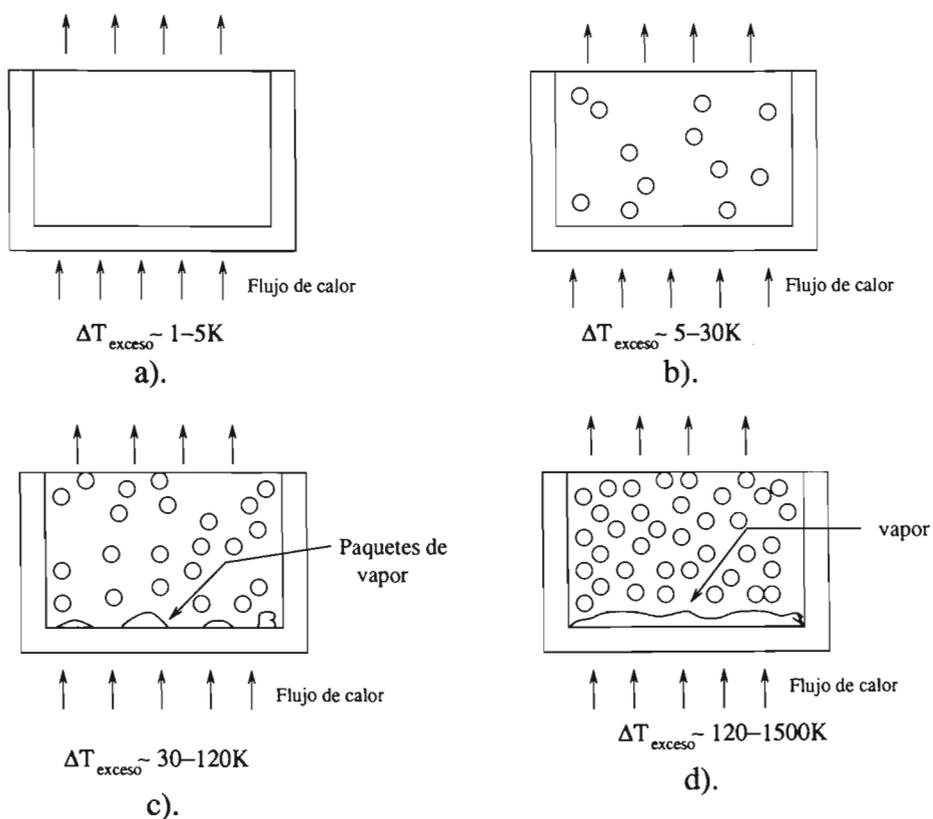


Figura 1.5: Esquemas de las etapas de ebullición, a). Ebullición con convección natural, b). Ebullición nucleada, c). Ebullición en transición, d). Ebullición tipo película.

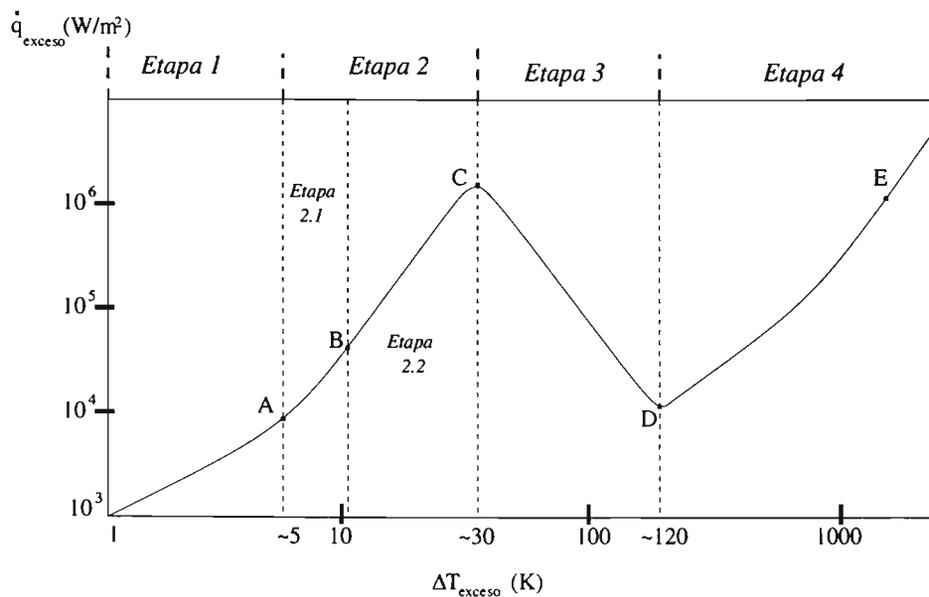


Figura 1.6: Curva de etapas de ebullición. a). Etapa 1: Ebullición con convección natural, b). Etapa 2: Ebullición nucleada, 2.1: las burbujas colapsan dentro del líquido, 2.2: las burbujas alcanzan la superficie del líquido, c). etapa 3: Ebullición en transición, d). Etapa 4: Ebullición tipo película.

para agua, y en general la forma de la curva se repite para diferentes fluidos, y sólo depende la curva de la superficie de calefacción en combinación con la presión del fluido, pero es prácticamente independiente de la geometría de la superficie de calentamiento. A continuación discutiremos en detalle cada uno de los regímenes.

### 1.4.2. Ebullición con convección natural.

Este tipo de ebullición se observa en el inciso a) de la figura 1.5, y se representa desde el origen hasta el punto A en la curva de ebullición de la figura 1.6. Sabemos que una sustancia pura a una presión constante, inicia la ebullición cuando se alcanza la temperatura de saturación  $T_{sat}$ . Pero en la práctica no se ven burbujas, hasta que la superficie sólida que está en contacto con el líquido tiene unos pocos grados Kelvin arriba de la temperatura de saturación (2 a 6 K para el agua). Por tanto el líquido es sobrecalentado en este caso (a una condición metaestable), y se evapora cuando la burbuja alcanza la superficie libre. El movimiento del fluido en este modo de ebullición esta gobernado por corrientes de convección natural, y la transferencia de calor desde la superficie de calefacción a temperatura  $T_s$  hasta la superficie se lleva a cabo por convección natural.

### 1.4.3. Ebullición nucleada.

Es en este tipo de ebullición donde se inicia el transporte de calor por medio de las burbujas y al mismo tiempo se afecta el movimiento del fluido por el burbujeo, en el esquema b) de la figura 1.5 se muestra este efecto, y se presenta en dos etapas en la figura 1.6. La primera etapa está representada entre el trazo de los puntos A y B de la figura 1.6, y la segunda etapa está representada por el trazo continuo de B a C de la gráfica de la figura 1.6.

En la primera etapa de la ebullición nucleada (trazo A-B), se tiene burbujeo aislado en zonas preferenciales de la superficie de calentamiento que se encuentra a temperatura  $T_s$ . En esta etapa, las burbujas son disipadas en el líquido rápidamente después de dejar la superficie del sólido, el

espacio dejado por la burbuja es llenado por líquido y el proceso se repite. Es el ciclo de salida de burbujas de la superficie sólida y llenarse con líquido nuevo lo que provoca el incremento del valor del coeficiente de transferencia de calor en esta región de ebullición nucleada.

En la segunda etapa de ebullición nucleada (región B-C) la diferencia de temperatura de calefacción se incrementa, y con esto, hay una cantidad abundante de burbujas, formando un gran número de lugares de nucleación, generando también columnas de vapor en el líquido. Las burbujas se mueven desde la superficie de nucleación hasta la superficie superior, donde la burbuja se rompe y escapa el contenido de vapor. En la gráfica de la figura 1.6 se puede observar que en la zona de ebullición nucleada cuando  $\Delta T_{exceso}$  tiene valores entre  $5 - 12K$  hay ebullición nucleada con burbujas que se rompen dentro del líquido, y para valores de  $\Delta T_{exceso}$  con valores entre  $12 - 30K$  se tiene una ebullición intensa donde las burbujas alcanzan la superficie libre. El punto C es un punto máximo relativo, y para el agua tiene un valor aproximado de  $1MW/m^2$ .

La ebullición nucleada es la ebullición más deseada en cocimiento de alimentos, debido a tener altos valores del coeficiente de transferencia de calor  $h$ , con relativamente bajos valores de  $\Delta T_{exceso}$  de  $30K$  para el agua.

Para los propósitos de nuestro estudio resulta útil sólo conocer el comportamiento de la curva de ebullición hasta el punto C de la figura 1.6, ya que a partir de este punto el flujo de calor comienza a decrecer y se necesita una mayor cantidad de  $\Delta T_{exceso}$  para que el flujo de calor vuelva a crecer. Por tanto los estados adelante del punto C no es conveniente alcanzarlos para no tener baja conducción del flujo de calor en nuestra olla de cocción de comida.

#### 1.4.4. Análisis de la cocción de comida con caldo.

Como ya hemos revisado, el exceso de temperatura adecuado para tener ebullición en la cocción de comida que tiene agua (caldo) está entre  $\Delta T_{exceso} = (6K, 30K)$ , mientras que el flujo de calor de ebullición adquiere los valores entre  $\dot{q}_{ebullicion} = (0, 1MW/m^2)$ . Conocidos estos parámetros en el capítulo 6, diseñaremos un respaldo eléctrico por medio de resistencias para nuestro cocedor solar, y este mismo sistema lo usaremos para que se asegure la ebullición en las ollas de comida con caldos y así lograr un buen cocimiento.

Una vez descritos los conceptos que necesitamos para desarrollar el diseño de nuestro cocedor solar, sólo nos resta conocer los conceptos del comportamiento de los rayos solares para cada lugar de la tierra, en cuanto a dirección de los rayos, así como a la irradiancia del lugar del flujo solar, sin embargo al ser un tema tratado abundantemente por diversos autores, hemos hecho un apartado del desarrollo de estos conceptos en el apéndice A. Con los conceptos ya presentados iniciaremos nuestro desarrollo del cocedor solar para cocción de alimentos.

## Capítulo 2

# Diseño del Cocedor Solar.

En este capítulo presentaremos como haremos el diseño del cocedor, es decir los pasos que seguiremos de acuerdo con la características deseadas, para después diseñar la cámara de cocción con la determinación del espesor adecuado del aislamiento. También en este capítulo presentaremos un sistema de ajuste de ángulo de inclinación del cocedor que permitirá que en todos los días del año los rayos solares entren perpendicularmente al cocedor.

### 2.1. Estrategia de diseño

Para diseñar el cocedor solar hemos decidido cubrir un grupo de condiciones que expresamos a continuación, y que son:

1. El volumen del cocedor deberá tener capacidad para 3 ollas express de 6 litros de capacidad.
2. La superficie transparente (Vidrio plano) deberá guardar una posición perpendicular durante todos los días del año al flujo de rayos solares a las 12:00 hora solar local, y con esto lograr obtener la mayor cantidad del flujo de energía solar colectada en el interior de nuestro cocedor.
3. El cocedor tendrá la opción de girar sobre una superficie horizontal, con el fin de llevar a cabo el ajuste del ángulo de incidencia solar sobre la superficie plana, una vez por día, con esto lograr el ajuste del punto anterior.
4. La base soporte de las ollas deberá estar a  $90^\circ$ , en todo momento con respecto a la vertical, al girar el cocedor sobre la superficie horizontal, y con esto tener la posibilidad de ajustar el cocedor solar en cualquier momento.
5. Las ollas deberán entrar y salir fácilmente en la cámara de cocción, ya que esto facilitará la operación del cocedor.
6. El aislamiento del cocedor deberá ser suficiente para que en condiciones de temperatura máxima interna de  $T_m = 150^\circ C$ , la pared exterior alcance una temperatura máxima de  $40^\circ$ , esto permitirá que cualquier usuario cuente con seguridad por evitar quemaduras con el cocedor.

Para realizar el cocedor solar de acuerdo a lo indicado, haremos el esquema de nuestra propuesta.

Parámetro	Valor
$R_{int}$	0,44m
$w_a$	0,72m
$w_c$	0,84m
$w_x$	0,12m
$L_{base}$	0,79m
$w_{base}$	0,28m
$\gamma_{max}$	60°

Cuadro 2.1: Dimensiones de la cámara de cocción

**Esquema de diseño del cocedor solar propuesto.** En el cocedor deseamos tener la posibilidad de ajustar el ángulo de incidencia del flujo luminoso solar sobre el plano de entrada de radiación al cocedor, es decir buscaremos tener la posibilidad de girar el concentrador. Por esto hemos decidido dar al cocedor solar la forma de una mitad de un cilindro. El cilindro será cortado en la dirección del eje, y sobre la mitad será adaptado el vidrio plano que recibirá el flujo luminoso. La parte interna del cilindro, será usada como cámara del cocedor solar. La parte externa de la cámara será aislada, y el aislante se cubrirá con una lamina. La forma externa que aislará la cámara será cilíndrica también, y esta superficie externa cilíndrica será adaptada para girar sobre una mesa plana. De las tapas laterales del cilindro una será fija y la otra será giratoria para introducir a través de ésta las ollas con los alimentos. Para que las ollas estén en todo momento horizontales, será puesta una base plana con rodamientos, los rodamientos usarán de base el interior de la cámara cilíndrica, lo que dará la posibilidad de que la base se ajuste y siempre este horizontal al moverse internamente sobre la cámara cuando sea girado el cocedor. Sobre el vidrio plano de entrada a la cámara se instalará el concentrador de 4 espejos planos, con lo que esperamos sea incrementado el flujo luminoso captado. Son estas las características de nuestra propuesta de cocedor solar para cocción de alimentos y el cual desarrollaremos a continuación.

Por tanto iniciaremos con el diseño de la cámara y la base de las ollas, así como la base de la superficie interna del cocedor solar.

## 2.2. Diseño de la cámara de cocción y base de las ollas para comida.

La cámara de cocción la diseñaremos de tamaño adecuado, para esto la base horizontal se asienta sobre la superficie cilíndrica. Para tener las dimensiones del volumen del espacio de la cámara, debemos considerar el volumen que ocupan las ollas, y al conocer este volumen encontrar el valor del radio interno de la cámara. En la figura 2.1 se muestra el esquema de diseño de la cámara de cocción del cocedor solar. Geométricamente se pueden obtener las dimensiones internas, sin embargo nosotros utilizamos las ollas físicamente y construimos la cámara, y las dimensiones que hemos determinado son mostradas en el cuadro 2.1.

Las dimensiones que hemos dado a la cámara de cocción, nos garantizan que la capacidad de volumen sea para 3 ollas express de 6 litros, y éstas estén verticales en todo momento. Las ollas al introducirse en la cámara no presentan ninguna obstrucción. Y la base hace que las ollas se puedan desplazar en cualquier momento que el usuario(a) así lo requiera. Una vez determinadas las dimensiones de la cámara, podemos adicionar el aislamiento térmico de la cámara, como a continuación lo presentamos.

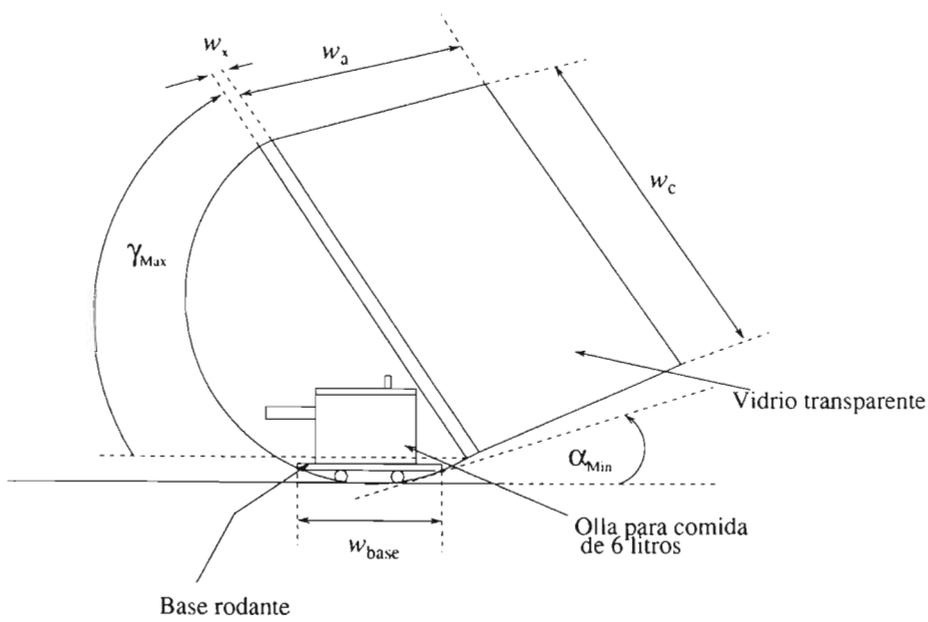


Figura 2.1: Esquema de la cámara de cocción, base rodante y olla para comida.

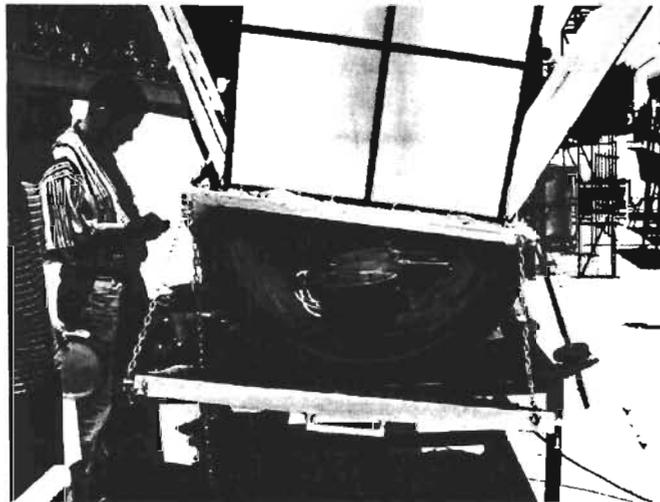


Figura 2.2: En la fotografía se muestra la cámara de cocción con las tres ollas sobre la base, ya en uso cotidiano de operación.

### 2.3. Determinación del espesor del aislamiento.

Para determinar el espesor adecuado del aislamiento tomaremos valores de las temperaturas máximas alcanzadas en la estufa solar de dos posiciones. El lugar donde se tiene la temperatura, se encuentra sobre la pared de absorción de radiación solar. En esta pared se han medido temperaturas hasta de  $150^{\circ}C$  [6]. Nosotros para una estimación usaremos la temperatura de  $200^{\circ}C$  y de esta manera calcular con una cota máxima. El material aislante que usaremos es fibra de vidrio para alta temperatura de coeficiente de conductividad térmica  $k_{ais} = 0,06W/mK$  [3]. Con este valor haremos la evaluación del radio crítico, como se sabe el radio crítico nos determina, cuando el agregar aislante a un cilindro, tiene por efecto disminuir el flujo de calor disipado hacia el ambiente en estado estacionario. El radio crítico se evalúa por medio de la relación [11]:

$$R_{crit} = \frac{k_{ais}}{h} = \frac{0,06W/mK}{10W/m^2K} = 0,006m \quad (2.1)$$

Donde  $h$  es el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección, y hemos tomado el valor que se reporta en distintos manuales de  $h = 10W/m^2K$  [8]. Por tanto podemos ver que  $R_{cam} \gg R_{crit}$  luego cualquier espesor de aislante que se adicione a la superficie externa de la cámara reducirá el flujo de calor disipado hacia el ambiente. Entonces el espesor del aislamiento quedará determinado por el límite impuesto de la temperatura de la pared externa.

Para evaluar el aislamiento tenemos que saber el flujo de energía que entrará en el cocedor solar, por tanto primero evaluaremos el área de entrada de energía directa, como:

$$A_c = 0,59m^2 \quad (2.2)$$

y si consideramos que el factor de concentración del área incrementada por los espejos será de aproximadamente  $FI = 1,8$  [2], por tanto esperamos una entrada de energía estimada de:

$$\dot{E}_{entra,T} = \dot{E}_{prom}(FI)(A_c)\eta_{tr} = 722W \quad (2.3)$$

Para nuestros propósitos de evaluación dividiremos este flujo de energía entre el área del cilindro y las caras laterales. El área de la cámara  $A_{camara}$  del cocedor solar es:

$$A_{camara} = \pi R_{cam}(w_a + R_{cam}) = 1,77m^2 \quad (2.4)$$

una vez que sabemos el área de la cámara podemos encontrar la densidad de energía sobre la pared, como:

$$\dot{q} = \frac{\dot{E}_{entra,T}}{A_{camara}} = \frac{722W}{1,77m^2} = 408W/m^2 \quad (2.5)$$

la relación para el flujo de calor en estado estacionario es:

$$\dot{q} = 2k_{ais} \frac{T_{w1} - T_{w2}}{d_{int}(Ln \frac{d_{ext}}{d_{int}})} \quad (2.6)$$

de esta relación podemos despejar el diámetro externo, evaluando como:

$$d_{ext} = d_{int} Exp\left[\frac{2k_{ais}(T_{w1} - T_{w2})}{\dot{q}d_{int}}\right] \quad (2.7)$$

sustituyendo los valores correspondientes obtenemos:

$$d_{ext} = 0,92m \quad (2.8)$$

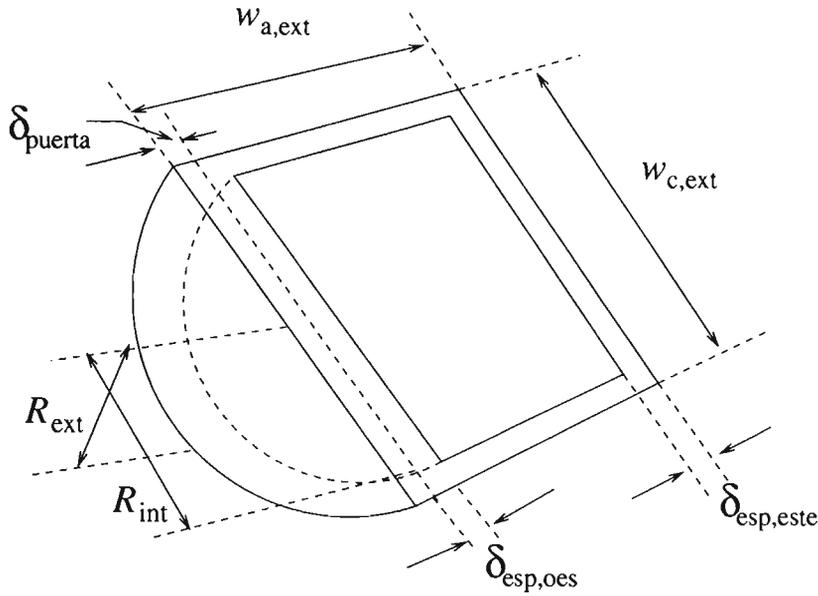


Figura 2.3: Esquema de la cámara de cocción aislada.

Parámetro	Valor
$\delta_{puerta}$	0,05m
$\delta_{esp,oes}$	0,12m
$\delta_{esp,este}$	0,09m
$w_{a,ext}$	1,00m
$w_{c,ext}$	1,01m
$R_{int}$	0,44m
$R_{ext}$	0,505m

Cuadro 2.2: Dimensiones de la cámara del cocedor y el aislamiento térmico del cocedor.

entonces con un diámetro externo de  $d_{ext} = 0,92m$  es suficiente, pero nosotros daremos una pared de  $d_{ext} = 1,00m$ . Para las paredes laterales, la relación que evalúa el flujo de calor es:

$$\dot{q} = k_{ais} \frac{T_{w1} - T_{w2}}{\delta_{pared}} \quad (2.9)$$

donde  $\delta_{pared}$  es el espesor de la pared lateral de la cámara, despejando  $\delta_{pared}$  obtenemos:

$$\delta_{pared} = k_{ais} \frac{T_{w1} - T_{w2}}{\dot{q}} = \frac{(0,06W/mK)(160K)}{422W/m^2} = 0,02m \quad (2.10)$$

Este espesor nos cubre los requerimientos deseados, sin embargo utilizaremos un espesor  $\delta_{pared} = 0,05m$ , la cámara aislada se muestra en la figura 2.3. Donde  $\delta_{puerta}$  es el espesor de la puerta,  $\delta_{esp,oes}$  es el espesor donde se montará el espejo oeste,  $w_{a,ext}$  es el ancho del cocedor solar,  $w_{c,ext}$  es el largo del cocedor solar que une la parte cilíndrica,  $R_{ext}$  es el radio externo del cocedor solar. En el cuadro 2.2 se muestra un esquema.

Después de determinar los valores de la cubierta de la cámara de cocción del cocedor solar, pasaremos a describir el sistema mecánico para ajustar la inclinación del plano de entrada de los rayos luminosos. Este es el mecanismo que nos permitirá obtener la máxima radiación entrante a la cámara todos los días del año para una posición fija del cocedor.

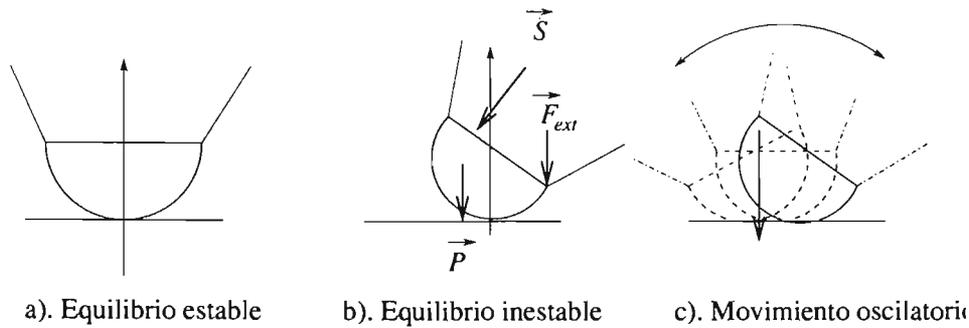


Figura 2.4: Representación de los posibles estados del cocedor solar.

## 2.4. Sistema mecánico para ajuste del ángulo de inclinación, del área de concentración.

Una vez que hemos diseñado el cocedor solar, describiremos el diseño y funcionamiento del sistema mecánico de ajuste del ángulo de incidencia del flujo luminoso, con las siguientes características:

- En estado de equilibrio mecánico, la cara superior del cocedor de medio cilindro está a un ángulo de  $0^\circ$  con respecto a la horizontal aproximadamente, como se muestra en el inciso a) de la figura 2.4.
- En caso de que una fuerza externa se aplique sobre el cocedor, éste girará, y se sostendrá en un punto que se equilibre con la fuerza  $\vec{P}$  del peso del cocedor solar opuesto al lado de aplicación de la fuerza  $\vec{F}_{ext}$ . Al hacer un balance de fuerzas con respecto al punto de apoyo sobre la mesa horizontal, y si la fuerza se mantiene constante y se le da un valor adecuado, el cocedor se puede ajustar con el ángulo que uno requiera para obtener el mínimo con respecto al vector unitario del flujo de radiación solar  $\vec{S}$ , esto se muestra en la figura 2.4 en el inciso b).
- Al hacer cero, la fuerza  $\vec{F}_{ext}$ , aplicada sobre el cocedor solar, este girará en el sentido contrario a donde se eliminó la fuerza, iniciando un movimiento tipo péndulo libre, mostrado en el inciso c) de la figura 2.4.

El comportamiento descrito, presenta inconvenientes para un manejo operativo manual de una ama de casa, debido a que se tiene que poner un soporte en la parte trasera lo que siempre presenta un riesgo de la oscilación y con esto un accidente de quien la opera.

Por tanto con el fin de evitar dificultades operativas y tener un dispositivo seguro, proponemos diseñar un mecanismo, que cumpla con dos funciones, la primera es aplicar la fuerza necesaria para mover el cocedor hasta la posición deseada y la segunda sujetar el cocedor solar con el fin de evitar la oscilación. En la figura 2.5 presentamos el dispositivo propuesto,

El sistema mecánico que proponemos se encuentra en color rojo en la figura 2.5. Este mecanismo cuenta con dos puntos fijos, un punto está en la mesa, y el otro está en la esquina del cocedor solar. El mecanismo funciona de forma que el cocedor solar gira cuando se gira el disco de ajuste, esto es debido a que cuando el disco gira, sube ó baja el tornillo. El tornillo está fijo a la esquina del cocedor solar y cuando este sube, el cocedor gira hacia la izquierda visto de frente a la puerta, y cuando baja el cocedor gira a la derecha visto de frente a la puerta. Las dos guías que se muestran en la figura 2.5, tienen la función de forzar que el cocedor solar gire sin moverse lateralmente. Al girar el cocedor solar realmente lo que hacemos es ajustar la inclinación del plano de entrada

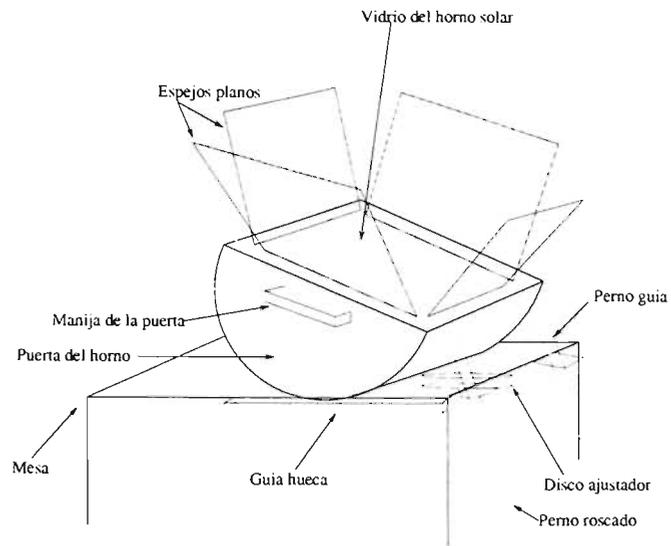


Figura 2.5: En la figura presentamos en color rojo el dispositivo manual fijo y ajustable para el movimiento de rotación del cocedor solar.

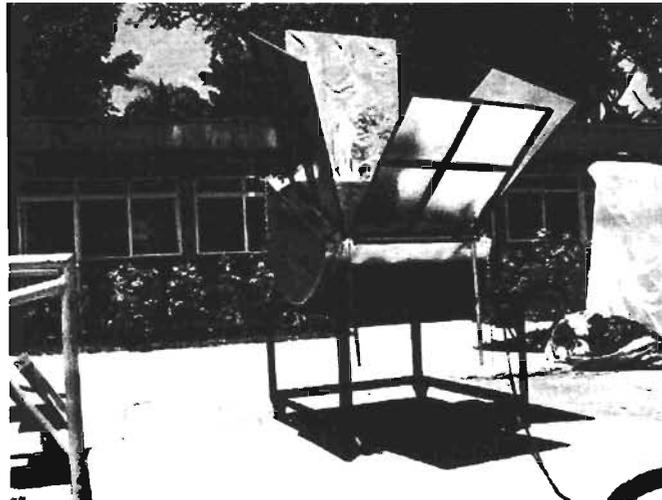


Figura 2.6: En la figura se muestra una fotografía del cocedor solar y su sistema mecánico de ajuste del ángulo de inclinación del vidrio interfaz, en lugar asignado en nuestro Centro.

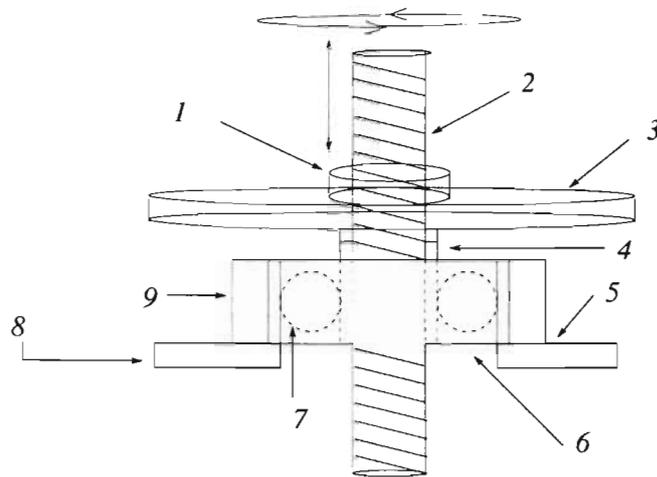


Figura 2.7: Detalle del mecanismo para ajustar la inclinación del vidrio plano, y los elementos que integran el dispositivo son; 1). Tuerca soldada al volante; 2). Perno móvil; 3). Volante; 4). Unión del volante con el balero; 5). Unión portabalero con la base; 6). Balero; 7). Balines del balero; 8). Base del portabalero; 9). Portabalero.

de la energía de radiación solar, lo que se hace fácilmente con nuestro mecanismo. El detalle del mecanismo que mueve al cocedor solar, formado por el tornillo, volante y portabalero se muestra en la figura 2.7, el mecanismo funciona de la siguiente manera:

- El balero se encuentra dentro de una cavidad de un portabalero, la parte interna del balero está libre, es decir tiene libertad de giro.
- El portabalero está fijo a una placa por medio de tornillos, la placa base del portabalero está unida a la mesa por medio de una bisagra.
- El balero en su cubierta central de acero inoxidable, está unido al volante por medio de soldadura. Con esto el volante tiene la posibilidad de girar al mismo tiempo que el balero sin tener resistencia alguna.
- En el centro del balero y volante se introduce un perno roscado de longitud  $l_{\text{tornillo}} = 1m$  y diámetro de  $d_{\text{int,balero}} = 1''$ .
- Al perno se le agrega una tuerca, la tuerca se suelda al volante. Con esto, al girar el volante una vuelta, habrá un desplazamiento lineal  $\Delta l$  correspondiente al intervalo del paso de la rosca del tornillo.
- Una vez lograda la transformación de la rotación del volante, en movimiento lineal del tornillo, se fija el perno en la parte superior sobre una bisagra. Esta bisagra está soldada al cocedor en la esquina izquierda del cocedor, observando el cocedor de Sur a Norte.
- Las bisagras que se tienen en los puntos fijos extremos tienen como función, ajustar el movimiento lineal del perno con el movimiento giratorio del cocedor solar, y que el cocedor no sufra esfuerzos que lo obliguen a deslizarse en lugar de rotar libremente sobre la mesa.

Lo anterior describe la construcción y la estructura del diseño del mecanismo para hacer girar el cocedor solar, y con esto ajustar la entrada de energía sobre el área de salida del concentrador.

Ahora que hemos descrito y diseñado los elementos del cocedor solar haremos la propuesta del cocedor solar para cocción de alimentos.

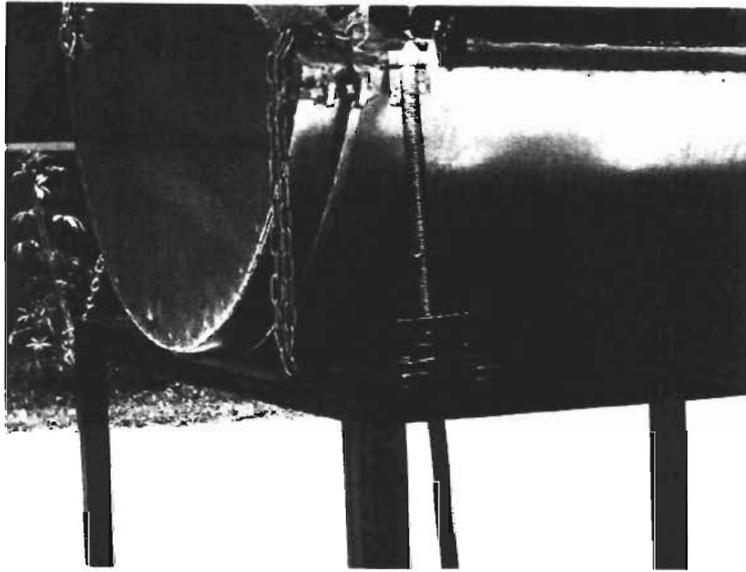


Figura 2.8: En la figura se muestra la fotografía del mecanismo para movimiento de rotación del cocedor solar, y poder ajustar el ángulo de incidencia del vidrio interfaz al ángulo deseado.

## 2.5. Propuesta de cocedor solar con ángulo de incidencia ajustable.

El cocedor solar que proponemos se muestra en la figura 2.5. El cocedor solar llevará a cabo la cocción de la comida con las siguientes características:

- Un tamaño del cocedor solar de alimentos para una familia de 10 personas.
- Cuenta con un sistema mecánico, de forma que permite el manejo sencillo del ajuste del ángulo de incidencia del flujo solar sobre el concentrador de la estufa.
- El cocedor solar tiene la posibilidad de ajustarse en cualquier momento durante el día, en cada día de la semana, para aprovechar la máxima cantidad posible de radiación directa del Sol.
- Es eficiente en el uso de la energía que llega a la cámara de cocción, y eficaz en la cocción; es decir, es efectivo en que la comida termine bien cocida.
- Se puede ajustar con diferente inclinación del ángulo de incidencia del flujo de rayos luminosos, dependiendo de la latitud del lugar en que se encuentre instalada, y con ángulos fijos de los espejos del concentrador. El cocedor solar de la figura 2.5, tiene las bondades que enunciamos, y consta de:

1. Un concentrador de cuatro espejos planos con dimensiones:

Espejo (m)	Ancho(m)	Largo (m)
Norte	0,74	0,91
Sur	0,74	0,91
Este	0,84	0,91
Oeste	0,84	0,91

Los espejos son ajustables, aunque se propone un sólo ajuste para todo el año que

es de  $55^\circ$  con respecto al plano horizontal del cocedor solar (plano del vidrio) para los espejos Norte y Sur, de  $75^\circ C$  para el espejo poniente y de  $35^\circ C$  para el espejo oriente. Lo anterior se debe a que proponemos utilizar el cocedor solar de las 10:00 a las 14:00 horas.

