

UNAM
POSGRADO
Ingeniería



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

POSGRADO EN INGENIERIA

CENTRO DE INVESTIGACION EN ENERGIA

ESTUDIO DE UN HORNO SOLAR

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERIA
AREA ENERGIA
OPCION FOTOTERMICA

P R E S E N T A :
GABRIELA HERNANDEZ LUNA

TUTORA: DRA. GUADALUPE HUELSZ LESBROS

TEMIXCO, MOR.

ENERO 2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Al arcoiris que ilumina mi vida:

Noé Daniel García Ávila y Noé Gael García Hernández
Por creer en mí, apoyarme y seguir juntos en la vereda de la vida.

Modesto Hernández Huerta y Antonia Luna Ramírez.
A quienes con su inmenso amor, ejemplo y gran apoyo me han encaminado en la vida

Maricela, Raúl, Sergio, Leonor y Javier,
Mis siempre queridos hermanas y hermanos,
porque el lazo que nos une es más fuerte que la sangre, sin importar las distancias.

Adriana, Daniel, Claudia, Mónica, Omar, Enyth, Berenice, Josué, Valeria y Ximena,
Mis sobrinas y sobrinos
Por contagiarme de su alegría y darme incondicionalmente su cariño.

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

NOMBRE: Gabriela Hernández Luna

FECHA: Enero 13, 04

FIRMA: Gabriela Hernández Luna

Índice general

Resumen	XII
Agradecimientos	XIV
Introducción	XVI
1. Antecedentes	1
2. Consumo de leña para la cocción de alimentos	5
2.1. Consumo mundial de leña	5
2.2. Consumo nacional de leña	6
2.3. Consumo regional de leña	9
2.3.1. Patrón de consumo energético por sector	10
2.3.2. Consumo energético de leña por tipo	13
3. Modelo teórico de concentración	15
3.1. Suposiciones del modelo	16
3.1.1. Cálculo de los ángulos de radiación solar	16
3.1.2. Cálculo de la irradiancia sobre el colector	17
3.1.3. Contribución del reflector sur	18
3.1.4. Contribución de los reflectores este y oeste	21
3.1.5. Contribución del reflector norte	24
3.1.6. Efecto de sombreado	25
3.1.7. Parámetros geométricos del modelo	26
4. Metodología experimental	29
4.1. Medición de las variables independientes	31
4.1.1. Radiación solar global	31
4.1.2. Velocidad del viento	31
4.1.3. Temperatura ambiente	31
4.2. Medición de las variables dependientes	32

4.2.1.	Temperatura del horno	32
4.2.2.	Tiempos de cocción	34
4.3.	Carga	35
4.3.1.	Pruebas para caracterización	35
4.3.2.	Pruebas para cocción de alimentos	36
4.4.	Procedimiento diario	37
5.	Resultados y análisis	39
5.1.	Caracterización del horno	39
5.1.1.	Pruebas sin carga	40
5.1.2.	Pruebas con agua	42
5.1.3.	Pruebas con aceite	44
5.2.	Análisis global	50
5.3.	Análisis temporal	52
5.3.1.	Eficiencia	59
5.4.	Cocción de alimentos	60
5.4.1.	Pruebas con maíz nixtamal	61
5.4.2.	Pruebas con frijol	62
5.4.3.	Pruebas con elote	63
5.4.4.	Análisis global	64
5.5.	Estimación del ahorro de leña	69
5.6.	Comparación del modelo teórico de concentración con resultados experimentales	70
6.	Nuevo prototipo del horno solar	77
6.1.	Materiales de construcción	77
6.2.	Caja exterior y reflectores	78
6.3.	Caja interior - olla	79
6.4.	Puerta	80
6.5.	Enfoque económico	81
7.	Conclusiones	85
A.	Calibración de termopares	93
B.	Selección de los recipientes, ollas	97
C.	Factor de corrección por estado de la República Mexicana	101
C.1.	Índice de claridad	102

Índice de figuras

2.1. Consumo mundial de madera por aplicación para el año 2001 [22]	6
2.2. Consumo energético nacional por sectores en el 2001 [25]	7
2.3. Consumo por tipo de energéticos en el 2001 en el sector residencial [25]	8
2.4. Consumo de leña por género [20]	14
3.1. Geometría sol-tierra	16
3.2. El plano vertical con la proyección de la radiación directa.	18
3.3. Los cuatro casos básicos de la contribución en la irradiancia del reflector al colector.	20
3.4. Plano perpendicular al colector y al reflector con inclinación nortesur.	22
4.1. Vista del horno solar tipo caja propuesto por Acosta <i>et al.</i> [4] y construidos por Hernández-Luna[5].	30
4.2. Vista del horno solar tipo caja propuesto por Acosta <i>et al.</i> [4] y construidos por Hernández-Luna[5].	30
4.3. Termopares en caja interior del horno	33
4.4. Termopares en la carga	33
4.5. Termopares distribuidos en la caja exterior del horno	34
4.6. Termopares distribuidos en el marco de unión de las cajas en el colector	35
5.1. Evolución térmica típica en las bases interiores en pruebas usando agua como carga.	46
5.2. Evolución térmica típica en los costados interiores en pruebas usando agua como carga.	47
5.3. Evolución térmica típica en el agua.	47

5.4. Evolución térmica típica en las bases exteriores en pruebas usando agua como carga.	48
5.5. Evolución térmica típica en los costados exteriores en pruebas usando agua como carga.	48
5.6. Evolución térmica típica en los reflectores en pruebas usando agua como carga.	49
5.7. Evolución térmica típica en el marco de unión en pruebas usando agua como carga.	49
5.8. Evolución térmica típica en la cubierta transparente usando en pruebas usando agua como carga.	50
5.9. Evolución de la radiación global bajo la cual se realizó la prueba típica usando agua como carga.	51
5.10. Evolución de la temperatura ambiente bajo la cual se realizó la prueba típica usando agua como carga.	52
5.11. Evolución de la velocidad del viento bajo la cual se realizó la prueba típica usando agua como carga.	53
5.12. Temperatura observada en el horno para tres pruebas utilizando agua como carga	54
5.13. Concentración calculada por el modelo en el horno en tres pruebas utilizando agua como carga	55
5.14. Radiación global en tres pruebas utilizando agua como carga	55
5.15. Temperatura ambiente en tres pruebas utilizando agua como carga	56
5.16. Concentración calculada en el horno en tres pruebas utilizando aceite como carga	57
5.17. Temperatura observada en el horno para tres pruebas utilizando aceite como carga	58
5.18. Radiación global en tres pruebas utilizando aceite como carga	58
5.19. Temperatura ambiente en tres pruebas utilizando aceite como carga	59
5.20. Concentración para los días de diseño del horno y para los días en que se relizaron puebas.	60
5.21. Tiempo de cocción del maíz nixtamal como función del promedio de la radiación global	61
5.22. Evolución térmica durante las pruebas con maíz nixtamal.	62
5.23. Promedio de la radiación global en las pruebas con frijol	63
5.24. Evolución térmica durante las pruebas con frijol.	64
5.25. Promedio de la radiación global en las pruebas con elote	64
5.26. Evolución térmica durante pruebas con elote.	65
5.27. Tiempo de cocción como función de la radiación global promedio, \bar{R}_n , durante las pruebas con alimentos	66
5.28. Tiempo de cocción como función de la radiación incidente en colector, \bar{I}_c , durante las pruebas con alimentos	67

5.29. Energía que incide en el colector durante las pruebas con alimentos	67
5.30. Comparación de concentraciones individuales experimentales y teóricas el 8 de marzo	71
5.31. Comparación de concentración total experimental y teórica el 8 de marzo	72
5.32. Comparación de concentraciones individuales experimentales y teóricas el 29 de julio	73
5.33. Comparación de concentración total experimental y teórica el 29 de julio	73
5.34. Comparación de concentración experimental y teórica el día 23 de diciembre	74
5.35. Comparación de la concentración total teórica y experimental el día 23 de diciembre	74
5.36. Concentración empleando dos diferentes bases para el mes de mayo	75
5.37. Concentración empleando dos diferentes bases para el mes de julio	76
6.1. Perfil exterior del horno	78
6.2. Vista isométrica de la caja exterior con reflectores	79
6.3. Horno solar adaptado con olla en el interior	80
6.4. Vista superior del horno	81
6.5. Vista del nuevo prototipo del horno solar con la olla a su costado	82
6.6. Cavidad interior del horno u olla.	82
6.7. Vista isométrica de la cavidad interior u olla	83
6.8. Cubierta de la olla del horno	83
6.9. Perfil de la puerta del horno solar	84
A.1. Gráfica obtenida para la calibración de los termopares	95
B.1. Características geométricas de los recipiente empleados en las pruebas	98