- Una cámara formada por una mitad cilíndrica aislada térmicamente, lugar que usamos para introducir los alimentos para su cocción, con dimensiones:

Parámetro	Dimensión (m)
Radio interno	0,44
Radio externo	0,505
Largo interno	0,84
Largo externo	1,00

- Puerta de acceso a la cámara de cocción, con dimensiones:

Elemento	Ancho (m)	Radio Externo (m)	Espesor (m)
Puerta	1,01	0,54	0,05

- Un vidrio de separación entre el concentrador y el compartimiento de cocción, las dimensiones de éste son:

Elemento	Ancho (m)	Largo (m)	Espesor (m)
Vidrio	0,83m	0,73	0,006

- Un sistema mecánico para graduar la inclinación del concentrador del cocedor. El intervalo de inclinación es de  $-10 \leq \gamma \leq 60^\circ$ .
- Un sistema mecánico rodante dentro de la cámara de cocción, que sirve para mantener verticales las ollas que contienen la comida, y además usaremos para adaptar en la parte inferior 3 resistencias para el respaldo eléctrico. Las dimensiones de éste dispositivo son:

Elemento	Ancho (m)	Largo (m)
Base de ollas	0,28	0,83

Son estas características que tiene nuestro cocedor, y a continuación desarrollaremos el modelo teórico del comportamiento térmico del cocedor solar de alimentos.

## Capítulo 3

# Modelo Teórico del Cocedor Solar.

En este capítulo nos proponemos desarrollar un modelo teórico de un cocedor solar, que nos permita con una sola medición de temperatura dentro de la cámara de cocción, inferir el comportamiento de la temperatura de cocción de la comida dentro de las ollas express. Además deseamos que a través de los parámetros encontrados en los resultados del desarrollo del modelo teórico, se pueda diseñar de forma más precisa cualquier cocedor solar. Lo anterior nos motiva a proponer el desarrollo de un modelo teórico con base en balances globales de energía.

Con el fin de iniciar nuestro desarrollo teórico, haremos las siguientes consideraciones:

- Las superficies de las paredes interiores del cocedor (cámara de cocción), la superficie exterior de las ollas para los alimentos, y el aire dentro de la cámara de cocción se encuentran en equilibrio térmico.
- La puerta está sellada perfectamente y no permite flujo de aire a través de ésta.
- El vidrio está sellado perfectamente y tampoco permite flujo de aire a través de éste.

Estas simplificaciones pueden ser cuestionadas, pero en este trabajo deseamos desarrollar el modelo más simple que describa cuantitativamente el comportamiento térmico del cocedor solar de alimentos. Con estas consideraciones llevaremos a cabo un balance de energía, para encontrar una relación de la temperatura con respecto al tiempo, que nos lleve a predecir el comportamiento térmico en el interior del cocedor. Además debemos con los resultados de este modelo, obtener los parámetros de diseño del cocedor solar, que nos aseguren que los alimentos terminen bien cocidos en cualquier día claro del año.

Por la primera ley de la termodinámica [11], sabemos que en la cámara de cocción de alimentos se cumple:

$$\dot{E}_{entra,T} - \dot{E}_{sale,T} = \dot{E}_{acumulada,T}. \quad (3.1)$$

Donde tenemos que  $\dot{E}_{entra,T}$  es el flujo de energía que entra a la cámara de cocción del cocedor solar en Watts,  $\dot{E}_{sale,T}$  es el flujo de energía que sale de la cámara de cocción en Watts también, y  $\dot{E}_{acumulada,T}$  es el cambio de la energía interna de la cámara de cocción con respecto al tiempo.

### 3.1. Energía de entrada al cocedor $\dot{E}_{entra,T}$

El flujo de energía que entra al cocedor se compone de dos partes, una componente directa  $\dot{E}_{dir,entra,T}$  y la otra componente del flujo de energía, es flujo de energía difusa  $\dot{E}_{dif,entra,T}$ . El flujo de energía que entra a la cámara de cocción se puede describir por medio de la relación:

$$\dot{E}_{entra,T} = A_{sup,c} \eta_{tr} (\eta_{dir,c} \dot{E}_{dir,sup,c} + \eta_{dif,c} \dot{E}_{dif,sup,c}), \quad (3.2)$$

donde  $\eta_{tr}$  es la eficiencia de transmisión del vidrio del cocedor,  $\eta_{dir,c}$  es la eficiencia del concentrador para el flujo de energía solar directa,  $\dot{E}_{dir,sup,c}$  es la energía en la entrada del concentrador,  $\eta_{dif,c}$  es la eficiencia del flujo de la energía solar difusa,  $\dot{E}_{dif,sup,c}$  es el flujo de la energía difusa en la entrada del concentrador,  $A_{base,c}$  es el área del vidrio que es el lugar en que se concentra la energía solar,  $A_{sup,c}$  es el área que forman los cuatro espejos planos. Nuevamente para desarrollar un modelo sencillo consideraremos que:

$$\eta_{dir,c} = \eta_{dif,c}, \quad (3.3)$$

luego entonces la relación de la energía de entrada toma la forma:

$$\dot{E}_{entra,T} = A_{sup,c} \eta_{dir,c} \eta_{tr} (\dot{E}_{dir,sup,c} + \dot{E}_{dif,sup,c}). \quad (3.4)$$

Los flujos de energía de manera individual se expresan como:

$$\dot{E}_{dir,entra,T} = A_{sup,c} \eta_{tr} \eta_{dir,c} \dot{E}_{dir,sup,c}, \quad (3.5)$$

y para el flujo de la energía difusa se tiene la relación:

$$\dot{E}_{dif,entra,T} = A_{sup,c} \eta_{tr} \eta_{dif,c} \dot{E}_{dif,sup,c}. \quad (3.6)$$

Las dos últimas relaciones nos definen las componentes del flujo de energía que entra al cocedor.

Para evaluar la energía difusa utilizaremos el modelo de día claro, del cuál hacemos un resumen a continuación.

### 3.1.1. Modelo del día claro para energía difusa.

En el modelo del día claro para la energía difusa  $\dot{E}_{dif,sup,c}$ , de acuerdo con E. E. Anderson [2], se considera que el flujo de energía depende de las condiciones atmosféricas, y de los componentes de los elementos en los estratos atmosféricos, y también de la atenuación a través de la distancia que llega el flujo luminoso. Utilizando coeficientes empíricos, la relación que evalúa el flujo de energía difusa es:

$$\dot{E}_{dif,sup,c} = AC \left[ \exp\left(\frac{-B}{\cos\theta_z}\right) \right]. \quad (3.7)$$

En la relación 3.7 los coeficientes  $A$ ,  $B$ , y  $C$  son determinados por la tabla 3.1 para el periodo iniciado en la fecha indicada.

Y para la energía total difusa que entra  $\dot{E}_{dif,sup,c}$ , podemos sustituir la relación 3.7 en la relación 3.6 y se obtiene la relación:

$$\dot{E}_{dif,entra,T} = A_{sup,c} \eta_{tr} \eta_{dif,c} AC \left[ \exp\left(\frac{-B}{\cos\theta_z}\right) \right], \quad (3.8)$$

con la relación 3.8 podemos estimar la energía difusa que entra a nuestro cocedor. A continuación evaluaremos la energía directa.

### 3.1.2. Evaluación de la energía directa que entra al cocedor $\dot{E}_{dir,entra}$ .

La energía directa que entra  $\dot{E}_{dir,entra}$  se puede expresar como:

$$\dot{E}_{dir,entra,T} = A_{sup,c} \eta_{tr} \eta_{dir,c} \dot{E}_{dir,sup,c}. \quad (3.9)$$

La relación nos define la componente del flujo de energía directa que entra al cocedor, en esta relación llamaremos a la concentración  $\eta_{dir,c}$  como:

$$\eta_{dir,c} = \eta_c(H), \quad (3.10)$$

Fecha	A(W/m <sup>2</sup> )	B(Adimensional)	C(Adimensional)
Enero/21	1230	0,142	0,058
Feb/21	1214	0,144	0,060
Marzo/21	1186	0,156	0,071
Abril/21	1135	0,180	0,097
Mayo/21	1104	0,196	0,121
Junio/21	1088	0,205	0,134
Julio/21	1085	0,207	0,136
Agosto/21	1107	0,201	0,122
Septiembre/21	1151	0,177	0,092
Octubre/21	1192	0,160	0,073
Noviembre/21	1221	0,149	0,063
Diciembre/21	1233	0,142	0,057

Cuadro 3.1: Valores de las constantes del modelo de día claro para estimación de la energía difusa [2].

donde se hace explícito que la eficiencia directa depende de la hora solar  $H$ . Nos concentraremos en la evaluación de la energía directa de entrada al cocedor. Este flujo de energía se evalúa por medio de la relación:

$$\dot{E}_{dir,entra,T}(\phi, H, n) = A_{sup,c}\eta_c(H)\eta_{tr}\dot{E}_{ext}(n)Exp\left[\frac{-B * h}{\cos(\theta_z)}\right] * \cos(\theta). \quad (3.11)$$

Donde  $h$  es la altura vertical de la atmósfera de la tierra,  $\phi$  es la latitud del lugar,  $H$  es la hora del horario solar en la localidad y toma los valores dentro del intervalo  $H = 6$  hasta  $H = 18$ ,  $\dot{E}_{ext}(n)$  es la relación de la energía dependiente del día del año  $n$  en la parte externa de la atmósfera terrestre,  $B$  es el coeficiente de extinción-absorción promedio de la energía que se propaga a través de la atmósfera para la latitud  $\phi$  y el día  $n$  del año,  $\theta(\phi, H, n)$  es el ángulo de incidencia entre la normal de la superficie de concentración y el ángulo de los rayos solares, la hora solar  $H$  y el día del año  $n$ ,  $\theta_z$  es el ángulo del flujo luminoso con respecto a la vertical del plano sobre la superficie de la tierra,  $\eta_c(H)$  es la eficiencia del concentrador compuesto por los 4 espejos planos y depende del ángulo de incidencia de los rayos solares sobre los espejos del concentrador,  $\eta_{tr}$  es la eficiencia de transmisión del vidrio claro transparente que supondremos constante. Si se considera a la altura vertical de la atmósfera  $h$  como  $h = 1$ , lo cual es una convención, entonces la relación de la energía que entra es:

$$\dot{E}_{dir,entra,T}(\phi, H, n) = A_{sup,c}\eta_c(H)\eta_{tr}\dot{E}_{ext}(n)Exp\left[\frac{-B}{\cos\theta_z}\right] * \cos\theta. \quad (3.12)$$

Para la relación de la energía externa  $\dot{E}_{ext}$  se tiene:

$$\dot{E}_{ext}(n) = \frac{\hat{S}[1 + \varepsilon(\cos[(n - 2)\frac{360^\circ}{365,2}])]^2}{1 - \varepsilon^2}, \quad (3.13)$$

donde  $\hat{S}$  es la constante solar y tomaremos el valor de  $\hat{S} = 1363W/m^2$ ,  $\varepsilon$  es la excentricidad de la órbita de la tierra con un valor de  $\varepsilon = 0,01672$ ,  $n$  es el número del día del año. El valor de la eficiencia de transmisión del vidrio  $\eta_{tr}$  se puede considerar constante para el intervalo longitudes de onda de operación de nuestro cocedor, y usaremos un valor determinado en manuales especializados en propiedades físicas.

Por tanto sólo nos resta por evaluar en la relación de la energía que entra al cocedor la eficiencia de concentración de los espejos planos  $\eta_c(H)$ . Para iniciar nuestra evaluación, consideraremos que

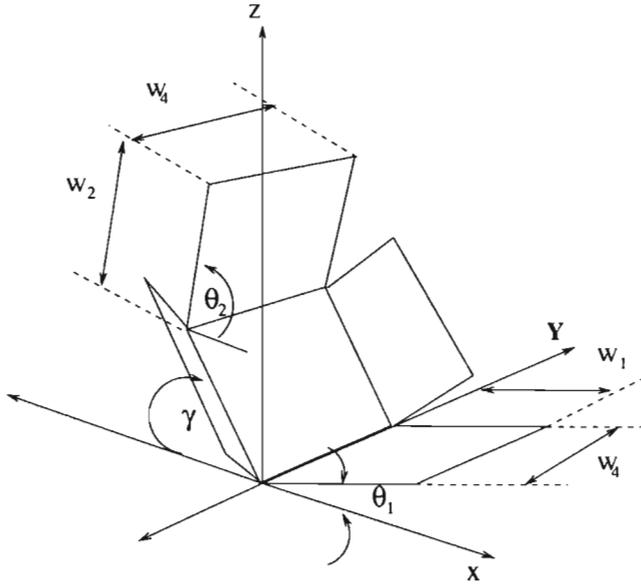


Figura 3.1: Esquema geométrico del concentrador de cuatro espejos planos de la estufa solar ajustable.

el cocedor solar opera entre las 10:00 horas y 14:00 horas. En la figura 3.1 podemos observar que el flujo de energía directa que entra a través del vidrio plano llega de dos componentes, una directa del flujo de radiación solar y la otra de la energía que llega de los espejos planos, por lo que la energía que entra se puede escribir como:

$$\dot{E}_{dir,entra,T} = \dot{E}_{dir,v,T} + \dot{E}_{dir,re,T}, \quad (3.14)$$

donde se tiene que  $\dot{E}_{dir,v,T}$  es la energía directa total que incide sobre el vidrio,  $\dot{E}_{dir,re,T}$  es la contribución del flujo de energía directa que es reflejada por los espejos sobre el área del vidrio plano del concentrador, por tanto evaluaremos las contribución directa sobre el concentrador  $\dot{E}_{dir,v,T}$  y  $\dot{E}_{dir,re,T}$  por separado. La eficiencia de concentración la podemos definir como:

$$\eta_{dir,c} = \frac{\dot{E}_{dir,v,T} + \dot{E}_{dir,re,T}}{\dot{E}_{dir,sup,c,T}}. \quad (3.15)$$

Donde  $\dot{E}_{dir,sup,c,T}$  es la energía directa total que entra en la parte superior del concentrador. De forma más explícita podemos escribir la relación de la eficiencia como:

$$\eta_{dir,c} = \frac{A_{base,c} \dot{E}_{dir,v} + \rho_{esp}(A_{sup,efec,esp} \dot{E}_{dir,sup,c})}{A_{sup,c} \dot{E}_{dir,sup,c}}, \quad (3.16)$$

donde  $\rho_{esp}$  es la reflectividad de los espejos. Si consideramos que:

$$\dot{E}_{dir,v} = \dot{E}_{dir,sup,c}, \quad (3.17)$$

entonces se tiene que:

$$\eta_{dir,c} = \frac{A_{base,c} + \rho_{esp} A_{sup,efec,esp}}{A_{sup,c}}, \quad (3.18)$$

el área superior efectiva de trabajo de los espejos  $A_{sup,efec,esp}$  se puede expresar como:

$$A_{sup,efec,esp} = A_{sup,c} - A_{base,c} - A_{ref,no,aprov}. \quad (3.19)$$

Donde el  $A_{ref,no,aprov}$  es el área superior que forma la ventana de rayos luminosos, que al incidir sobre los espejos, los rayos luminosos reflejados caen fuera del concentrador,  $\rho_{esp}$  es la reflectividad de los espejos. Al sustituir la relación anterior en la relación de la eficiencia obtenemos:

$$\eta_{dir,c} = \frac{A_{base,c} + \rho_{esp}(A_{sup,c} - A_{base,c} - A_{ref,no,aprov})}{A_{sup,c}}, \quad (3.20)$$

después de alguna manipulación algebraica podemos expresar la relación de la eficiencia como:

$$\eta_{dir,c}(H) = \frac{A_{base,c}}{A_{sup,c}}(1 - \rho_{esp}) + \rho_{esp}\left(1 - \frac{A_{sup,no,aprov}(H)}{A_{sup,c}}\right), \quad (3.21)$$

donde en esta última relación se ha hecho explícito que parte de la relación depende de  $H$ . El área no aprovechada, se puede evaluar geoméricamente del ángulo del flujo de rayos luminosos, o se puede estimar un valor máximo. Con base en observaciones realizadas en campo estimamos que se tiene un diez porciento del área total del área  $A_{sup,no,aprov}$ . Por tanto la relación de la eficiencia se puede considerar aproximadamente como:

$$\eta_{dir,c}(H) = \frac{A_{base,c}}{A_{sup,c}}(1 - \rho_{esp}) + \rho_{esp}(0,9). \quad (3.22)$$

Podemos suponer que nuestro espejo tiene una  $\rho_{esp} = 0,85$  que corresponde a un espejo de buena reflectividad. Considerando esta reflectividad la eficiencia tiene un valor de:

$$\eta_{dir,c}(H) = \frac{A_{base,c}}{A_{sup,c}}(0,15) + (0,765), \quad (3.23)$$

y el área de la base es  $A_{base,c} = 0,6048m^2$  y el área superior del concentrador es  $A_{sup,c} = 1,08m^2$ , al sustituir los valores de las áreas encontramos una eficiencia de:

$$\eta_{dir,c}(H) = \frac{0,6048m^2}{1,08m^2}(0,15) + (0,765) = 0,82. \quad (3.24)$$

Con la relación para la eficiencia, podemos evaluar la energía  $E_{entra,T}$ , sin embargo es necesario encontrar los valores de la energía para nuestro caso específico, por lo que encontraremos el tamaño adecuado de los espejos para una operación fija. Una vez que hemos determinado cuales son las relaciones con las que evaluaremos la energía que entra  $\dot{E}_{entra,Total}$ , presentaremos la relación con la que estimaremos esta energía, como se muestra a continuación.

### 3.1.3. Evaluación del flujo de energía total que entra al cocedor.

Como ya contamos con las relaciones individuales de evaluación de los flujos de energía que entran al cocedor, obtendremos a continuación la relación que utilizaremos para realizar la evaluación de la energía total que entra al cocedor  $\dot{E}_{entra,T}$ . Al sustituir las relaciones 3.8, y la relación 3.12 en la relación 3.4 y obtenemos:

$$\dot{E}_{entra,T} = A_{sup,c}\eta_{dir,c}\eta_{tr}(\dot{E}_{ext}(n)Exp\left[\frac{-B}{\cos\theta_z}\right] * \cos\theta + AC\left[Exp\left(\frac{-B}{\cos\theta_z}\right)\right]). \quad (3.25)$$

Con esta relación podemos conocer el flujo de energía que entra al cocedor. Sin embargo proponemos utilizar el cocedor solar para comida sólo de las 10:00 a las 14:00 hora solar, y durante este espacio de tiempo, la relación del flujo de la energía 3.25, tiene un comportamiento bastante cercano entre el máximo y el mínimo.

Sugerimos para propósitos de simplificación matemática y hacer la evaluación del comportamiento dinámico de la temperatura en el interior del cocedor, con un modelo sencillo, pero que reproduzca las mediciones experimentales utilizar una constante  $\bar{E}_0$  para considerar el flujo de la energía que entra al cocedor como:

$$\dot{E}_{entra,T} = \bar{E}_0$$

y donde  $\bar{E}_0$  es el promedio integral entre para la energía entre las horas de operación del cocedor solar, que son de las 10:00 a las 14:00 horas, por tanto la relación es expresada como:

$$\bar{E}_0 = \frac{1}{w|_{14:00} - w|_{10:00}} \int_{w|_{10:00}}^{w|_{14:00}} \dot{E}_{entra,T}(w) |_n dw, \quad (3.26)$$

donde se tiene que  $w|_{10:00}$  es el ángulo horario a las 10:00 tiempo local para el día  $n$ ,  $w|_{14:00}$  es el ángulo horario hora local para el día  $n$ , y  $\dot{E}(w) |_n$  es el flujo de energía que se tiene durante el periodo de operación del cocedor solar para el día  $n$ , donde  $n = 1$  el primero de Enero y  $n = 365$  el 31 de Diciembre. Utilizando la relación 3.26 podemos estimar el promedio integral del flujo de entrada de energía al cocedor solar.

Ya que tenemos una estimación de la energía que entra al cocedor solar, y continuando con cálculo de lo necesario para establecer la energía acumulada, resta encontrar la energía que sale  $\dot{E}_{sale}$ . A continuación evaluaremos el flujo de la energía disipada hacia el ambiente.

## 3.2. Flujo de energía disipada hacia el ambiente $\dot{E}_{sale,T}$ .

La energía que sale del interior del cocedor se compone de dos partes, una componente de conducción  $\dot{E}_{cond}$ , y una componente por radiación  $\dot{E}_{rad}$ , donde estamos considerando que la parte convectiva está contemplada en la conducción, entonces esto lo expresamos matemáticamente como:

$$\dot{E}_{sale,T} = \dot{E}_{sale,cond} + \dot{E}_{sale,rad}, \quad (3.27)$$

evaluaremos primero la parte conductiva.

### 3.2.1. Energía que sale por conducción $\dot{E}_{sale,cond}$ .

La energía que sale del cocedor por conducción  $\dot{E}_{sale,cond}$  la modelaremos considerando que la todas las superficies metálicas pintadas de negro se encuentran a la misma temperatura  $T$ , y la pared aislante se comporta como una resistencia, lo mismo el aire de la cámara de cocción se comporta como una resistencia equivalente, en serie con la resistencia térmica del vidrio hasta alcanzar el exterior. La salida de energía por conducción  $\dot{E}_{sale,cond}$  se expresa por medio de la relación:

$$\dot{E}_{sale,cond} = \frac{L_{cil}(T - T_{amb})}{R_{L,pared,cil}} + \frac{A_{T,par,planas}(T - T_{amb})}{R_{paredes,planas}} + \frac{A_{S,cil}(T - T_{amb})}{R_{cam,vidrio}} + \eta_{aleta} h A_{sup,met}(T - T_{amb}), \quad (3.28)$$

donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor entre la superficie y el aire,  $\eta_{aleta}$  es la eficiencia de la superficie metálica superior que podemos considerar una aleta,  $A_{sup,met}$  es el área del metal que está unido a la cámara y vidrio interfaz,  $R_{L,pared,cil}$  es la resistencia por unidad de longitud de la cámara hasta el ambiente con temperatura  $T_{amb}$  a través del cilindro,  $L_{cil}$  es la longitud del cilindro de la cámara,  $R_{paredes,planas}$  es la resistencia de las paredes planas de puerta y parte posterior a la puerta,  $A_{T,par,planas}$  es el área de las paredes planas,  $R_{cam,vidrio}$  es la resistencia de

Parámetro	Valor
$d_1$	0,88m
$d_2$	1,01m
$k_{ais}$	0,6W/mK, [3] [11].
$\delta_{pared,1}$	0,05m
$\delta_{pared,2}$	0,08m
$h$	10W/m <sup>2</sup> K, [11].
$\delta_{vidrio}$	0,006m
$k_{vidrio}$	0,78W/mK, [2] [11].
$L_{cil}$	0,84m
$A_{T,par,planas}$	1,38m <sup>2</sup>
$A_v$	0,59m <sup>2</sup>
$A_{sup,met}$	0,12m <sup>2</sup>

Cuadro 3.2: Resumen de dimensiones y parámetros físicos.

la cámara y vidrio hasta el ambiente,  $A_{S,cil}$  es área del cilindro de la cámara. La relación 3.28 se puede expresar también como:

$$\dot{E}_{sale,cond} = \frac{(T - T_{amb})}{R_{cond,conv}}, \quad (3.29)$$

donde se tiene:

$$R_{cond,conv} = \frac{1}{\frac{L_{cil}}{R_{L,pared,cil}} + \frac{A_{T,par,planas}}{R_{paredes,planas}} + \frac{A_v}{R_{cam,vidrio}} + \eta_{aleta} h A_{sup,met}}. \quad (3.30)$$

Las resistencias se expresan como [7] [11]:

$$R_{L,pared,cil} = \frac{1}{\pi k_{ais}} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{2}{h\pi d_2}, \quad (3.31)$$

donde  $A_v$  es el área del vidrio,  $k_{ais}$  es la conductividad del aislante,  $d_1$  es el diámetro interno del cilindro,  $d_2$  es el diámetro externo del cilindro,  $h$  es el coeficiente de transferencia convectivo de calor, y la resistencia de la pared plana es [7] [11]:

$$R_{paredes,planas} = \frac{\delta_{pared}}{k_{ais}} + \frac{1}{h}, \quad (3.32)$$

donde  $\delta_{pared}$  es el espesor del aislante. y la resistencia del vidrio hacia el ambiente es [7] [11]:

$$R_{cam,vidrio} = \frac{\delta_{vidrio}}{k_{vidrio}} + \frac{2}{h}, \quad (3.33)$$

con  $\delta_{vidrio}$  es el espesor del vidrio,  $k_{vidrio}$  la conductividad del vidrio,  $A_{sup,met}$  es el área de la superficie metálica, y la eficiencia de la aleta es aproximadamente  $\eta_{aleta} \cong 0,85$  [11].

La relación para la evaluación del flujo de energía que sale del cocedor por conducción y convección se obtiene al sustituir los valores de los parámetros físicos que se muestran en el cuadro 3.2, en las relaciones 3.31, 3.32 y 3.33. Así obtenemos los valores de las resistencias individuales específicas, como se muestran en el cuadro 3.3. Al utilizar los valores encontrados de las resistencias individuales, podemos sustituirlas en la relación 3.30 y obtenemos:

$$R_{cond,conv} = \frac{1}{5,56W/K} = 0,18K/W. \quad (3.34)$$

Este es el valor mínimo de resistencia  $R_{cond,conv}$  que usaremos en nuestras evaluaciones. Evaluaremos a continuación la energía disipada hacia el ambiente por radiación.

Parámetro	Valor
$R_{L,pared,cil}$	$0,794mK/W$
$\frac{L_{cil}}{R_{pared,cil}}$	$1,06W/K$
$R_{pared,1}$	$1,1m^2K/W$
$\frac{A_{pared,planas}}{R_{pared,1}}$	$0,27W/K$
$R_{pared,2}$	$1,6m^2K/W$
$\frac{A_{T,par,planas}}{R_{pared,2}}$	$0,19W/K$
$R_{cam,vidrio}$	$0,21m^2K/W$
$\frac{A_v}{R_{cam,vidrio}}$	$2,84W/K$
$\eta_{aleta}hA_{sup,met}$	$1,2W/K$

Cuadro 3.3: Resumen de resultados de evaluaciones de resistencias térmicas.

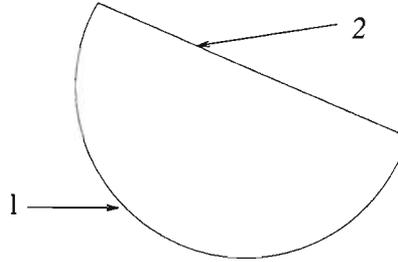


Figura 3.2: Esquema para evaluar los factores de vista.

### 3.2.2. Energía que sale del cocedor por radiación hacia el ambiente.

Para encontrar una relación útil en nuestro planteamiento de la ecuación de balance de la energía 3.1, buscaremos que el flujo de energía que sale del cocedor por medio de la radiación, se pueda evaluar en una función lineal con la diferencias de temperaturas entre la interna del cocedor y el ambiente. Sabemos que necesitaremos para encontrar el flujo de energía que sale por radiación de los factores de visión o también conocidos como factores de vista, a continuación presentaremos esa evaluación.

#### Factores de vista.

Para encontrar los factores de vista lo haremos con un esquema sencillo, donde sólo consideraremos la radiación del área del fondo cilíndrico sobre el área del vidrio interfaz, y despreciaremos influencia de las paredes laterales, que corresponden a puerta y pared cerrada, con esto y observando la figura 3.2 podemos expresar por medio del método algebraico, las siguientes ecuaciones [11]:

$$F_{11} + F_{12} = 1, \quad (3.35)$$

$$F_{21} + F_{22} = 1, \quad (3.36)$$

donde se tiene que  $F_{11}$  es el factor de vista del área del cilindro con su misma área,  $F_{12}$  es el factor de vista del cilindro hacia el área del vidrio,  $F_{21}$  es el factor de vista del área del vidrio hacia el área del cilindro,  $F_{22} = 0$  [11] es el factor de vista del área del vidrio con su misma área y es cero por ser un objeto plano. Y además se tiene la relación de reciprocidad [11]:

$$A_1F_{12} = A_2F_{21}. \quad (3.37)$$

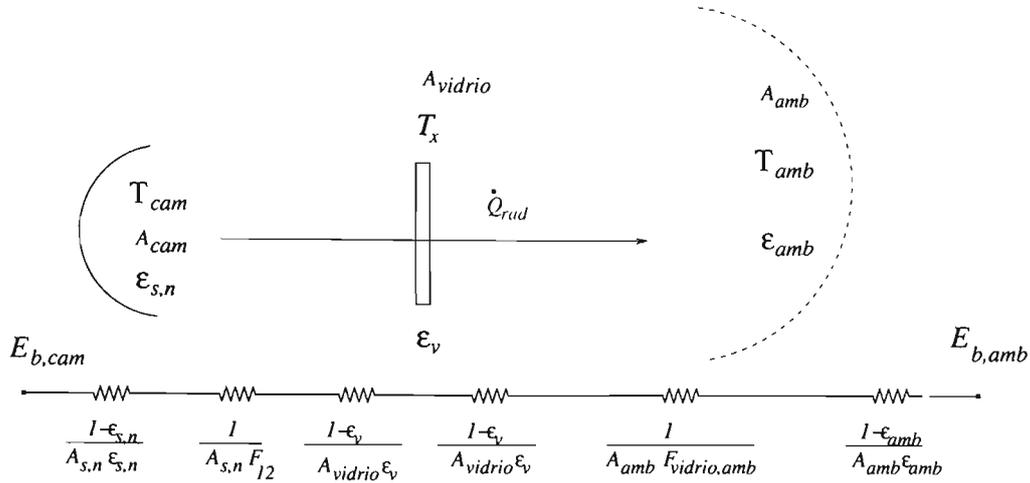


Figura 3.3: Esquema de analogía eléctrica para la resistencia térmica radiativa.

Resolviendo el sistema de ecuaciones para los factores de vista y con la consideración de reciprocidad, tomando en cuenta que  $A_1 = 1,16m^2$  y  $A_{vidrio} = A_2 = 0,59m^2$  obtenemos  $F_{11} = 0,49$ ,  $F_{12} = 0,51$ ,  $F_{21} = 1$  y  $F_{22} = 0$ .

Una vez que conocemos los factores de vista iniciaremos la evaluación de la energía disipada por radiación de la cámara del cocedor hacia el ambiente.

### Relación para el flujo de radiación térmica.

Para encontrar la relación que evaluará el flujo de energía disipada al ambiente, utilizaremos la analogía de circuitos eléctricos, para un esquema radiativo. Para modelar las resistencias térmicas supondremos que el flujo de radiación térmica fluye desde la superficie cilíndrica de la cámara de cocción hasta el ambiente, y despreciamos la interacción de las paredes laterales del cilindro con el vidrio y del vidrio con los espejos planos. Por esto el circuito equivalente sólo modela las resistencias desde la cámara al vidrio, y del vidrio hasta el ambiente. En la figura 3.3 mostramos el esquema equivalente para la radiación desde la cámara hasta el ambiente, y podemos observar que la resistencia total es la suma de resistencias individuales que se expresan como [11]:

$$\dot{Q}_{sale,rad} = \frac{\dot{E}_{b,cam} - \dot{E}_{b,amb}}{R_{S,rad}}, \quad (3.38)$$

donde se tiene que  $\dot{E}_{b,cam} = \sigma T_{cam}^4$  con  $T_{cam}$  la temperatura de la superficie de la cámara,  $\dot{E}_{b,amb} = \sigma T_{cielo}^4 \cong \sigma T_{amb}^4$  donde  $T_{cielo}$  es la temperatura equivalente del cielo al considerar el ambiente como un cuerpo negro, y en el caso de días claros con temperatura cercana a los  $23^\circ C$ , se tiene una diferencia en la evaluación del flujo de radiación térmica del ambiente, con respecto a tomar el valor de  $T_{amb}$  que es de  $\approx 15\%$  menor. Como nosotros pretendemos desarrollar un modelo sencillo para nuestro balance de energía, entonces haremos las siguientes consideraciones:

- En lugar de utilizar la temperatura  $T_{cielo}$  en la evaluación del flujo de energía disipado por radiación, utilizaremos el valor de la temperatura ambiente  $T_{amb}$ .
- Supondremos que el ambiente es un cuerpo negro por lo que  $\epsilon_{amb} = 1$ .
- Para evaluar el factor de vista externo del vidrio interfaz, supondremos que sólo se interacciona con el ambiente, por lo cual se tiene el factor de vista del vidrio al ambiente es  $F_{12} = 1$ .

- Como la evaluación de flujos radiativos es para temperaturas bajas, entonces el flujo de radiación está en el infrarrojo, y en este rango de longitudes de onda, el vidrio se puede considerar opaco, por tanto el coeficiente de transmitividad del vidrio  $\tau_{vidrio} \simeq 0$ , para esas longitudes de onda [2, 11], por lo cual  $\rho = 1 - \alpha_{vidrio} = 1 - \epsilon_v$ , donde estamos llamando  $\alpha_{vidrio}$  al coeficiente de absorción del vidrio, y estamos usando la ley de Kirchoff ( $\alpha_{vidrio} = \epsilon_{vidrio} = \epsilon_v$ ).

Para la evaluación  $R_{S,amb}$  iniciaremos considerando la suma de resistencias individuales mostradas en la figura 3.3, y que se puede representar por medio de la relación:

$$R_{S,amb} = \frac{1 - \epsilon_{s,n}}{A_{cam}\epsilon_{s,n}} + \frac{1}{A_{cam}F_{12}} + \frac{1 - \epsilon_v}{A_v\epsilon_v} + \frac{1 - \epsilon_v}{A_v\epsilon_v} + \frac{1}{A_vF_{v,amb}} + \frac{1 - \epsilon_{amb}}{A_{amb}\epsilon_{amb}}, \quad (3.39)$$

en la relación 3.39  $\epsilon_{s,n}$  es la emisividad de la pintura negra de recubrimiento de la superficie de la cámara,  $A_{cam} = \pi \frac{d_1}{2} L_{cil}$  es el área de la cámara de cocción del cocedor,  $\epsilon_v$  es la emisividad del vidrio,  $A_v$  es el área del vidrio interfaz,  $F_{12} = \frac{A_v}{A_{cam}}$  es el factor de vista de la cámara hacia el vidrio interfaz,  $A_{amb}$  es el área de una superficie esférica imaginaria. Al tomar en cuenta las consideraciones anteriores se tiene que  $\frac{1}{A_vF_{12}} = \frac{1}{A_v}$ ,  $\frac{1 - \epsilon_{amb}}{A_{amb}\epsilon_{amb}} = 0$ , y la relación 3.39 se puede escribir como:

$$R_{S,amb} = \frac{1}{A_{cam}} \left[ \frac{1 - \epsilon_{s,n}}{\epsilon_{s,n}} + \frac{2}{F_{12}\epsilon_v} \right], \quad (3.40)$$

y si ahora definimos:

$$\epsilon_{ef} = \frac{1}{\frac{1 - \epsilon_{s,n}}{\epsilon_{s,n}} + \frac{2}{F_{12}\epsilon_v}}. \quad (3.41)$$

Se considera que  $\epsilon_{s,n} = 0,9$  [11], y  $\epsilon_v = 0,91$  [11] y  $F_{12} = 0,51$ , obtenemos que  $\epsilon_{ef} = 0,23$ , valor que usaremos para las siguientes evaluaciones. Al utilizar nuestra definición de la relación 3.41, la resistencia térmica  $R_{S,rad}$  se puede expresar como:

$$R_{S,rad} = \frac{1}{A_{cam}\epsilon_{ef}}, \quad (3.42)$$

sustituyendo la relación 3.42 en la relación 3.38 obtenemos:

$$\dot{Q}_{sale,rad} = \epsilon_{ef} A_{cam} \sigma [T_{cam}^4 - T_{amb}^4]. \quad (3.43)$$

Como buscamos obtener una relación lineal para introducir en la ecuación de balance, expresaremos el flujo de calor que sale por radiación  $\dot{Q}_{sale,rad}$  como:

$$\dot{Q}_{sale,rad} = \epsilon_{ef} A_{cam} \sigma (T_{cam} + T_{amb})(T_{cam}^2 + T_{amb}^2)[T_{cam} - T_{amb}], \quad (3.44)$$

y para la relación 3.44 queda:

$$\dot{Q}_{sale,rad} = h_{rad} A_{cam} [T_{cam} - T_{amb}], \quad (3.45)$$

donde hemos considerado:

$$h_{rad} = \epsilon_{ef} \sigma (T_{cam} + T_{amb})(T_{cam}^2 + T_{amb}^2). \quad (3.46)$$

El valor de  $h_{rad}$  lo evaluamos para el intervalo de trabajo del cocedor solar, y encontramos la tabla 3.4, y de esta tabla obtenemos el valor promedio que es  $\bar{h}_{rad} = 1,98 W/m^2 K$ , y una  $h_{rad,max} = 2,65 W/m^2 K$ .

Si definimos la resistencia térmica como:

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} A_{cam}}, \quad (3.47)$$

Temperatura ( $^{\circ}C$ )	$h_{rad}(W/m^2 \cdot K)$
35	1.42
45	1.48
55	1.56
65	1.64
75	1.73
85	1.82
95	1.91
105	2.00
115	2.10
125	2.2
135	2.31
145	2.42
155	2.53
165	2.65

Cuadro 3.4: Tabla de evaluación del valor de  $h_{rad}$  del cocedor.

entonces la resistencia teórica máxima es:

$$R_{rad,max} = \frac{1}{h_{rad,max} A_{cam}} = \frac{1}{(2,65W/m^2K)(1,16m^2)} = 0,33K/W, \quad (3.48)$$

y la resistencia térmica media la obtenemos como:

$$R_{rad,media} = \frac{1}{\bar{h}_{rad} A_{cam}} = \frac{1}{(1,98W/m^2K)(1,16m^2)} = 0,44K/W. \quad (3.49)$$

Al considerar la resistencia térmica se puede expresar la relación del flujo de la energía que sale como:

$$\dot{E} = \frac{T - T_{amb}}{R_{rad}} \quad (3.50)$$

y en donde consideraremos que  $R_{rad} = R_{rad,med}$ , y también hemos hecho la consideración que  $T = T_{cam}$  dentro de la cámara de cocción, que se justifica por nuestra hipótesis de que en el interior de la cámara de cocción las superficies se encuentran en equilibrio térmico. Tomaremos en consideración la relación 3.50 para las evaluaciones posteriores. A continuación presentaremos la relación de la energía que se disipa hacia el ambiente.