Índice de cuadros

2.1.	Consumo energético a nivel nacional y regional	9
2.2.	Descripción general de los usos finales en el sector doméstico . . .	10
2.3.	Uso de la energía en la cocción de alimentos	11
2.4.	Consumo de leña para cocción de alimentos	11
2.5.	Recolección de leña	12
2.6.	Descripción general de los usos finales en el sector comercial	12
2.7.	Descripción general de los usos finales en el sector servicios	13
3.1.	Parámetros geométricos de octubre 7 a marzo 7.	26
3.2.	Parámetros geométricos de marzo 8 hasta mayo 15 y julio 30 a octubre 6	27
3.3.	Parámetros geométricos de mayo 16 hasta julio 29.	27
4.1.	Pruebas realizadas en el horno solar para la caracterización	36
4.2.	Pruebas de cocción de alimentos realizadas en el horno solar	37
5.1.	Uso de leña empleada en la cocción de alimentos	69
5.2.	Tiempo ahorrado en la colecta de leña usando el horno solar	70
C.1.	Factor de corrección para al estimar el ahorro de leña de acuerdo a la región [34]	102

Nomenclatura

En esta sección se describe la simbología empleada en la tesis.

Símbolo	Descripción	Unidades
A_c	Área del colector	m^2
A_{dp}	Proyección del colector sobre la línea horizontal	
A_{ds}	Proyección del ángulo azimutal solar sobre la línea horizontal	
A_r	Área del reflector	m^2
C	Concentración de radiación en el colector	
F_c	Factor de corrección para estimación del consumo de leña	%
H	Longitud del colector medida perpendicularmente a la unión del reflector en cuestión	m
I_{bn}	Altitud solar	
I_{bp}	Proyección de I_n en el plano perpendicular al colector y al reflector en cuestión	W
I_{bp}^*	Proyección de I_n en el plano perpendicular al colector y al reflector en cuestión con inclinación norte-sur	W
I_c	Radiación incidente en el colector	W
I_n	Radiación normal incidente en el colector	W
I_r	Contribución del reflector a la radiación incidente en el colector	W
I_{rsom}	Radiación que es afectada por la sombra de los reflectores este y oeste	W
K_T	Índice de claridad	

Símbolo	Descripción	Unidades
L_r	Longitud del reflector medida perpendicularmente a la unión de éste con el colector	m
O_{pp}	Lado del plano perpendicular al plano perpendicular al colector y al reflector	
O_{pp}^*	Lado del plano perpendicular al plano perpendicular al colector y al reflector con inclinación norte-sur	
O_{ps}	Lado del plano perpendicular al plano perpendicular al colector y al reflector	
O_{ps}^*	Lado del plano perpendicular al plano perpendicular al colector y al reflector con inclinación norte-sur	
R_n	Radiación solar directa por unidad de tiempo y área incidente en el plano normal a la radiación	$W m^{-2}$
\bar{R}_n	Promedio de la radiación solar directa por unidad de tiempo y área	$W m^{-2}$
R_z	Radiación solar global por unidad de tiempo y área	$W m^{-2}$
\bar{R}_{zm}	Radiación solar global mensual por unidad de tiempo y área	$W m^{-2}$
T_a	Temperatura ambiente	$^{\circ}C$
t_c	tiempo de cocción	h
V_v	Velocidad del viento	$m s^{-1}$

Símbolos griegos

Símbolo	Descripción	Unidades
α_p	Altura solar aparente proyectada sobre el plano perpendicular al colector y al reflector	grados
α_p^*	Altura solar aparente proyectada sobre el plano perpendicular al colector y al reflector	grados
α_{p1}	Ángulo crítico de aceptación	grados
α_{p2}	Ángulo crítico de aceptación	grados
α_s	Altura solar	grados
β_c	Inclinación del colector	grados
β_r	Sombreado del reflector	
β^*	Inclinación del colector en dirección norte-sur	grados

Símbolos griegos

Símbolo	Descripción	Unidades
γ_c	Ángulo azimutal del colector	grados
γ_{cr}	Ángulo azimutal del plano perpendicular al colector y al reflector	grados
γ_s	Ángulo azimutal solar	grados
δ	Declinación	grados
θ_c	Ángulo que forma la normal del colector y la dirección de la irradiancia normal directa	grados
θ_z	Ángulo cenital	grados
ϕ	Latitud	grados
ρ	Reflectancia efectiva del reflector	
ω	Ángulo horario	grados

Resumen

En esta tesis se realiza la evaluación térmica de un horno solar tipo caja propuesto por un grupo del CIE de la UNAM (Acosta *et al.*, Diseño y emulación de un horno solar tipo caja. Memorias de la XX Reunión Nacional de Energía Solar ANES, 1996) y construido por (Hernández-Luna G, Ingeniería, UAEMorelos, 2001). Se pone a prueba el horno para la cocción de alimentos, además se desarrolla un modelo teórico de concentración de energía incidente en el colector del horno basado en el modelo de Peres y Karlsson (Peres B y Karlsson B, Solar Energy 51(5), 1995) y se propone un nuevo diseño del horno solar siguiendo la geometría del diseño actual.

En la evaluación térmica del horno se siguió la metodología empleada en (Hernández-Luna G, Ingeniería, UAEMorelos, 2001) para lo cual se realizaron tres tipos de pruebas (de octubre a marzo) con diferente carga distribuida en dos ollas de aluminio: con aire, con 6 litros de aceite y con 6 litros de agua. En las pruebas con aire la máxima temperatura registrada fue de 170°C, utilizando aceite como carga se obtuvo una temperatura de 134°C y en las pruebas empleando agua como carga, la máxima temperatura registrada fue de 100°C.

Las pruebas con alimentos se realizaron considerando el uso del horno en comunidades rurales motivo por el cual los alimentos seleccionados fueron frijol y maíz, este último en dos presentaciones, como maíz nixtamal (para la elaboración de tortillas) y elote. Dentro de los principales resultados se destaca el demostrar la facilidad de cocción de estos alimentos en el horno, obteniéndose una ecuación única, ecuación 1, para calcular el tiempo de cocción de los alimentos involucrados

$$t_c = 11 \pm 1 - 0.010 \pm 0.003 \bar{R}_n \quad (1)$$

donde t_c es el tiempo de cocción en horas y \bar{R}_n es el promedio durante ese tiempo de la radiación global del sitio donde se quiera usar el horno en $W m^{-2}$. Cabe mencionar que \bar{R}_n se encuentra acotada a $320 \leq \bar{R}_n < 700$, esto por dos motivos, el primero es la duración del día y el segundo es que con radiaciones menores a $320 W m^{-2}$ no es posible realizar el proceso de cocción, sin embargo se puede llevar a cabo el precocimiento de los alimentos.

Una vez probado que es posible emplear el horno para la cocción de alimentos, se hace una estimación del ahorro de leña que traería consigo el uso del horno en una comunidad rural, obteniendo un ahorro anual de leña de 1,100 kg por familia. Esta estimación está basada en los resultados de una investigación sobre el consumo de leña en una comunidad rural del país (O. Masera, R. Almeida, J. Cervantes, *et al.*, Reporte técnico, Grupo Energía Departamento de Física de la UNAM, 1987).

El modelo de concentración considera la contribución de cada uno de los re-

flectores de forma individual e independiente de los otros, salvo por el sombreado. Supone que los reflectores son infinitamente largos, sin embargo, dado el arreglo de los reflectores alrededor del horno, la aproximación resulta adecuada. Al realizar predicciones teóricas y compararlas con los resultados de la investigación experimental realizada por Jaramillo y colaboradores (Jaramillo O. A., Arriaga L. G., vázquez J. J., Acosta R. y Huelsz G. Memorias de la *XXIII* Reunión de ANES, 1999), aunque se obtienen diferencias en las predicciones individuales de los reflectores, éstas parecen compensarse y la concentración total, dentro de la incertidumbre, es igual a la experimental. Con este modelo se calculó la concentración para diversos días y se observó que ésta presenta valores entre 1.7 y 2.25 durante todo el año, lo que indica que la geometría del diseño es adecuada.

Se realizaron modificaciones al prototipo actual con la idea de incrementar el volumen de carga para hacer el horno más eficiente y disminuir el costo de construcción. La propuesta original de este nuevo prototipo consiste en utilizar una olla en forma similar a la geometría del horno y que funge al mismo tiempo como caja interior del horno.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración de muchas personas, motivo por el cual agradezco infinitamente el apoyo de todas y cada una de ellas sin olvidar agradecer a las instituciones dedicadas a la investigación y formación de recursos humanos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México agradezco la oportunidad de permitirme prepararme en sus instalaciones y realizar uno de mis anhelados sueños, ser parte de ella.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología agradezco el financiamiento otorgado para la realización de mis estudios de Maestría.

Al Centro de Investigación en Energía agradezco el permitirme realizar en sus instalaciones mi formación a través del Departamento de Termociencias, específicamente al Laboratorio de Transferencia de Energía y Masa y a todo el personal que ahí labora.

A la Dra. Guadalupe Huelsz Lesbros agradezco la dirección de la tesis y los apoyos brindados a lo largo de esta etapa de mi vida.

A mis revisores, Dr. Antonio del Río, Dr. Rafael Almanza, Dr. Camilo Arancibia y Dr. Oscar Jaramillo, los valiosos comentarios, observaciones y sugerencias en la revisión de esta tesis.

Un agradecimiento especial al Dr. Camilo Arancibia, encargado de la estación meteorológica y al Ing. José de Jesús Quiñones por el apoyo brindado el proporcionarme los datos de las variables climáticas indispensables para la realización de este trabajo. La investigación experimental reportada en esta tesis fue realizada en la plataforma experimental del CIE, a cargo del Dr. Camilo Arancibia, a quién también agradezco el facilitarme el espacio requerido para la misma.

A mi amiga, María Elena Lárraga Ramírez, agradezco el apoyo brindado en el manejo del *software* requerido en la presentación de los resultados.

A la unidad de cómputo del CIE, a través de su personal, Héctor Cortés, Alfredo Quiroz, Esther García y Ma. Carmen Huerta.

A mis compañeros de generación, les agradezco el tiempo y el espacio compartido, así como el cariño otorgado, especialmente a María Loreto Cedillo Rocel, a Aida Quinto y a Guillermo Barrios del Valle.

En la toma de fotografías agradezco la valiosa ayuda de dos personas, José de Jesús Quiñones y François Demiaux.

A Guillermo Barrios le agradezco la ayuda brindada en la utilización del *software* para la edición de la tesis.

A los amigos que he podido encontrar en el CIE-UNAM, Naghelli Ortega Ávila, Pedro Guido Aldana, Adriana Ramírez, Guillermo Ovando, Alejandro Lambert, Alfonso Castrejón y Galo López, les agradezco la amistad y los gratos momentos compartidos.

Al personal de la unidad de información del CIE les agradezco las facilidades otorgadas en la búsqueda de información bibliográfica requerida en esta tesis.

A todo el personal del CIE-UNAM.

Introducción

La conversión de energía radiante en energía térmica es una forma ampliamente conocida para aprovechar la energía solar. La energía térmica así generada es utilizada para variedad de aplicaciones, entre ellas la cocción de alimentos.

Uno de los principales usos de la energía térmica en toda sociedad es la cocción de alimentos. En la zonas rurales de nuestro país, esta energía se obtiene en gran medida de la combustión de leña. Con la idea de reducir la cantidad de leña quemada en la cocción de alimentos, se ha propuesto el uso de cocinas, hornos y estufas solares [1].

Las cocinas solares han sido una alternativa viable que evita la producción de desechos provocados por la combustión generada para la obtención de energía térmica, cuya finalidad es elevar la temperatura y causar cambios asociados al proceso de cocción de alimentos.

Una cocina solar es un dispositivo donde se aprovecha la energía radiativa para elevar la temperatura y cocinar alimentos. Dentro de esta definición es posible establecer una diferencia entre una estufa solar y un horno solar.

Se define estufa solar a un equipo que capta la energía solar, principalmente la componente directa, la cual se concentra en un área descubierta donde se colocan los alimentos a cocinar, de esta forma, los alimentos reciben energía principalmente desde la base. Al hacer uso de una estufa solar se producen grandes pérdidas energéticas por convección y radiación durante el proceso de cocción debido a que el recipiente se encuentra expuesto directamente al medio ambiente [2]. En este tipo de dispositivos es necesario que el usuario se encuentre cerca de éstos (estufa y recipientes) bajo los rayos del sol, siendo afectados, el usuario y los alimentos por el polvo y el viento del lugar.

Por horno solar se entiende una cavidad cerrada donde se cocinan gran variedad de alimentos que van desde frutas, verduras, leguminosas, cereales, etc. La cavidad se encuentra aislada con una cubierta transparente por el lado expuesto al sol. También es posible encontrar hornos con reflectores arreglados alrededor del horno incrementando la radiación solar en el interior. En los hornos solares el recipiente donde se introducen los alimentos recibe energía por los costados, por la parte superior y una porción de energía útil extra por contacto desde su base [3], ya que el recipiente se encuentra dentro de una cavidad, las pérdidas por convección y radiación son menores a las de una estufa solar. Este es el tipo de dispositivo que se estudia en esta tesis.

La tesis tiene dos objetivos principales realizar una evaluación térmica de un horno solar tipo caja propuesto en el CIE de la UNAM [4] y contruido por [5] con la finalidad de caracterizarlo y probar su funcionamiento para la cocción de alimentos. Para este segundo objetivo, se propone realizar pruebas con alimentos que constituyen la base de la dieta mexicana, se plantean pruebas con dos tipos

de granos: frijol y maíz. Este último en dos formas, tipo nixtamal y elotes.

Otro objetivo de la tesis es concluir las modificaciones al modelo teórico de concentración de energía solar basado en el modelo propuesto de Peres y Karlsson [6], el cual se emplea para determinar la concentración de la energía incidente en la superficie colectora del horno solar durante todas las horas de insolación, para todos los días del año y concluir el programa de cómputo respectivo. Las modificaciones al modelo y al programa sólo se habían hecho para una época del año [5]. Los resultados de la emulación se compararán con la investigación experimental realizada por Jaramillo y colaboradores [7].

Entre los objetivos, también se plantea el diseño de un nuevo horno solar, siguiendo la geometría propuesta en el horno actual, con adaptaciones para incrementar la eficiencia en el proceso de cocción y con la idea de aminorar el costo de fabricación.

El contenido de esta tesis se presenta en siete capítulos. En el capítulo I se encuentran los antecedentes y una breve revisión bibliográfica a cerca de las investigaciones realizadas sobre hornos solares. En el capítulo II se muestran datos sobre el consumo de leña a tres niveles: mundial, nacional y en una comunidad rural del país. En el capítulo III se presenta el modelo teórico de concentración de energía solar por los reflectores del horno como función del tiempo. El capítulo IV describe la metodología experimental de las pruebas y las condiciones en las que éstas se realizaron. Los resultados de las pruebas se presentan en el capítulo V en cuatro secciones: los resultados de la caracterización del horno, de las pruebas con alimentos, de la estimación del ahorro en el consumo de leña y finalmente se presentan los resultados de comparar el modelo teórico de concentración con los resultados experimentales de Jaramillo y colaboradores [7]. El capítulo VI presenta el diseño del nuevo prototipo de horno solar, las dimensiones de éste y los elementos que lo conforman. Finalmente las conclusiones derivadas de esta investigación se presentan en el capítulo VII.

Capítulo 1

Antecedentes

Diversas han sido las investigaciones realizadas a cerca de cocinas solares, sin embargo, la investigación sistemática sobre este tema es una actividad que tiene apenas unos 50 años de tradición destacando en los últimos 15 años un renovado interés por este tipo de dispositivos impulsado por razones ecológicas.

Una revisión de la literatura, realizada por Hernández-Luna en el trabajo *Diseño, Construcción y Caracterización de un Horno Solar Rural* [5], sugiere que considerables esfuerzos se han invertido en la investigación y desarrollo de hornos solares. Esta revisión presenta un panorama concreto a cerca de los hornos solares clasificándolos bajo diversos criterios. Un breve resumen de este trabajo se presenta a continuación.

En la literatura se han investigado cocinas solares para uso industrial y de uso doméstico. En el sector doméstico, es posible clasificar a las cocinas solares para cocción de alimentos en tres rubros principales. La primera clasificación considera las características geométricas del dispositivo, la segunda clasifica a los dispositivos por generaciones y finalmente la tercera los clasifica de acuerdo a los movimientos o ajustes a la trayectoria solar que cada modelo requiere para lograr un buen desempeño.