### 3.2.3. Relación del flujo de energía disipada al ambiente $E_{sale,T}$ .

La relación de la energía 3.27, se puede escribir al sustituir en ésta las relaciones 3.29 y la relación para el flujo que sale por radiación y obtenemos:

$$\dot{E}_{sale,T} = \frac{T - T_{amb}}{R_{Total}}, \quad (3.51)$$

donde se tiene que:

$$\frac{1}{R_{Total}} = \frac{1}{R_{cond,conv}} + \frac{1}{R_{rad}}. \quad (3.52)$$

La relación 3.51 es la que utilizaremos para evaluar el comportamiento dinámico de nuestro modelo. Al utilizar los valores encontrados en las relaciones 3.34 y 3.48 y al sustituirlos en la relación 3.52 obtenemos

$$\frac{1}{R_{Total}} = \frac{1}{R_{cond,conv}} + \frac{1}{R_{rad}} = \frac{1}{0,18K/W} + \frac{1}{0,44K/W} = 7,83W/K, \quad (3.53)$$

luego entonces tenemos que:

$$R_{Total} = 0,1277K/W \cong 0,13K/W. \quad (3.54)$$

Al valor de resistencia total  $R_{Total} = 0,13K/W$ , le consideraremos como el valor teórico de las resistencia térmica total de nuestro cocedor.

A continuación presentaremos la evaluación del cambio con respecto al tiempo  $t$ , de la energía acumulada en el interior del cocedor.

### 3.3. Energía acumulada en el interior del cocedor $\dot{E}_{acumulada,T}$ .

La energía que se acumula o decrece en el interior del cocedor, puede ser evaluada por medio del cambio con respecto al tiempo de la entalpía, entonces el flujo de la energía acumulada la podemos expresar como [11]:

$$\dot{E}_{acumulada,T} = (C_{ollas} + C_{comida} + C_{cil,base} + \frac{C_{vidrio}}{2} + \frac{C_{ais}}{2}) \frac{dT}{dt}, \quad (3.55)$$

donde  $C_{ollas}$  es la capacidad calorífica de las ollas,  $C_{comida}$  es la capacidad calorífica de la comida,  $C_{cil,base}$  es la capacidad calorífica del cilindro de la cámara y la base de las ollas,  $C_{vidrio}$  es la capacidad calorífica del vidrio,  $T$  es la temperatura promedio de los elementos interiores del cocedor, y donde debemos de aclarar que para el vidrio y el aislamiento, se ha considerado la capacidad media, por lo cual se tiene el factor  $\frac{1}{2}$  en el valor de la capacidad  $C_{vidrio}$  y  $C_{ais}$ . La relación 3.55 se puede escribir de forma simplificada como:

$$E_{acumulada,T} = C_T \frac{dT}{dt}, \quad (3.56)$$

donde [3]:

$$C_T = C_{ollas} + C_{comida} + C_{cil,base} + \frac{C_{vidrio}}{2} + \frac{C_{ais}}{2}, \quad (3.57)$$

donde la capacidad calorífica dada por [10] [11]:

$$C_i = m_i c_{p_i}, \quad (3.58)$$

donde  $m_i$  es la masa del elemento,  $c_{p_i}$  es la capacidad calorífica específica a presión constante del elemento.

Para nuestro cocedor estimaremos el valor de  $C_T$ ,  $C_{TV}$  donde éste será el valor de la capacidad en vacío sin ollas,  $C_{TV,Ollas}$  valor que será la capacidad del cocedor en vacío con ollas sin comida, los valores de las masas y capacidades específicas de los elementos [2] [3] [8] [11], se muestran en la tabla 3.5. Con los valores de la tabla 3.5, podemos estimar también los valores de las capacidades  $C_{T,i}$  para las diferentes posibilidades, para las cuales obtenemos los valores de la tabla 3.6. Ahora pasemos a detallar el modelo.

Elemento	masa (Kg)	$c_p(J/Kg \cdot K)$	$C_i(J/K)$
Ollas de aluminio	2,35	903	2122
Fierro de la cámara	12	434	5208
Aislante Fibra de Vidrio	15	1130	8475
Vidrio Transparente	6.6	750	2475
Agua	1	4220	4220
Comida	2.5	850	2125

Cuadro 3.5: Tabla de evaluación de capacidades individuales de los elementos que integran el cocedor.

Capacidad	Valor $J/K$
En vacío $C_{TV}$	16 158
En vacío con una olla $C_{T,1,olla}$	18 280
En vacío con 2 ollas $C_{T,2,ollas}$	20 402
En vacío con 3 ollas $C_{T,3,ollas}$	22 524
Con comida y una olla $C_{TC,1,olla}$	28 869
Con comida y 2 ollas $C_{TC,2,ollas}$	35 214
Con comida y 3 ollas $C_{TC,3,ollas}$	41 559

Cuadro 3.6: Resumen de evaluación de capacidades promedio.

### 3.3.1. Ecuación diferencial del modelo propuesto.

Podemos hacer un resumen del balance de energía en el interior del cocedor al sustituir las relaciones 3.51, 3.26 y 3.56 en la relación 3.1, y que se muestra a continuación como [10]:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{entra,T} - \dot{E}_{sale,T} &= \dot{E}_{acumulada,T}, \\ \bar{E}_0 - \frac{(T - T_{amb})}{R_{Total}} &= C_T \frac{dT}{dt}, \end{aligned} \quad (3.59)$$

Consideraremos que  $T_{amb}$  es constante para el intervalo de operación de nuestro cocedor solar, luego entonces la relación 3.59 se puede reescribir como:

$$C_T R_{Total} \frac{dT}{dt} + T = (\bar{E}_0 R_{Total} + T_{amb}), \quad (3.60)$$

y la relación 3.60 se simplifica como:

$$C_T R_{Total} \frac{dT}{dt} + T = T_{max}, \quad (3.61)$$

donde tenemos que:

$$T_{max} = \bar{E}_0 R_{Total} + T_{amb}, \quad (3.62)$$

y donde se puede observar que  $T_{max}$  es una constante. La constante  $T_{max}$  es un parámetro muy importante del cocedor solar, ya que este valor nos determinará si el cocedor solar puede lograr una cocción exitosa. Los valores aceptables para  $T_{max}$  tienen que ser superiores a  $T_{max} = 100^\circ$ .

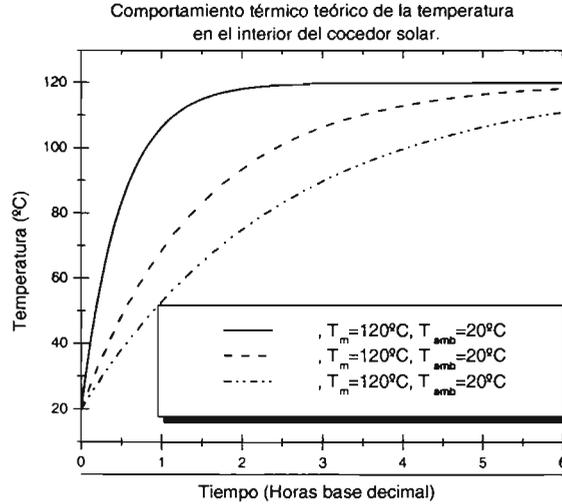


Figura 3.4: Gráfica de las temperaturas teóricas en función del tiempo característico  $\tau$ (Hrs.), en línea continua muestra  $\tau = 0,5$ , en línea - - - la curva tiene  $\tau = 1,5$ , en línea inferior tiene  $\tau = 2,5$ .

### 3.4. Evaluación del comportamiento de la temperatura en el interior del cocedor solar.

En esta sección evaluaremos la ecuación diferencial y haremos un análisis del resultado del comportamiento térmico. Para resolver la relación 3.61, supondremos que al inicio de la cocción de los alimentos, la temperatura del cocedor es:

$$T|_{t=0} = T_{amb}. \quad (3.63)$$

La solución de la ecuación diferencial 3.61, con la condición inicial 3.63 es [4]:

$$T = T_{max} [1 - \text{Exp}(-\frac{t}{\tau})] + T_{amb} [\text{Exp}(-\frac{t}{\tau})], \quad (3.64)$$

con la consideración

$$\tau = C_T R_{Total}. \quad (3.65)$$

Donde  $\tau$  tiene unidades de tiempo y determina una constante de tiempo, y esta constante es un tiempo característico del proceso. En la figura 3.64 podemos observar tres casos con  $T_{max} = 120^\circ$  y  $T_{amb} = 20^\circ$ . Por las experiencias obtenidas en cocciones de alimentos realizadas en nuestro Centro sabemos, que si la temperatura de los alimentos durante la cocción fue superior a  $T = 90^\circ\text{C}$  durante 2 horas continuas, la comida resulta bien cocida. Por tanto cualquier curva de temperatura del cocedor, tiene que cumplir esta condición, para tener la certeza de que los alimentos estén bien cocinados, y esta condición se logra para las curvas que tienen valores de  $\tau$  que cumplen con la condición  $0,5 \leq \tau \leq 1,5$  horas y una temperatura  $T_{max} = 120^\circ$ .

Una vez que hemos determinado los resultados de nuestro modelo teórico haremos un desarrollo de aplicación a nuestro cocedor en particular, para los días de equinoccios y solsticios, encontrando para estos días el comportamiento térmico de la temperatura en el interior del cocedor.

## Capítulo 4

# Evaluación Teórica del Modelo.

En este capítulo presentaremos las evaluaciones numéricas para días específicos del modelo teórico. Para esto realizaremos las evaluaciones utilizando datos de energía evaluada por medio de fórmulas de relaciones ya presentadas, los datos complementarios de los valores de propiedades físicas de los materiales usados en la construcción del cocedor, han sido tomados de manuales especializados [3] [7] [8] [11].

### 4.1. Evaluación con Datos Calculados.

En esta sección presentaremos el desempeño teórico de la temperatura con respecto al tiempo en el interior del cocedor. Lo que haremos será presentar en forma analítica, y en algunos casos gráfica, la curva del comportamiento de la temperatura  $T(t)$ , y la relación analítica que hemos desarrollado relación 3.64 es:

$$T(t) = T_{max}[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{\tau})] + T_{amb}\text{Exp}(\frac{-t}{\tau}),$$

donde ya hemos presentado las relaciones que debemos utilizar para llegar hasta encontrar la relación de  $T_{max}$  que es la 3.62, y la relación para  $\tau$  que es la relación 3.65, la relación para  $\bar{E}_{entra,T}$  que es 3.26, la energía que entra para un día claro  $\dot{E}_{entra,T}$  que es la relación 3.25, la energía externa  $\dot{E}$  evaluada por la relación 3.13, la ecuación de la resistencia total que es la relación 3.52, la capacidad total evaluada por la relación 3.57, la ecuación del  $\cos(\theta)$  que es la relación A.28, la relación para evaluar  $\cos(\theta_z)$  que es la relación A.10, la relación para evaluar el ángulo  $\delta$  que es la relación A.1 y este grupo de relaciones son:

$$\begin{aligned} \tau &= R_{Total}C_T, \\ T_{max} &= \bar{E}_0 R_{Total} + T_{amb}, \\ \bar{E}_0 &= \frac{1}{w|_{14:00} - w|_{10:00}} \int_{w|_{10:00}}^{w|_{14:00}} \dot{E}_{entra,T}(w) |_n dw, \\ \dot{E}_{entra,T} &= A_{sup,c} \eta_{dir,c} \eta_{tr} (\dot{E}_{ext}(n) \text{Exp}[\frac{-B}{\cos\theta_z}] * \cos\theta + AC[\text{Exp}(\frac{-B}{\cos\theta_z})]), \\ \dot{E}_{ext}(n) &= \frac{\dot{S}[1 + \varepsilon(\cos[(n-2)\frac{360^\circ}{365,2}])]^2}{1 - \varepsilon^2}, \\ \cos(\theta_z) &= \cos(\delta)\cos(w)\cos(\phi) + \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi), \\ \cos(\theta) &= \cos(\delta)\cos(w)\cos(\phi - \gamma) + \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi - \gamma), \\ \delta &= 23,45^\circ \text{sen}(\frac{360^\circ}{365}(284 + n)). \end{aligned}$$

Con estas relaciones encontraremos el desempeño teórico de nuestro cocedor solar, para los dos equinoccios y dos solsticios.

#### 4.1.1. Evaluación del comportamiento térmico del cocedor el día 21 de Diciembre del año.

Para llevar a cabo las evaluaciones supondremos que  $\gamma = \theta_p |_{w=0^\circ}$ , lo cual nos permite obtener el máximo flujo disponible de la radiación solar en el cocedor solar, en operación fija, debido a tener el mínimo ángulo  $\theta$  durante el movimiento aparente del sol, para cualquier día del año. Para el caso que estamos evaluando éste valor es  $\gamma = \theta_p = 42,3^\circ$ , y  $\delta = -23,5^\circ$ . entonces tenemos que:

1. Primero evaluaremos el  $\cos(\theta)$  para el día 21 de Diciembre, lo que expresamos como:

$$\cos(\theta) |_{21/Dic} = \cos(\delta)\cos(w)\cos(\phi - \gamma) + \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi - \gamma),$$

sustituyendo los valores correspondientes obtenemos:

$$\cos(\theta) |_{21/Dic} = 0,84\cos(w) + 0,158. \quad (4.1)$$

2. Luego evaluamos  $\cos(\theta_z)$  para este día, por medio de la relación:

$$\cos(\theta_z) |_{21/Dic} = \cos(\delta)\cos(w)\cos(\phi) + \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi),$$

y al sustituir valores numéricos se tiene:

$$\cos(\theta_z) |_{21/Dic} = 0,868\cos(w) - 0,129. \quad (4.2)$$

3. A continuación evaluaremos  $\dot{E}_{ext}(n)$  por medio de la relación:

$$\dot{E}_{ext}(n) = \frac{\dot{S}[1 + \epsilon(\cos[(n - 2)\frac{360^\circ}{365,2}])]^2}{1 - \epsilon^2}, \quad (4.3)$$

sustituyendo los valores numéricos tenemos que:

$$\dot{E}_{ext}(n = 355) = \frac{1363W/m^2[1 + 0,01672(\cos[(353)\frac{360^\circ}{365,2}])]^2}{1 - (0,01672)^2} = 1408W/m^2, \quad (4.4)$$

donde se ha considerado  $\epsilon = 0,01672$  [9],  $\dot{S} = 1363W/m^2$  [2].

4. Ahora evaluaremos  $\dot{E}_{entra,T}$ , lo cuál se realiza por medio de la relación:

$$\dot{E}_{entra,T} = A_{sup,c}\eta_{dir,c}\eta_{tr}(\dot{E}_{ext}(n)\text{Exp}[\frac{-B}{\cos\theta_z}] * \cos\theta + AC[\text{Exp}(\frac{-B}{\cos\theta_z})]),$$

y al sustituir los valores correspondientes obtenemos:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{entra,T} = & (1147W)(0,84\cos(w) + 0,158)\text{Exp}[\frac{-0,142}{0,868\cos(w) - 0,129}] + \\ & (67,34W)[\text{Exp}(\frac{-0,142}{(0,868\cos w - 0,129)})]. \end{aligned} \quad (4.5)$$

En la relación anterior se ha tomado el valor de la reflectividad de los espejos de 0,85, sin embargo los espejos que nosotros hemos adquirido tienen poca reflectividad, debido a que no

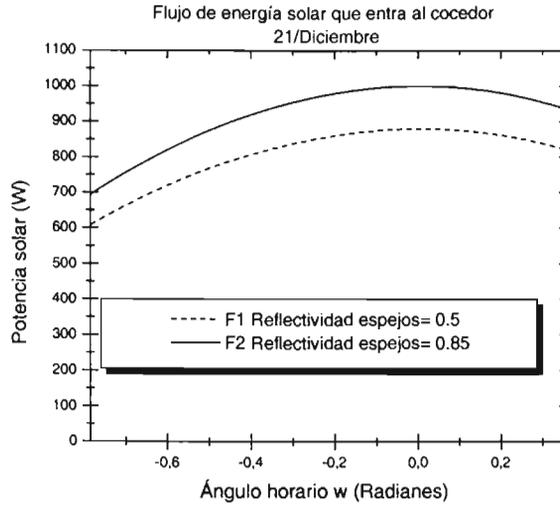


Figura 4.1: En la figura mostramos el comportamiento de la energía que entra al cocedor solar de las 10:00 a las 14:00 horas, del día 21 de Diciembre (en horario de invierno).

son pulido espejo, y estimamos se tiene una reflectividad de los espejos de 0,5, y al considerar esto en la relación de la eficiencia de concentración, se obtiene un valor de  $\eta_{dir,c} = 0,73$ , y si con este valor, evaluamos la energía que entra al cocedor  $\dot{E}_{entra,T}$ , encontramos la relación:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{entra,T} = & (1021W)(0,84\cos(w) + 0,158)Exp\left[\frac{-0,142}{0,868\cos(w) - 0,129}\right] + \\ & (46,6W)\left[Exp\left(\frac{-0,142}{(0,868\cos w - 0,129)}\right)\right]. \end{aligned} \quad (4.6)$$

5. Ambas relaciones al graficarse para el intervalo de trabajo del cocedor solar de 10:00-14:00 horas (horario de invierno en México), se obtienen las curvas representadas en la figura 4.1.
6. La energía integral promedio es representada como:

$$\bar{E}_0 = \frac{1}{w|_{14:00} - w|_{10:00}} \int_{w|_{10:00}}^{w|_{14:00}} \dot{E}_{entra,T}(w) |_{n=355} dw,$$

la cual al resolver por medio de un integrador numérico nos da por resultados:

- Cuando la reflectividad de los espejos tiene un valor de 0.85, la energía promedio integral es  $\bar{E}_0 = 923W$ .
  - Cuando la reflectividad de los espejos es de 0.5, la energía promedio integral es  $\bar{E}_0 = 811W$ .
7. Para evaluar la temperatura máxima  $T_m$  utilizaremos la relación:

$$T_{max} = \bar{E}_0 R_{Total} + T_{amb},$$

Nosotros encontramos un valor teórico de la resistencia térmica total que es de  $R_{Total,teorico} = 0,13^\circ C/W$ , y un valor experimental de nuestro cocedor que es  $R_{Total} = 0,13^\circ C/W$ , y por tanto

utilizaremos este valor en la evaluación teórica. La temperatura promedio mensual medida en nuestra estación solarimétrica y meteorológica del CIE-UNAM de Temixco Morelos, para el mes de Diciembre del año 2001 fue  $T_{amb} = 20^{\circ}C$ , y este valor es el que usaremos en nuestras evaluaciones. Al sustituir los valores correspondientes en la relación de evaluación de  $T_m$  obtenemos:

$$T_{max} |_{\rho_{espejos}=0,85} = (923W)(0,13^{\circ}C) + 20^{\circ}C = 140^{\circ}C, \quad (4.7)$$

$$T_{max} |_{\rho_{espejos}=0,5} = (811W)(0,13^{\circ}C) + 20^{\circ}C = 125^{\circ}C. \quad (4.8)$$

8. Ahora evaluaremos los valores de  $\tau$  para las cargas teóricas  $C_{T,n,ollas}$ , como:

cocción	Capacidad(J/°C)	$R_{Total}(^{\circ}C/W)$	$\tau(s)$	$\tau(Hr)$
En vacío	16 158	0.13	2585	0.58
En vacío con una olla	18 280	0.13	2376	0.66
En vacío con 2 ollas	20 402	0.13	2652	0.74
En vacío con 3 ollas	22 524	0.13	2928	0.81
Con comida y una olla	28 869	0.13	3753	1.04
Con comida y 2 ollas	35 214	0.13	4578	1.27
Con comida y 3 ollas	41 559	0.13	5403	1.5

9. Las relaciones teóricas del comportamiento térmico de la temperatura  $T(t)$  en el interior del cocedor, para cada una de las posibilidades se representan como:

- Cuando  $T_{max} = 140^{\circ}C$  y  $T_{amb} = 20^{\circ}C$  se obtienen las relaciones:

$$T(t) = T_{max}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + T_{amb}e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

a) En vacío se tiene la relación:

$$T(t) = 140^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{0,58})] + 20^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{0,58}). \quad (4.9)$$

b) Cocción de comida en una olla:

$$T(t) = 140^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{1,04})] + 20^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{1,04}). \quad (4.10)$$

c) Cocción de comida en dos ollas:

$$T(t) = 140^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{1,27})] + 20^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{1,27}). \quad (4.11)$$

d) Cocción de comida en tres ollas:

$$T(t) = 140^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{1,5})] + 20^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{1,5}). \quad (4.12)$$

Y la gráfica del comportamiento térmico descrito por las relaciones teóricas máximas para el 21 de Diciembre en día claro se muestran en 4.2.

- Si ahora consideramos  $T_{max} = 125^{\circ}C$  y  $T_{amb} = 20^{\circ}C$  obtenemos las relaciones:

$$T(t) = T_{max}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + T_{amb}e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

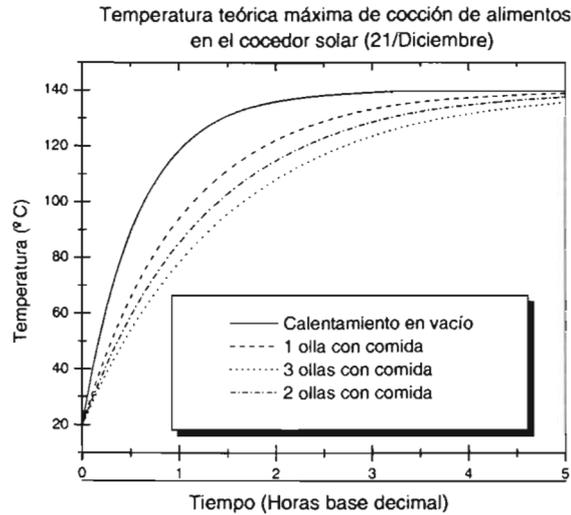


Figura 4.2: En la figura se muestra el comportamiento térmico teórico de las cocciones en el cocedor solar, donde se ha supuesto que los espejos tienen reflectividad de 0.85

a) En vacío se tiene la relación:

$$T(t) = 125^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{0,58})] + 20^{\circ}C \text{Exp}(\frac{-t}{0,58}). \quad (4.13)$$

b) Cocción de comida en una olla:

$$T(t) = 125^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{1,04})] + 20^{\circ}C \text{Exp}(\frac{-t}{1,04}). \quad (4.14)$$

c) Cocción de comida en dos ollas:

$$T(t) = 125^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{1,27})] + 20^{\circ}C \text{Exp}(\frac{-t}{1,27}). \quad (4.15)$$

d) Cocción de comida en tres ollas:

$$T(t) = 125^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{1,5})] + 20^{\circ}C \text{Exp}(\frac{-t}{1,5}). \quad (4.16)$$

Y las gráficas de las relaciones teóricas de las cocciones en el cocedor solar lo más aproximado a lo real, se muestran en la figura 4.3. La evaluación de los días 21 de Marzo, 21 de Junio, 21 de Septiembre, son mostradas en el apéndice C.

Aún cuando las evaluaciones las presentamos en el apéndice, mostraremos una gráfica comparativa de los límites teóricos de la energía que entra a nuestro cocedor solar para cocción de alimentos, para observar el comportamiento de la energía que entra a nuestro cocedor, si los días donde se realizan los cálculos fueran claros. Esto se presenta en la figura 4.6, para solsticios y equinoccios.

También realizamos una gráfica comparativa del comportamiento de la temperatura, cuando se tienen dos ollas con comida dentro del cocedor, que es alimento suficiente para una familia de 8 personas, esto se muestra en la figura 4.4.

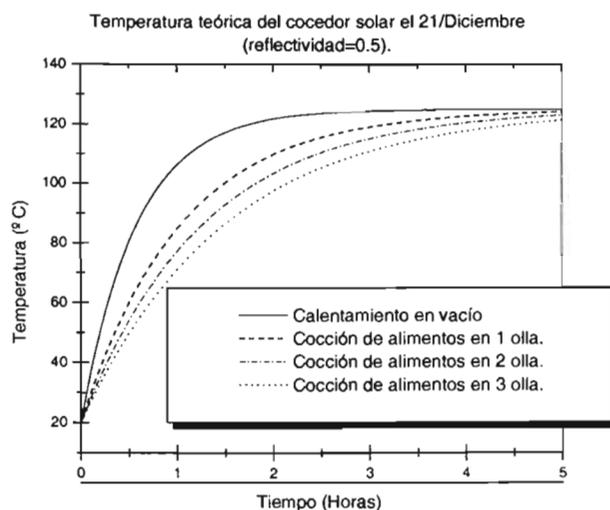


Figura 4.3: En la figura se muestran las gráficas del comportamiento térmico teórico del cocedor solar, durante las cocciones de alimentos el día 21 de Diciembre, donde se ha supuesto que los espejos tienen reflectividad 0.5.

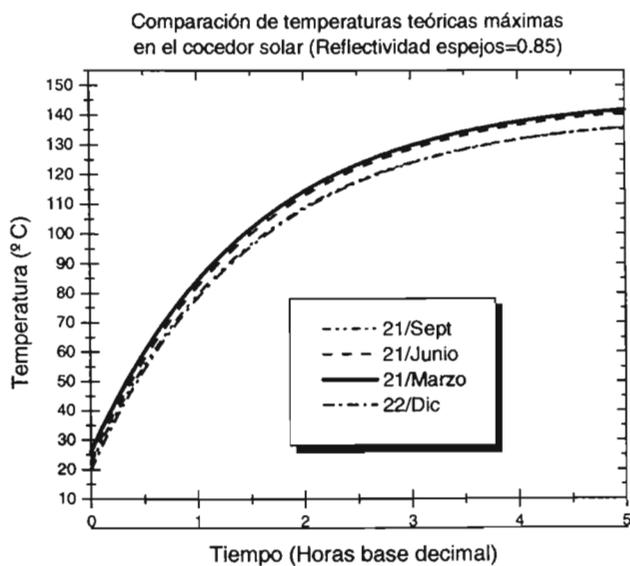


Figura 4.4: En la figura se muestra el comportamiento térmico en el interior del cocedor, durante los días de solsticios y equinoccios, para una reflectividad de los espejos de 0.85.

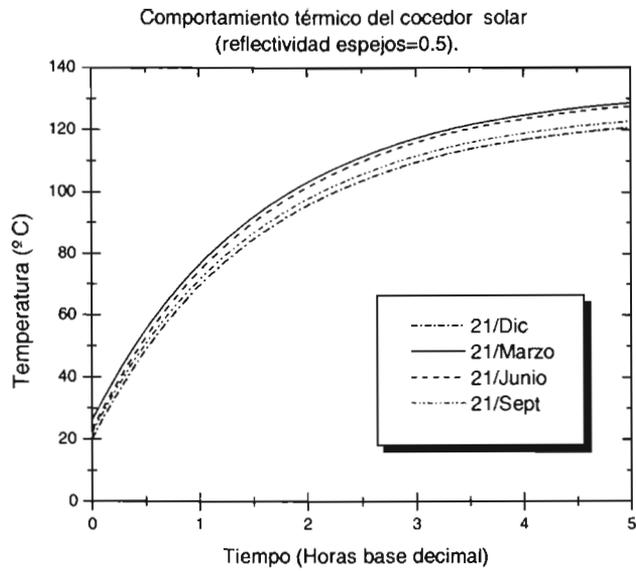


Figura 4.5: En la figura se muestra el comportamiento térmico del cocedor solar cuando se tiene una reflectividad de los espejos de 0.5, y para los días de los equinoccios y solsticios.

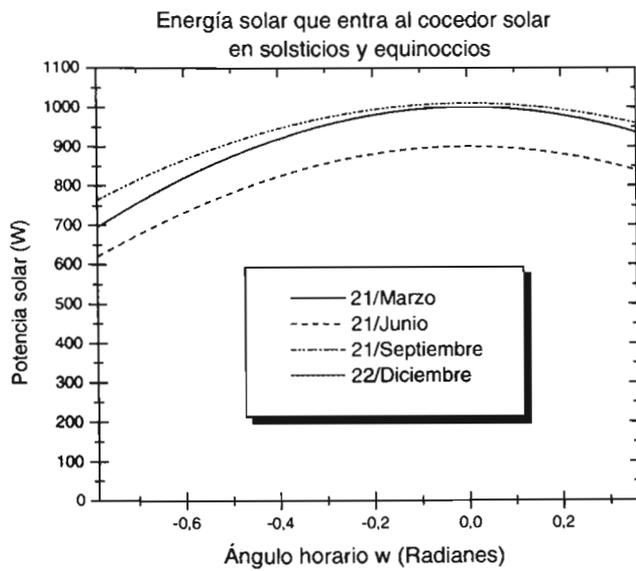


Figura 4.6: En la figura se muestra la comparación de la energía evaluada teóricamente, que entra al cocedor solar para cocción de alimentos en los equinoccios y solsticios.

Y la gráfica comparativa para el comportamiento de la temperatura, cuando se tienen dos ollas con comida dentro del cocedor, y con espejos que tienen reflectividad igual a 0.5, se muestra en la figura 4.5.

Una vez que hemos hecho las evaluaciones teóricas del comportamiento térmico, y así también el comportamiento de la energía, en los equinoccios y solsticios que generan un comportamiento térmico exitoso del cocedor solar. Procederemos a continuación a mostrar los resultados experimentales.

## Capítulo 5

# Desarrollo Experimental.

Una vez que hemos desarrollado un modelo teórico, es deseable comparar éste con evaluaciones experimentales. Para esto es necesario primero hacer un diseño del experimento que llevaremos a cabo, donde especifiquemos qué deseamos conocer y qué medios usaremos para las evaluaciones y comparaciones, esto lo haremos a continuación.

### 5.1. Objetivos de la medición experimental.

Nuestro modelo nos dice que el comportamiento de la temperatura  $T(t)$  está determinado por la relación 3.64 que es:

$$T(t) = T_{max}[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{\tau})] + T_{amb}\text{Exp}(\frac{-t}{\tau}),$$

donde se tiene:

$$\begin{aligned}\tau &= R_{Total}C_T, \\ T_{max} &= \bar{E}_0 R_{Total} + T_{amb}.\end{aligned}$$

Del experimento podemos obtener  $T_{max}$ ,  $T_{amb}$ , por medio de mediciones directas. Y al graficar los datos experimentales en un programa estadístico, se puede encontrar el valor de  $\tau$ , al hacer un ajuste al tipo de curva de nuestro modelo, sólo que allí la ecuación se muestra como:

$$T(t) = T_{max} - (T_{max} - T_i)\text{Exp}(-\frac{t}{\tau}), \quad (5.1)$$

donde las relaciones del paquete estadístico 5.1 y la relación 3.64 serán la misma, si el valor de la temperatura inicial dentro la cámara de cocción del cocedor es  $T_{amb} = T_i$ . Y al conocer los valores de  $T_{max}$ ,  $T_{amb}$ ,  $\tau$ , y saber el valor de  $R_{Total}$  podemos inferir  $C_T$ , para la cocción.

Como los valores de  $R_{Total}$  y  $C_T$  no se pueden obtener ambos experimentalmente de los datos medidos en una corrida, es necesario evaluar uno por separado, y después, usarlo en otras evaluaciones, una vez que ha sido determinado el valor del parámetro.

Como el valor de la resistencia térmica total tiene mucha importancia en un cocedor, para conocer los valores de la temperatura máxima en estado estacionario. Proponemos evaluar  $R_{Total}$ , de la siguiente forma:

- Haremos una corrida de calentamiento del cocedor solar durante el día, con el cocedor evitando la radiación directa del Sol.

- El día que escogeremos deberá tener una parte del cielo totalmente claro y las nubes deberán cubrir el Sol, con el fin de evitar al máximo la radiación directa.
- El cocedor estará orientado en la dirección a cielo abierto para evitar en lo posible la radiación reflejada de superficies cercanas.
- Introduciremos una resistencia eléctrica, de potencia conocida  $\bar{E}_0$  dentro del cocedor.
- Durante la corrida de calentamiento del cocedor, mediremos la potencia consumida de la resistencia eléctrica, indirectamente, usando las mediciones voltaje medido en los extremos de la resistencia eléctrica, y de corriente eléctrica que fluye a través de la resistencia eléctrica, simultáneamente con las mediciones de temperatura de la cámara del cocedor.
- Mediremos la temperatura ambiente  $T_{amb}$  y usaremos  $\bar{T}_{amb}$ .
- Observaremos el comportamiento térmico del cocedor durante la corrida, para determinar el estado transitorio y el estado estacionario.
- Y en el estado estacionario evaluaremos  $R_{Total}$  como:

$$R_{Total,exp} = \frac{(T_{max} - T_{amb})}{\bar{E}_{0,elec}}. \quad (5.2)$$

Una vez encontrado el valor experimental de  $R_{Total,exp}$  lo compararemos con el valor teórico primero, y observaremos cuánto se tiene de diferencia, luego usaremos el valor experimental para encontrar dos parámetros importantes como son:  $C_T$  y al mismo tiempo evaluaremos  $\bar{E}_0$  para las cocciones solares utilizando la relación:

$$\bar{E}_0 = \frac{(T_{max} - T_{amb})}{R_{Total,exp}}. \quad (5.3)$$

La energía experimental la compararemos con nuestra evaluación teórica y observaremos las diferencias. Sólo nos queda por evaluar experimentalmente la eficiencia del cocedor. La eficiencia teórica la podemos encontrar analíticamente por medio de la relación:

$$\eta_{cocedor,solar,teorica}(t) = \frac{C_T[T(t) - T_{amb}]}{\dot{E}_{entra,T}(w)}. \quad (5.4)$$

Pero  $\dot{E}_{entra,T}(w)$  no se puede medir experimentalmente, por tanto si buscamos estimar una eficiencia considerando utilizar valores experimentales, podemos hacerlo usando un flujo de energía de referencia, nosotros usaremos la energía observada en estado estacionario, entonces la eficiencia la encontraremos por medio de la relación:

$$\eta_{cocedor,solar,experimental}(t) = \frac{\tau[T(t) - T_{amb}]}{(t - t_i)[T_{max} - T_{amb}]}. \quad (5.5)$$

Y donde nosotros usaremos como tiempo inicial  $t_i = 0s$ .

## 5.2. Medición de temperaturas de cocción de alimentos y parámetros físicos.

Primero presentaremos la medición de la resistencia térmica total experimental  $R_{Total,exp}$ , los resultados se presentan a continuación

### 5.2.1. Medición de resistencia térmica total $R_{Total,exp}$ del cocedor solar con respaldo eléctrico.

El experimento se llevó a cabo bajo las siguientes condiciones:

- El día tenía nubosidad intermitente, pero de baja intensidad.
- La temperatura ambiente se mantuvo muy estable, alrededor de  $T_{amb} = 26^{\circ}C$ .
- Al cocedor se mantuvieron los espejos superior y laterales a  $90^{\circ}$  con respecto al plano inclinado del área del concentrador, con el fin de evitar entrada de radiación directa.
- El plano inclinado se dirigió hacia el cielo abierto contrario a la posición del sol.
- La nubosidad en la dirección de inclinación del cocedor fue nula durante la corrida.

Para realizar las mediciones usamos el siguiente equipo:

- Termómetro digital de  $\pm 1^{\circ}C$  de precisión.
- Amperímetro digital de  $\pm 0,05A$  de precisión.
- Voltímetro digital de  $\pm 0,05Vca$  de precisión.

**Características del sistema de calefacción.** Estas son:

- La resistencia está ubicada físicamente bajo la base para las ollas de comida, como se muestra en la figura 6.1.
- La capacidad de la resistencia es de 450 Watts nominal, y para 120 Vca nominal.

**Datos experimentales.** Los datos obtenidos del experimento son mostrados en el cuadro 5.1.

**Evaluación de resistencia térmica total  $R_{Total,exp}$ .** Para encontrar el valor de la resistencia utilizamos la relación:

$$R_{Total,exp} = \frac{(T_{max} - T_{amb})}{\dot{E}_{elect}}$$

Y de la tabla 5.1 encontramos que:

- El valor promedio de los datos de resistencia total experimental es  $R_{Total,exp} = 0,13 \pm 0,001^{\circ}C/W$ .

Por tanto nosotros en nuestras evaluaciones utilizaremos el valor de  $R_{Total,exp} = 0,13^{\circ}C/W$ .

Sólo con la finalidad de observar el comportamiento térmico cuando se introduce energía eléctrica al cocedor en lugar de energía solar, presentamos la figura 5.1, en la cual se puede observar, que la curva de temperatura sigue un comportamiento similar a cuando se introduce energía solar, lo que nos muestra que el cocedor no puede distinguir si la energía que entra al cocedor es un flujo de energía de radiación solar o flujo de energía eléctrica, y la transformación de cualquiera de los dos tipos de energía, una parte en energía interna de los elementos del cocedor, incrementando la temperatura de éste, y simultáneamente el complemento al flujo de entrada disipado hacia el ambiente.

### Datos Experimentales para evaluación de resistencia térmica.

Tiempo(Min)	$T_{cocedor}(^{\circ}C)$	$T_{amb}(^{\circ}C)$	Volts	$I(A)$	$\dot{E}(W)$	$R_{Total}(^{\circ}C/W)$
0	40	27	117.8	4.4	466.55	NE
7	49	27	116.3	4.28	447.99	NE
9	52	27	116.2	4.23	442.37	NE
16	58	27	118.0	4.28	454.54	NE
21	62	27	116.9	4.28	450.30	NE
26	65	26	117.4	4.26	450.11	NE
31	68	26	115.7	4.21	438.39	NE
37	70	25	116.2	4.17	436.10	NE
41	73	26	116.6	4.19	439.70	NE
46	75	25	116,6	4.23	443.90	NE
51	77	26	117.2	4.22	445.13	NE
56	78	26	117.2	4.25	448.29	NE
66	83	27	116.6	4.22	442.85	NE
71	83	27	117.1	4.24	446.85	NE
76	84	27	116.7	4.23	444.28	NE
81	85	28	117.5	4.25	449.24	0.1268252
96	85	29	116.5	4.13	433.03	0.12932114
101	85	27	116.1	4.20	438.86	0.1321612
104	85	27	116.1	4.19	437.81	0.13247662
108	85	29	117.4	4.19	442.72	0.12875089

Cuadro 5.1: Evaluación de resistencia térmica de cocedor solar. Los cuadros marcados con NE, de acuerdo con el diseño del experimento, no se deben de evaluar.