La clasificación basada en las características geométricas de los hornos, considera tres clases: la primera está formada por modelos de horno tipo caja, la segunda considera las estufas concentradoras y la última está formada por los hornos o estufas separadas del colector solar y calentadas a través de un fluido de trabajo.

La clasificación respecto a las generaciones de los hornos solares considera el tipo de material del cual está elaborado el horno y la máxima temperatura

alcanzada en el dispositivo, sin embargo sólo considera los hornos cuya geometría es un prisma rectangular.

La última clasificación considera los movimientos que los diversos hornos requieren para su buen desempeño, separando a los hornos fijos de los hornos con ajustes a la trayectoria solar. Para contextualizar la aportación del diseño del horno solar estudiado en esta tesis, a continuación se presenta una revisión de los hornos solares bajo esta clasificación.

Los hornos solares denominados fijos son los que no requieren ningún tipo de ajustes o movimientos a la trayectoria solar. Estos diseños se han propuesto para ser utilizados en regiones templadas, cuyas latitudes son mayores que $23^{\circ}27'$, por lo que el ángulo de altura solar no cambia de signo, es decir, corresponde siempre al sur (en el hemisferio norte) o siempre al norte (en el hemisferio sur), ejemplos de estos hornos son los propuestos por Khalifa y colaboradores [8], el horno que estos autores proponen es de plato plano en la que se utiliza un fluido para transportar energía térmica desde el punto de colección hasta el lugar donde se encuentran los recipientes de cocción. Otro modelo que no requiere ajustes es un horno solar tipo caja con cuatro reflectores propuesto por Ghougassian [9], así como también el modelo de John y colaboradores [10], el cual es un horno solar tipo concentrador y de plato plano. Un ejemplo más de hornos fijos es el propuesto por Kumar y colaboradores [11], basado en un colector solar evacuado unido a un recipiente de cocción por medio de un intercambiador de calor.

Los hornos solares que requieren ajustes constantes a la trayectoria solar en general son diseñados para la zona intertropical, en la cual el ángulo de altura solar cambia de signo. Cabe mencionar que el requerir ajustes ha sido un inconveniente en el uso práctico de este tipo de dispositivos, principalmente en los sistemas que necesitan ajustes frecuentes.

Uno de los modelos que requiere seguimiento solar continuo, es el propuesto por Urbano [12]. Este modelo cuenta con un sistema mecánico con seguimiento solar puntual, esto, aunque facilita su uso, lo hace muy costoso.

Existen modelos que requieren ajustes cada 15 minutos, entre ellos destacan los hornos solares tipo caja presentados por Buddhi y Sahoo [13], Herliyani y colaboradores [14], y Suharta y colaboradores [15]. Otro modelo que requiere ajustes es el horno de Sharaf [16] de tipo cónico.

En la literatura es posible encontrar modelos que requieren ajustes cada 20 minutos tal como el modelo de Khalifa [8] de tipo concentrador y como foco puntual se tiene el recipiente donde se cocinan los alimentos y algunos modelos de Löf [17] de tipo reflector parabólico.

Entre los hornos que requieren ajustes cada hora destaca el presentado por Oturañ [18] el cual es un modelo de tipo caja y otros modelos de Löf [17] de los que destacan los de tipo sombrilla.

En la literatura, el modelo de horno solar con frecuencia de ajuste mínima, es

el presentado por Nahar [2], este diseño considera sólo movimientos quincenales.

Con el fin de evitar inconvenientes ocasionados por los ajustes constantes a la trayectoria solar y teniendo como objetivo el diseño de un horno de fácil operación para su aplicación en comunidades rurales, un grupo del Centro de Investigación en Energía de la UNAM, Acosta y colaboradores [4], propusieron un horno solar tipo caja para ser usado en comunidades rurales de la zona intertropical. El aspecto novedoso en este diseño es la geometría de la cavidad, formada por siete lados, donde dos de ellos funcionan como base. Este diseño permite realizar el proceso de cocción con sólo cuatro simples ajustes a lo largo del año. El horno solar se propone con la idea de disminuir la deforestación a causa del consumo de leña empleada en la cocción de alimentos, principalmente en las comunidades rurales.

Una vez definida la geometría del horno solar, Vázquez y colaboradores [19] analizaron el comportamiento óptico mediante un modelo a escala, un heliodón y fotografías. Concluyeron que el diseño opto-geométrico propuesto es adecuado. Posteriormente Jaramillo y colaboradores [7], usando el mismo modelo a escala, el heliodón y una matriz de fotoresistencias sobre el colector, analizaron la contribución energética de los reflectores con el fin de determinar la concentración en la superficie colectora. Al término de su investigación, los autores observaron que la concentración en el colector es cercana a 2 al medio día solar y sugirieron la construcción de un prototipo para evaluar su comportamiento térmico.

Con los antecedentes arriba mencionados, se desarrolló la tesis *Diseño, Construcción y Caracterización de un Horno Solar Rural* [5], donde, además de documentar el trabajo realizado previamente por Acosta y colaboradores [4], Vázquez y colaboradores [19] y Jaramillo y colaboradores [7], se llevó a cabo la construcción de un prototipo del horno solar, así como su evaluación térmica durante dos meses. También se desarrolló un modelo teórico para determinar la concentración y la energía solar incidente en la superficie colectora del horno solar durante las horas de insolación basado en el modelo de Peres y Karlsson [6]. El modelo desarrollado sólo predecía la concentración en la época del año estudiada experimentalmente. De ese trabajo surgieron las propuestas que dan origen a esta tesis.

Durante el desarrollo de esa tesis [5], se realizaron pruebas en el horno durante noviembre y diciembre, por lo tanto, se conoce el comportamiento térmico para dicha época. Es recomendable ampliar las pruebas con la finalidad de conocer el comportamiento térmico del horno durante un periodo mayor.

Dado que el objetivo principal del horno es emplearlo para la cocción de alimentos, en esta tesis se realizan pruebas con alimentos que constituyen la base de la dieta mexicana en comunidades rurales. Se prueban dos tipos de granos: frijol y maíz. Este último en dos formas, tipo nixtamal y elotes. También se concluye el desarrollo del modelo teórico de concentración de energía solar

para el horno, basado en el modelo de Peres y Karlsson [6], para determinar la concentración de la energía incidente en la superficie colectora del horno solar durante las horas de insolación todos los días del año, además se completa el programa de cómputo respectivo. Los resultados se comparan con la investigación experimental realizada por Jaramillo y colaboradores [7].

En esta tesis se propone además el diseño de un nuevo horno solar, siguiendo la misma geometría del modelo actual, pero con adaptaciones para incrementar la eficiencia en el proceso de cocción y tratando de reducir el costo de fabricación.

La utilización del horno solar para cocción de alimentos tiene diversas ventajas, de las cuales podemos destacar las siguientes: desde el punto de vista ecológico, el empleo del horno solar ayudaría a disminuir la deforestación ocasionada por la utilización de leña empleada para la cocción de alimentos, principalmente en comunidades rurales. Además el uso de este dispositivo no produce residuos o desechos. Desde el punto de vista económico, su utilización disminuiría el tiempo empleado en la recolección de leña o en el gasto por la compra de este combustible, ya que la fuente energética que el horno utiliza para su funcionamiento es un recurso gratuito disponible en la cantidad suficiente en la mayor parte del territorio nacional. Por lo tanto, en esta tesis se realiza una estimación del ahorro de leña derivado del uso de este horno.

Capítulo 2

Consumo de leña para la cocción de alimentos

En este capítulo se presenta un panorama del consumo de leña a nivel mundial y nacional con la idea de estimar el ahorro en el consumo de leña que traería el uso del horno solar, como el propuesto, para la cocción de alimentos. Se analiza el consumo de leña en una comunidad rural a partir de una investigación realizada en el estado de Michoacán por Maser y colaboradores en 1987 [20], a saber, la única investigación de este tipo realizada en el país.

El consumo de leña está relacionado con factores y variables de la oferta y la demanda. Dentro de los factores destacan los sistemas locales de producción, las condiciones biofísicas asociadas con el estado de los recursos naturales y factores tecnológicos, además de la estructura socioeconómica tal como educación, acceso a los recursos forestales, los medios de transporte y las prácticas de cocinado [21].

2.1. Consumo mundial de leña

Los energéticos consumidos mundialmente son, en orden de importancia, el petróleo y el carbón, seguidos del gas natural, la energía nuclear y finalmente otros tipos de energéticos, donde se encuentra la leña. La cantidad total de energía que estos energéticos aportan, a nivel mundial, asciende a 4.26×10^{17} kJ [22] al año.