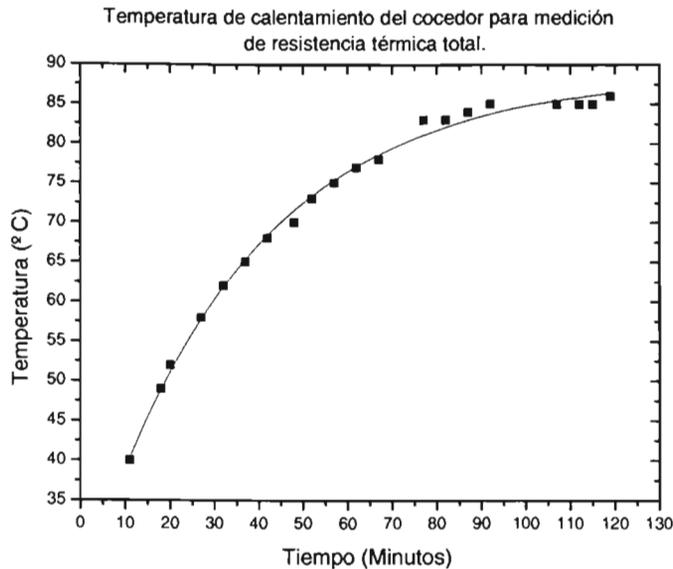


Figura 5.1: En la figura se muestra el comportamiento de la temperatura durante el calentamiento por medio de resistencia eléctrica del cocedor solar para cocción de alimentos, para encontrar el valor de su resistencia térmica total.

**Relación de comportamiento térmico del cocedor solar, durante el calentamiento para medición de su resistencia térmica total.** La curva de ajuste a los datos experimentales de calentamiento del cocedor, para medir la resistencia térmica total, es la relación:

$$T(t) = (91 \pm 1)^\circ C - (62 \pm 1)^\circ \text{Exp}\left[\frac{-t}{(42 \pm 3)(\text{min})}\right], \quad (5.6)$$

donde  $t$  se mide en minutos y  $0 \leq t \leq 120\text{min}$ .

Podemos observar una gran aproximación entre los valores teóricos y experimental de la resistencia térmica total del cocedor que tiene los valores:

$$R_{Total,experimental} = 0,1299 \pm 0,001^\circ C/W, \quad (5.7)$$

$$R_{Total,teorica} = 0,1277^\circ C/W. \quad (5.8)$$

Con lo que se puede observar que existe diferencia del 2% entre los valores teórico y experimental de la resistencia térmica total del cocedor solar, por lo que se puede considerar que son el mismo valor.

A continuación presentamos el desarrollo y análisis de cocciones de comidas solares totalmente, que hemos llevado a cabo en diferentes fechas, y donde los resultados experimentales nos muestran que el modelo teórico propuesto reproduce adecuadamente el comportamiento térmico del cocedor, así también que la cocción con energía solar es posible para cualquier comida.

### 5.2.2. Temperatura de cocción de clemole de pollo.

El 3 de Diciembre del 2004 llevamos a cabo la cocción de clemole de pollo, en nuestro cocedor solar, donde realizamos la cocción de alimentos con las siguientes condiciones:

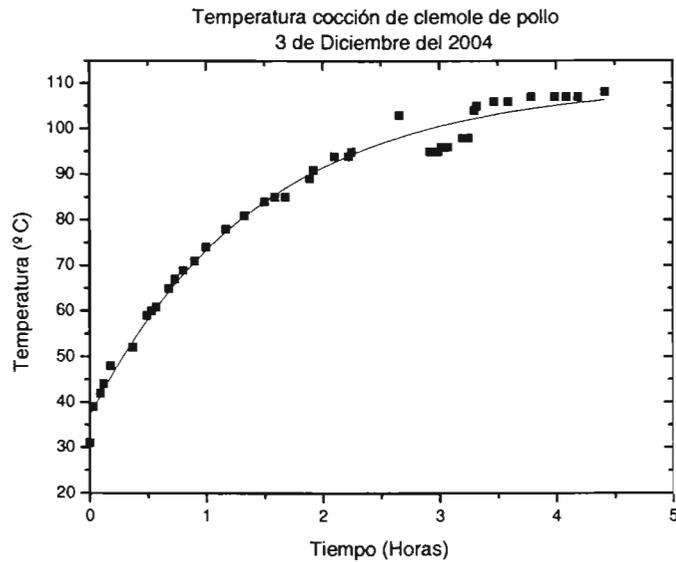


Figura 5.2: Gráfica de la temperatura de cocción de clemole de pollo.

- Cantidad: 9 kilogramos de alimentos entre pollo y verduras y 5 litros de agua aproximadamente.
- Número de ollas: 3 ollas express (pintadas externamente de negro.).
- Hora de inicio: 10:00 horas.
- Hora de finalización de la cocción: 14:00 horas.

Realizamos la medición de temperatura con un termómetro que tiene una precisión de  $\pm 1^\circ C$ .

Con las mediciones de temperatura en la cámara de cocción, realizadas durante la cocción del clemole, llevamos a cabo una gráfica, que se muestra en la figura 5.2, en ésta figura podemos observar en color rojo la curva de ajuste de nuestro modelo realizada para las mediciones de temperatura.

**Resultados.** De la curva de temperatura ajustada a los datos, se infiere que:

$$\begin{aligned}\tau &= 1,38 \pm 0,1 \text{ horas}, \\ T_{max} &= 108^\circ C \pm 1^\circ C, \\ T_{max} - T_i &= 72^\circ C \pm 1^\circ C, \\ T_i &= 36^\circ C \pm 1^\circ C.\end{aligned}$$

**Relación analítica.** La relación analítica de ajuste experimental es:

$$T(t) = (108^\circ C \pm 1^\circ C) - (72 \pm 1^\circ C) \text{Exp}\left[\frac{-t}{(1,38 \pm 0,07) \text{Hr.}}\right],$$

y donde se tiene que  $t$  está en el intervalo  $0 \leq t \leq 4,0 \text{ horas}$ .

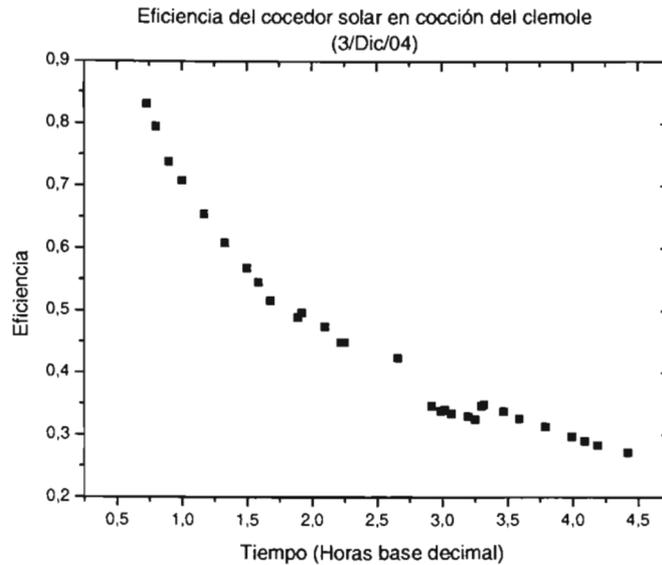


Figura 5.3: Gráfica de la eficiencia del cocedor durante la cocción de clemole de pollo el día 3 de Diciembre del 2004

**Análisis de la curva de temperatura.** Se puede observar en la figura 5.2, que los datos se ajustan bien en el intervalo, excepto entre  $2,6\text{Hr} \leq t \leq 3,3$  horas, donde la temperatura disminuyó, lo cual fue debido a nubes intensas que se interpusieron al paso de los rayos luminosos.

**Eficiencia de la cocción de clemole de pollo.** La gráfica de eficiencia de la cocción de clemole se muestra en la figura 5.3.

**Análisis de la eficiencia de cocción.** Se puede observar que la eficiencia decrece de un máximo aproximado de  $\eta = 0,84$  hasta tender a valores muy bajos, cercanos al  $\eta = 0,26$ , lo que corresponde a diferentes etapas del calentamiento, primero al iniciar el calentamiento la disipación del flujo de energía es bajo, y el flujo de energía se invierte en incrementar la energía interna de los elementos del cocedor, y a medida que la temperatura del cocedor se incrementa también se incrementa la disipación de flujo de energía hacia el ambiente, disminuyendo con esto el valor de eficiencia de transformación de energía de radiación solar en energía térmica, y este proceso continúa hasta el final de la cocción.

La evaluación del valor de  $C_T$  se lleva a cabo como:

$$C_T = \frac{\tau}{R_{Total,exp}} = \frac{(1,42\text{Hr})\left(\frac{3600\text{s}}{1\text{Hr}}\right)}{0,13\text{K/W}} = 39323\text{J/}^\circ\text{C}.$$

Los valores de  $C_T$  tienen un gran acercamiento con los valores que encontramos teóricamente para el caso con comida en 3 ollas  $C_{TC,3,ollas} = 41559\text{J/}^\circ\text{C}$ . La diferencia en valores de las capacidades teórica y experimental es de sólo 5%.

A continuación presentaremos el comportamiento de la temperatura del cocedor en vacío.

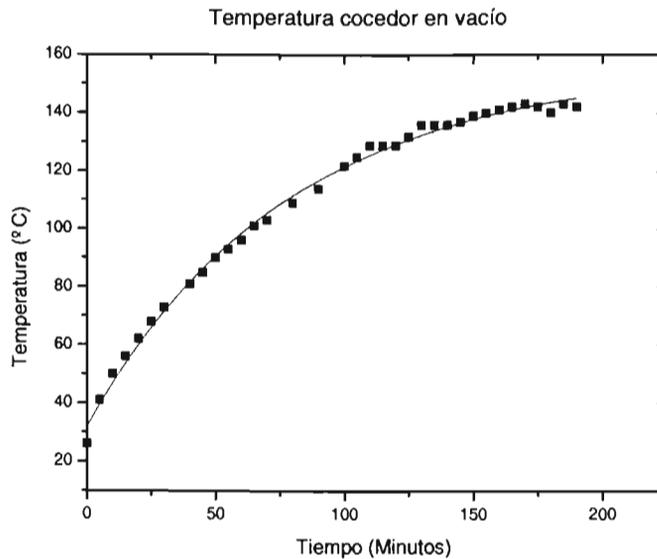


Figura 5.4: Gráfica de la temperatura del cocedor en vacío, la prueba fue realizada el día 11 de Enero del 2005

### 5.2.3. Temperatura del cocedor en vacío.

Ahora presentaremos el comportamiento de la temperatura del cocedor en vacío, la prueba se realizó el día 11 de Enero del 2005.

En la figura 5.4 se muestra la gráfica del comportamiento térmico del cocedor, llevado a cabo con las siguientes condiciones:

- En la cámara del cocedor sólo estaban los elementos de soporte y resistencias eléctricas.
- Al inicio del calentamiento el cocedor tenía una temperatura cercana a la temperatura ambiente.
- Los espejos se mantuvieron fijos.
- El calentamiento se inicio a las 10:00 horas.
- La finalización fue a las 13:00 horas.

**Relación analítica.** La relación analítica de la curva ajustada es:

$$T(t) = (156^{\circ}C \pm 2^{\circ}C) - (124^{\circ}C \pm 2^{\circ}C)Exp\left[\frac{-t}{78 \pm 3}\right], \quad (5.9)$$

donde la unidad del tiempo  $t$  son minutos, así también las unidades de  $\tau$ .

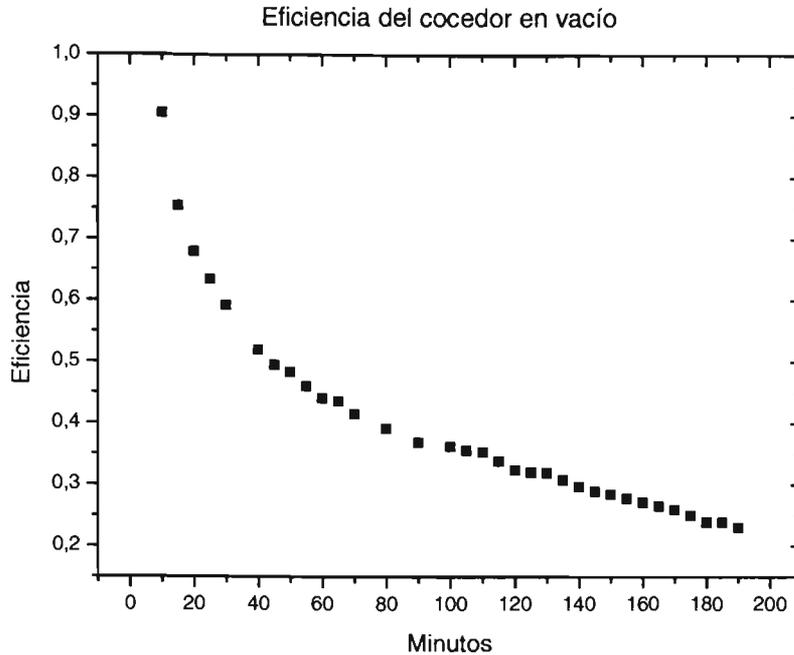


Figura 5.5: Gráfica de la eficiencia del cocedor solar en vacío, medición realizada durante el día 11 de Enero del 2005.

**Resultados:** En la gráfica se muestra la curva ajustada, de ésta se extraen los valores de los parámetros los cuales tienen los valores:

$$\tau = 1,29 \pm 0,05 \text{ horas},$$

$$T_{max} = 156^\circ C \pm 2^\circ C,$$

$$C_T = \frac{\tau_{vacio}}{R_{Total,exp}} = \frac{(1,29 Hr) \left( \frac{3600s}{1Hr} \right)}{0,13 K/W} = 35723 J/^\circ C.$$

**Análisis de los resultados.** Podemos observar que el valor de  $\tau$  es alto, para vacío se esperaba un valor inferior a  $\tau = 1$  hora. Yo le atribuyo la diferencia a dos factores, el primero a la instalación de resistencias y sus cables eléctricos, lo que representa una carga térmica. El segundo factor es que durante la prueba se observó un poco de viento, creemos que debido a esto la energía disipada al ambiente, provocó una curva de temperatura diferente a la esperada.

**Curva de eficiencia.** La curva de eficiencia térmica del cocedor que tuvimos fue la mostrada en la figura 5.5, en ésta se puede observar la forma decreciente esperada. Y durante la primera hora es donde se puede observar una caída muy rápida de esta eficiencia.

#### 5.2.4. Temperatura de cocción de postre de manzana.

Presentaremos el comportamiento de la temperatura del cocedor durante la cocción de postre de manzana, la cocción se realizó el día 18 de Febrero del 2005.

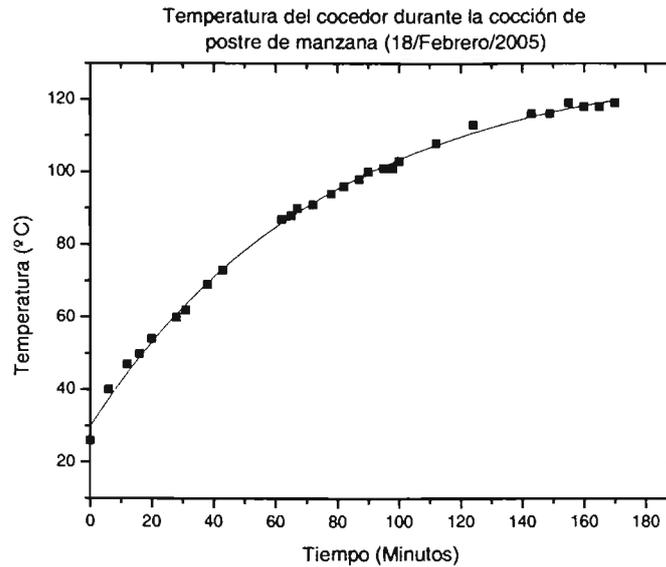


Figura 5.6: Gráfica de la temperatura del cocedor durante la cocción de postre de manzana realizada la medición el día 18 de Febrero del 2005

En la figura 5.6 se muestra la gráfica del comportamiento térmico del cocedor, llevado a cabo con las siguientes condiciones:

- En la cámara del cocedor sólo se introdujo una olla con el postre.
- Al inicio del calentamiento el cocedor tenía una temperatura igual a la temperatura ambiente.
- Los espejos se mantuvieron fijos.
- Realizamos tres ajustes de dirección del cocedor solar.
- El calentamiento se inicio a las 9:10 AM.
- La finalización fue a las 12:00 horas.

**Relación analítica.** La relación analítica de la curva ajustada es:

$$T(t) = (130^{\circ}C \pm 2^{\circ}C) - (101^{\circ}C \pm 1^{\circ}C)Exp\left[\frac{-t}{(76 \pm 1)}\right], \quad (5.10)$$

donde la unidad del tiempo  $t$  son minutos, así tambien las unidades de  $\tau$ .

**Resultados:** En la gráfica se muestra la curva ajustada, de esta se extraen los valores de los parámetros los cuales tienen los valores:

$$\begin{aligned} \tau &= 1,26 \pm 0,02 \text{ horas}, \\ T_{max} &= 130^{\circ}C \pm 2^{\circ}C, \\ C_T &= \frac{\tau_{vacio}}{R_{Total,exp}} = \frac{(1,26 \text{ Hr}) \left(\frac{3600s}{1 \text{ Hr}}\right)}{0,13 \text{ K/W}} = 34892 \text{ J/}^{\circ}C. \end{aligned}$$

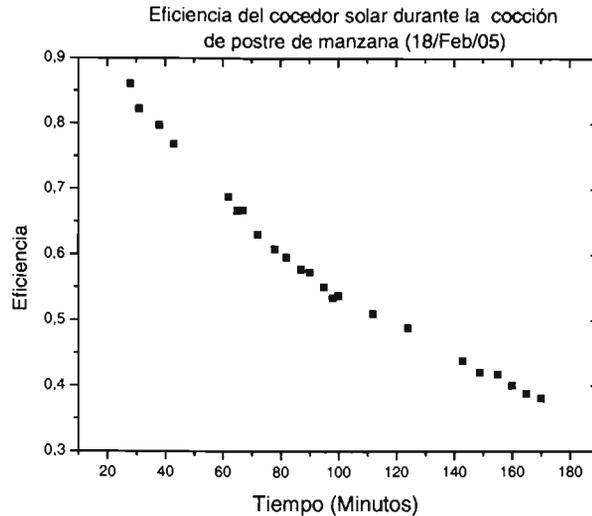


Figura 5.7: Gráfica de la eficiencia del cocedor solar durante la cocción de postre de manzana, medición realizada durante el día 18 de Febrero del 2005.

**Análisis de los resultados.** Podemos observar que el valor de  $\tau$  es adecuado para nuestro modelo, aunque obtuvimos un valor menor que el valor de vacío. Creo que la diferencia se debe a que no hizo viento, lo que favoreció el desempeño de la curva de temperatura, notamos que los datos experimentales se ajustan al modelo teórico.

**Curva de eficiencia.** La curva de eficiencia térmica del cocedor que tuvimos fue la mostrada en la figura 5.7. En ésta se puede observar la forma decreciente esperada. Y durante la primera hora es donde se puede observar una caída muy rápida de esta eficiencia, similar a las curvas de eficiencia ya mostradas. Una vez que hemos presentado los reportes de las cocciones de comidas que hemos considerado de referencia, mostraremos un resumen de comidas hechas en nuestro Centro de Investigación en Energía.

### 5.2.5. Temperatura de cocción de pollo en mole verde y lentejas.

Presentaremos el comportamiento de la temperatura del cocedor durante la cocción de pollo en mole verde y lentejas, la cocción se realizó el día 13 de marzo del 2005. Esta comida fue realizada con respaldo eléctrico. Por continuidad de la sección respaldo eléctrico se presenta aquí, aunque la explicación del funcionamiento del respaldo eléctrico se muestra en el capítulo siguiente.

En la figura 5.8 se muestra la gráfica del comportamiento térmico del cocedor, llevado a cabo con las siguientes condiciones:

- En la cámara del cocedor se introdujeron tres ollas express.
- Al inicio del calentamiento el cocedor tenía una temperatura igual a la temperatura ambiente.
- Los espejos se mantuvieron fijos.
- El calentamiento se inició a las 10:25 AM, en horario de verano.
- El respaldo eléctrico inició su operación en automático a los 135 minutos

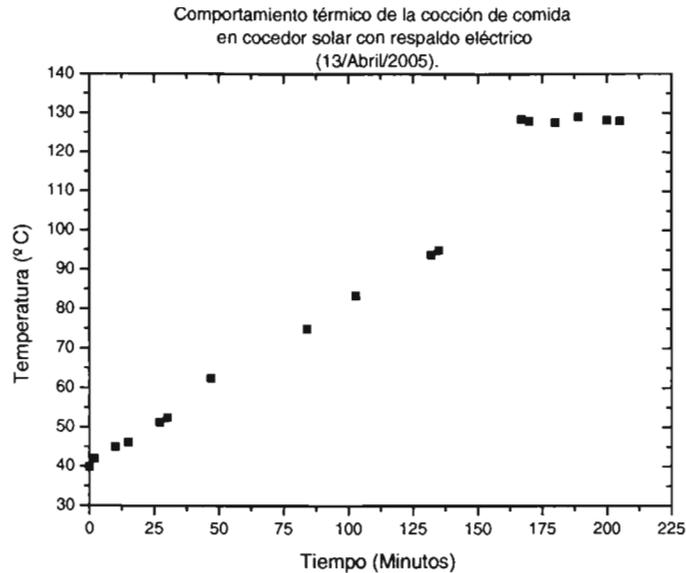


Figura 5.8: En la figura se muestra el comportamiento térmico del cocedor solar con respaldo eléctrico, durante la cocción de pollo en mole verde y lentejas.

- Después de iniciado el respaldo eléctrico la temperatura inicia el crecimiento hasta alcanzar la temperatura de  $T(t) = 128^{\circ}C$ , donde se inicia la operación de control, y el control de temperatura se comportó térmicamente de forma que  $T(t) = 128,0^{\circ}C \pm 0,5^{\circ}C$ , hasta finalizar la cocción.
  
- La finalización de la cocción en el cocedor fue a las 14:30 horas del horario de verano.

**Análisis de la cocción de comida con respaldo eléctrico.** La cocción del pollo en mole verde y lentejas fue realizada en horario de verano de forma exitosa, esta cocción fue realizada gracias al respaldo eléctrico con que cuenta nuestro cocedor, ya que las 14:00 horas del horario de verano en Temixco, Morelos corresponde a las 12:22 horario solar. Y si el cocedor fuera utilizado con energía solar solamente, la cocción no se lograría, en el horario de verano, para el intervalo de tiempo deseado.

La otra posibilidad de usar el cocedor con energía solar únicamente, es cambiar el horario de cocción de la comida, usando la cocción de alimentos entre las 11:00 y las 15:00 horas., esto no es adecuado para personas que tienen un horario fijo para comer, pero usaría menos respaldo eléctrico.

También se pudo observar que la comida tiene una mejor textura que la que se obtiene en una estufa convencional, en las figuras 5.11 y 5.12 se muestran las comidas al finalizar la cocción.

Podemos observar en la figura 5.8 que el crecimiento de la temperatura del cocedor al inicio de la cocción en horario de verano, es menor que la temperatura en horario de invierno, como se puede observar también en la figura 5.2, que es la gráfica de la cocción de clemole de pollo, realizada el 3 de Diciembre del 2004.

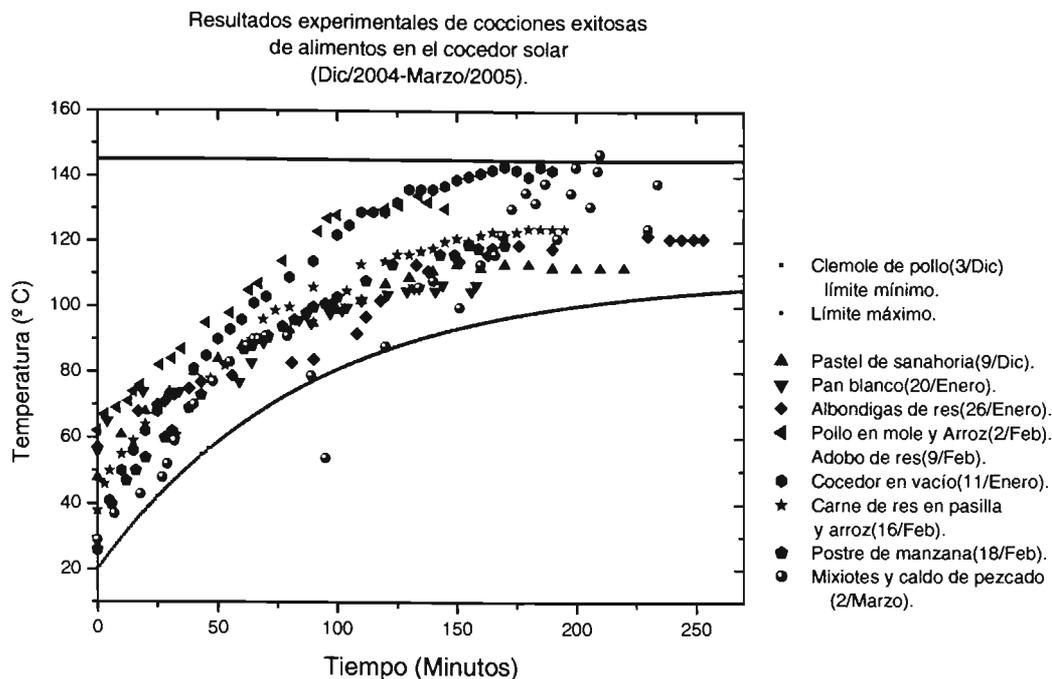


Figura 5.9: En la figura se presenta los resultados de cocciones exitosas, que fueron realizadas con energía solar. La cocción de mixiotes y caldo de pescado llevada a cabo el 2 de Marzo se realizó con el respaldo eléctrico.

### 5.3. Resumen de resultados de cocciones de alimentos en el cocedor solar.

Se ha hecho ya costumbre hacer comidas solares en nuestro Centro. En las comidas han participado principalmente los estudiantes de las distintas especialidades de la maestría en ingeniería. De las cocciones exitosas que hemos tenido representan aproximadamente un 90 % de las cocciones realizadas, se muestra un resumen de los resultados del comportamiento térmico en la figura 5.9.

De los resultados obtenidos haremos un análisis a continuación.

#### 5.3.1. Análisis de los resultados experimentales.

Para facilitar nuestro análisis describiremos los puntos que consideramos importantes del resumen:

- En todas las cocciones que estamos presentando, la comida cocinada resultó mejor cocida, al ser comparada con una estufa convencional, esto lo muestra la textura de la carne cocinada en nuestro cocedor solar, que termina más suave que la cocinada en estufas convencionales de gas. El sabor de las comidas cocinadas en nuestro cocedor solar es similar al sabor obtenido de las comidas cocinadas en estufas convencionales. Creo que esto se debe a que el sabor depende más de los ingredientes del guiso, que de la forma de cocinarse, o del tipo de dispositivo ocupado para la cocción de alimentos.
- En la figura 5.9 se nos muestra en color negro, la cocción de clemole de pollo del día 3 de



Figura 5.10: En la fotografía mostramos arroz cocinado en nuestro cocedor solar.



Figura 5.11: En la fotografía se muestra lentejas cocinadas en el cocedor solar.



Figura 5.12: En la fotografía se muestra pollo en mole verde cocinado en nuestro cocedor solar.

Diciembre del 2004. Las condiciones bajo las cuales se llevó a cabo la cocción, que ya han sido descritas, y los resultados nos hacen inferir que esta curva es la curva límite inferior de la temperatura de cocción. Esto ha sido inferido debido al buen resultado de la cocción, la cual presentó bien cocido el pollo y verduras, mientras se tuvo las peores condiciones de los espejos, con una reflectividad muy baja, incluso creemos inferior a 0.5.

- La temperatura en el interior del cocedor para la cocción de clemole de pollo del día 3/Diciembre, presentó una gran concordancia con nuestro modelo teórico, como ya fue mostrado en el reporte del clemole de pollo, por lo tanto consideramos esta curva como el comportamiento térmico real mínimo para lograr una cocción exitosa.
- A partir de esta curva insertamos los datos de diferentes cocciones, algunas fueron realizadas con cocedor precalentado, sin embargo nunca bajaron de la curva límite, ni sobrepasaron la línea roja, que hemos puesto como límite superior, al encontrar hasta ahora que las cocciones tienen ese límite (Excepto la cocción de caldo y mixiotes de pescado). Sin embargo se sabe que el éxito de la cocción no depende de estar limitado superiormente, pues en estufa convencional se alcanza temperaturas elevadas, y las cocciones son exitosas y reducen sólo el tiempo de cocción del alimento.
- La cocción de mixiotes y caldo de pescado, fue introducida como cocción exitosa, y esta ha sido nuestra primer comida donde hemos utilizado el respaldo eléctrico, y discutiremos su evolución:
  1. El respaldo fue puesto de forma manual, sin control automático de temperatura.
  2. La decisión de adicionar el respaldo eléctrico se tomó al detectar que la temperatura había disminuido hasta una temperatura de  $T = 54^{\circ}C$ , por nubosidad.

3. El inicio del respaldo se hizo durante la última hora de cocción, y sólo fue usado de forma intermitente, en la gráfica se puede observar que hicimos subir la temperatura del cocedor hasta  $T = 145^{\circ}C$ , donde se desconectaba el respaldo dejando enfriar hasta una temperatura de  $T = 125^{\circ}C$ .
  4. El suministro de energía eléctrica fue muy baja, estimamos menos de 0.5 KW-Hr., por lo que la energía eléctrica fue despreciable si consideramos que la comida guisada fue para 20 personas.
- Es bueno también describir la curva marcada como cocedor en vacío en color verde oscuro, ésta fue realizada con la finalidad de conocer el comportamiento de la temperatura en el interior del cocedor cuando no se tiene carga, y buscamos conocer la curva con mayor velocidad de crecimiento del comportamiento térmico del cocedor. De esta curva podemos decir que no tiene una pendiente tan inclinada como esperabamos. Sin embargo, esperamos que cualquier curva de temperatura que se tenga con condiciones similares se desarrolle entre la curva límite inferior y la curva de vacío.

A continuación presentamos el modo de operación del respaldo eléctrico.

## Capítulo 6

# Respaldo Eléctrico.

En este capítulo presentaremos el sistema eléctrico que proponemos para tener eficacia en la cocción de alimentos, para cualquier día del año.

No sin antes aclarar que nuestro cocedor solar es eficaz en la cocción de alimentos para días claros, e inclusive para días con nublados tenues intermitentes de baja duración (2-3 minutos), con intervalos largos de radiación directa de aproximadamente 20 minutos. Y los días con estas características cubren aproximadamente un 75 % de los días del año en Morelos. Por tanto, el sistema eléctrico que proponemos busca apoyar días que se encuentran en este 25 % de días del año que no se lograría la cocción de alimentos. Además puede ser un buen complemento de apoyo para otras características deseables en la cocción. Nosotros consideramos que el sistema eléctrico puede contribuir con apoyo en:

- Asegurar una cocción convectiva en las comidas que contienen caldo.
- Dar energía de apoyo como complemento de la energía solar, para el cocimiento de comidas muy "duras" (más duras que el pozole), y que en estas comidas termine su cocción a la hora máxima de las 14:00 horas, una vez que se inicia la cocción a las 10:00 horas.
- Dar energía de apoyo a la energía solar durante días que presentan nublados intermitentes intensos, que cubren al Sol por periodos de más de 10 minutos. Ya que nublados tan intensos y prolongados no garantizan la eficacia en la cocción de alimentos utilizando únicamente Sol, en nuestro cocedor solar.
- Utilizar el cocedor solar durante todo el año, con lo que tendrá un aprovechamiento completo para uso doméstico.
- Tener la posibilidad de aprovechar toda la energía disponible del día, pues con el apoyo de la energía eléctrica podemos usar el cocedor solar en cualquier horario diferente al propuesto, y ahorrar consumo de energía eléctrica ó el consumo de gas LP, debido al uso de la estufa convencional durante la tarde o por la mañana.

En la temporada de horario de invierno termina bien cocida la comida, gracias al respaldo eléctrico, pues como se sabe las 14:00 horas en horario invierno corresponde a las 12:22 horario solar, en Temixco, Morelos, y la energía solar no sería suficiente para nuestra cocción de comida, dentro del horario propuesto.

Son las características enunciadas las que nos motivan a introducir un respaldo eléctrico para nuestro cocedor solar. A continuación presentamos el desarrollo e implementación del respaldo eléctrico.

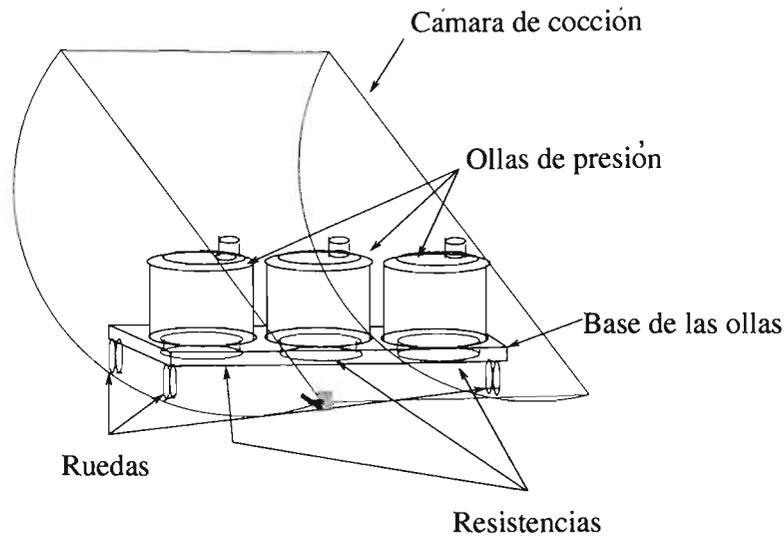


Figura 6.1: En la figura mostramos la ubicación física de las resistencias de calefacción para respaldo eléctrico al cocedor solar.

## 6.1. Adaptación física de las resistencias.

Para que las resistencias cumplan con el objetivo de apoyar la ebullición, además de adicionar energía al interior del cocedor, proponemos instalarlas en la base de las ollas. En la base, las resistencias están instaladas bajo el lugar donde se acomodan las ollas de presión. Las resistencias eléctricas son del tipo similar al que se usan en las parrillas eléctricas. La adaptación mecánica es hecha por abrazaderas. En la figura 6.1 mostramos la instalación de las resistencias eléctricas. Una vez que hemos presentado la ubicación física de las resistencias, presentaremos a continuación el tipo de control que proponemos.

## 6.2. Control eléctrico de respaldo

El control que proponemos, deseamos que funcione como respaldo, por tanto haremos que cumpla con las siguientes características:

- El cocedor deberá aprovechar toda la energía solar disponible.
- Durante las primeras dos horas de cocción, en el cocedor se utilizará sólo energía solar sin apoyo eléctrico.
- Cuando el cocedor solar supere la temperatura de  $T(t) = 95^\circ$ , se activará un relevador de tiempo que contará el tiempo de cocción de la comida, este tiempo será ajustado entre 1 y 2 horas.
- Al finalizar el tiempo de la cocción de la comida, se desactivarán las resistencias calefactoras totalmente.
- Cuando finalice el tiempo de cocción será activada una alarma sonora para indicar que la cocción ha sido terminada.

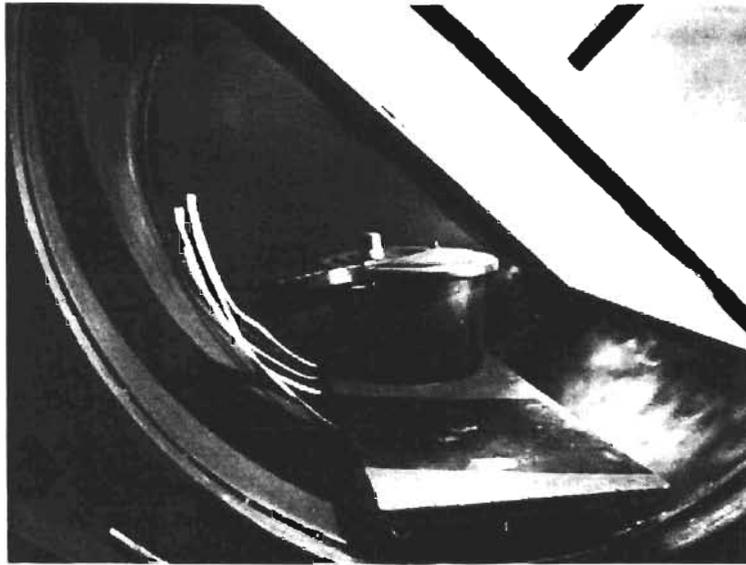


Figura 6.2: En la fotografía se muestra la ubicación de las resistencias bajo la base de ollas, y los cables eléctricos de las mismas.

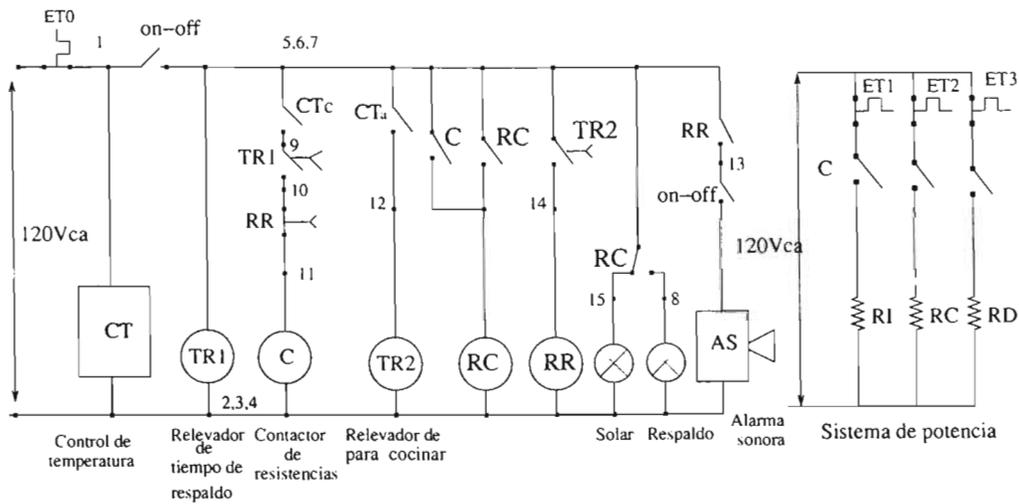


Figura 6.3: En la figura presentamos el sistema eléctrico de respaldo para el cocedor solar de cocción de alimentos.

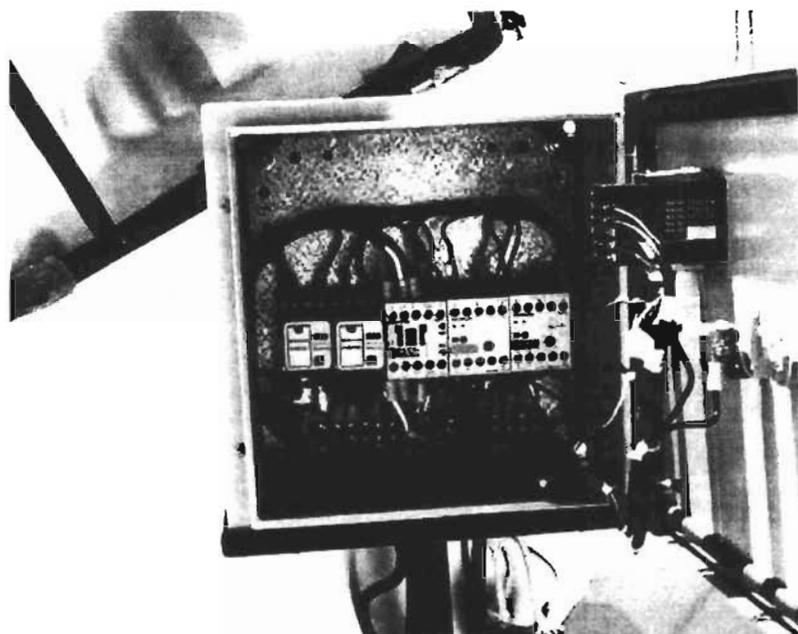


Figura 6.4: Elementos eléctricos.

Todos los puntos enunciados en el listado anterior, son satisfechos por medio del circuito de la figura 6.3. A continuación presentamos las características técnicas de cada uno de los elementos que componen el circuito de control.

### 6.2.1. Descripción de los elementos del control eléctrico.

Aquí describiremos las características técnicas de cada uno de los elementos iniciando por el control de temperatura.

**Control de temperatura  $CT$ .** El control de temperatura que proponemos lo denominamos en el circuito eléctrico  $CT$ , con las siguientes características:

- Es del tipo digital. Lo que nos permitirá leer la temperatura del cocedor fácilmente.
- Recibe la señal de un termopar de cualquier tipo, es decir la entrada es universal, y de acuerdo con el termopar que usaremos en el cocedor, se configurará el control electrónico.
- El voltaje aplicado al control de temperatura para que funcione es de 100-240 Vca. Nosotros usaremos 120Vca.
- Cuenta con dos salidas de contactos de tres polos, una configurable para control de temperatura dentro del cocedor y la otra configurable para alarma. Al contacto de control de temperatura le llamamos  $CTc$  y lo usamos para controlar el contactor denominado  $C$  en el circuito eléctrico. Al contacto de alarma del control de temperatura lo llamamos  $CTa$  en el circuito eléctrico y lo usamos para iniciar la cuenta del tiempo de cocción terminal de los alimentos.

**Relevador de tiempo  $TR1$ .** El relevador de tiempo tiene las siguientes características:

- Es digital.

- Tiene un intervalo de trabajo (Rango) de 0 a 10 horas. Nosotros lo ajustaremos en un tiempo de 2 horas.
- El voltaje aplicado para que opere es de  $100 - 240V_{ca}$ . Nosotros aplicaremos  $120V_{ca}$ .
- Tiene dos contactos de salida que tienen un límite máximo de  $I_{max} = 6A$ , para  $V_{max} = 440V_{ca}$ .

**Contactador de potencia C.** El contactor que seleccionamos tiene las siguientes características eléctricas:

- Los platinos del contactor son para una corriente máxima de  $I_{max} = 30A$  y un voltaje máximo de  $V = 440V_{ca}$ .
- La bobina del contactor es para  $120 V_{ca}$ .

Este contactor al activarse, cierra sus interruptores (platinos) y activa las resistencias de respaldo. Por lo que este contactor es llamado elemento final de control.

**Relevador de tiempo TR2.** Este relevador de tiempo cuenta con las siguientes características:

- Es digital.
- Tiene un intervalo de trabajo (Rango de trabajo) de 0 a 10 horas. Nosotros lo ajustaremos en un tiempo que dependerá de los alimentos que se cocinen, y se propone de forma general segura un tiempo de 2 horas.
- El voltaje aplicado para que trabaje es de  $100 - 240V_{ca}$ . Nosotros aplicaremos  $120V_{ca}$ .
- El voltaje aplicado para que opere es de  $100 - 240V_{ca}$ . Nosotros aplicaremos  $120V_{ca}$ .
- Tiene dos contactos de salida que tienen un límite máximo de  $I_{max} = 6A$ , para  $V_{max} = 440V_{ca}$ .

**Alarma sonora AS.** La alarma sonora funciona cuando se ha terminado la cocción de los alimentos, al activar *TR2* su contacto. Las características eléctricas de la alarma sonora son:

- Voltaje de operación  $120V_{ca}$ .
- Tipo timbre.

**Sistema eléctrico de potencia.** En el circuito eléctrico que proponemos el sistema de potencia se compone de:

- Tres resistencias eléctricas con las siguientes características:
  1. Voltaje de trabajo  $120V_{ca}$ .
  2. Potencia de cada resistencia es de 500 Watts.
- Cada resistencia cuenta con una protección térmica, denominadas *ET1*, *ET2* Y *ET3*. Las protecciones están diseñadas para 15 amperes, y pueden proteger una sobrecorriente o un cortocircuito de las resistencias.

Son estas las características enlistadas de los dispositivos eléctricos. Y a continuación describiremos el modo de operación del sistema de control.

### 6.2.2. Funcionamiento del sistema de control de temperatura para el cocedor solar.

El sistema de control de temperatura tiene los objetivos ya enlistados en el inicio de la sección. A continuación describiremos las tres posibilidades que se tienen en la operación del cocedor solar con respaldo eléctrico.

#### Funcionamiento del cocedor con energía únicamente solar.

Esta posibilidad es la que deseamos se tenga en nuestro cocedor, en un porcentaje de días del año que supere el 65 %.

El modo de operación está representado gráficamente en la figura 6.5. Para hacer operar el cocedor solar utilizando el control eléctrico suponemos que:

- La temperatura ambiente que utilizaremos es  $T_{amb} = 25^{\circ}C$ . Valor que se tiene como promedio en Temixco Morelos.
- La temperatura  $T_{coc} = 95^{\circ}C$ , es la que consideramos apropiada después de múltiples observaciones realizadas en comidas solares organizadas en el CIE.
- La temperatura de control  $T_{con} = 125^{\circ}C$ , temperatura suficiente para llevar a cabo una cocción con convección en comida con caldo, de acuerdo con el trabajo presentado en la sección 1.4 y en especial en la subsección 1.4.4.
- La temperatura máxima  $T_{max}$  es variable depende del día del año. Y de las condiciones ambientales, aunque hemos tenido valores desde  $T_{max} = 110^{\circ}C$  hasta  $T_{max} = 136^{\circ}C$  en nuestro cocedor solar.

el control funciona de la siguiente manera:

- La cocción inicia a la temperatura ambiente  $T_{amb}$  en el tiempo  $t = 0^{+}$  cuando cerramos el interruptor general *on - off*. Al mismo tiempo se empieza a contar el tiempo de respaldo en el relevador  $TR1$ .
- En el periodo de calentamiento se alcanza la temperatura  $T_{coc} = 95^{\circ}C$  a aproximadamente  $t = 0,9Hr$ , momento en el cuál el control de temperatura  $CT$  activa su contacto marcado como  $CT_a$ , al cerrarse el contacto  $CT_a$  se inicia el conteo del tiempo de cocción por medio de  $TR2$ .
- En el punto marcado por  $t_0$  se alcanza la temperatura de control  $T_{con}$ , esto se alcanza en menos de 2 horas, por tanto el contacto  $CT_c$  se abrirá a partir de este tiempo, y no se cerrará, debido a que la temperatura del cocedor es superior a la temperatura de control. Luego entonces el contactor  $C$  no se activará en ningún momento mientras la temperatura del cocedor supere a la temperatura de control.
- Al alcanzar el tiempo  $t = 2$  horas se activa el contacto del relevador de tiempo  $TR1$ , con esto activa el respaldo eléctrico, pero no será activado el contactor  $C$  debido a lo explicado en el punto anterior.
- Cuando el relevador de tiempo  $TR2$  termina de contar el tiempo de cocción, que nosotros marcamos en la gráfica con un tiempo de 2 horas, se activan sus contactos, con esto elimina el respaldo eléctrico y al mismo tiempo activa la alarma sonora  $AS$ .
- Al sonar la alarma sonora, podemos considerar que la cocción ha finalizado.

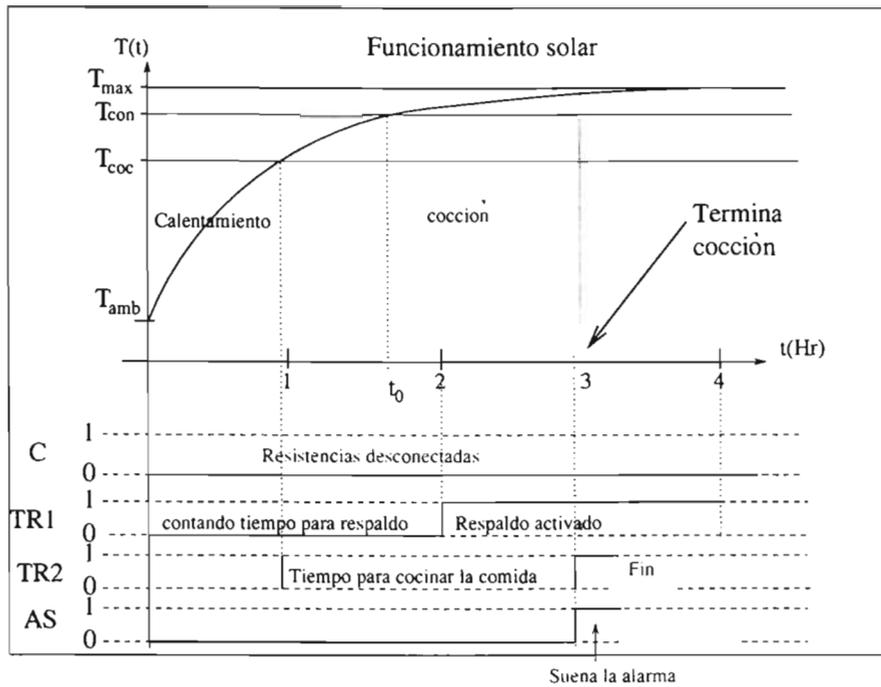


Figura 6.5: En la figura se muestra la operación del control eléctrico para una operación donde la energía solar es suficiente para lograr la cocción.

- La temperatura máxima  $T_{max}$  se alcanza entre las 3-4 horas, y una vez que se alcanza se mantiene sobre el valor de la temperatura de control  $T_{con}$ .
- Con lo anterior se logra una comida totalmente solar.

### Funcionamiento del cocedor con energía solar y respaldo eléctrico.

En la figura 6.6, mostramos el modo de operación del cocedor solar cuando el respaldo es requerido durante la cocción.

El modo de operación está representado gráficamente en la figura 6.6. Para hacer operar el control suponemos que:

- La temperatura ambiente que utilizaremos es  $T_{amb} = 25^{\circ}C$ . Valor que se tiene como promedio en Temixco Morelos.
- La temperatura  $T_{coc} = 95^{\circ}C$ , la consideramos apropiada después de múltiples observaciones realizadas en comidas solares organizadas en el CIE.
- La temperatura de control  $T_{con} = 125^{\circ}C$ , temperatura suficiente para llevar a cabo una cocción con convección en comida con caldo.
- La temperatura máxima  $T_{max}$ , es variable depende del día del año, y de las condiciones ambientales, aunque hemos tenido valores desde  $T_{max} = 110^{\circ}C$  hasta  $T_{max} = 136^{\circ}C$  en nuestro cocedor solar.

El control funciona de la siguiente manera:

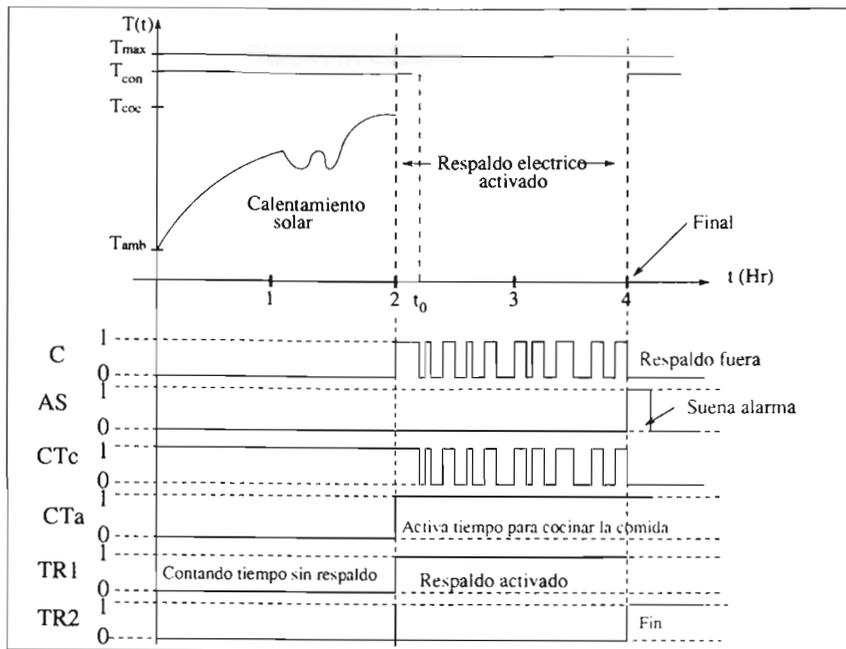


Figura 6.6: En la figura se muestra el modo de operación del sistema de respaldo eléctrico para el cocedor solar que proponemos.

- La cocción inicia a la temperatura ambiente  $T_{amb}$  en el tiempo  $t = 0^+$  cuando cerramos el interruptor general *on - off*. Al mismo tiempo se empieza a contar el tiempo de respaldo en el relevador  $TR1$ .
- En el periodo de calentamiento no se alcanza la temperatura  $T_{coc} = 95^\circ$  durante las dos primeras horas, por tanto el control de temperatura  $CT$  no activa el contacto  $CTa$  hasta un poco pasadas las dos primeras horas, en el momento en que se alcanza la temperatura  $T_{coc}$ , el contacto marcado como  $CTa$  se cierra, en este momento se inicia la cuenta del tiempo de cocción por medio de  $TR2$ .
- Al alcanzar el tiempo  $t = 2$  horas se cierra el contacto del relevador de tiempo  $TR1$ , con esto activa el respaldo eléctrico, y es activado el contactor  $C$  con lo cual se cierran sus contactos y son energizadas las resistencias, iniciando calentamiento con energía solar y eléctrica.
- En el punto marcado por  $t_0$  se alcanza la temperatura de control  $T_{con}$ , el tiempo en que se logra ésto es ligeramente mayor a 2 horas. Y cuando la temperatura  $T_{con}$  es alcanzada en el tiempo  $t_0$ , a partir de este momento se entrará en un periodo de control.
- El periodo de control inicia cuando se alcanza la temperatura  $T_{con}$  en el cocedor, y a partir de este punto el control de temperatura  $CT$  iniciara su acción sobre el sistema operando de la siguiente forma:
  1. Cuando la temperatura sobrepasa la temperatura de control  $T_{con}$  en aproximadamente  $2^\circ C$ , el contacto  $CTc$  se abre, entonces al abrirse el contacto  $CTc$  se abre el contactor  $C$ , luego el contactor  $C$  al desactivarse, desconecta las resistencias, y con esta secuencia el cocedor empieza a enfriarse.
  2. Al estarse enfriando el cocedor y se baja la temperatura en  $2^\circ C$  con respecto a la temperatura de control  $T_{con}$  se cierra el contacto  $CTc$ , al cerrarse el contacto  $CTc$  se

activa el contactor  $C$ , al activarse el contactor  $C$  se cierran sus contactos, al cerrarse los contactos de  $C$  las resistencias se energizan y empiezan a calentar el cocedor.

3. Una vez que las resistencias empiezan a calentar se eleva la temperatura hasta alcanzar la temperatura de  $2^{\circ}C$  sobre la temperatura de control  $T_{con}$ , lo cual hace que se abra el contacto  $CTc$  y el proceso se repite de acuerdo al punto 1.
- El relevador de tiempo  $TR2$  inicia a contar el tiempo de cocción un poco pasadas  $t = 2Hr$ , termina de contar el tiempo de cocción, que nosotros marcamos en la gráfica con un tiempo de 4 horas, en este momento en  $TR2$  se activan sus contactos, con esto elimina el respaldo eléctrico y al mismo tiempo activa la alarma sonora  $AS$ .
  - Al sonar la alarma sonora, podemos considerar que la cocción ha finalizado.
  - La temperatura máxima  $T_{max}$  no es alcanzada por ser superior a  $T_{con}$ .
  - Con lo anterior se logra una comida con energía solar y eléctrica.

Esto dos modos de control eléctrico descritos nos entregan los casos extremos de la operación del cocedor solar-eléctrica, aunque pueden utilizarse otras variantes, y que caen en funcionamientos intermedio de la descripción actual, por ejemplo el apoyo eléctrico desde un inicio de la cocción, puede ser realizado si el relevador de tiempo  $TR1$  se ajusta a  $\Delta t = 0,00Hr.$ , y con esto el cocedor operará todo el ciclo de la cocción de alimentos, como cocedor con energía híbrida solar y eléctrica.

Finalmente nuestro cocedor ha quedado con la presentación de las fotografías 6.7 y 6.8, donde se muestra el cocedor solar con respaldo eléctrico, y con un sistema mecánico para optimizar la energía solar que entra al cocedor.

En el próximo capítulo presentamos dos propuestas de modificaciones para el cocedor solar con respaldo eléctrico, una propuesta contempla un cocedor para 2 ollas express de 6 litros, las cuales cubren una capacidad de una familia típica. El otro cocedor es para una capacidad de 6 ollas express de 6 litros, tamaño que creemos cubre las necesidades de una fonda.

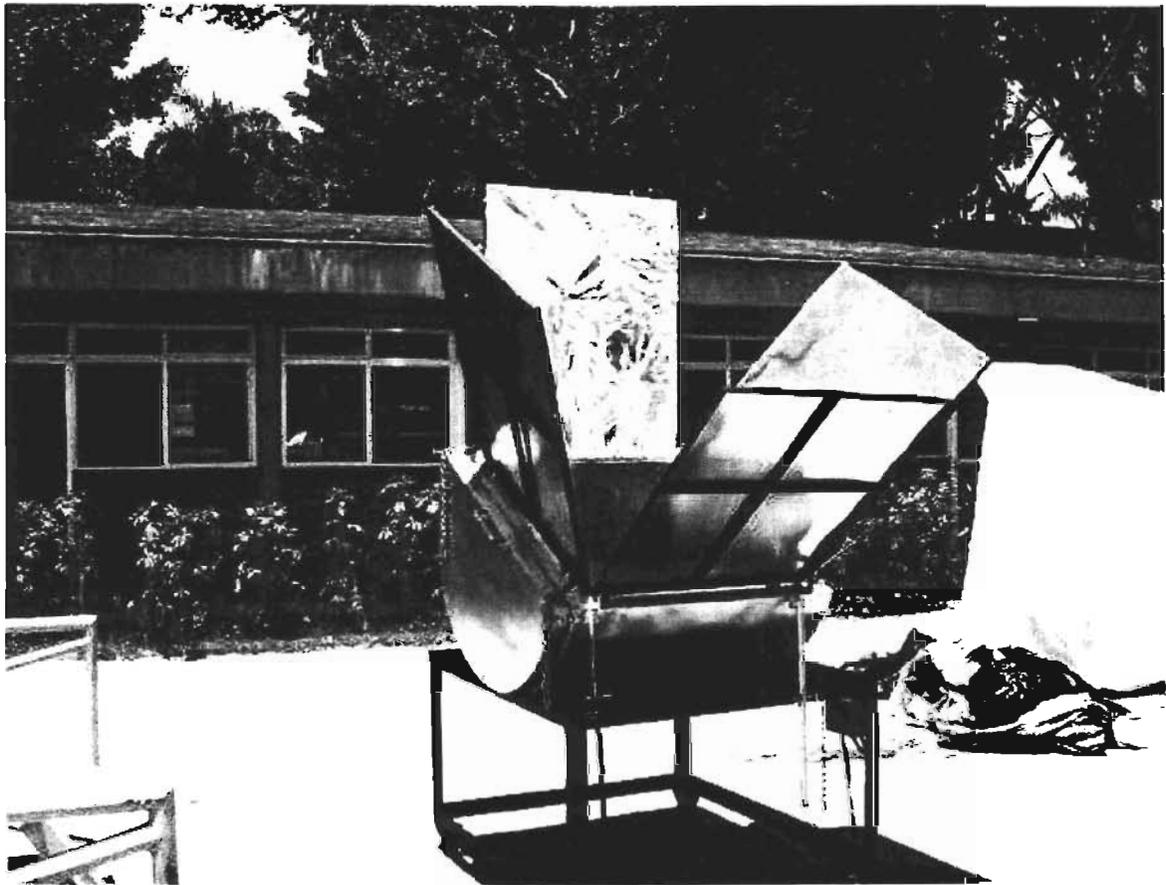


Figura 6.7: En la fotografía se muestra el cocedor solar con respaldo eléctrico, y donde se observa al frente el ajustador del ángulo de incidencia solar sobre el vidrio interfaz, en el lado la puerta de acceso de las ollas de presión con los alimentos.

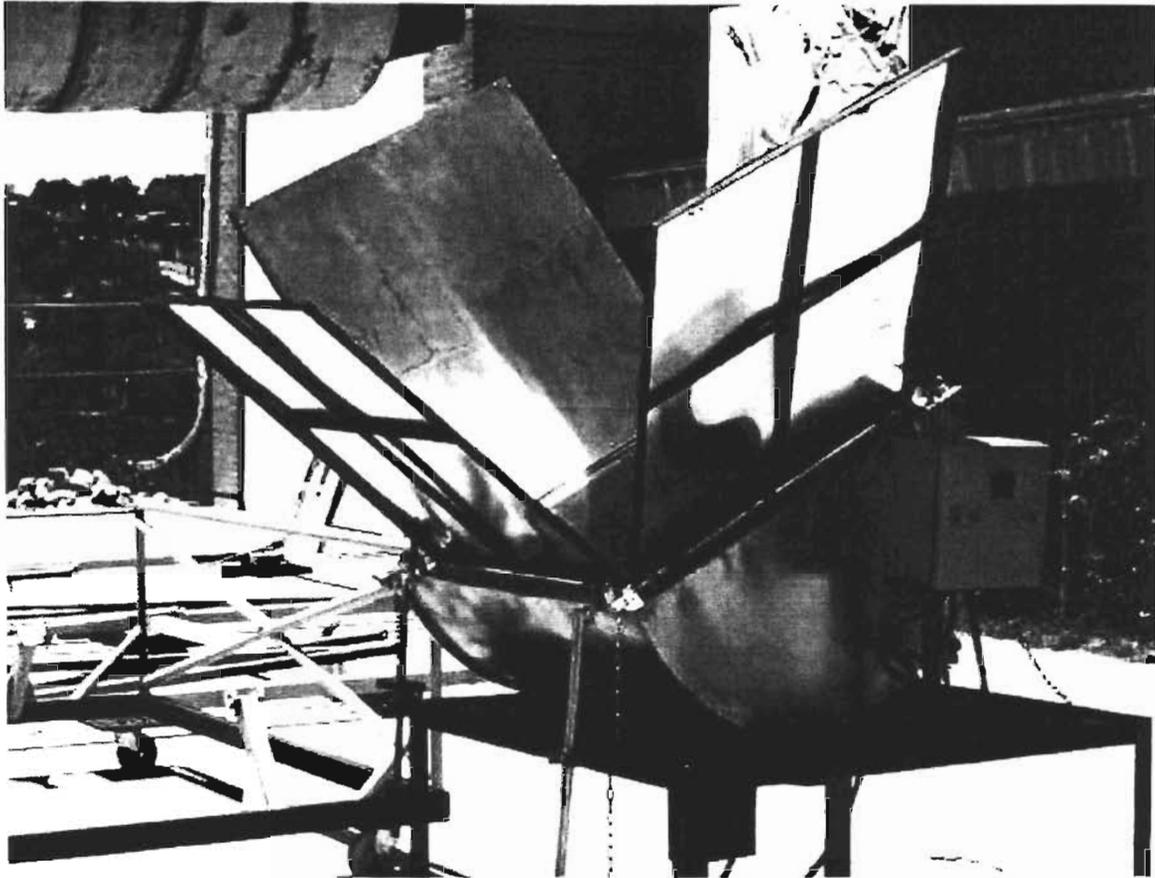


Figura 6.8: Fotografía de nuestro cocedor solar, donde se muestra el tablero de control del respaldo eléctrico, el sistema mecánico de ajuste del ángulo de inclinación del vidrio interfaz, y su concentrador de cuatro espejos planos.

## Capítulo 7

# Cocedores Solares para 2 y 6 Ollas.

En este capítulo presentaremos el resumen del diseño de dos cocedores solares para cocción de alimentos para 2 ollas de presión de 6 litros de capacidad uno, y otro para 6 ollas de presión de 6 litros de capacidad, lo cual presentaremos a continuación.

### 7.1. Diseño del cocedor para 2 ollas de presión.

En esta sección presentaremos un resumen del diseño de un cocedor solar, de 2 ollas de presión de 6 litros, con la misma forma que utilizamos para nuestro cocedor de tres ollas de presión. Como la base teórica será la misma podemos evitar el seguimiento y sólo presentaremos los resultados de las evaluaciones.

Las dimensiones de los elementos del cocedor solar son:

- La cámara de cocción tiene las dimensiones:  
Las dimensiones que hemos dado a la cámara de cocción, nos garantiza que la capacidad de volumen sea para 2 ollas express de 6 litros, y éstas estén verticales en todo momento. Las ollas al introducirse en la cámara no presentan ninguna obstrucción. Y la base hace que las ollas se puedan desplazar en cualquier momento que el usuario(a) así lo requiera.
- La cámara aislada tiene las dimensiones: La cámara aislada tiene las dimensiones que se muestran en el cuadro 7.2 se muestran las dimensiones reales.

Después de determinar los valores de la cubierta de la cámara de cocción del cocedor solar, pasaremos a describir el sistema mecánico para ajustar la inclinación del plano de entrada de los rayos luminosos. El cocedor solar llevará a cabo la cocción de la comida con las siguientes características:

Parámetro	Valor(m)
<i>Radio</i>	0,44
$w_a$	0,54
$w_c$	0,84
$w_x$	0,10
<i>Largo, base</i>	0,60
$w_b$	0,28

Cuadro 7.1: Dimensiones de la cámara de cocción para cocedor de 2 ollas.

Parámetro	Valor(m)
$\delta_{puerta}$	0,05
$\delta_{esp,oes}$	0,12
$\delta_{esp,este}$	0,09
$w_{a,ext}$	0,80
$w_{c,ext}$	1,00
$R_{int}$	0,44
$R_{ext}$	0,505

Cuadro 7.2: Dimensiones de la cámara del cocedor y el su aislamiento térmico.

- Un tamaño del cocedor de cocción de alimentos para una familia de 6 personas.
- Cuenta con un sistema mecánico, de forma que permite el manejo sencillo del ajuste del ángulo de incidencia del flujo solar sobre el concentrador del cocedor.
- El cocedor tiene la posibilidad de ajustarse durante el día solar cada día de la semana, para aprovechar la mayor cantidad posible de radiación directa del Sol.
- Se puede ajustar con diferente inclinación del ángulo de incidencia del flujo de rayos luminosos, dependiendo de la latitud del lugar en que se encuentre instalada, y con ángulos fijos de los espejos del concentrador. El cocedor solar consta de:

1. Un concentrador de cuatro espejos planos con dimensiones:

Espejo	Ancho (m)	Largo (m)
Norte	0,54	0,91
Sur	0,54	0,91
Este	0,84	0,54
Oeste	0,84	0,54

Los espejos son ajustables, aunque se propone un sólo ajuste para todo el año que es de  $60^\circ$  con respecto al plano horizontal del cocedor solar (plano del vidrio) para los espejos Norte y Sur, de  $75^\circ C$  para el espejo poniente y de  $35^\circ C$  para el espejo oriente. Lo anterior se debe a que proponemos utilizar el cocedor solar de las 10:00 a las 14:00 horas.

2. Una cámara formada por una mitad cilíndrica aislada térmicamente, lugar que usamos para introducir los alimentos para su cocción, con dimensiones:

Parámetro	Dimensión (m)
Radio interno	0,44
Radio externo	0,505
Largo interno	0,64
Largo externo	0,80

3. Puerta de acceso a la cámara de cocción, con dimensiones:

Elemento	Ancho m	Radio Externo (m)	Espesor (m)
Puerta	1,00	0,50	0,05

Parámetro	Valor
$d_1$	0,88m
$d_2$	1,01m
$k_{ais}$	0,6W/mK
$\delta_{pared,1}$	0,05m
$\delta_{pared,2}$	0,08m
$h$	10W/m <sup>2</sup> K
$\delta_{vidrio}$	0,006m
$k_{vidrio}$	0,78W/mK
$L_{cil}$	0,64m
$A_{T,cil}$	1,49m <sup>2</sup>
$A_{vidrio,cil}$	0,45m <sup>2</sup>

Cuadro 7.3: Dimensiones del cocedor de 2 ollas de presión de 6 litros cada una y los valores de propiedades físicas de los materiales usados en el cocedor.

- Un vidrio de separación entre el concentrador y el compartimiento de cocción, las dimensiones de éste son:

Elemento	Ancho (m)	Largo (m)	Espesor (m)
Vidrio	0,83	0,53	0,006

- Un sistema mecánico para graduar la inclinación del concentrador del cocedor, el intervalo de inclinación es de  $-10 \leq \gamma \leq 60^\circ$ .
- Un sistema mecánico rodante dentro de la cámara de cocción, que sirve para mantener verticales las ollas que contienen la comida, las dimensiones de éste dispositivo es:

Elemento	Ancho (m)	Largo (m)
Base de ollas	0,28	0,60

Son estas características que tiene nuestro cocedor, y a continuación mostraremos el comportamiento térmico del cocedor.

### 7.1.1. Flujo de energía disipada hacia el ambiente $\dot{E}_{sale,T}$ .

Para evaluar la resistencia térmica, necesitamos las dimensiones de la cámara de cocción, y los valores de las propiedades físicas de los materiales, lo cual presentamos en la tabla 7.3. El flujo de la energía que sale del interior del cocedor se obtiene al sustituir los valores de los parámetros tabulados en 7.3 en las relaciones correspondientes obtenemos los valores de las resistencias individuales específicas, como se muestran en la siguiente tabla 7.1.1 Al utilizar los valores encontrados de las resistencias individuales, la resistencia térmica total es:

$$R_{Total} = 0,16K/W.$$

Parámetro	Valor
$R_{L,pared,cil}$	$0,794mK/W$
$\frac{L_{cil}}{R_{pared,cil}}$	$0,81W/K$
$R_{pared,1}$	$1,1m^2K/W$
$\frac{A_{pared,planas}}{R_{pared,1}}$	$0,27W/K$
$R_{pared,2}$	$1,6m^2K/W$
$\frac{A_{T,par,planas}}{R_{pared,2}}$	$0,19W/K$
$R_{cam}$	$0,21m^2K/W$
$\frac{A_{vidrio}}{R_{cam}}$	$2,14W/K$
$\eta h A_{sup,met}$	$1,07W/K$

Cuadro 7.4: Resistencias térmicas del cocedor de 2 ollas de presión.

Él valor de  $R_{Total} = 0,16K/W$  lo consideraremos como el valor teórico de las resistencia térmica total de nuestro cocedor. A continuación presentaremos la evaluación del flujo de energía acumulado en el interior del cocedor.

### 7.1.2. Evaluación del comportamiento térmico del cocedor el día 21 de Diciembre del año.

Para llevar a cabo las evaluaciones supondremos que  $\gamma = \theta_p |_{w=0^\circ}$ , para el día de la evaluación. Para el caso que estamos evaluando éste valor es  $\gamma = \theta_p = 42,3^\circ$ , y  $\delta = -23,5^\circ$ . entonces tenemos que:

1. Primero evaluaremos el  $\cos(\theta)$  para el día 22 de Diciembre, lo que expresamos como:

$$\cos(\theta) |_{21/Dic} = 0,84\cos(w) + 0,158,$$

2. Luego evaluamos  $\cos(\theta_z)$  para este día, por medio de la relación:

$$\cos(\theta_z) |_{21/Dic} = 0,868\cos(w) - 0,129.$$

3. A continuación evaluaremos  $\dot{E}_{ext}(353)$  por medio de la relación:

$$\dot{E}_{ext}(n = 355) = \frac{1363W/m^2[1 + 0,01672(\cos[(353)\frac{360^\circ}{365,2}])]^2}{1 - (0,01672)^2} = 1408W/m^2,$$

donde se ha considerado  $\epsilon = 0,01672$ ,  $\dot{S} = 1363W/m^2$ .

4. Ahora evaluaremos  $\dot{E}_{entra,T}$ , lo cual se realiza por medio de la relación:

$$\dot{E}_{entra,T} = (1105W)(0,84\cos(w) + 0,158)Exp\left[\frac{-0,142}{0,868\cos(w) - 0,129}\right] + (67,34W)\left[exp\left(\frac{-0,142}{(0,868\cos w - 0,129)}\right)\right].$$

En la relación anterior se ha tomado el valor de la reflectividad de los espejos de 0,85, sin embargo los espejos que nosotros hemos adquirido tienen poca reflectividad, debido a que no son pulido espejo, y estimamos se tiene una reflectividad de los espejos de 0,5, y al considerar

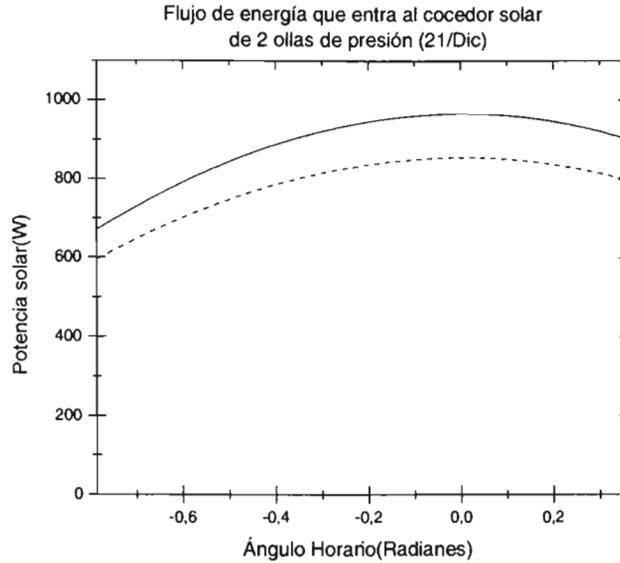


Figura 7.1: En la figura se muestra el comportamiento del flujo de la energía solar entre las 10:00 y 14:00 horas, en rojo con línea continua se muestra para la reflectividad de 0.85 de los espejos planos, en azul se consideró espejos de reflectividad 0.5.

esto en la relación de la eficiencia de concentración, se obtiene un valor de  $\eta_{dir,c} = 0,73$ , y si con este valor, evaluamos la energía que entra al cocedor  $\dot{E}_{entra,T}$ , encontramos la relación:

$$\dot{E}_{entra,T} = (970W)(0,84\cos(w) + 0,158)Exp\left[\frac{-0,142}{0,868\cos(w) - 0,129}\right] + (46,6W)\left[exp\left(\frac{-0,142}{(0,868\cos w - 0,129)}\right)\right].$$

5. Ambas relaciones al graficarse para el intervalo de trabajo del cocedor solar de 10:00-14:00 horas (horario de invierno de México), se obtiene las curvas representadas en la figura 7.1.
6. La energía integral promedio es representada como:

$$\bar{\dot{E}}_0 = \frac{1}{w|_{14:00} - w|_{10:00}} \int_{w|_{10:00}}^{w|_{14:00}} \dot{E}_{entra,T}(w) |_{n=355} dw,$$

la cuál al resolver por medio de un integrador numérico nos da por resultados:

- Cuando la reflectividad de los espejos tiene un valor de 0.85, la energía promedio integral es  $\bar{\dot{E}}_0 = 891W$ .
  - Cuando la reflectividad de los espejos es de 0.5, la energía promedio integral es  $\bar{\dot{E}}_0 = 771W$ .
7. Para evaluar la temperatura máxima  $T_{max}$  utilizaremos la relación:

$$T_{max} = \bar{\dot{E}}_0 R_{Total} + T_{amb},$$

y como que el valor de la resistencia térmica total teórica de este cocedor es  $R_{Total} = 0,16^{\circ}C/W$ , y la temperatura promedio mensual medida en nuestra estación solarimétrica y meteorológica del CIE-UNAM de Temixco Morelos, para el mes de Diciembre del año 2001 fue  $T_{amb} = 20^{\circ}C$ , y este valor usaremos en nuestras evaluaciones. Al sustituir los valores correspondientes en la relación para evaluar  $T_{max}$  obtenemos:

$$T_{max} |_{\rho_{espejos}=0,85} = (891W)(0,16^{\circ}C) + 20^{\circ}C = 163^{\circ}C,$$

$$T_{max} |_{\rho_{espejos}=0,5} = (772W)(0,16^{\circ}C) + 20^{\circ}C = 143^{\circ}C.$$

8. Ahora evaluaremos los valores de  $\tau$  para las cargas teóricas  $C_{T,n,ollas}$ , como:

cocción	Capacidad(J/ $^{\circ}C$ )	$R_{Total}(^{\circ}C/W)$	$\tau(s)$	$\tau(horas)$
En vacío	12 926	0.16	2068	0.57
Con comida y una olla	22 791	0.16	3647	1.01
Con comida y 2 ollas	28171	0.16	4507	1.25

9. Las relaciones teóricas del comportamiento térmico de la temperatura  $T(t)$  en el interior del cocedor, para cada una de las posibilidades se representan como:

- Cuando  $T_{max} = 163^{\circ}C$  y  $T_{amb} = 20^{\circ}C$  se obtienen las relaciones:

$$T(t) = T_{max}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + T_{amb}e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

- a) En vacío se tiene la relación:

$$T(t) = 163^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{0,57})] + 20^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{0,57}). \quad (7.1)$$

- b) Cocción de comida en dos ollas:

$$T(t) = 163^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{1,25})] + 20^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{1,25}). \quad (7.2)$$

Y la gráfica del comportamiento térmico descrito por las relaciones teóricas máximas para el 21 de Diciembre en día claro se muestran en la figura 7.2.