Comparativamente la leña es un combustible con baja aportación energética, 29.82×10^{15} kJ al año, lo que representa aproximadamente alrededor del 6% del total [23], sin embargo, en términos de cantidad de leña ésta es importante, ya

que representa 1.87×10^{12} kg o 3.32×10^9 m³ (177.26 kg, 0.53 m³ *per cápita*)¹. Cabe señalar que el 60 % del consumo total de madera en el mundo corresponde a su utilización como combustible, mientras que un 20 % se emplea en la rama de la construcción y en la elaboración de muebles y el 20 % restante corresponde al consumo en la industria papelera [22]. Esta distribución se muestra en la figura 2.1.

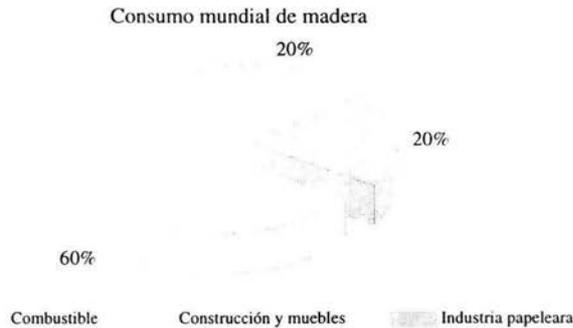


Figura 2.1: Consumo mundial de madera por aplicación para el año 2001 [22]

Según Delgado-Arellano [24], del 60 % del consumo mundial de madera, que se usa como combustible (17.89×10^{15} kJ), el 90 % corresponde al consumo en las comunidades rurales de los países en desarrollo. En los cuales aproximadamente el 90 % de los habitantes que habitan en la zona rural usan este recurso natural como energético primario dentro del sector doméstico.

2.2. Consumo nacional de leña

En esta sección se presenta un panorama del consumo energético en el ámbito nacional, empleando como fuente el Balance Nacional de Energía del año 2001 [25], lo que permite ubicar el consumo de leña para cocción de alimentos en nuestro país.

¹Para calcular la cantidad de leña se considera el poder calorífico de ésta como de 3800 kcal/kg y que 1.0 m³ de leña equivale a 565.25 kg [21]

El consumo de energía en el ámbito nacional asciende a 3941.30×10^{12} kJ [25], de los cuales el 89.4 %, aproximadamente 3523.52×10^{12} kJ, se obtienen a partir de los hidrocarburos, la contribución de las siguientes fuentes energéticas nucleo, hidro, geo y eólica es del 4.6 %, equivalente a 181.30×10^{12} kJ. La biomasa contribuye con el 3.6 %, la cual es equivalente a 141.89×10^{12} kJ y el 2.4 % de la energía restante, equivalente a 94.60×10^{12} kJ, se obtiene a partir del carbón.

El consumo de energía por sectores a nivel nacional se distribuyó de la siguiente forma: el sector transporte es el principal consumidor energético, con un 43 % de la energía total consumida, aproximadamente 1694.70×10^{12} kJ, seguido del sector industrial, cuyo consumo energético asciende a 31 %, es decir, el 1221.80×10^{12} kJ. El sector residencial consume el 19 %, equivalente a 748.84×10^{12} kJ, mientras que el sector comercial consume 118.23×10^{12} kJ, es decir 3 % del consumo energético total. El sector agropecuario consume el 3 %, equivalente a 118.23×10^{12} kJ y finalmente el sector con menor consumo energético es el público con solamente 1 % de la energía nacional total, aproximadamente 39.40×10^{12} kJ, tal como se muestran en la figura 2.2.

Consumo energético nacional por sectores

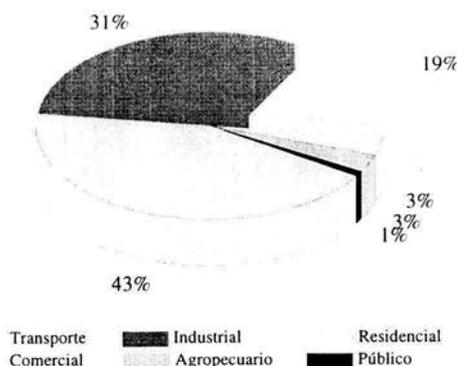


Figura 2.2: Consumo energético nacional por sectores en el 2001 [25]

Debido al interés en conocer el consumo de leña que se usa en la cocción de alimentos, se hace énfasis en el consumo de energéticos de acuerdo al tipo de combustible en el sector residencial.

Las principales fuentes energéticas empleadas en este sector son gas LP, leña, electricidad y gas natural junto con diesel y querosenos. El combustible más utilizado, gas LP, satisface el 41 % del consumo energético del sector, aproximadamente 307.02×10^{12} kJ, seguido de la leña con el 30 %, es decir, 224.657×10^{12} kJ, el consumo eléctrico satisface el 24 % equivalente a 179.72×10^{12} kJ y finalmente el gas natural, diesel y querosenos cuyo consumo satisface el 5 % del sector, esto es 37.44×10^{12} kJ. La figura 2.3 detalla el consumo de los energéticos empleados en el sector residencial. El consumo de leña a nivel residencial constituye el 6 % del consumo energético nacional.

Fuentes energéticas empleadas en el sector residencial

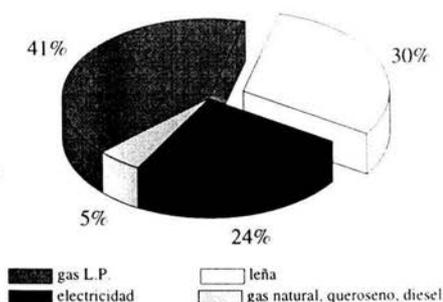


Figura 2.3: Consumo por tipo de energéticos en el 2001 en el sector residencial [25]

Es importante señalar que en México, en 1990, según datos del INEGI [26], el 91 % de los habitantes rurales y el 11 % de los habitantes urbanos cocinaban con leña.

Dado que la información arriba presentada no es suficiente para realizar una estimación del ahorro del bioenergético leña que traería consigo el uso del horno

solar propuesto en esta tesis, es necesario contar con información que proporcione datos concretos del consumo de leña para la cocción de alimentos, por ello se hizo uso de una investigación realizada sobre el patrón del consumo energético en una comunidad rural. El detalle de ésta se presenta en la siguiente sección.

2.3. Consumo regional de leña

Entre 1985 y 1986 Masera y colaboradores [20] realizaron una investigación de campo detallada sobre el patrón del consumo energético en la comunidad rural Cheranatzicurín, perteneciente al municipio de Paracho, en el estado de Michoacán. En esta investigación se determinan y caracterizan las distintas situaciones y problemáticas asociadas con el uso y manejo de los recursos energéticos en dicha comunidad.

La investigación se realizó aplicando la metodología denominada *Estrategias energéticas orientadas a los usos finales de energía*, la cual considera inicialmente la caracterización general del poblado, así como la medición de los gastos energéticos por fuente y por sector. Para la obtención de la información se emplearon mediciones *in situ* de las variable más importantes, así como también entrevistas abiertas y encuestas. Las entrevistas se realizaron a personas económicamente sobresalientes de la comunidad.

La comunidad tiene 2418 habitantes en 403 familias, las cuales habitan en 340 casas y tienen en promedio 6 miembros. La principal actividad de la comunidad es la agricultura, considerada como una actividad central.

Para el patrón de consumo energético se consideran cuatro sectores: productivo, de procesamiento, doméstico y servicios. Es posible agrupar estos sectores en forma análoga a los datos reportados en el Balance Energético Nacional correspondiente al año 2001 [25]. Así, el sector residencial es equivalente al sector doméstico en esta investigación, el sector comercial está conformado por los sectores productivo y de procesamiento, finalmente en el sector público ambas investigaciones coinciden en definición, como se ilustra en el cuadro 2.1. Es importante mencionar que el consumo nacional energético presentado se ha segregado del industrial, transporte, y agrícola, debido a las características de la comunidad en particular.

Sector de consumo	Porcentaje nacional [%]	Porcentaje regional [%]
Residencial	84	78
Comercial	13	16
Público	3	6

Cuadro 2.1: Consumo energético a nivel nacional y regional

Del cuadro 2.1 es posible notar que el sector residencial a nivel nacional y regional concentran el mayor consumo energético, seguido del sector comercial y finalmente el público. El consumo en energéticos en los niveles nacional y regional es cuantitativamente similar y presenta sólo pequeñas variaciones.