- Si ahora consideramos  $T_{max} = 143^{\circ}C$  y  $T_{amb} = 20^{\circ}C$  obtenemos las relaciones:

$$T(t) = T_{max}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + T_{amb}e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

- a) En vacío se tiene la relación:

$$T(t) = 143^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{0,57})] + 20^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{0,57}). \quad (7.3)$$

- b) Cocción de comida en dos ollas:

$$T(t) = 143^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{1,25})] + 20^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{1,25}). \quad (7.4)$$

Y las gráficas de las relaciones teóricas de las cocciones en el cocedor solar lo más aproximado a lo real, se muestran en la figura 7.3.

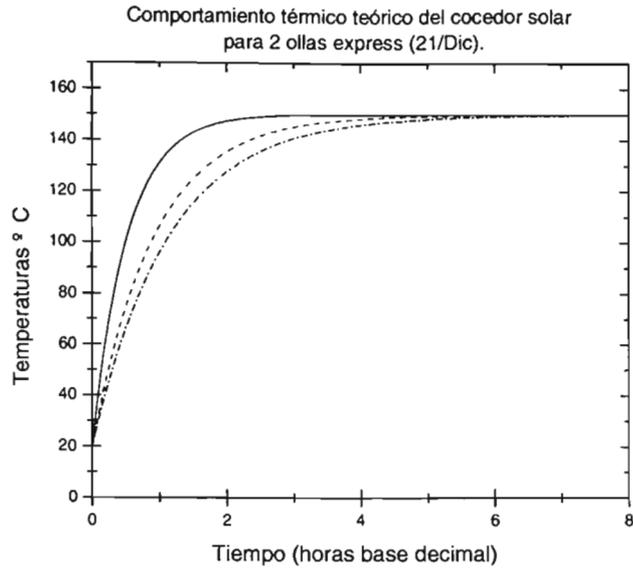


Figura 7.2: En la figura se muestra el comportamiento térmico del cocedor solar de 2 ollas express en el día 21 de Diciembre, en línea roja y continua se muestra el comportamiento en vacío, en color violeta y línea intermitente se muestra el comportamiento con 1 olla, y en línea color azul de punto y raya se muestra el comportamiento con 2 ollas.

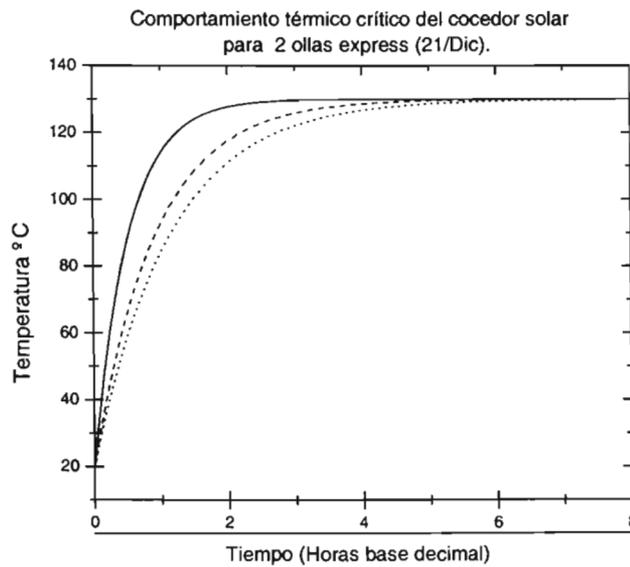


Figura 7.3: En la figura se muestra el comportamiento térmico teórico del interior del cocedor solar para alimentos de 2 ollas express, para el cocedor vacío en rojo y línea continua, para 1 olla se muestra en violeta y línea —, y en violeta la línea inferior para 2 ollas.

Parámetro	Valor(m)
<i>Radio</i>	0,44
$w_a$	1,78
$w_c$	0,84
$w_x$	0,10
<i>Largo, base</i>	1,70
$w_b$	0,28

Cuadro 7.5: Dimensiones de la cámara de cocción para cocedor de 6 ollas.

Parámetro	Valor(m)
$\delta_{puertas}$	0,06
$\delta_{esp,oes}$	0,09
$w_{a,ext}$	2,05
$w_{c,ext}$	1,00
$R_{int}$	0,44
$R_{ext}$	0,505

Cuadro 7.6: Dimensiones de la cámara del cocedor y el aislamiento térmico del cocedor de 6 ollas.

### 7.1.3. Comentarios

Como se puede observar de la figuras 4.4 y 4.5, En el desempeño térmico del cocedor de 3 ollas de presión, que el día 21 de Diciembre, tiene el desempeño térmico más bajo.

Por tanto esperamos que el desempeño del cocedor de dos ollas, tenga un desempeño similar al que se tiene en el cocedor de tres ollas. Luego entonces se espera un desempeño térmico satisfactorio en el cocedor de 2 ollas express de 6 litros.

## 7.2. Cocedor Solar para 6 Ollas de Presión.

En esta sección presentaremos el diseño de un cocedor solar para cocción de alimentos para 6 ollas express de 6 litros. Este diseño tiene por finalidad sea utilizado en fondas.

### 7.2.1. Diseño de la cámara de cocción y base de las ollas para comida.

La cámara de cocción la diseñaremos de tamaño adecuado, para esto la base horizontal se asienta sobre la superficie cilíndrica. Para tener las dimensiones del volumen del espacio de la cámara, debemos considerar el volumen que ocupan las ollas, y al conocer este volumen encontrar el valor del radio interno de la cámara. En la figura 2.1 se muestra el esquema de diseño de la cámara de cocción del cocedor solar. Las dimensiones que hemos obtenido son mostradas en el cuadro 7.5.

Las dimensiones que hemos dado a la cámara de cocción, nos garantiza que la capacidad de volumen sea para 6 ollas express de 6 litros, y éstas estén verticales en todo momento. Las ollas al introducirse en la cámara no presentan ninguna obstrucción. Y la base hace que las ollas se puedan desplazar en cualquier momento que el usuario(a) así lo requiera. La cámara aislada tiene las dimensiones que se muestran en el cuadro 7.6 se muestran las dimensiones reales.

Después de determinar los valores de la cubierta de la cámara de cocción del cocedor solar,

pasaremos a describir el sistema mecánico para ajustar la inclinación del plano de entrada de los rayos luminosos.

El cocedor solar llevará a cabo la cocción de la comida con las siguientes características:

- Un tamaño del cocedor de cocción de alimentos para 40 personas.
- Cuenta con un sistema mecánico, de forma que permite el manejo sencillo del ajuste del ángulo de incidencia del flujo solar sobre el concentrador del cocedor.
- El cocedor tiene la posibilidad de ajustarse durante el día solar cada día de la semana, para aprovechar la mayor cantidad posible de radiación directa del Sol.
- Se puede ajustar con diferente inclinación del ángulo de incidencia del flujo de rayos luminosos, dependiendo de la latitud del lugar en que se encuentre instalada, y con ángulos fijos de los espejos del concentrador. El cocedor solar de la figura 2.5, tiene las bondades que enunciamos, y consta de:

1. Un concentrador de cuatro espejos planos con dimensiones:

Espejo	Ancho (m)	Largo (m)
Norte	1,60	1,10
Sur	1,80	1,10
Este	0,84	1,00
Oeste	0,84	1,00

Los espejos son ajustables, aunque se propone un sólo ajuste para todo el año que es de  $60^\circ$  con respecto al plano horizontal del cocedor solar (plano del vidrio) para los espejos Norte y Sur, de  $75^\circ C$  para el espejo poniente y de  $35^\circ C$  para el espejo oriente. Lo anterior se debe a que proponemos utilizar el cocedor solar de las 10:00 a las 14:00 horas.

2. Una cámara formada por una mitad cilíndrica aislada térmicamente, lugar que usamos para introducir los alimentos para su cocción, con dimensiones:

Parámetro	Dimensión (m)
Radio interno	0,44
Radio externo	0,505
Largo interno	1,90
Largo externo	2,05

3. Puerta de acceso a la cámara de cocción, con dimensiones:

Elemento	Ancho (m)	Radio Externo (m)	Espesor (m)
Puerta	1,00	0,50	0,08

4. Dos vidrios de separación entre el concentrador y el compartimiento de cocción, las dimensiones de éstos son:

Elemento	Ancho (m)	Largo (m)	Espesor (m)
Vidrios	0,94	0,84	0,006

5. Un sistema mecánico para graduar la inclinación del concentrador del cocedor, el intervalo de inclinación es de  $-10 \leq \gamma \leq 60^\circ$ .
6. Un sistema mecánico rodante dentro de la cámara de cocción, que sirve para mantener verticales las ollas que contienen la comida, las dimensiones de éste dispositivo es:

Elemento	Ancho (m)	Largo (m)
Base de ollas	0,28m	1,75

Son estas características que tiene nuestra cocedor, y a continuación desarrollaremos el comportamiento térmico del cocedor para 6 ollas de presión de 6 litros cada una.

### 7.2.2. Flujo de energía disipada hacia el ambiente $\dot{E}_{sale,T}$ .

El flujo de la energía total que sale del interior del cocedor se evalú al sustituir los valores de las dimensiones del cocedor y las propiedades físicas de los materiales de que se integra el cocedor, y al hacer las evaluaciones correspondientes obtenemos un valor de resistencia total de:

$$R_{Total} = 0,05K/W.$$

El valor de  $R_{Total} = 0,05K/W$  lo consideraremos como el valor teórico de las resistencia térmica total de nuestro cocedor solar de 6 ollas express. A continuación presentaremos la evaluación del flujo de energía acumulado en el interior del cocedor.

### 7.2.3. Evaluación del comportamiento térmico del cocedor el día 21 de Diciembre del año.

Para llevar a cabo las evaluaciones supondremos que  $\gamma = \theta_p |_{w=0^\circ}$ , para el día de la evaluación. Para el caso que estamos evaluando éste valor es  $\gamma = \theta_p = 42,3^\circ$ , y  $\delta = -23,5^\circ$ . entonces tenemos que:

1. Primero evaluaremos el  $\cos(\theta)$  para el día 21 de Diciembre, lo que expresamos como:

$$\cos(\theta) |_{21/Dic} = 0,84\cos(w) + 0,158.$$

2. Luego evaluamos  $\cos(\theta_z)$  para este día, por medio de la relación:

$$\cos(\theta_z) |_{21/Dic} = 0,868\cos(w) - 0,129.$$

3. A continuación evaluaremos  $\dot{E}_{ext}(355)$  por medio de la relación:

$$\dot{E}_{ext}(n = 355) = \frac{1363W/m^2 [1 + 0,01672(\cos[(353) \frac{360^\circ}{365,2}])]^2}{1 - (0,01672)^2} = 1408W/m^2,$$

donde se ha considerado  $\epsilon = 0,01672$ ,  $\dot{S} = 1363W/m^2$ .

4. Ahora evaluaremos  $\dot{E}_{entra,T}$ , lo cuál se realiza por medio de la relación:

$$\dot{E}_{entra,T} = (3000W)(0,84\cos(w) + 0,158)Exp[\frac{-0,142}{0,868\cos(w) - 0,129}] + (150W)[exp(\frac{-0,142}{(0,868\cos w - 0,129)})].$$

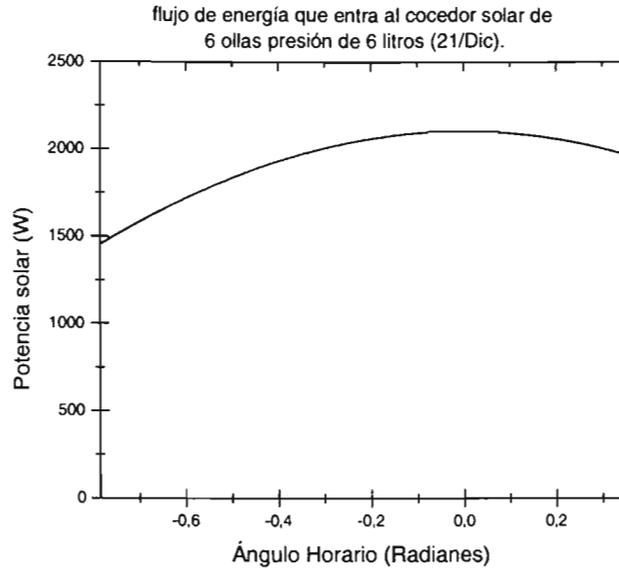


Figura 7.4: En la figura se muestra el comportamiento del flujo de la energía solar entre las 10:00 y 14:00 Horas, se consideró la reflectividad de 0.85 para los espejos planos.

5. La relación de la energía al graficarse para el intervalo de trabajo del cocedor solar de 10:00-14:00 hora local (horario de invierno México), se obtiene la curva representada en la figura 7.4.
6. La energía integral promedio es representada como:

$$\bar{E}_0 = \frac{1}{w|_{14:00} - w|_{10:00}} \int_{w|_{10:00}}^{w|_{14:00}} \dot{E}_{entra,T}(w) |_{n=355} dw,$$

la cual al resolver por medio de un integrador numérico nos da por resultados:

- Cuando la reflectividad de los espejos tiene un valor de 0.85, la energía promedio integral es  $\bar{E}_0 = 2392W$ .
7. Para evaluar la temperatura máxima  $T_{max}$  utilizaremos la relación:

$$T_{max} = \bar{E}_0 R_{Total} + T_{amb},$$

y como que el valor de la resistencia térmica total del cocedor de 6 ollas es  $R_{Total} = 0,05^{\circ}C/W$ , y la temperatura promedio mensual medida en nuestra estación solarimétrica y meteorológica del CIE-UNAM de Temixco Morelos, para el mes de Diciembre del año 2001 fue  $T_{amb} = 20^{\circ}C$ , y este valor usaremos en nuestras evaluaciones. Al sustituir los valores correspondientes en la relación para evaluar  $T_{max}$  obtenemos:

$$T_{max} |_{\rho_{espejos}=0,85} = (2392W)(0,05^{\circ}C) + 20^{\circ}C = 140^{\circ}C.$$

8. Ahora evaluaremos los valores de  $\tau$  para las cargas teóricas  $C_{T,n,ollas}$ , como:

cocción	Capacidad(J/°C)	R <sub>Total</sub> (°C/W)	τ(s)	tau(horas)
En vacío	32316	0.05	1616	0.45
Con comida en 4 ollas	70428	0.05	3521	0.98
Con comida en 6 ollas	83118	0.05	4156	1.15

9. Las relaciones teóricas del comportamiento térmico de la temperatura  $T(t)$  en el interior del cocedor, para cada una de las posibilidades se representan como:

- Cuando  $T_{max} = 140^{\circ}C$  y  $T_{amb} = 20^{\circ}C$  se obtienen las relaciones:

$$T(t) = T_{max}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + T_{amb}e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

a) En vacío se tiene la relación:

$$T(t) = 140^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{0,45})] + 20^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{0,45}). \quad (7.5)$$

b) Cocción de comida en cuatro ollas:

$$T(t) = 140^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{0,98})] + 20^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{0,98}). \quad (7.6)$$

c) Cocción de comida en seis ollas:

$$T(t) = 140^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{1,15})] + 20^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{1,15}). \quad (7.7)$$

Y la gráfica del comportamiento térmico descrito por las relaciones teóricas máximas para el 21 de Diciembre en día claro se muestran en la figura 7.5.

#### 7.2.4. Comentarios

Como los resultados son similares a los encontrados para los cocedores de 2 y 3 ollas, esperamos un resultado exitoso del diseño.

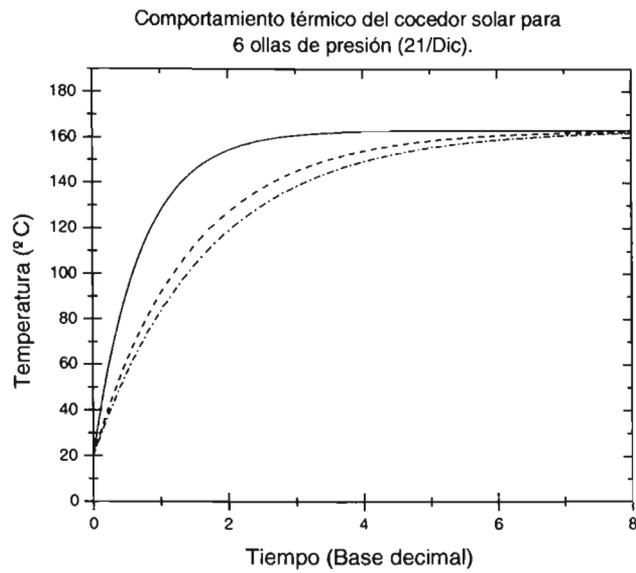


Figura 7.5: En la figura se muestra el comportamiento térmico del cocedor solar de 6 ollas express en el día 21 de Diciembre, en rojo con línea continua se muestra el comportamiento en vacío, en azul con línea intermitente se muestra el comportamiento con 4 ollas, y en rosa el comportamiento con 6 ollas.

## Capítulo 8

# Conclusiones

En este trabajo se presentó el diseño, modelo teórico para el comportamiento térmico, junto con la evaluación experimental de un cocedor solar. Podemos decir que los objetivos han sido cumplidos, pues realizamos lo siguiente:

1. Se diseñó el sistema de 4 espejos planos, para concentrar la energía de radiación solar, incrementando el flujo de energía captado en aproximadamente un 80 %, con respecto al uso del cocedor solar sin espejos concentradores.
2. Desarrollamos un modelo teórico del comportamiento dinámico de la temperatura en el interior del cocedor, y donde el modelo teórico aplica para cualquier cocedor solar donde los límites térmicos sean similares.
3. Los resultados experimentales nos mostraron que el modelo teórico del comportamiento térmico resultó adecuado, y puede ser utilizado para llevar a cabo predicciones teóricas muy acertadas, una vez que se conoce los valores de  $C_{T,n,ollas}$ ,  $R_{total,exp}$ ,  $T_{max}$  y la temperatura ambiente promedio del lugar  $T_{amb}$ .
4. Se desarrolló un procedimiento para medir experimentalmente la resistencia térmica total  $R_{total}$ . Con este procedimiento evaluamos la resistencia térmica total de nuestro cocedor, y encontramos una diferencia de 2 % con respecto a la resistencia térmica total teórica. Al tener esta aproximación tan cercana entre los valores teórico y experimental, nos permite poder utilizar cualquiera de los dos métodos para diseñar los cocedores solares eficaces.
5. El mecanismo de ajuste del ángulo de incidencia del flujo de rayos solares, nos permite obtener el máximo flujo de energía posible para cada día del año.
6. El sistema mecánico propuesto hace que nuestro cocedor cuente con energía adicional comparado con respecto a un cocedor de dos posiciones del mismo tamaño.
7. La puerta de acceso de los alimentos nos proporciona una simplicidad en la operación.
8. El aislamiento térmico del cocedor cumplió con la función de reducir el calor disipado al ambiente, y además la temperatura externa máxima del cocedor, es inferior a los  $35^{\circ}C$ , con lo cual se evitan quemaduras al usuario(a).
9. El sistema de respaldo eléctrico que se implementó facilita un mayor aprovechamiento de la energía disponible durante los días soleados del año, si así lo desea el usuario.

10. El sistema eléctrico nos proporcionó, un mecanismo eficaz para hacer una cocción convectiva dentro de las ollas, cuando el alimento contiene caldos. Esto hace que cualquier ama de casa pueda tener la confianza de sustituir la estufa convencional por un cocedor solar con respaldo eléctrico similar al que desarrollamos, y además obtener una comida mejor cocinada que en la estufa convencional.

Los anteriores puntos nos muestran que nuestro trabajo ha sido concluido de forma exitosa, donde nuestra aportación facilitará el diseño de cocedores solares y también hornos que utilicen otro tipo de energía como eléctrica o gas. Se podrán caracterizar adecuadamente, al conocer el valor de su resistencia térmica total y también al conocer la resistencia térmica total se podrá inferir el desempeño térmico del cocedor o cocedor diseñado, su capacidad máxima, y la energía de respaldo adicional necesaria para lograr un trabajo eficaz en la cocción de alimentos por el cocedor.

# Bibliografía

- [1] Acosta R., O.A. Jaramillo, J.J. Vázquez y J.A. del Río. *Diseño y emulación de un cocedor solar tipo caja*. Memorias de la XX Reunión Anual de Energía Solar ANES. Xalapa, Veracruz., 1996.
- [2] Anderson, E.E., *Fundamentals of Solar Energy Conversion*, Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1983.
- [3] Astirraga U.J., *Hornos Industriales de Resistencias*, McGraw-HILL/Interamericana de España, S. A. Madrid, España., 1994.
- [4] Elsgotz L., *Ecuaciones diferenciales y cálculo variacional*, Editorial MIR, Moscú, Ex-URRS., 1983.
- [5] Hernández-Luna G., *Diseño, Construcción de un Horno Solar Rural*, Tesis de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Junio, 2001.
- [6] Hernández-Luna G., *Estudio de un Horno Solar*, Tesis de Maestría en Ingeniería en el Área de Energía, Universidad Nacional Autónoma de México, Enero, 2004.
- [7] Isachenko V., y V. Osipova., *Transmisión del calor*, Marcombo, España., 1973.
- [8] Krasnoschiokov, E.A., y A.S. Sukomiel., *Problemas de termotransferencia*, Editorial MIR, Moscú, Ex-URRS, 1986.
- [9] Rapp. D., *Solar Energy*, Englerood Cliffs., New Jersey, USA., 1981.
- [10] Wark, K. y D.E. Richards, *Termodinámica*, McGraw-Hill., Madrid, España., 2001.
- [11] Çengel Y.A., *Heat Transfer*, McGraw-Hill., New York, USA., 2003.

# Apéndice A

## Geometría solar.

### A.1. Geometría del comportamiento del flujo de radiación solar.

En el desarrollo de hornos (cocedores) solares es muy importante, saber el comportamiento de la energía durante cada uno de los días del año. Y como la energía recibida en cada lugar específico de la tierra, depende del ángulo de incidencia del flujo de rayos solares, y este flujo de rayos solares depende en cada lugar de la declinación de la tierra, así también del comportamiento dinámico de rotación de la tierra alrededor de su eje, y de la traslación de la tierra alrededor del sol. Por tanto se hace necesario hacer un desarrollo de la geometría usual para relacionar el comportamiento de la energía durante todo el año. A continuación iniciaremos presentando que es la declinación solar.

#### A.1.1. Declinación solar.

El plano ecuatorial de la tierra, definido como el plano perpendicular al eje de rotación de la tierra, presenta un ángulo, llamado declinación con respecto al flujo de los rayos luminosos solares, en la figura A.1 mostramos el ángulo de declinación del flujo luminoso  $\delta$ , así también se muestra el ángulo de la latitud  $\phi$  de un lugar de la tierra, el cual se mide con grados positivos hacia el polo norte y grados negativos al medir la latitud hacia el polo sur, y el cero grados de latitud está en el ecuador. El ángulo  $\delta$  toma valores positivos en latitudes norte y valores negativos en latitudes sur, por tanto la declinación tiene valores durante el año que van desde  $\delta = -23,45^\circ$  hasta  $\delta = 23,45^\circ$ . Una de las relaciones que nos da la evolución de  $\delta$  durante el año es la relación:

$$\delta = 23,45^\circ \text{sen}\left(\frac{360^\circ}{365}(284 + n)\right), \quad (\text{A.1})$$

donde  $n$  es el día del año, y  $n = 1$  es asignado al 1 de Enero del año, y finaliza en el día  $n = 365$  el 31 de Diciembre. La declinación tiene su influencia en la duración del día y la noche, en los días  $n = 81$  (21 de Marzo) y  $n = 264$  (23 de Septiembre), se tiene una declinación  $\delta = 0^\circ$ , y esto hace que en el ecuador el día tenga duración igual a la duración de la noche, es decir 12 horas, estos días son llamados equinoccios. El 21 de Junio se tiene el solsticio de verano, día en el cual la declinación es positiva y tiene un valor  $\delta = 23,45^\circ$ , con esto en el hemisferio norte se tiene el día más largo, y en el hemisferio sur se tiene el día más corto. El día 21 de Diciembre se tiene el solsticio de invierno, cuando la declinación  $\delta = -23,45^\circ$ , lo que es causa en el hemisferio norte, el tener el día más corto, y en el hemisferio sur el día más largo. Son los días de los equinoccios y solsticios, donde tenemos los valores extremos de los ángulos zenital  $\theta_z$ , y es en estos días donde realizaremos nuestras evaluaciones de la energía. Continuaremos ahora presentando el sistema de referencia ubicado en la superficie de la tierra donde se encuentra el observador.

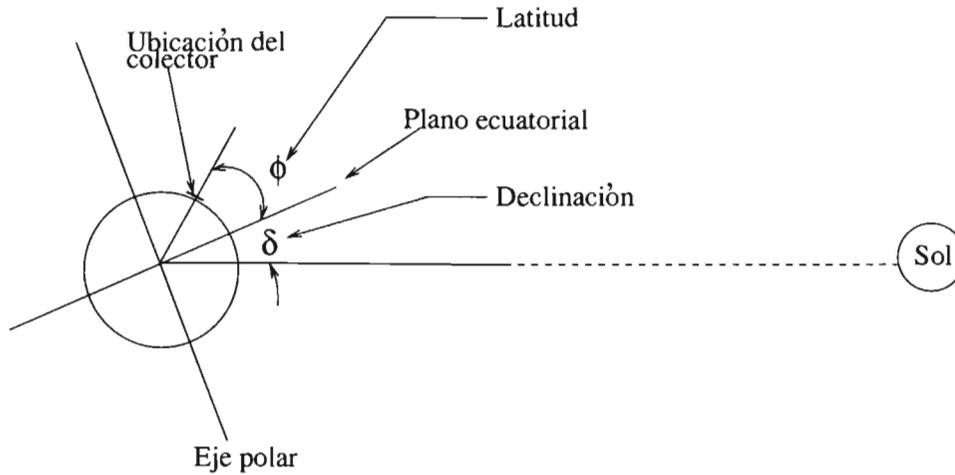


Figura A.1: Esquema del ángulo de declinación solar de la Tierra.

### A.1.2. Sistema de referencia aparente.

Para describir la posición del Sol desde el punto de referencia del observador, usaremos la figura A.2, en este sistema por medio de los dos ángulos  $\theta_z$  y  $\gamma_s$ , se puede describir el flujo de radiación solar, el cual matemáticamente expresa el vector  $\vec{S}$  como:

$$\vec{S} = \text{sen}(\theta_z)\text{cos}(\gamma_s)\hat{i} + \text{sen}(\theta_z)\text{sen}(\gamma_s)\hat{j} + \text{cos}(\theta_z)\hat{k}, \quad (\text{A.2})$$

en donde el ángulo  $\theta_z$  es llamado ángulo zenital, y es medido con respecto a la vertical, y  $\gamma_s$  es llamado ángulo azimutal, y es medido con respecto al eje sur, con grados cero cuando la proyección se encuentra sobre el eje norte-sur  $S$ , y grados positivos en el lado este, y grados negativos en el lado oeste. A continuación presentaremos como se representa el vector de los rayos solares en un sistema tomando el origen en el centro de la tierra.

### A.1.3. Sistema coordenado con origen en el centro de la tierra.

Para describir el campo vectorial del flujo de radiación solar desde el marco de referencia del centro de la tierra usaremos la figura A.3, en ésta figura se muestra el ángulo horario  $w$  y el ángulo de declinación solar  $\delta$ , y por medio de estos ángulos el vector  $\vec{S}$  se expresa como:

$$\vec{S} = \text{cos}(\delta)\text{cos}(w)\hat{i}'' + \text{cos}(\delta)\text{sen}(w)\hat{j}'' + \text{sen}(\delta)\hat{k}'', \quad (\text{A.3})$$

donde  $w$  es el ángulo solar que corresponde  $15^\circ/Hr$ , es decir cada hora el Sol avanza aparentemente  $15^\circ$ , y donde se tiene la convención de los ángulos, positivos en las mañanas y negativos por la tarde, y también  $w = 0^\circ$  cuando  $\vec{S}$  apunta sobre el meridiano (eje  $m$ ). El tiempo solar coincide con el tiempo estándar de los meridianos. Para saber el tiempo solar en un lugar específico, es necesario hacer las correcciones angulares con respecto al meridiano de la zona, conociendo la longitud del lugar y con la consideración de que el ángulo solar avanza  $15^\circ/Hr$ . El eje  $p$  es llamado eje polar, y que apunta hacia el polo Norte, mientras que  $\delta$  es la declinación solar que ya hemos mencionado. Ahora es conveniente conocer las relaciones del ángulo  $\theta_z$  y  $\gamma_s$  con respecto a los ángulos  $w$  y  $\delta$ , así como  $\phi$ . Esto lo evaluaremos a continuación, encontrando las relaciones de transformación de los vectores unitarios  $(i, j, k)$  con respecto a los ejes  $(i'', j'', k'')$ .

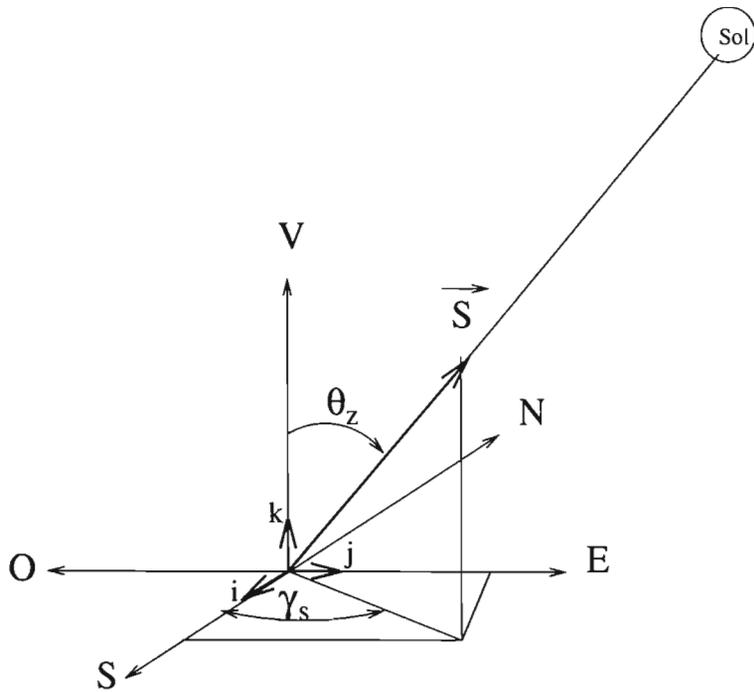


Figura A.2: Sistema de coordenadas local para descripción de la posición del Sol.

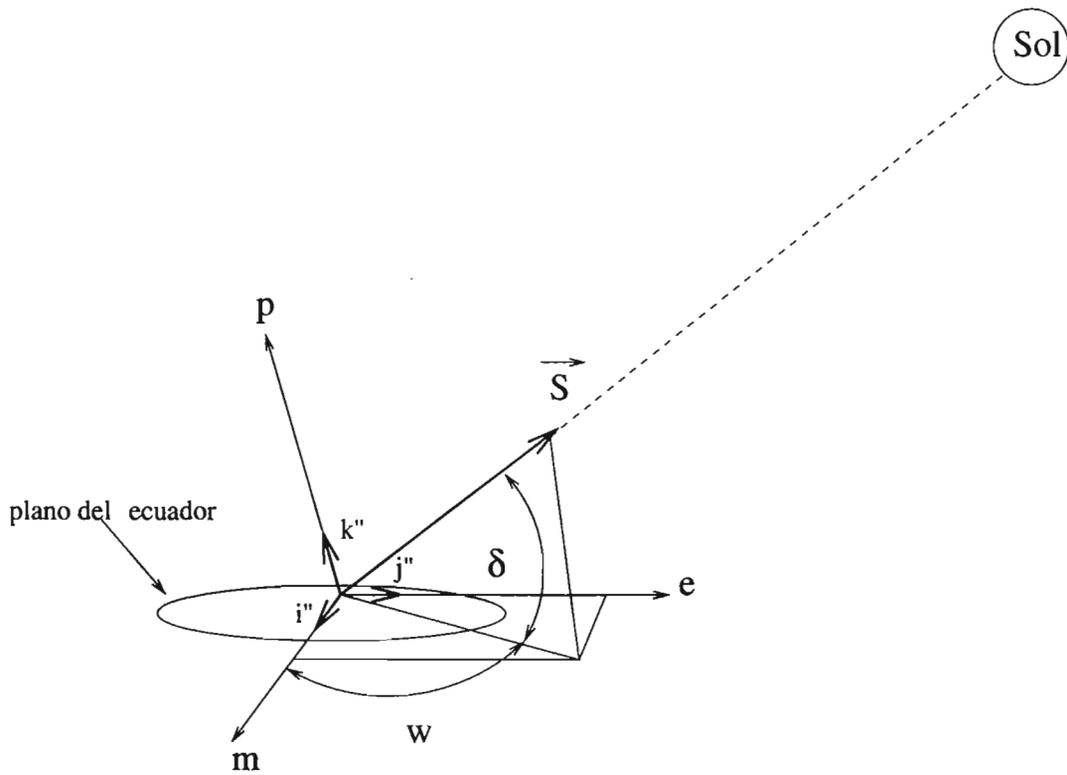


Figura A.3: Esquema del sistema de referencia con origen en el centro de la tierra para descripción de la posición del Sol.

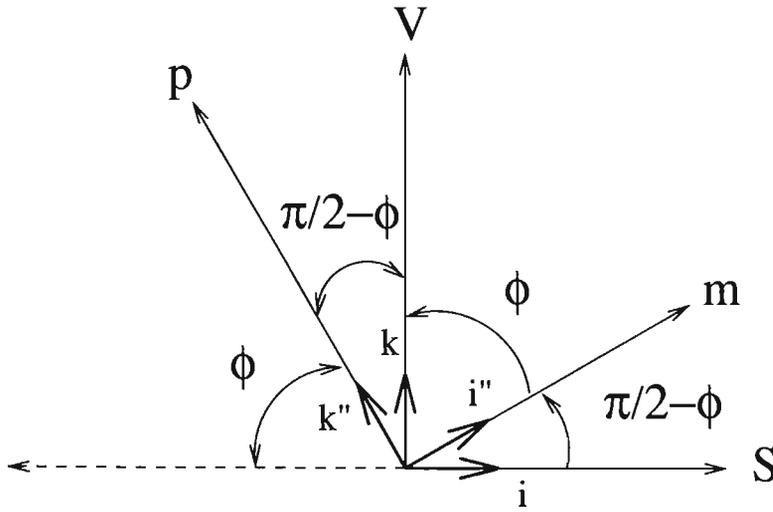


Figura A.4: Esquema para realizar la transformación de coordenadas.

#### A.1.4. Representaciones de $\vec{S}$ en ambos sistemas de referencia y expresiones de los ángulos $\theta_z$ y $\gamma_s$ .