El consumo anual total de energía de estos tres sectores a nivel regional asciende a 29566.56×10^6 kJ. Su distribución por sectores se presenta de forma independiente para cada sector, junto con sus usos finales. Es importante señalar que en este estudio se considera la energía humana y animal empleada en las distintas actividades.

2.3.1. Patrón de consumo energético por sector

En esta subsección se presenta el patrón de consumo energético por sector derivado de la investigación en esta comunidad.

Sector residencial o doméstico

El consumo energético de este sector se divide principalmente en siete usos o actividades finales. La cantidad de energía anual que es consumida en este sector asciende a 23.08×10^6 kJ, equivalente al 78.08 % del consumo total de la comunidad.

Los usos finales o actividades consideradas son: iluminación, recreación, recolección de leña, obtención de agua, lavado de ropa, aseo personal y cocción de alimentos. El cuadro 2.2 presenta los consumos energéticos para cada uno de los usos o actividades finales.

Uso final	Energía [10^3 kJ/año]	Porcentaje [%]
Iluminación	1092.04	4.73
Recreación	33.91	0.14
Recolección de leña	228.34	0.98
Obtención de agua	81.42	0.35
Lavado de ropa	104.44	0.45
Aseo personal	1789.01	7.75
Cocción de alimentos	19757.50	85.60
Total	23086.67	100

Cuadro 2.2: Descripción general de los usos finales en el sector doméstico

Como puede observarse la cocción de alimentos representa un alto porcentaje del consumo energético para el sector doméstico (aproximadamente un 85.58 %) y en general de todos los sectores.

La dieta tradicional de la comunidad, al igual que en otras, está constituida básicamente de tortillas de maíz, frijoles, sopa de pasta o arroz, verduras silvestres y en menor medida de carne de pollo, pescado, puerco o res. Para realizar el proceso de cocción, los habitantes de esta comunidad rural emplean leña como principal fuente de energía, alcanzando un total de 1.5 kg *per capita* diariamente (equivalente a 1,323,855 kg de leña anual). El consumo anual de energía, por tipo, empleado en la cocción de alimentos es presentado en el cuadro 2.3, se incluye también la energía humana en la elaboración de tortillas.

Fuente energética	Energía [10 ⁶ kJ]	Energía por familia [10 ³ kJ]	Porcentaje [%]
Gas	123.01	305.23	0.62
Leña	19533.60	48470.42	98.91
Humana	91.97	228.20	0.46
Total	19748.58	49003.85	100

Cuadro 2.3: Uso de la energía en la cocción de alimentos

Las tortillas son un elemento indispensable en la dieta de las familias mexicanas, mismas que cobran gran importancia en comunidades rurales. Para su elaboración se demandan dos procesos, en el primero se elabora el nixtamal (cocimiento del maíz nixtamal con agua de cal molido en los molinos mecánicos para poder formar la masa del maíz). Posteriormente, se preparan las tortillas a mano con esta masa y se cuecen sobre un comal. En esta comunidad cada familia elabora el nixtamal con una frecuencia de 2 ó 3 veces por semana, el consumo de leña para el cocimiento es de 0.3 kg por cada kg de maíz.

El cuadro 2.4 presenta el uso de la leña anual para la cocción de alimentos, en el que destacan por separado el consumo para la elaboración de tortillas y para el cocimiento de nixtamal.

Tipo de alimento	Energía [10 ⁶ kJ]	Energía por familia [10 ³ kJ]	Porcentaje [%]
tortillas	7131.00	17694.78	36.50
nixtamal	1741.51	4321.34	8.92
otros	10661.09	26454.31	54.57
Total	19533.60	48470.43	100

Cuadro 2.4: Consumo de leña para cocción de alimentos

La leña es el recurso energético con mayor demanda en esta comunidad, motivo por el cual la obtención de esta fuente tiene un alto impacto en las actividades que desempeña la población. En general, los pobladores de la región ocupan 3.3 horas por familia al día de trabajo humano y 0.4 horas por familia

día de trabajo animal, lo cual representa 1.0% del consumo energético de este sector.

El tiempo que la comunidad invierte en la recolección de leña, así como la temporalidad en que realiza esta actividad se presentan en el cuadro 2.5. Cabe señalar que la recolección de leña es una actividad cuyas características varían en función del miembro de la familia que la efectúe.

Trabajo	Horas trabajo diario	Temporalidad	Horas anuales
hombre	0.7	5 horas/semana	30,672
mujer	1.3	3 horas 3 veces/semana	46,800
niños	1.3	3 horas 3 veces/semana	14,508
animal	0.4	3 horas/semana	15,552
Total	3.7	26 horas/semana	107,532

Cuadro 2.5: Recolección de leña

Sector Comercial

El sector productivo junto con el sector procesamiento forman el sector comercial y en conjunto consumen el 15.50% de la energía total de la comunidad. El consumo energético de este sector se divide en 10 actividades principales: labores agrícolas, resinación, maquila de guitarras, albañilería, venta de leña, venta de tortilla, labores en aserraderos, pulido de guitarras, molienda del maíz y manufactura mecánica de tortillas. Estas actividades productivas son las más importantes dentro de la comunidad. El consumo energético anual para cada actividad se presentan en el cuadro 2.6.

Actividades	Energía [10^6 kJ/año]	Porcentaje [%]
Labores agrícolas	896.55	19.70
Resinación	99.83	2.20
Maquila de guitarras	56.74	1.25
Albañilería	28.58	0.63
Venta de leña	132.05	2.90
Venta de tortillas	3199.87	70.25
Labores de aserradero	7.99	0.18
Pulido de guitarras	5.06	0.11
Molienda de maíz	101.00	2.22
Manuf mec de tortillas	25.51	0.56
Total	4553.18	100

Cuadro 2.6: Descripción general de los usos finales en el sector comercial

La fuente energética para estas actividades es básicamente la energía humana y en algunas de ellas también la energía animal, lo cual nos indica poca o nula mecanización de los procesos productivos.

Sector servicios

Finalmente, dentro de este sector se consideran tres usos finales del consumo energético: transporte, iluminación y televisión de escuela, mismos que representan el 6.42 % del consumo total, tal como lo presenta el cuadro 2.7.

En términos de las fuentes energéticas, el sector servicios está dominado por las fuentes comerciales: electricidad, gasolina y diesel. Los dos últimos representan el 95 % del consumo energético en este sector. Respecto al alumbrado público, este servicio se proporciona mediante focos incandescentes en las principales avenidas del poblado. El consumo energético debido a la televisión de la escuela es mínimo. Existen dos tipos de servicios de transporte en la comunidad: para pasajeros y de carga, mismos que se satisfacen por camiones y camionetas particulares.

Uso final de la energía	Energía [10^6 kJ/año]
Iluminación	80.13
Televisión de escuela	0.59
Transporte	1817.91
Total	1989.63

Cuadro 2.7: Descripción general de los usos finales en el sector servicios

En el capítulo 5 se empleará la información presentada en este capítulo para estimar el ahorro que representaría el uso del horno estudiado en esta tesis.

2.3.2. Consumo energético de leña por tipo

A partir de la información presentada se puede ver que las diferentes actividades productivas y de procesamiento se basan en el uso de la madera. El bosque satisface también las necesidades domésticas para la reparación o construcción de viviendas y en menor medida se talan árboles con fines comerciales como construcción de cajas de empaque.

La comunidad cuenta con una superficie boscosa de 1185 ha que corresponden al 31 % de la superficie total de la misma.

El consumo de leña por tipo se distribuye de la siguiente forma, los árboles aportan el 94.3 % del consumo de leña total, seguido de los arbustos, con el 5 %

y finalmente los residuos agrícolas con 0.7% de la energía total consumida por la comunidad.

Los géneros más consumidos son el pino y el encino, que en conjunto representan el 85% del consumo total de la leña, como se observa en la figura 2.4.



Figura 2.4: Consumo de leña por género [20]

En lo que respecta al uso de la leña según la parte del árbol, poco menos de la mitad corresponde al tronco (44.2%), lo que indica que se talan árboles para emplearlos como combustibles.

En esta comunidad se usan 1,630 toneladas de leña anuales destinándose principalmente a la cocción de alimentos (76.4%) y en general el sector doméstico, que en su conjunto alcanza el 87.4% del consumo total. Respecto a su temporalidad, ésta no se emplea en forma totalmente homogénea a lo largo del año, el consumo se incrementa en invierno y disminuye en primavera, debido al decremento de la precipitación pluvial, al registro de temperaturas más altas y la baja humedad relativa del aire. Debido a los factores mencionados, la leña se encuentra más seca que en otras épocas y se consume más eficientemente.

Capítulo 3

Modelo teórico de concentración

Para calcular la energía solar incidente en el horno y la concentración por los reflectores como función del tiempo a partir de las mediciones de energía solar global incidente en el plano horizontal, se desarrolló un modelo teórico basado en el modelo de Peres y Karlsson [6]. El modelo que estos autores proponen es aplicable a arreglos de colectores solares (planos o CPC) largos con un solo reflector; en dichos arreglos, el plano perpendicular al colector y al reflector es un plano vertical, además el ángulo entre la horizontal y el reflector (por la parte de atrás) es menor a 90° .

Dado que los reflectores este y oeste no cumplen con todas las condiciones establecidas por Peres y Karlsson [6], se introducen nuevas variables para estos casos, y se desarrollan las modificaciones respectivas; el modelo requiere modificaciones para el reflector norte en una época del año. En el trabajo previo [5] se había desarrollado parte del modelo para calcular la concentración solar y la energía solar incidente en el horno para una época del año; en esta tesis, se desarrolla dicho modelo para todo el año.

Además de determinar la concentración solar para todo el año, el modelo validado se empleó para analizar la concentración en los días en que se realiza el cambio de base, que no son equidistantes, sin embargo, son los más adecuados dada la concentración determinada para esos días. Este modelo se empleó también para determinar la energía incidente en el horno solar al realizar pruebas con alimentos, con la cual es posible conocer la cantidad de energía necesaria para la cocción de alimentos usando el horno solar.

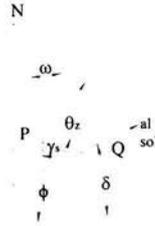


Figura 3.1: Geometría sol-tierra

3.1. Suposiciones del modelo

El modelo emplea como dato de entrada el valor medido de la irradiancia solar directa en el plano horizontal, en unidades de $[W m^{-2}]$, para el cálculo de la energía que incide en el horno por unidad de tiempo. Se considera la contribución de cada uno de los reflectores de forma individual e independiente de los otros, salvo por el sombreado. Se supone que los reflectores son infinitamente largos, es decir, no se toman en cuenta los efectos de borde. Sin embargo, dado el arreglo de los reflectores alrededor del horno, la aproximación resulta adecuada, como se verá posteriormente.

3.1.1. Cálculo de los ángulos de radiación solar

Primero se calcula el ángulo cenital, θ_z , formado por el rayo directo del sol respecto al cenit [27], esquematizado en 3.1.

$$\theta_z = \arccos(\cos \delta \cos \phi \cos \omega + \text{sen } \delta \text{ sen } \phi) \quad (3.1)$$

donde δ es el ángulo de declinación, ϕ es la latitud y ω es el ángulo horario.

Cuando el $\cos \theta_z \leq 0$ es de noche, por lo que sólo se harán los cálculos siguientes cuando $\cos \theta_z > 0$.

El ángulo de altura solar, α_s , se define como el ángulo formado por la horizontal y por una línea directa al sol y se calcula con 3.2 [27].

$$\alpha_s = \arcsin(\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \text{sen } \phi \text{ sen } \delta). \quad (3.2)$$

El ángulo azimutal solar es el ángulo formado por la proyección del vector que apunta al sol en el plano horizontal y el meridiando local (sur=0, este negativo y oeste positivo), se evaluará con las siguientes expresiones:

si $\omega < 0$, esto es antes de medio día solar

$$\gamma_s = \arccos \left\{ \frac{\sin \delta - \sin \phi \cos \theta_z}{\cos \phi \sin \theta_z} \right\} - 180^\circ, \quad (3.3)$$

pero si $\omega > 0$ es decir después del medio día solar

$$\gamma_s = 180^\circ - \arccos \left\{ \frac{\sin \delta - \sin \phi \cos \theta_z}{\cos \phi \sin \theta_z} \right\}. \quad (3.4)$$

La irradiancia solar directa, R_n , por unidad de tiempo y por unidad de área incidente en el plano normal a la radiación, está dado por [27]:

$$R_n = \frac{R_z}{\cos \theta_z}. \quad (3.5)$$

donde R_z es la irradiancia global sobre la horizontal en $W m^{-2}$.

3.1.2. Cálculo de la irradiancia sobre el colector

Primero se calcula el ángulo que forma la normal del colector y la dirección de la irradiancia normal directa, θ_c , el cual está dado por [27]

$$\begin{aligned} \theta_c = & \arccos \{ \sin \delta \sin \phi \cos \beta_c - \sin \delta \cos \phi \sin \beta_c \cos \gamma_c \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta_c \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta_c \cos \gamma_c \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \beta_c \sin \gamma_c \sin \omega \}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

donde β_c es la inclinación del colector medida con respecto al plano horizontal, γ_c es el ángulo azimutal del colector y δ es la declinación.

La irradiancia en la superficie del colector se calcula como

$$R_c = R_z \frac{\cos \theta_c}{\cos \theta_z}. \quad (3.7)$$

La potencia incidente directamente en el colector, I_c [W], se calcula mediante la expresión [27]

$$I_c = R_c A_c, \quad (3.8)$$

donde A_c es el área del colector, en m^2 .

3.1.3. Contribución del reflector sur

La configuración del reflector sur con el colector cumple las condiciones del modelo propuesto por Peres y Karlson [6], es decir, el plano perpendicular al colector y al reflector es un plano vertical y el ángulo entre la horizontal y el reflector (por la parte de atrás) es menor a 90^0 . Por lo que se siguió el procedimiento propuesto por estos autores.

Primero se calcula el ángulo de la altura solar aparente, α_p , en el plano perpendicular al colector y al reflector. A continuación se presenta la deducción de la expresión para calcular α_p .

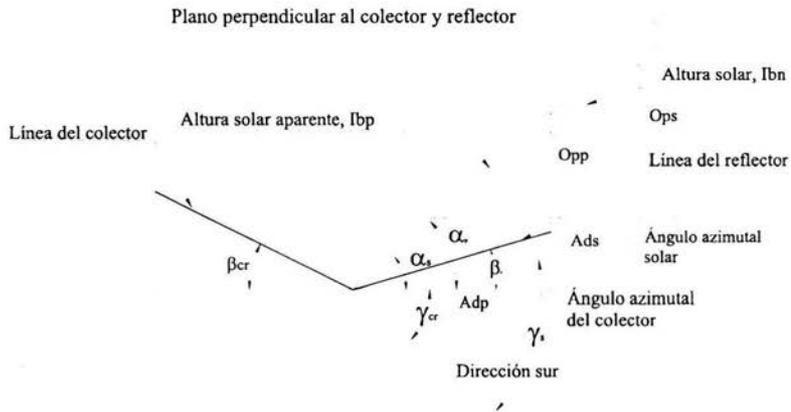


Figura 3.2: El plano vertical con la proyección de la radiación directa.

De la figura 3.2 es posible observar que

$$O_{pp} = O_{ps} \quad (3.9)$$

$$A_{dp} = A_{ds} \cos(\gamma_s - \gamma_{cr}) \quad (3.10)$$

donde γ_{cr} es el ángulo azimutal del plano perpendicular al colector y al reflector ($-90^0 \leq \gamma_{cr} \leq 90^0$, al sur $\gamma_{cr} = 0^0$, este negativo y oeste positivo). Por lo que, en el caso del reflector sur $\gamma_{cr} = 0^0$,
y también,

$$\tan \alpha_p = \frac{O_{pp}}{A_{dp}} . \quad (3.11)$$

Al sustituir A_{dp} (ecuación 3.10) en la ecuación (3.11) se obtiene

$$\tan \alpha_p = \frac{O_{pp}}{A_{ds} \cos(\gamma_s - \gamma_{cr})} . \quad (3.12)$$

De la figura 3.2 se observa también que

$$\tan \alpha_s = \frac{O_{ps}}{A_{ds}} , \quad (3.13)$$

y al sustituir las ecuaciones (3.9) y (3.13) en la ecuación (3.12) se tiene

$$\tan \alpha_p = \frac{\tan \alpha_s}{\cos(\gamma_s - \gamma_{cr})} , \quad (3.14)$$

depejando a α_p se llega a

$$\alpha_p = \arctan \left\{ \frac{\tan \alpha_s}{\cos(\gamma_s - \gamma_{cr})} \right\} . \quad (3.15)$$