Una vez que hemos hecho la descripción de  $\vec{S}$  en ambos sistemas de referencia, buscaremos las expresiones de los ángulos  $\theta_z$  y  $\gamma_s$  con respecto a los ángulos  $w$  y  $\delta$  Así como  $\phi$ . En la figura A.4 podemos ver con origen común, los vectores unitarios de los sistemas de referencia descritos anteriormente, el sistema de referencia aparente y el centrado en el centro de la tierra. En este sistema común se representa el plano donde se muestra, los ejes para el plano de los vectores, que se pueden representar como  $(S, 0, V)$  y los ejes para el plano, de los vectores que se pueden representar como  $(m, 0, p)$ , los ejes  $e$  y  $E$  serán comunes a ambos sistemas de referencia. El ángulo  $\phi$  es la latitud que ya mencionamos anteriormente. En la figura A.4 podemos observar que el vector  $\vec{i}$  se puede representar con respecto a los vectores  $\vec{i}''$  y  $\vec{k}''$  como:

$$\hat{i} = \hat{i}'' \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) - \hat{k}'' \cos(\phi), \quad (\text{A.4})$$

y se sabe que:

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) = \text{sen}\phi, \quad (\text{A.5})$$

sustituyendo este valor de la ecuación A.5 en la ecuación A.4 obtenemos:

$$\hat{i} = \hat{i}'' \text{sen}(\phi) - \hat{k}'' \cos(\phi), \quad (\text{A.6})$$

Para el vector  $\hat{k}$  se puede observar de la figura A.4 que:

$$\hat{k} = \hat{i}'' \cos(\phi) + \hat{k}'' \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right), \quad (\text{A.7})$$

y si sustituimos la relación A.5 en la relación A.7 obtenemos:

$$\hat{k} = \hat{i}'' \cos\phi + \hat{k}'' \text{sen}\phi, \quad (\text{A.8})$$

las relaciones A.6 y A.8 son las relaciones de transformación del sistema de referencia aparente al sistema de referencia con origen en el centro de la tierra. Al recordar que  $\vec{S}$  se representa en el sistema con origen en el centro de la tierra como:

$$\vec{S} = \hat{i}'' \cos(\delta) \cos(w) + \hat{j}'' \cos(\delta) \text{sen}(w) + \hat{k}'' \text{sen}(\delta), \quad (\text{A.9})$$

como  $\hat{k}$  es el vector que sale del eje  $V$ , podemos evaluar el  $\cos(\theta_z)$ , si utilizamos las relaciones A.8 y A.9 en el producto punto vectorial de  $\hat{k}$  con  $\vec{S}$ , obtenemos:

$$\cos(\theta_z) = \hat{k} \cdot \vec{S} = \cos(\delta)\cos(w)\cos(\phi) + \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi) \quad (\text{A.10})$$

donde  $\theta_z$  es el ángulo que se forma entre el eje vertical  $V$  representado por el vector  $\hat{k}$  y el vector  $\vec{S}$  representación del flujo de energía solar. La ecuación A.10 nos permite evaluar  $\theta_z$  como función de  $(\delta, w, \phi)$ . Ahora presentaremos la evaluación de  $\gamma_s$ , para esto utilizaremos la propiedad de que los ejes  $e$  y  $E$  son comunes, y por tanto las componentes  $\hat{j}$  y  $\hat{j}''$  son iguales, de las relaciones A.2 y A.3 estas componentes son:

$$S_{\hat{j}} = \text{sen}(\theta_z)\text{sen}(\gamma_s) \quad (\text{A.11})$$

$$S_{\hat{j}''} = \cos(\delta)\text{sen}(w) \quad (\text{A.12})$$

$$S_{\hat{j}} = S_{\hat{j}''} \quad (\text{A.13})$$

$$\text{sen}(\theta_z)\text{sen}(\gamma_s) = \cos(\delta)\text{sen}(w). \quad (\text{A.14})$$

Entonces despejando  $\text{sen}(\gamma_s)$  obtenemos:

$$\text{sen}(\gamma_s) = \frac{\cos(\delta)\text{sen}(w)}{\text{sen}(\theta_z)}, \quad (\text{A.15})$$

La relación A.15 nos permite evaluar  $\gamma_s$  como función de  $(\delta, w, \phi)$ , con lo cual contamos con herramienta de los ángulos zenital y azimutal utilizando los ángulos de latitud  $\phi$ , Declinación  $\delta$  y ángulo horario  $w$ .

Pasaremos a continuación a mostrar como evaluaremos el ángulo de incidencia de una superficie inclinada.

#### A.1.5. Evaluación del ángulo de incidencia del flujo de radiación solar sobre una superficie inclinada.

Para hacer el desarrollo de la evaluación del ángulo de incidencia del flujo de radiación solar sobre una superficie, que tiene un ángulo de inclinación  $\alpha$  usaremos la figura A.5. En esta figura se puede observar que si hacemos uso de los ángulos  $\alpha$  y  $\gamma$ , el vector normal  $\vec{N}$  a la superficie del colector, tiene la representación matemática de la relación:

$$\vec{N} = \hat{i}\text{sen}(\alpha)\cos(\gamma) + \hat{j}\text{sen}(\alpha)\text{sen}(\gamma) + \hat{k}\cos(\alpha). \quad (\text{A.16})$$

Y para encontrar el  $\cos(\theta)$ , donde  $\theta$  es el ángulo que forma la normal  $\vec{N}$  y la representación del flujo de radiación solar  $\vec{S}$ , hacemos uso del producto punto vectorial entre  $\vec{N}$  y  $\vec{S}$ , por tanto tenemos que:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = \vec{N} \cdot \vec{S} = & \text{sen}(\alpha)\cos(\gamma)\text{sen}(\theta_z)\cos(\gamma_s) + \\ & + \text{sen}(\alpha)\text{sen}(\gamma)\text{sen}(\theta_z)\text{sen}(\gamma_s) + \cos(\alpha)\cos(\theta_z), \end{aligned} \quad (\text{A.17})$$

si agrupamos términos obtenemos:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \text{sen}(\theta_z)\text{sen}(\alpha)[\cos(\gamma)\cos(\gamma_s) + \text{sen}(\gamma)\text{sen}(\gamma_s)] + \\ & + \cos(\alpha)\cos(\theta_z), \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

pero se sabe que:

$$\cos(\gamma_s - \gamma) = \cos(\gamma)\cos(\gamma_s) + \text{sen}(\gamma)\text{sen}(\gamma_s), \quad (\text{A.19})$$

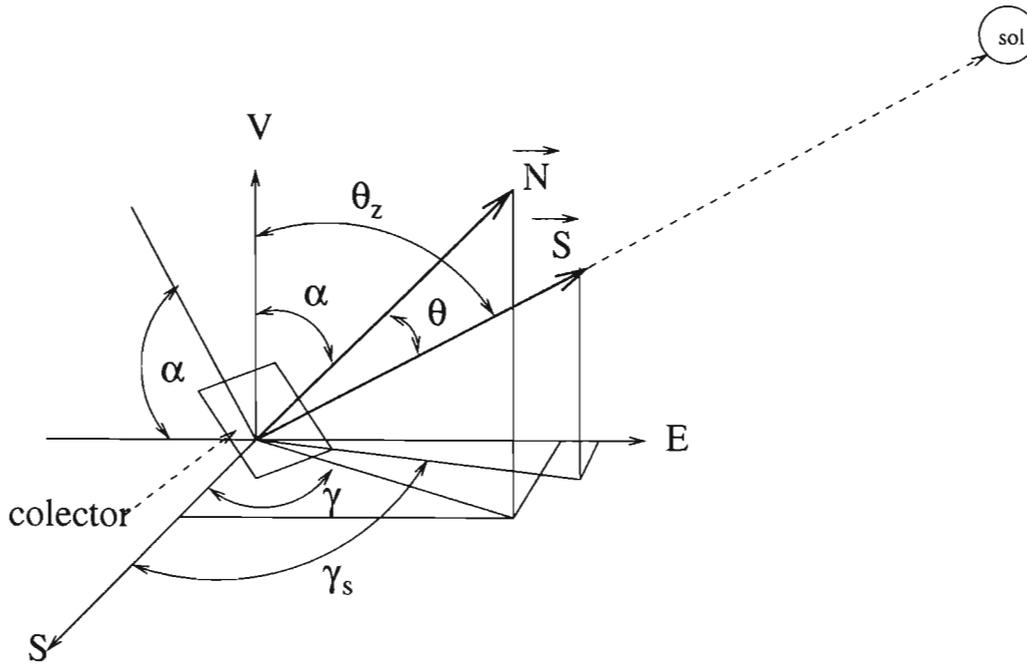


Figura A.5: Esquema de superficie inclinada y ángulo de incidencia de radiación solar.

si sustituimos la relación A.19 en la relación A.18 obtenemos:

$$\cos(\theta) = \text{sen}(\theta_z)\text{sen}(\alpha)\cos(\gamma_s - \gamma) + \cos(\alpha)\cos(\theta_z), \quad (\text{A.20})$$

la relación A.20 es la expresión de  $\cos(\theta)$  en función de los ángulos  $\theta_z$ ,  $\gamma$ ,  $\gamma_s$  y el ángulo de inclinación  $\alpha$ .

Aunque ya tenemos la relación A.20 para poder encontrar el ángulo  $\theta$ , es deseable conocer también la relación  $\cos(\theta)$  en función de los ángulos  $\delta$ ,  $\phi$  y  $w$ , esto con el fin de realizar evaluaciones directas con estos parámetros.

Para encontrar la relación de  $\cos(\theta)$  en función de los parámetros citados, expresaremos  $\vec{N}$  en el sistema de referencia  $(m, e, p)$ . Para esto sustituiremos las relaciones de transformación de  $\hat{i}$  y  $\hat{k}$  como función de  $\hat{i}^n$  y  $\hat{k}^n$ , que son las relaciones A.6 y A.8, en la relación A.16 y obtenemos:

$$\begin{aligned} \vec{N} = & (\hat{i}^n \text{sen}(\phi) - \hat{k}^n \cos(\phi))\text{sen}(\alpha)\cos(\gamma) + \hat{j}^n \text{sen}(\alpha)\text{sen}(\gamma) + \\ & + (\hat{i}^n \cos\phi + \hat{k}^n \text{sen}\phi)\cos(\alpha), \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

recordando que el vector  $\vec{S}$  en el sistema  $(m, e, p)$  es:

$$\vec{S} = \cos(\delta)\cos(w)\hat{i}^n + \cos(\delta)\text{sen}(w)\hat{j}^n + \text{sen}(\delta)\hat{k}^n, \quad (\text{A.22})$$

Ahora como sabemos que el  $\cos(\theta)$  es el producto punto de los vectores  $\vec{N}$  con  $\vec{S}$ , entonces utilizando las relaciones A.21 y A.22 para realizar  $\vec{N} \cdot \vec{S}$  obtenemos:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = \vec{N} \cdot \vec{S} = & \text{sen}(\phi)\text{sen}(\alpha)\cos(\gamma)\cos(\delta)\cos(w) + \\ & + \cos(\phi)\cos(\alpha)\cos(\delta)\cos(w) + \text{sen}(\alpha)\text{sen}(\gamma)\cos(\delta)\text{sen}(w) + \\ & + \text{sen}(\phi)\cos(\alpha)\text{sen}(\delta) - \cos(\phi)\text{sen}(\alpha)\cos(\gamma)\text{sen}(\delta), \end{aligned} \quad (\text{A.23})$$

la relación A.23 es la relación para obtener el  $\cos(\theta)$  en función de  $\delta$ ,  $\phi$  y  $w$ , así como de  $\gamma$ . Sin embargo es común alinear los concentradores con el eje Norte-Sur por lo que se tiene  $\gamma = 0^\circ$  y con

esto  $\cos(\gamma) = 1$  y  $\text{sen}(\gamma) = 0$  y al sustituir esto en la relación A.23 obtenemos:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \text{sen}(\phi)\text{sen}(\alpha)\cos(\delta)\cos(\omega) + \cos(\phi)\cos(\alpha)\cos(\delta)\cos(\omega) + \\ & + \text{sen}(\phi)\cos(\alpha)\text{sen}(\delta) - \cos(\phi)\text{sen}(\alpha)\text{sen}(\delta), \end{aligned} \quad (\text{A.24})$$

Si agrupamos los factores comunes obtenemos:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \cos(\delta)\cos(\omega)[\cos(\phi)\cos(\alpha) + \text{sen}(\phi)\text{sen}(\alpha)] + \\ & + \text{sen}(\delta)[\text{sen}(\phi)\cos(\alpha) - \cos(\phi)\text{sen}(\alpha)], \end{aligned} \quad (\text{A.25})$$

pero sabemos que:

$$\cos(\phi - \alpha) = \cos(\phi)\cos(\alpha) + \text{sen}(\phi)\text{sen}(\alpha), \quad (\text{A.26})$$

$$\text{sen}(\phi - \alpha) = \text{sen}(\phi)\cos(\alpha) - \cos(\phi)\text{sen}(\alpha), \quad (\text{A.27})$$

entonces la relación A.25 se puede escribir como:

$$\cos(\theta) = \cos(\delta)\cos(\omega)\cos(\phi - \alpha) + \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi - \alpha), \quad (\text{A.28})$$

con esta relación contamos ya con la herramienta de evaluación del ángulo  $\theta$  en cualquiera de los dos marcos de referencia.

Para conocer el desempeño de nuestro sistema de concentración, es necesario saber la cantidad de energía que se puede aprovechar, al hacer incidir los rayos solares sobre un plano inclinado, y para esto debemos saber el valor de la proyección del flujo de radiación solar sobre el plano azimutal. Por tanto a continuación presentaremos la evaluación del ángulo  $\theta_p$  que es el ángulo que forma, la proyección de  $\vec{S}$  sobre la pared azimutal y la vertical.

#### A.1.6. Evaluación del ángulo $\theta_p$ .

Cuando la componente horizontal de  $\vec{S}$  es proyectado en el plano azimutal del concentrador, la magnitud se convierte en  $\text{sen}\theta_z\cos(\gamma_s - \gamma)$ , mientras que la componente vertical sigue siendo  $\cos\theta_z$ . El ángulo entre la vertical y la proyección de  $\vec{S}$  es el ángulo del perfil solar:

$$\theta_p = \text{Arctan}[\tan(\theta_z)\cos(\gamma_s - \gamma)]. \quad (\text{A.29})$$

Durante el día, el ángulo  $\theta_p$  alcanzara su mínimo cuando  $\gamma_s = \gamma$  y su máximo al inicio del día ó en la puesta del sol. Cuando el concentrador esta alineado con el eje Norte-sur, se tiene  $\gamma = 0^\circ$ , entoncés la relación A.29 se transforma en:

$$\theta_p = \text{Arctan}[\tan(\theta_z)\cos(\gamma_s)]. \quad (\text{A.30})$$

En la relación A.30 ocurrira el mínimo al medio día solar, y el máximo, en la salida del Sol del colector, y también en la puesta del Sol del colector.

## Apéndice B

# Concentrador de 4 espejos planos.

En este apéndice presentaremos el desarrollo de cómo se evaluaría un concentrador de espejos planos fijos, con dos ajustes durante el año, similar al modelo desarrollado en el CIE para dos posiciones de ajuste y cuatro espejos planos.

Para diseñar los espejos consideraremos que sólo utilizaremos el cocedor entre las 10 y 14 horas, por tanto la trayectoria solar cubrirá en su recorrido diario un ángulo de  $-30^\circ \leq w \leq 30^\circ$  con respecto a la normal del cocedor, normal que tendrá un ajuste semanal, utilizando una guía de sombra de dos puntos. Luego entonces el ángulo que asinaremos a los dos espejos este y oeste será de  $60^\circ$  con respecto al plano inclinado. La longitud de cada espejo será asignada en proporción 1 : 1 con respecto a la longitud de concentración en dirección Este-Oeste.

### B.1. Diseño de los espejos norte y sur del concentrador del cocedor solar para 2 posiciones.

Para el diseño de los espejos seguiremos a E.Anderson Edward [2], de la geometría mostrada en la figura B.1 se pueden obtener las relaciones:

$$w_1 = -w_c \frac{\cos(\alpha + \theta_p - 2\theta_1)}{\cos(\theta_1 - \theta_p)}, \quad (\text{B.1})$$

$$w_2 = -w_c \frac{\cos(\alpha + \theta_p + 2\theta_2)}{\cos(\theta_p + \theta_2)}, \quad (\text{B.2})$$

$$w_3 = w_1 \cos(\theta_1 - \theta_p) - w_2 \cos(\theta_2 + \theta_p) + w_c \cos(\alpha - \theta_p), \quad (\text{B.3})$$

donde se tiene que:

$$\theta_1 \leq \frac{\theta_p + \alpha}{2} - 45^\circ, \quad (\text{B.4})$$

$$\theta_2 \geq 45^\circ - \frac{\theta_p + \alpha}{2}, \quad (\text{B.5})$$

y el ángulo  $\theta_p$  esta dado por la relación:

$$\theta_p = \text{ArcTan}(\text{Tan}\theta_z \text{Cos}(\gamma_s - \gamma)), \quad (\text{B.6})$$

donde tenemos que  $\gamma_s$  es el ángulo azimutal, proyección del rayo luminoso, y  $\gamma$  es la proyección del rayo luminoso sobre el plano azimutal del concentrador. El factor del incremento del área de concentración de energía es:

$$FI = \frac{w_3}{w_c \cos(\alpha - \theta_p)} = \frac{w_1 \cos(\theta_p - \theta_1)}{w_c \cos(\alpha - \theta_p)} - \frac{w_2 \cos(\theta_2 + \theta_p)}{w_c \cos(\alpha - \theta_p)} + 1, \quad (\text{B.7})$$

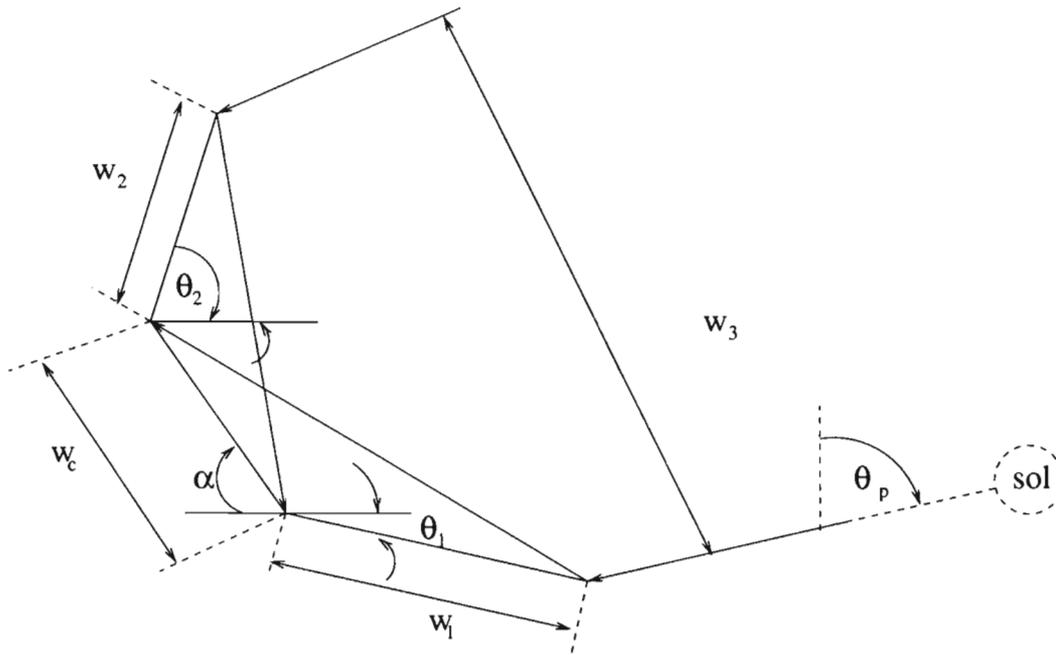


Figura B.1: Esquema para evaluación de la longitud de los espejos Norte y Sur del concentrador de cuatro espejos planos del cocedor solar.

podemos observar que entre más se acerque a cero la diferencia entre  $\alpha - \theta_p$ , el factor  $FI$  será mayor. Entonces con el fin de optimizar el concentrador debemos encontrar el valor o valores de más recomendables durante el año, vamos a evaluar los ángulos  $\theta_z$ ,  $\gamma_s$  y  $\theta_p$ .

### Evaluación de los ángulos $\theta_z$ , $\gamma_s$ y $\theta_p$ durante los Equinoccios y solsticios.

Los días que nos determinan los ángulos extremos de  $\theta_z$  y  $\theta_p$ , se encuentran en los días de los equinoccios y solsticios. Los equinoccios se tiene en los días 21 de Marzo y 22 de Septiembre, y los solsticios se tienen en los días 22 de Diciembre y 21 de Junio.

### Evaluación de los ángulos $\theta_z$ , $\gamma_s$ y $\theta_p$ en el 21 de Marzo.

Primero aclararemos que las relaciones que usaremos son las relaciones A.10, A.15 y A.29: que se muestran a continuación:

$$\begin{aligned} \cos(\theta_z) &= \cos(\delta)\cos(w)\cos(\phi) + \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi), \\ \text{sen}(\gamma_s) &= \frac{\cos(\delta)\text{sen}(w)}{\text{sen}(\theta_z)}, \\ \theta_p &= \text{ArcTan}(\text{Tan}\theta_z\text{Cos}(\gamma_s)), \end{aligned}$$

para encontrar los valores de  $\theta_z$ ,  $\gamma_s$  y  $\theta_p$ , es necesario conocer el valor de de latitud  $\phi$ , y este valor fue localizado en la enciclopedia "Encarta" encontrandose un valor  $\phi = 18^\circ 51' = 18,85^\circ$ . El valor de  $\delta$  lo hemos resumido en el cuadro B.1, y con estos datos podemos hacer la evaluación de los ángulos correspondientes. Evaluaremos los ángulos para  $w = 0^\circ$ ,  $w = 15^\circ$  y  $w = 30^\circ$ , que equivale a evaluar para las horas solares  $H = 12$ ,  $H = 11$  y  $H = 10$ . A continuación presentamos los cálculos al sustituir los valores de  $\delta$ ,  $\phi$  en la relación del  $\cos(\theta_z)$  como se muestra a continuación:

Día/Mes	Valor $\delta$
21/Marzo	$0^\circ$
21/Junio	$23,45^\circ$
22/Septiembre	$0^\circ$
22/Diciembre	$-23,45^\circ$

Cuadro B.1: Valores del ángulo de declinación  $\delta$  en los solsticios y equinoccios.

$$\cos(\theta_z) = \cos(0^\circ)\cos(w)\cos(18,85^\circ) + \text{sen}(0^\circ)\text{sen}(18,85^\circ), \quad (\text{B.8})$$

$$\cos(\theta_z |_{w=0^\circ}) = (0,9464)\cos(0^\circ) = 0,9464 \Rightarrow \theta_z = 18,85^\circ, \quad (\text{B.9})$$

$$\cos(\theta_z |_{w=15^\circ}) = (0,9464)\cos(15^\circ) = 0,9142 \Rightarrow \theta_z = 23,91^\circ, \quad (\text{B.10})$$

$$\cos(\theta_z |_{w=30^\circ}) = (0,9464)\cos(30^\circ) = 0,8196 \Rightarrow \theta_z = 34,95^\circ. \quad (\text{B.11})$$

Ahora evaluaremos los valores de  $\gamma_s$  a continuación:

$$\text{sen}(\gamma_s) = \frac{\cos(0^\circ)\text{sen}(w)}{\text{sen}(\theta_z)}, \quad (\text{B.12})$$

$$\text{sen}(\gamma_s |_{w=0^\circ}) = \frac{\text{sen}(0^\circ)}{0,323} = 0 \Rightarrow \gamma_s = 0^\circ, \quad (\text{B.13})$$

$$\text{sen}(\gamma_s |_{w=15^\circ}) = \frac{\text{sen}(15^\circ)}{\text{sen}(23,91^\circ)} = 0,6386 \Rightarrow \gamma_s = 39,68^\circ, \quad (\text{B.14})$$

$$\text{sen}(\gamma_s |_{w=30^\circ}) = \frac{\text{sen}(30^\circ)}{\text{sen}(34,95^\circ)} = 0,8828 \Rightarrow \gamma_s = 61,98^\circ, \quad (\text{B.15})$$

a continuación evaluaremos  $\theta_p$

$$\theta_p = \text{ArcTan}(\text{Tan}\theta_z \text{Cos}(\gamma_s)), \quad (\text{B.16})$$

$$\theta_p |_{w=0^\circ} = \text{ArcTan}(\text{Tan}(18,85^\circ)\text{Cos}(0^\circ)) = 18,85^\circ, \quad (\text{B.17})$$

$$\theta_p |_{w=15^\circ} = \text{ArcTan}(\text{tan}(23,91^\circ)\text{Cos}(39,68^\circ)) = 18,84^\circ, \quad (\text{B.18})$$

$$\theta_p |_{w=30^\circ} = \text{ArcTan}(\text{Tan}(34,95^\circ)\text{Cos}(61,98^\circ)) = 18,18^\circ, \quad (\text{B.19})$$

$$(\text{B.20})$$

a continuación evaluaremos los ángulos el 21 de Junio.

### Evaluación de los ángulos $\theta_z$ , $\gamma_s$ y $\theta_p$ en el 21 de Junio.

También aquí usaremos las relaciones A.10, A.15 y A.29. para encontrar los valores de  $\theta_z$ ,  $\gamma_s$  y  $\theta_p$ , seguiremos el procedimiento utilizado para la evaluación del 21 de marzo. considerando que  $\delta = 23,45^\circ$  y  $\phi = 18,85^\circ$

$$\cos(\theta_z) = \cos(23,45^\circ)\cos(w)\cos(18,85^\circ) + \text{sen}(23,45^\circ)\text{sen}(18,85^\circ), \quad (\text{B.21})$$

$$\cos(\theta_z) = 0,8682\cos(w) + 0,1286, \quad (\text{B.22})$$

$$\cos(\theta_z |_{w=0^\circ}) = (0,8682)\cos(0^\circ) + 0,1286 = 0,9968 \Rightarrow \theta_z = 4,58^\circ, \quad (\text{B.23})$$

$$\cos(\theta_z |_{w=15^\circ}) = (0,8682)\cos(15^\circ) + 0,1286 = 0,9672 \Rightarrow \theta_z = 14,72^\circ, \quad (\text{B.24})$$

$$\cos(\theta_z |_{w=30^\circ}) = (0,8682)\cos(30^\circ) + 0,1286 = 0,8804 \Rightarrow \theta_z = 28,30^\circ. \quad (\text{B.25})$$

Ahora evaluaremos los valores de  $\gamma_s$  a continuación:

$$\text{sen}(\gamma_s) = \frac{\cos(\delta)\text{sen}(w)}{\text{sen}(\theta_z)},$$

$$\text{sen}(\gamma_s |_{w=0^\circ}) = \frac{\cos(23,45^\circ)\text{sen}(0^\circ)}{0,323} = 0 \Rightarrow \gamma_s = 0^\circ, \quad (\text{B.26})$$

$$\text{sen}(\gamma_s |_{w=15^\circ}) = \frac{\cos(23,45^\circ)\text{sen}(15^\circ)}{\text{sen}(14,72^\circ)} = 0,9345 \Rightarrow \gamma_s = 69,14^\circ, \quad (\text{B.27})$$

$$\text{sen}(\gamma_s |_{w=30^\circ}) = \frac{\cos(23,45^\circ)\text{sen}(30^\circ)}{\text{sen}(28,3^\circ)} = 0,8828 \Rightarrow \gamma_s = 75,36^\circ, \quad (\text{B.28})$$

a continuación evaluaremos  $\theta_p$

$$\theta_p = \text{ArcTan}(\text{Tan}\theta_z \text{Cos}(\gamma_s)), \quad (\text{B.29})$$

$$\theta_p |_{w=0^\circ} = \text{ArcTan}(\text{Tan}(4,58^\circ)\text{Cos}(0^\circ)) = 4,58^\circ, \quad (\text{B.30})$$

$$\theta_p |_{w=15^\circ} = \text{ArcTan}(\text{tan}(14,72^\circ)\text{Cos}(69,14^\circ)) = 5,34^\circ, \quad (\text{B.31})$$

$$\theta_p |_{w=30^\circ} = \text{ArcTan}(\text{Tan}(28,3^\circ)\text{Cos}(75,36^\circ)) = 7,75^\circ, \quad (\text{B.32})$$

$$(\text{B.33})$$

a continuación evaluaremos los ángulos el 22 de Septiembre.

### Evaluación de los ángulos $\theta_z$ , $\gamma_s$ y $\theta_p$ en el 22 de Septiembre.

También aquí usaremos las relaciones A.10, A.15 y A.29. para encontrar los valores de  $\theta_z$ ,  $\gamma_s$  y  $\theta_p$ , seguiremos el procedimiento utilizado para la evaluación del 21 de Marzo. considerando que  $\delta = 0^\circ$  y  $\phi = 18,85^\circ$  tenemos que si:

$$\cos(\theta_z) = \cos(\delta)\cos(w)\cos(\phi) + \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi),$$

$$\cos(\theta_z) = \cos(0^\circ)\cos(w)\cos(18,85^\circ) + \text{sen}(0^\circ)\text{sen}(18,85^\circ), \quad (\text{B.34})$$

$$\cos(\theta_z) = 0,9464\cos(w), \quad (\text{B.35})$$

$$\cos(\theta_z |_{w=0^\circ}) = (0,9464)\cos(0^\circ) = 0,9464 \Rightarrow \theta_z = 18,85^\circ, \quad (\text{B.36})$$

$$\cos(\theta_z |_{w=15^\circ}) = (0,9464)\cos(15^\circ) = 0,9142 \Rightarrow \theta_z = 23,91^\circ, \quad (\text{B.37})$$

$$\cos(\theta_z |_{w=30^\circ}) = (0,9464)\cos(30^\circ) = 0,8196 \Rightarrow \theta_z = 34,95^\circ. \quad (\text{B.38})$$

Ahora evaluaremos los valores de  $\gamma_s$  a continuación:

$$\text{sen}(\gamma_s) = \frac{\cos(\delta)\text{sen}(w)}{\text{sen}(\theta_z)}.$$

$$\text{sen}(\gamma_s |_{w=0^\circ}) = \frac{\cos(0^\circ)\text{sen}(0^\circ)}{0,323} = 0 \Rightarrow \gamma_s = 0^\circ, \quad (\text{B.39})$$

$$\text{sen}(\gamma_s |_{w=15^\circ}) = \frac{\cos(0^\circ)\text{sen}(15^\circ)}{\text{sen}(23,91^\circ)} = 0,6386 \Rightarrow \gamma_s = 39,69^\circ, \quad (\text{B.40})$$

$$\text{sen}(\gamma_s |_{w=30^\circ}) = \frac{\cos(0^\circ)\text{sen}(30^\circ)}{\text{sen}(34,95^\circ)} = 0,8728 \Rightarrow \gamma_s = 60,79^\circ, \quad (\text{B.41})$$

a continuación evaluaremos  $\theta_p$

$$\theta_p = \text{ArcTan}(\text{Tan}\theta_z \text{cos}(\gamma_s)), \quad (\text{B.42})$$

$$\theta_p |_{w=0^\circ} = \text{ArcTan}(\text{Tan}(18,85^\circ)\text{cos}(0^\circ)) = 18,85^\circ, \quad (\text{B.43})$$

$$\theta_p |_{w=15^\circ} = \text{ArcTan}(\text{tan}(23,91^\circ)\text{cos}(39,69^\circ)) = 18,83^\circ, \quad (\text{B.44})$$

$$\theta_p |_{w=30^\circ} = \text{ArcTan}(\text{Tan}(34,95^\circ)\text{cos}(75,36^\circ)) = 10,02^\circ, \quad (\text{B.45})$$

$$(\text{B.46})$$

a continuación evaluaremos los ángulos el 22 de Diciembre.

### Evaluación de los ángulos $\theta_z$ , $\gamma_s$ y $\theta_p$ en el 22 de Diciembre.

También aquí usaremos las relaciones A.10, A.15 y A.29. para encontrar los valores de  $\theta_z$ ,  $\gamma_s$  y  $\theta_p$ , seguiremos el procedimiento utilizado para la evaluación del 21 de Marzo. Considerando que  $\delta = -23,45^\circ$  y  $\phi = 18,85^\circ$

$$\cos(\theta_z) = \cos(\delta)\cos(w)\cos(\phi) + \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi),$$

$$\cos(\theta_z) = \cos(-23,45^\circ)\cos(w)\cos(18,85^\circ) + \text{sen}(-23,45^\circ)\text{sen}(18,85^\circ), \quad (\text{B.47})$$

$$\cos(\theta_z) = 0,8682\cos(w) - 0,1286, \quad (\text{B.48})$$

$$\cos(\theta_z |_{w=0^\circ}) = (0,8682)\cos(0^\circ) - 0,1286 = 0,7396 \Rightarrow \theta_z = 42,3^\circ, \quad (\text{B.49})$$

$$\cos(\theta_z |_{w=15^\circ}) = (0,8682)\cos(15^\circ) - 0,1286 = 0,7100 \Rightarrow \theta_z = 44,76^\circ, \quad (\text{B.50})$$

$$\cos(\theta_z |_{w=30^\circ}) = (0,8682)\cos(30^\circ) - 0,1286 = 0,6233 \Rightarrow \theta_z = 51,44^\circ. \quad (\text{B.51})$$

Ahora evaluaremos los valores de  $\gamma_s$  a continuación:

$$\text{sen}(\gamma_s) = \frac{\cos(\delta)\text{sen}(w)}{\text{sen}(\theta_z)},$$

$$\text{sen}(\gamma_s |_{w=0^\circ}) = \frac{\cos(-23,45^\circ)\text{sen}(0^\circ)}{\text{sen}(42,3^\circ)} = 0 \Rightarrow \gamma_s = 0^\circ, \quad (\text{B.52})$$

$$\text{sen}(\gamma_s |_{w=15^\circ}) = \frac{\cos(-23,45^\circ)\text{sen}(15^\circ)}{\text{sen}(44,76^\circ)} = 0,3372 \Rightarrow \gamma_s = 19,70^\circ, \quad (\text{B.53})$$

$$\text{sen}(\gamma_s |_{w=30^\circ}) = \frac{\cos(-23,45^\circ)\text{sen}(30^\circ)}{\text{sen}(51,44^\circ)} = 0,5866 \Rightarrow \gamma_s = 35,91^\circ, \quad (\text{B.54})$$

a continuación evaluaremos  $\theta_p$

$$\theta_p = \text{ArcTan}(\text{Tan}\theta_z \text{Cos}(\gamma_s)), \quad (\text{B.55})$$

$$\theta_p |_{w=0^\circ} = \text{ArcTan}(\text{Tan}(42,3^\circ)\cos(0^\circ)) = 42,3^\circ, \quad (\text{B.56})$$

$$\theta_p |_{w=15^\circ} = \text{ArcTan}(\text{tan}(44,76^\circ)\cos(19,7^\circ)) = 43,03^\circ, \quad (\text{B.57})$$

$$\theta_p |_{w=30^\circ} = \text{ArcTan}(\text{Tan}(51,44^\circ)\cos(35,91^\circ)) = 45,45^\circ. \quad (\text{B.58})$$

$$(\text{B.59})$$

Un resumen de estas evaluaciones se tiene en el cuadro B.2.

Como se puede observar para  $w = 0^\circ$  se tiene dos ángulos extremos uno máximo en el 21 de Diciembre y otro mínimo el 21 de junio, por tanto podemos optimizar el cocedor solar para comida con dos posiciones anuales para la ciudad de Temixco Morelos, en los valores promedio del 21 de marzo y 21 de Junio, y el otro valor promedio entre las fechas de 22 de Septiembre y 21 de Diciembre. Los ángulos que recomendamos son:

- Para el periodo 21 de Marzo al 22 de Septiembre recomendamos un ángulo  $\alpha$  de  $12^\circ$ .
- Para el periodo 23 de Septiembre al 20 de marzo recomendamos un ángulo  $\alpha$  de  $35^\circ$ .

Con esta información podemos ya evaluar el tamaño de los espejos superior (Norte) y inferior (Sur), con respecto a las fechas límite como a continuación se muestra.

Día	$\theta_z(w = 30^\circ)$	$\theta_z(w = 15^\circ)$	$\theta_z(w = 0^\circ)$
21/Marzo	34,95°	23,91°	18,85°
21/Junio	28,30°	14,72°	4,58°
22/Sep	34,95°	23,91°	18,85°
21/Dic	51,44°	44,76°	42,3°
Día	$\gamma_s(w = 30^\circ)$	$\gamma_s(w = 15^\circ)$	$\gamma_s(w = 0^\circ)$
21/Marzo	61,98°	39,68°	0°
21/Junio	75,36°	69,14°	0°
22/Sep	60,78	39,67°	0°
21/Dic	35,91°	19,70°	0°
Día	$\theta_p(w = 30^\circ)$	$\theta_p(w = 15^\circ)$	$\theta_p(w = 0^\circ)$
21/Marzo	18,85°	18,84°	18,18°
21/Junio	7,75°	5,34°	4,58°
22/Sep	10,02°	18,83°	18,85°
21/Dic	45,45°	43,03°	42,3°

Cuadro B.2: Resultados de las evaluaciones de  $\theta_z$ ,  $\gamma_s$  y  $\theta_p$ , en días de equinoccios y solsticios.

### Evaluación de la longitud de los espejos.

Para evaluar la longitud de los espejos, iniciaremos por evaluar el mínimo de los valores de los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$ , en las fechas del 21 de junio y 21 de Diciembre que son las fechas extremas.

Para el 21 de Diciembre se tiene que  $\alpha = 35^\circ$  y  $\theta_p = 42,29^\circ$ , y con estos valores las relaciones para  $w_1$  y  $w_2$  son:

$$w_1 = -w_c \frac{\cos(35^\circ + 42,29^\circ - 2\theta_1)}{\cos(\theta_1 - 42,29^\circ)}, \quad (\text{B.60})$$

$$w_2 = -w_c \frac{\cos(35^\circ + 42,29^\circ + 2\theta_2)}{\cos(42,29^\circ + \theta_2)}, \quad (\text{B.61})$$

si a los valores de los ángulos  $\alpha = 35^\circ$  y  $\theta_p = 42,29^\circ$ , los transformamos en radianes y los sustituimos obtenemos:

$$w_1 = -w_c \frac{\cos((0,43)\pi - 2\theta_1)}{\cos(\theta_1 - 0,235\pi)}, \quad (\text{B.62})$$

$$w_2 = -w_c \frac{\cos((0,43)\pi + 2\theta_2)}{\cos((0,235)\pi + \theta_2)}. \quad (\text{B.63})$$

Graficamos las relaciones B.62 y B.63, y de las observaciones graficas encontramos para las ecuaciones B.62 y B.63 que:

$$-28^\circ \leq \theta_1 \leq -6,5^\circ, \quad (\text{B.64})$$

cuando se tiene:

$$3w_c \geq w_1 \geq 0, \quad (\text{B.65})$$

y para  $\theta_2$  se tiene:

$$6,5^\circ \leq \theta_2 \leq 43^\circ, \quad (\text{B.66})$$

cuando se tiene:

$$0 \leq w_2 \leq 3w_c. \quad (\text{B.67})$$

Para el 21 de Junio se tiene que  $\alpha = 12^\circ$  y  $\theta_p = 4,64^\circ$ , y con estos valores las relaciones para  $w_1$  y  $w_2$  son:

$$w_1 = -w_c \frac{\cos(12^\circ + 4,64^\circ - 2\theta_1)}{\cos(\theta_1 - 4,64^\circ)}, \quad (\text{B.68})$$

$$w_2 = -w_c \frac{\cos(12^\circ + 4,64^\circ + 2\theta_2)}{\cos(4,64^\circ + \theta_2)}, \quad (\text{B.69})$$

si a los valores de los ángulos  $\alpha = 12^\circ$  y  $\theta_p = 4,64^\circ$ , los transformamos en radianes y los sustituimos obtenemos:

$$w_1 = -w_c \frac{\cos((0,092)\pi - 2\theta_1)}{\cos(\theta_1 - 0,025\pi)}, \quad (\text{B.70})$$

$$w_2 = -w_c \frac{\cos((0,092)\pi + 2\theta_2)}{\cos((0,025)\pi + \theta_2)}. \quad (\text{B.71})$$

$$(\text{B.72})$$

Graficamos las relaciones B.70 y B.72, y de las observaciones graficas encontramos que:

$$-34^\circ \geq \theta_1 \geq -68^\circ, \quad (\text{B.73})$$

cuando se tiene:

$$0 \leq w_1 \leq 3w_c, \quad (\text{B.74})$$

y para  $\theta_2$  se tiene:

$$34^\circ \leq \theta_2 \leq 57^\circ, \quad (\text{B.75})$$

cuando se tiene:

$$0 \leq w_2 \leq 3w_c. \quad (\text{B.76})$$

Y para los días de los equinoccios, el 21 de Marzo y 22 de Septiembre, se representa por medio de las relaciones:

$$w_1 = -w_c \frac{\cos(12^\circ + 18,85^\circ - 2\theta_1)}{\cos(\theta_1 - 18,85^\circ)}, \quad (\text{B.77})$$

$$w_2 = -w_c \frac{\cos(12^\circ + 18,85^\circ + 2\theta_2)}{\cos(18,85^\circ + \theta_2)}, \quad (\text{B.78})$$

si a los valores de los ángulos  $\alpha = 12^\circ$  y  $\theta_p = 18,85^\circ$ , los transformamos en radianes y los sustituimos obtenemos:

$$w_1 = -w_c \frac{\cos((0,1714)\pi - 2\theta_1)}{\cos(\theta_1 - 0,1047\pi)}, \quad (\text{B.79})$$

$$w_2 = -w_c \frac{\cos((0,1714)\pi + 2\theta_2)}{\cos((0,1047)\pi + \theta_2)}. \quad (\text{B.80})$$

Graficamos las relaciones B.79 y B.80, y de las observaciones gráficas encontramos para las ecuaciones B.79 y B.80 que:

$$-31^\circ \geq \theta_1 \geq -57^\circ, \quad (\text{B.81})$$

cuando se tiene:

$$0 \leq w_1 \leq 3w_c, \quad (\text{B.82})$$

y para  $\theta_2$  se tiene:

$$106^\circ \leq \theta_2 \leq 157^\circ, \quad (\text{B.83})$$

cuando se tiene:

$$0 \leq w_2 \leq 3w_c. \quad (\text{B.84})$$

Con estas evaluaciones podemos observar que no existe una longitud óptima, sino mas bien una vez seleccionada una longitud  $w_c$ , se decide que longitud  $w_1$  y  $w_2$  se asignará a los espejos, determinando con esto el ángulo correspondiente  $\theta_1$  y  $\theta_2$  para cada uno de los espejos, en cada estación del año. Determinaremos las longitudes apropiadas de los espejos y los ángulos correspondientes. Con el fin de utilizar poco material para los espejos, utilizaremos espejos de longitudes menores de  $w_c$ , en especial nosotros usaremos espejos con dimensiones:

$$w_1 = w_2 = \frac{w_c}{2}, \quad (\text{B.85})$$

Con la relación B.85 podemos evaluar los ángulos de los espejos para cada etapa, esto lo hacemos al sustituir las dimensiones  $w_1$  y  $w_2$  en las relaciones B.62, B.63, B.70, B.72, B.79, B.80, y obtenemos:

Para Diciembre

$$\theta_1 = -14^\circ \quad (\text{B.86})$$

$$\theta_2 = 14^\circ. \quad (\text{B.87})$$

Para Junio

$$\theta_1 = -52^\circ \quad (\text{B.88})$$

$$\theta_2 = 48^\circ. \quad (\text{B.89})$$

Para Marzo y Septiembre

$$\theta_1 = -46^\circ \quad (\text{B.90})$$

$$\theta_2 = 128^\circ. \quad (\text{B.91})$$

## Apéndice C

# Evaluaciones térmicas del cocedor.

En este apéndice evaluaremos el comportamiento térmico teórico durante los días 21 de Marzo, 21 de Junio y 21 de Septiembre.

### C.1. Evaluación del comportamiento térmico del cocedor el día 21 de Marzo del año.

Para llevar a cabo las evaluaciones supondremos que  $\gamma = \theta_p |_{w=0^\circ}$ , para el día de la evaluación. Para el caso que estamos evaluando éste valor es  $\gamma = \theta_p = 18, 18^\circ$ , y  $\delta = 0^\circ$ . entonces tenemos que:

1. Primero evaluaremos el  $\cos(\theta)$  para el día 21 de Marzo, lo que expresamos como:

$$\cos(\theta) |_{21/Marzo} = \cos(w), \quad (C.1)$$

2. Luego evaluamos  $\cos(\theta_z)$ , por medio de la relación:

$$\cos(\theta_z) |_{21/Marzo} = 0,95\cos(w). \quad (C.2)$$

3. A continuación evaluaremos  $\dot{E}_{ext}(80)$  por medio de la relación:

$$\dot{E}_{ext}(n = 80) = \frac{1363W/m^2 [1 + 0,01672(\cos[(78) \frac{360^\circ}{365,2}])]^2}{1 - (0,01672)^2} = 1374W/m^2. \quad (C.3)$$

donde se ha considerado  $\epsilon = 0,01672$ ,  $\dot{S} = 1363W/m^2$ .

4. Ahora evaluaremos  $\dot{E}_{entra,T}$ , lo cual se realiza por medio de la relación:

$$\dot{E}_{entra,T} = (1119W)(\cos(w))Exp[\frac{-0,156}{0,95\cos(w)}] + (71,11W)[exp(\frac{-0,156}{(0,95\cos w)})]. \quad (C.4)$$

En la relación anterior se ha tomado el valor de la reflectividad de los espejos de 0,85, sin embargo como ya comentamos los espejos que nosotros hemos adquirido tienen poca reflectividad, debido a que no son pulido espejo, y estimamos se tiene una reflectividad de nuestros espejos de 0,5, y al considerar esto en la relación de la eficiencia de concentración, se obtiene un valor de  $\eta_{dir,c} = 0,73$ , y si con este valor, evaluamos la energía que entra al cocedor  $\dot{E}_{entra,T}$ , encontramos la relación:

$$\dot{E}_{entra,T} = (997W)(\cos(w))Exp[\frac{-0,156}{0,95\cos(w)}] + (61,08W)[Exp(\frac{-0,156}{(0,95\cos w)})]. \quad (C.5)$$

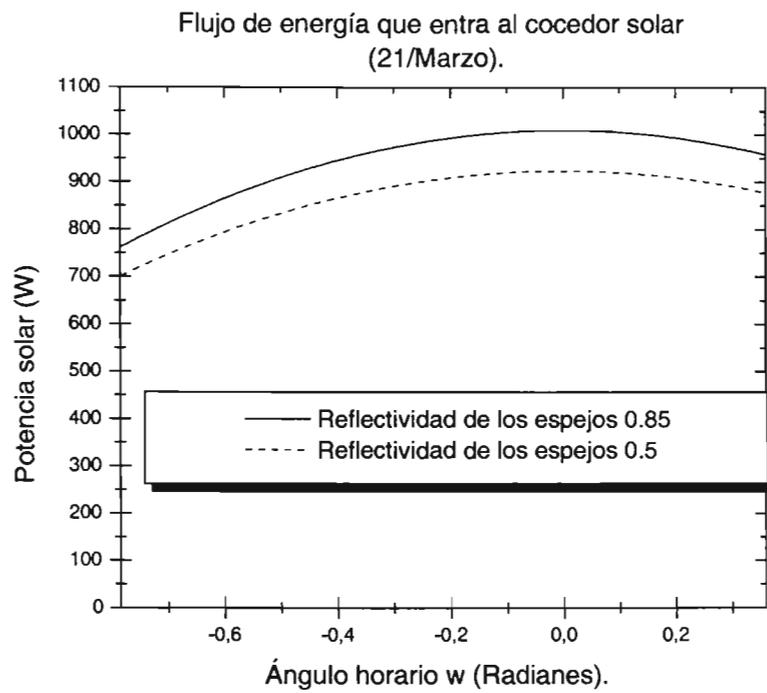


Figura C.1: En la figura se muestra el comportamiento de la energía que entra a nuestro cocedor solar, de las 10:00 a las 14:00 horas, del 21 de Marzo.

5. Ambas relaciones al graficarse para el intervalo de trabajo del cocedor solar de 10:00-14:00 horas (horario de invierno en México), se obtiene las curvas representadas en la figura C.1.
6. La energía integral promedio es representada como:

$$\bar{E}_0 = \frac{1}{w|_{14:00} - w|_{10:00}} \int_{w|_{10:00}}^{w|_{14:00}} \dot{E}_{entra,T}(w) |_{n=80} dw,$$

la cuál al resolver por medio de un integrador numérico nos da por resultados:

- Cuando la reflectividad de los espejos tiene un valor de 0.85, la energía promedio integral es  $\bar{E}_0 = 926W$ .
- Cuando la reflectividad de los espejos es de 0.5, la energía promedio integral es  $\bar{E}_0 = 823W$ .

7. Para evaluar la temperatura máxima  $T_{max}$  utilizaremos la relación:

$$T_{max} = \bar{E}_0 R_{Total} + T_{amb},$$

y como hemos ya utilizado la resistencia térmica total experimental  $R_{Total} = 0,13^\circ C/W$ , y la temperatura promedio mensual medida en nuestra estación solarimétrica y meteorológica del CIE-UNAM de Temixco Morelos, para el mes de Marzo del año 2003 fue  $T_{amb} = 26^\circ C$ , y este valor usaremos para nuestras evaluaciones. Y al sustituir los valores en la relación de  $T_{max}$  obtenemos:

$$T_{max} |_{\rho_{espejos}=0,85} = (926W)(0,13^\circ C) + 26^\circ C = 146^\circ C, \quad (C.6)$$

$$T_{max} |_{\rho_{espejos}=0,5} = (823W)(0,13^\circ C) + 26^\circ C = 133^\circ C. \quad (C.7)$$

8. Los valores de  $\tau$  para las cargas teóricas  $C_{T,n,ollas}$ , son las mismas ya indicadas antes y repetimos para observar la evaluación completa, y se presenta a continuación:

cocción	Capacidad(J/°C)	$R_{Total}(^\circ C/W)$	$\tau(s)$	$\tau(Hr)$
En vacío	16 158	0.13	2585	0.58
En vacío con una olla	18 280	0.13	2376	0.66
En vacío con 2 ollas	20 402	0.13	2652	0.74
En vacío con 3 ollas	22 524	0.13	2928	0.81
Con comida y una olla	28 869	0.13	3753	1.04
Con comida y 2 ollas	35 214	0.13	4578	1.27
Con comida y 3 ollas	41 559	0.13	5403	1.5

9. Las relaciones teóricas del comportamiento térmico de la temperatura  $T(t)$  en el interior del cocedor, para cada una de las posibilidades se representan como:

- Cuando  $T_{max} = 146^\circ C$  y  $T_{amb} = 26^\circ C$  se obtienen las relaciones:

$$T(t) = T_{max}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + T_{amb}e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

- a) En vacío se tiene la relación:

$$T(t) = 146^\circ C[1 - Exp(\frac{-t}{0,58})] + 26^\circ C Exp(\frac{-t}{0,58}), \quad (C.8)$$

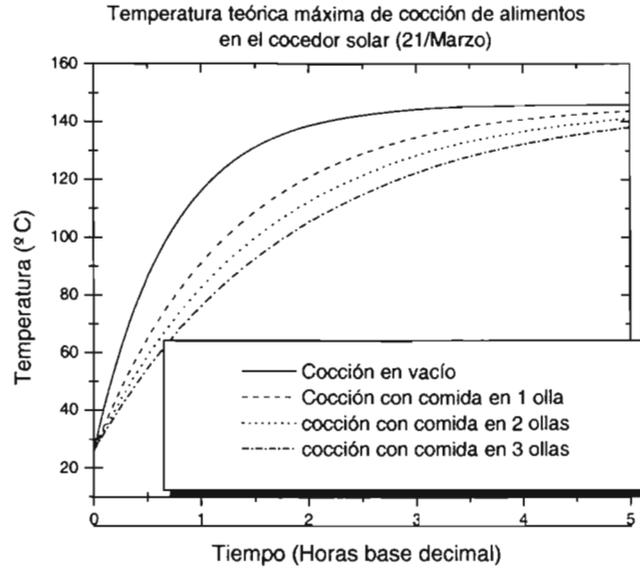


Figura C.2: En la figura se muestra las gráficas del comportamiento térmico teórico del cocedor para cocciones de alimentos el día 21 de Marzo, y donde suponemos que los espejos tienen una reflectividad de 0.85.

b) Cocción de comida en una olla:

$$T(t) = 146^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{1,04})] + 26^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{1,04}). \quad (\text{C.9})$$

c) Cocción de comida en dos ollas:

$$T(t) = 146^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{1,27})] + 26^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{1,27}). \quad (\text{C.10})$$

d) Cocción de comida en tres ollas:

$$T(t) = 146^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{1,5})] + 26^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{1,5}). \quad (\text{C.11})$$

Las gráficas del comportamiento térmico teórico máximo del cocedor solar, se muestran en la figura C.2.

- Si ahora consideramos  $T_{max} = 133^{\circ}C$  y  $T_{amb} = 26^{\circ}C$  obtenemos las relaciones:

$$T(t) = T_{max}(1 - e^{\frac{-t}{\tau}}) + T_{amb}e^{\frac{-t}{\tau}}.$$

a) En vacío se tiene la relación:

$$T(t) = 133^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{0,58})] + 26^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{0,58}). \quad (\text{C.12})$$

b) Cocción de comida en una olla:

$$T(t) = 133^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{1,04})] + 26^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{1,04}). \quad (\text{C.13})$$

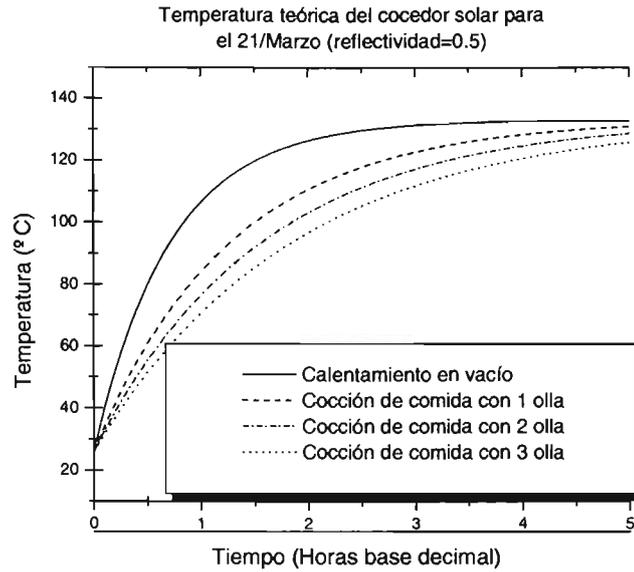


Figura C.3: En la figura se muestra las gráficas del comportamiento térmico teórico del cocedor para cocciones de alimentos el día 21 de Marzo, y donde suponemos que los espejos tienen una reflectividad de 0.5.

c) Cocción de comida en dos ollas:

$$T(t) = 133^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{1,27})] + 26^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{1,27}). \quad (\text{C.14})$$

d) Cocción de comida en tres ollas:

$$T(t) = 133^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{1,5})] + 26^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{1,5}). \quad (\text{C.15})$$

Las gráficas del comportamiento térmico teórico máximo del cocedor solar, se muestran en la figura C.3.

## C.2. Evaluación del comportamiento térmico del cocedor el día 21 de Junio del año.

Para llevar a cabo las evaluaciones supondremos que  $\gamma = \theta_p |_{w=0^{\circ}}$ , para el día de la evaluación. Para el caso que estamos evaluando éste valor es  $\gamma = \theta_p = 4,58^{\circ}$ , y  $\delta = 23,5^{\circ}$ . entonces tenemos que:

1. Primero evaluaremos el  $\cos(\theta)$  para el día 21 de Junio, lo que expresamos como:

$$\cos(\theta) |_{21/June} = 0,92 * \cos(w). \quad (\text{C.16})$$

2. Luego evaluamos  $\cos(\theta_z)$ , por medio de la relación:

$$\cos(\theta_z) |_{21/June} = 0,868 * \cos(w) + 0,129. \quad (\text{C.17})$$

3. A continuación evaluaremos  $\dot{E}_{ext}(172)$  por medio de la relación:

$$\dot{E}_{ext}(n = 172) = \frac{1363W/m^2 [1 + 0,01672(\cos[(170) \frac{360^\circ}{365,2}])]^2}{1 - (0,01672)^2} = 1319W/m^2, \quad (C.18)$$

donde se ha considerado  $\epsilon = 0,01672$ ,  $\dot{S} = 1363W/m^2$ .

4. Ahora evaluaremos  $\dot{E}_{entra,T}$ , lo cuál se realiza por medio de la relación:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{entra,T} = & (1073W)(0,92 * \cos(w))Exp[\frac{-0,205}{0,868\cos(w) + 0,129}], \\ & + (118W)[Exp(\frac{-0,205}{(0,868 * \cos w + 0,129)})]. \end{aligned} \quad (C.19)$$

En la relación anterior se ha tomado el valor de la reflectividad de los espejos de 0,85, sin embargo como ya comentamos los espejos que nosotros hemos adquirido tienen poca reflectividad, debido a que no son pulido espejo, y estimamos se tiene una reflectividad de nuestros espejos de 0,5, y al considerar esto en la relación de la eficiencia de concentración, se obtiene un valor de  $\eta_{dir,c} = 0,73$ , y si con este valor, evaluamos la energía que entra al cocedor  $\dot{E}_{entra,T}$ , encontramos la relación:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{entra,T} = & (955W)(\cos(w))Exp[\frac{-0,205}{0,868\cos(w) + 0,129}] \\ & + (105W)[Exp(\frac{-0,205}{(0,868 * \cos w + 0,129)})]. \end{aligned} \quad (C.20)$$

5. Ambas relaciones al graficarse para el intervalo de trabajo del cocedor solar de 10:00-14:00 horas (horario de invierno en México), se obtiene las curvas representadas en la figura C.4.
6. La energía integral promedio es representada como:

$$\bar{\dot{E}}_0 = \frac{1}{w|_{14:00} - w|_{10:00}} \int_{w|_{10:00}}^{w|_{14:00}} \dot{E}_{entra,T}(w) |_{n=172} dw,$$

la cuál al resolver por medio de un integrador numérico nos da por resultados:

- Cuando la reflectividad de los espejos tiene un valor de 0.85, la energía promedio integral es  $\bar{\dot{E}}_0 = 939W$ .
- Cuando la reflectividad de los espejos es de 0.5, la energía promedio integral es  $\bar{\dot{E}}_0 = 836W$ .

7. Para evaluar la temperatura máxima  $T_{max}$  utilizaremos la relación:

$$T_{max} = \bar{\dot{E}}_0 R_{Total} + T_{amb},$$

y como ya sabemos que experimentalmente se tiene en nuestro cocedor solar  $R_{Total} = 0,13^\circ C/W$ , y la temperatura promedio mensual medida en nuestra estación solarimétrica y meteorológica del CIE-UNAM de Temixco Morelos, para el mes de Junio del año 2003 fue de  $T_{amb} = 23^\circ C$ , valor que será usado en nuestras evaluaciones. Y al sustituir los valores correspondientes en la relación de  $T_{max}$  obtenemos:

$$T_{max} |_{\rho_{espejos}=0,85} = (939W)(0,13^\circ C) + 23^\circ C = 145^\circ C, \quad (C.21)$$

$$T_{max} |_{\rho_{espejos}=0,5} = (836W)(0,13^\circ C) + 23^\circ C = 132^\circ C. \quad (C.22)$$

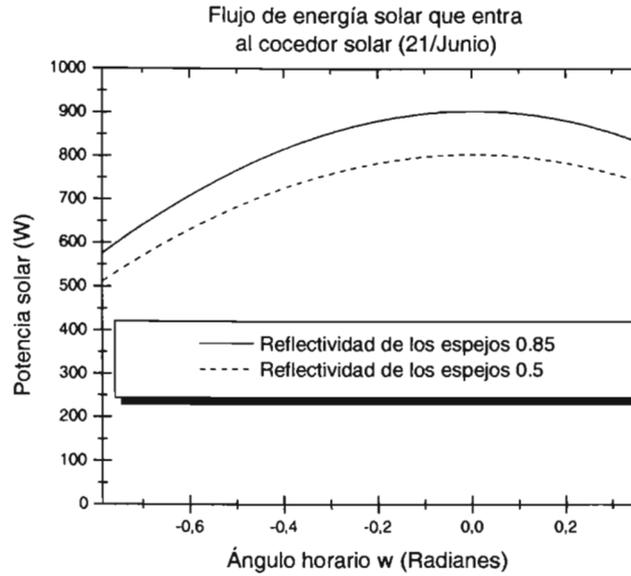


Figura C.4: En la figura se muestra el desempeño de la energía solar que entra al cocedor solar entre las 10:00 y las 14:00 horas para el 21 de Junio.

8. Los valores de  $\tau$  para las cargas teóricas  $C_{T,n,ollas}$ , son las mismas ya indicadas antes y repetimos para observar la evaluación completa, y se presenta:

cocción	Capacidad(J/°C)	$R_{Ttotal}(°C/W)$	$\tau(s)$	$\tau(Hr)$
En vacío	16 158	0.13	2585	0.58
En vacío con una olla	18 280	0.13	2376	0.66
En vacío con 2 ollas	20 402	0.13	2652	0.74
En vacío con 3 ollas	22 524	0.13	2928	0.81
Con comida y una olla	28 869	0.13	3753	1.04
Con comida y 2 ollas	35 214	0.13	4578	1.27
Con comida y 3 ollas	41 559	0.13	5403	1.5

9. Las relaciones teóricas del comportamiento térmico de la temperatura  $T(t)$  en el interior del cocedor, para cada una de las posibilidades se representan como:

- Cuando  $T_{max} = 145°C$  y  $T_{amb} = 23°C$  se obtienen las relaciones:

$$T(t) = T_{max}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + T_{amb}e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

- a) En vacío se tiene la relación:

$$T(t) = 145°C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{0,58})] + 23°C\text{Exp}(\frac{-t}{0,58}). \quad (C.23)$$

- b) Cocción de comida en una olla:

$$T(t) = 145°C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{1,04})] + 23°C\text{Exp}(\frac{-t}{1,04}). \quad (C.24)$$

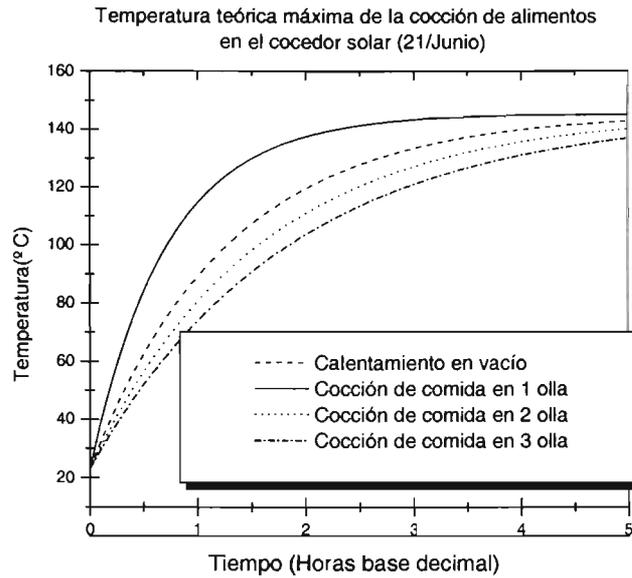


Figura C.5: En la figura se muestra las gráficas del comportamiento térmico teórico del cocedor para cocciones de alimentos el día 21 de Junio, y donde suponemos que los espejos tienen una reflectividad de 0.85.

c) Cocción de comida en dos ollas:

$$T(t) = 145^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{1,27})] + 23^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{1,27}). \quad (\text{C.25})$$

d) Cocción de comida en tres ollas:

$$T(t) = 145^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{1,5})] + 23^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{1,5}). \quad (\text{C.26})$$

Las gráficas del comportamiento térmico teórico máximo del cocedor solar, se muestran en la figura C.5.

- Si ahora consideramos  $T_{max} = 132^{\circ}C$  y  $T_{amb} = 23^{\circ}C$  obtenemos las relaciones:

a) Cocción en vacío con tres ollas:

$$T(t) = 132^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{0,81})] + 23^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{0,81}). \quad (\text{C.27})$$

b) Cocción de comida en tres ollas:

$$T(t) = 132^{\circ}C[1 - \text{Exp}(\frac{-t}{1,5})] + 23^{\circ}C\text{Exp}(\frac{-t}{1,5}). \quad (\text{C.28})$$

Las gráficas del comportamiento térmico teórico máximo del cocedor solar, se muestran en la figura C.6.

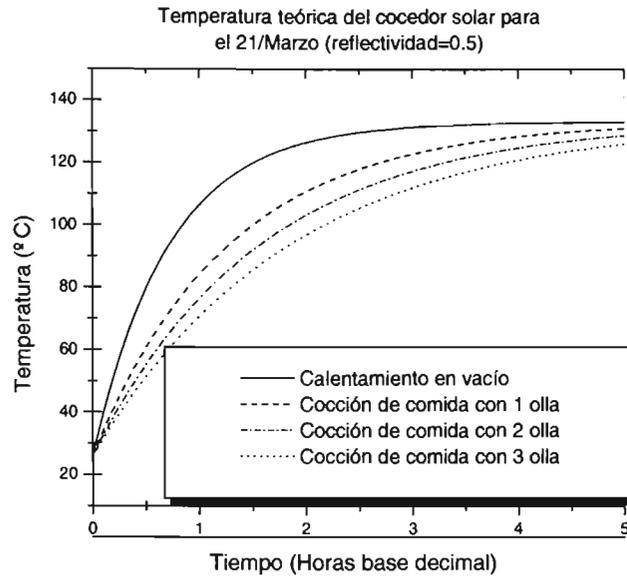


Figura C.6: En la figura se muestra las gráficas del comportamiento térmico teórico del cocedor para cocciones de alimentos el día 21 de Junio, y donde suponemos que los espejos tienen una reflectividad de 0.5.

### C.3. Evaluación del comportamiento térmico del cocedor el día 21 de Septiembre del año.

Para llevar a cabo las evaluaciones supondremos que  $\gamma = \theta_p |_{w=0^\circ}$ , para el día de la evaluación. Para el caso que estamos evaluando éste valor es  $\gamma = \theta_p = 18,85^\circ$ , y  $\delta = 0^\circ$ . entonces tenemos que:

1. Primero evaluaremos el  $\cos(\theta)$  para el día 21 de Septiembre, lo que expresamos como:

$$\cos(\theta) |_{21/Septiembre} = \cos(w) \quad (C.29)$$

2. Luego evaluamos  $\cos(\theta_z)$ , por medio de la relación:

$$\cos(\theta_z) |_{21/Septiembre} = 0,95 * \cos(w). \quad (C.30)$$

3. A continuación evaluaremos  $\dot{E}_{ext}(264)$  por medio de la relación:

$$\dot{E}_{ext}(n = 264) = \frac{1363W/m^2 [1 + 0,01672(\cos[(262) \frac{360^\circ}{365,2}])]^2}{1 - (0,01672)^2} = 1354W/m^2, \quad (C.31)$$

donde se ha considerado  $\epsilon = 0,01672$ ,  $\dot{S} = 1363W/m^2$ .

4. Ahora evaluaremos  $\dot{E}_{entra,T}$ , lo cuál se realiza por medio de la relación:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{entra,T} = & (1103W)(\cos(w))Exp[\frac{-0,177}{0,95\cos(w)}], \\ & + (86,27W)[Exp(\frac{-0,177}{(0,95 * \cos w)})]. \end{aligned} \quad (C.32)$$

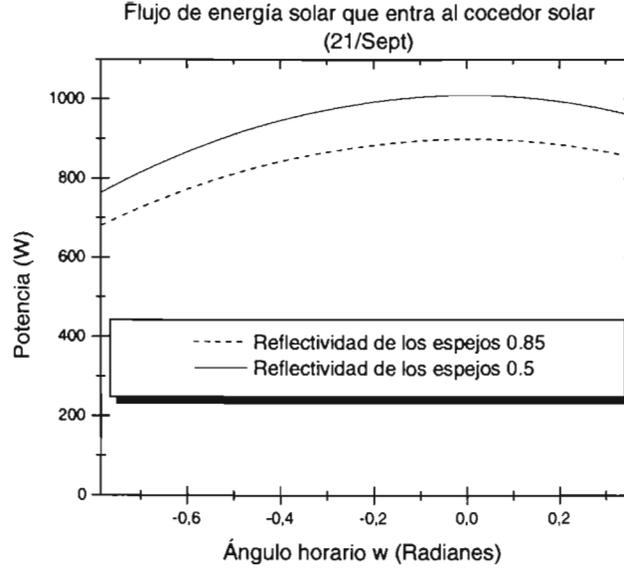


Figura C.7: En la figura se muestra el desempeño de la energía solar que entra al cocedor solar entre las 10:00 y las 14:00 horas, del 21 de Septiembre.

En la relación anterior se ha tomado el valor de la reflectividad de los espejos de 0,85, sin embargo como ya comentamos los espejos que nosotros hemos adquirido tienen poca reflectividad, debido a que no son pulido espejo, y estimamos se tiene una reflectividad de nuestros espejos de 0,5, y al considerar esto en la relación de la eficiencia de concentración, se obtiene un valor de  $\eta_{dir,c} = 0,73$ , y si con este valor, evaluamos la energía que entra al cocedor  $\dot{E}_{entra,T}$ , encontramos la relación:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{entra,T} = & (982W)(0,95 * \cos(w))Exp\left[\frac{-0,177}{0,95 * \cos(w)}\right] \\ & + (76,8W)\left[Exp\left(\frac{-0,177}{(0,95 * \cos w)}\right)\right]. \end{aligned} \quad (C.33)$$

5. Ambas relaciones al graficarse para el intervalo de trabajo del cocedor solar de 10:00-14:00 horas (horario de invierno en México), se obtiene las curvas representadas en la figura C.7.
6. La energía integral promedio es representada como:

$$\bar{E}_0 = \frac{1}{w|_{14:00} - w|_{10:00}} \int_{w|_{10:00}}^{w|_{14:00}} \dot{E}_{entra,T}(w) |_{n=264} dw,$$

la cuál al resolver por medio de un integrador numérico nos da por resultados:

- Cuando la reflectividad de los espejos tiene un valor de 0.85, la energía promedio integral es  $\bar{E}_0 = 905W$ .
- Cuando la reflectividad de los espejos es de 0.5, la energía promedio integral es  $\bar{E}_0 = 806W$ .

7. Para evaluar la temperatura máxima  $T_{max}$  utilizaremos la relación:

$$T_{max} = \bar{E}_0 R_{Total} + T_{amb}$$

y como sabemos que  $R_{Total} = 0,13^\circ C/W$ , y la temperatura promedio mensual medida en nuestra estación solarimétrica y meteorológica del CIE-UNAM de Temixco Morelos, para el mes de Septiembre del año 2001 fue  $T_{amb} = 22^\circ C$ , valor que usaremos para nuestras evaluaciones. Y al sustituir los valores correspondientes en la relación de  $T_{max}$  obtenemos:

$$T_{max} |_{\rho_{espejos}=0,85} = (905W)(0,13^\circ C) + 22^\circ C = 140^\circ C, \quad (C.34)$$

$$T_{max} |_{\rho_{espejos}=0,5} = (806W)(0,13^\circ C) + 22^\circ C = 127^\circ C. \quad (C.35)$$

8. Los valores de  $\tau$  para las cargas teóricas  $C_{T,n,ollas}$ , son las mismas ya indicadas antes y repetimos para observar la evaluación completa, y se presenta:

coCCIÓN	Capacidad(J/°C)	$R_{Total}(^\circ C/W)$	$\tau(s)$	$\tau(Hr)$
En vacío	16 158	0.13	2585	0.58
En vacío con una olla	18 280	0.13	2376	0.66
En vacío con 2 ollas	20 402	0.13	2652	0.74
En vacío con 3 ollas	22 524	0.13	2928	0.81
Con comida y una olla	28 869	0.13	3753	1.04
Con comida y 2 ollas	35 214	0.13	4578	1.27
Con comida y 3 ollas	41 559	0.13	5403	1.5

9. Las relaciones teóricas del comportamiento térmico de la temperatura  $T(t)$  en el interior del cocedor, para cada una de las posibilidades se representan como:

- Cuando  $T_{max} = 140^\circ C$  y  $T_{amb} = 22^\circ C$  se obtienen las relaciones:

- a) Cocción en vacío con tres ollas:

$$T(t) = 140^\circ C [1 - \text{Exp}(\frac{-t}{0,81})] + 22^\circ C \text{Exp}(\frac{-t}{0,81}). \quad (C.36)$$

- b) Cocción de comida en tres ollas:

$$T(t) = 140^\circ C [1 - \text{Exp}(\frac{-t}{1,5})] + 22^\circ C \text{Exp}(\frac{-t}{1,5}). \quad (C.37)$$

Las gráficas del comportamiento térmico teórico máximo del cocedor solar, se muestran en la figura C.8.

- Si ahora consideramos  $T_{max} = 127^\circ C$  y  $T_{amb} = 22^\circ C$  obtenemos las relaciones:

- a) En vacío se tiene la relación:

$$T(t) = 127^\circ C [1 - \text{Exp}(\frac{-t}{0,58})] + 22^\circ C \text{Exp}(\frac{-t}{0,58}). \quad (C.38)$$

- b) Cocción de comida en tres ollas:

$$T(t) = 127^\circ C [1 - \text{Exp}(\frac{-t}{1,5})] + 22^\circ C \text{Exp}(\frac{-t}{1,5}). \quad (C.39)$$

Las gráficas del comportamiento térmico teórico máximo del cocedor solar, se muestran en la figura C.9.

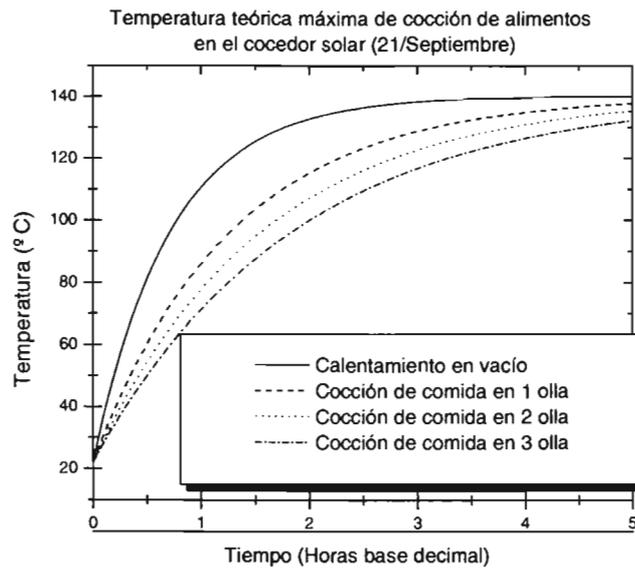


Figura C.8: En la figura se muestra las gráficas del comportamiento térmico teórico del cocedor para cocciones de alimentos el día 21 de Septiembre, y donde suponemos que los espejos tienen una reflectividad de 0.85.

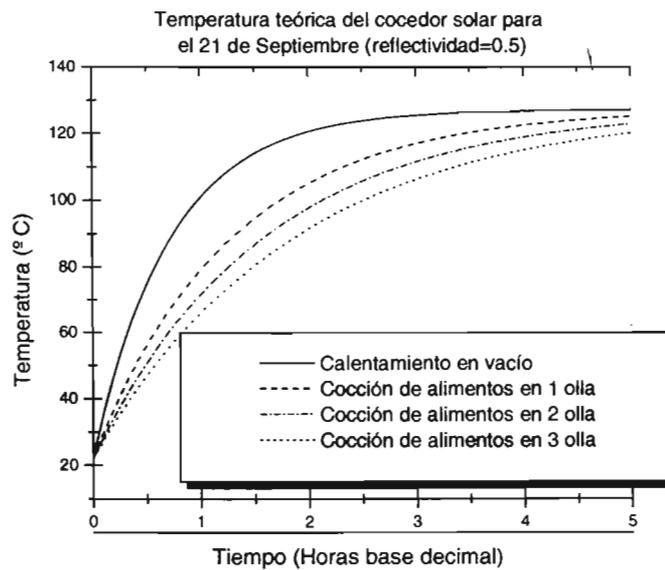


Figura C.9: En la figura se muestra las gráficas del comportamiento térmico teórico del cocedor para cocciones de alimentos el día 21 de Septiembre, y donde suponemos que los espejos tienen una reflectividad de 0.5.