Después se calcula la proyección de la irradiancia normal sobre el plano perpendicular al colector y al reflector, empleando las relaciones obtenidas a partir de la figura 3.2, esto es

$$\sen \alpha_s = \frac{O_{ps}}{I_{bn}} , \quad (3.16)$$

$$\sen \alpha_p = \frac{O_{pp}}{I_{bp}} , \quad (3.17)$$

y $O_{pp} = O_{ps}$, entonces

$$I_{bn} \sen \alpha_s = I_{bp} \sen \alpha_p , \quad (3.18)$$

donde I_{bn} es la irradiancia solar directa en un plano normal a la dirección del sol mientras que I_{bp} es la proyección de I_{bn} en el plano vertical al colector y al reflector con dirección γ_c . Despejando I_{bp} y usando $I_{bn} = A_r * R_n$ en 3.18, donde A_r es el área del reflector [m^2], en este caso el sur, se llega a

$$I_{bp} = R_n A_r \frac{\sen \alpha_s}{\sen \alpha_p} . \quad (3.19)$$

Para la evaluación de la contribución del reflector sur a la irradiancia se distinguen cuatro casos a lo largo del día, según el valor del ángulo de la altura solar

Cuatro casos de la contribución

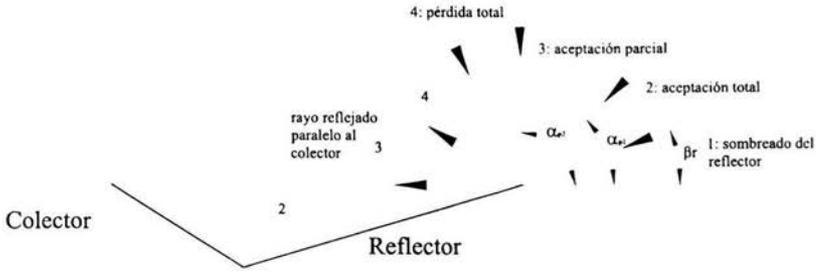


Figura 3.3: Los cuatro casos básicos de la contribución en la irradiancia del reflector al colector.

aparente con respecto a dos ángulos críticos que se encuentran esquematizados en la figura 3.3 y definidos por

$$\alpha_{p1} = 2\beta_r + \arctan \left\{ \frac{\text{sen } \beta_{cr} - \frac{L_r}{H} \text{sen } \beta_r}{\frac{L_r}{H} \cos \beta_r + \cos \beta_{cr}} \right\} \quad (3.20)$$

y

$$\alpha_{p2} = 2\beta_r + \beta_{cr} \quad (3.21)$$

donde β_{cr} es el ángulo del colector respecto a la horizontal trazada en la unión del colector y el reflector en cuestión, L_r y H son las longitudes del reflector y colector, respectivamente, medidas perpendicularmente a la unión de ambas.

Caso 1:

Cuando $\alpha_p < \beta_r$

El reflector sombrea al colector, por lo que su contribución, I_r en W , es negativa, en este caso, la contribución del reflector sur a la irradiancia está dada por

$$I_r = -I_c \frac{L_r}{H} \frac{\text{sen}(\beta_r - \alpha_p)}{\text{sen}(\beta_{cr} + \alpha_p)} \quad (3.22)$$

Caso 2:

Cuando $\beta_r < \alpha_p < \alpha_{p1}$

En estas condiciones toda la irradiancia reflejada por el reflector incide en el colector, I_r en W , entonces

$$I_r = I_c \rho \frac{L_r}{H} \text{sen}(\alpha_p - \beta_r), \quad (3.23)$$

donde ρ es la reflectancia efectiva del reflector.

Caso 3:

Cuando $\alpha_{p1} < \alpha_p < \alpha_{p2}$

La altura solar aparente es tan alta que parte de la irradiancia reflejada por el reflector, I_r en W , se pierde arriba del colector, entonces

$$I_r = I_c \rho \text{sen}(2\beta_r + \beta_c - \alpha_p). \quad (3.24)$$

Caso 4:

Cuando $\alpha_p > \alpha_{p2}$

Toda la irradiancia reflejada por el reflector, I_r en W , se pierde arriba del colector, por lo que

$$I_r = 0. \quad (3.25)$$

3.1.4. Contribución de los reflectores este y oeste

Las configuraciones del reflector este y del oeste con el colector no cumplen una de las condiciones del modelo propuesto por Peres y Karlsson [6]. En cada uno de los casos, el plano perpendicular al colector y al reflector no es un plano vertical, sino que presenta un ángulo con respecto a la vertical dado por la inclinación del colector en la dirección norte-sur, que se denotará como β^* , esquematizada en la figura 3.4. Estas configuraciones sí cumplen con la condición en la cual el ángulo entre la horizontal y el reflector (por la parte de atrás) es menor a 90° .

A continuación se presenta la deducción a las modificaciones del modelo de Peres y Karlsson [6] a partir de considerar la figura 3.4.

$$O_{pp} = O_{ps} \quad (3.26)$$

$$A_{dp} = A_{ds} \cos(\gamma_s - \gamma_{cr}), \quad (3.27)$$

donde γ_{cr} es el ángulo azimutal del plano perpendicular al colector y al reflector ($-90^\circ \leq \gamma_{cr} \leq 90^\circ$, al este $\gamma_{cr} = 0^\circ$, este negativo y oeste positivo). Por lo que, en el caso del reflector este u oeste $\gamma_{cr} = 90^\circ$ o $\gamma_{cr} = -90^\circ$, dependiendo de la ubicación.

También es fácil ver que

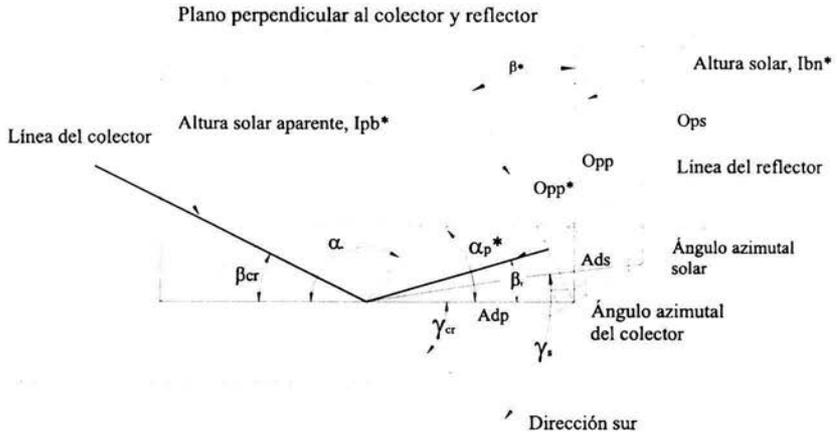


Figura 3.4: Plano perpendicular al colector y al reflector con inclinación norte-sur.

$$A_{dp}^* = A_{dp}, \quad (3.28)$$

así mismo,

$$O_{pp}^* = O_{pp} \cos \beta^*, \quad (3.29)$$

y

$$\tan \alpha_p^* = \frac{O_{pp}^*}{A_{dp}^*}, \quad (3.30)$$

sustituyendo (3.28) y (3.29) en (3.30) se llega a

$$\tan \alpha_p^* = \frac{O_{pp}}{A_{dp}} \cos \beta^*, \quad (3.31)$$

sustituyendo (3.27) en (3.31)

$$\tan \alpha_p^* = \frac{O_{ps}}{A_{ds}} \frac{\cos \beta^*}{\cos(\gamma_s - \gamma_{cr})}, \quad (3.32)$$

ahora, sustituyendo la ecuación (3.13) en (3.32) se llega a

$$\tan \alpha_p^* = \cos \beta^* \frac{\tan \alpha_s}{\cos(\gamma_s - \gamma_{cr})}. \quad (3.33)$$

Se puede ver de la figura 3.4 las mismas expresiones (3.16) y (3.17) que las deducidas para el reflector sur, por lo que al sustituir en la ecuación (3.26), se obtiene

$$I_{bp} = I_{bn} \frac{\text{sen } \alpha_s}{\text{sen } \alpha_p}, \quad (3.34)$$

que es la expresión para determinar la irradiancia de la proyección normal para los reflectores este y oeste en W , pero sin considerar el ángulo respecto a la vertical dado por la inclinación del colector en la dirección norte-sur, denotado por β^* . Para incluir esta consideración se emplean las siguientes expresiones, deducibles a partir de la figura 3.4, de la cual se observa que

$$\cos \alpha_p = \frac{A_{dp}}{I_{bp}}, \quad (3.35)$$

$$\cos \alpha_p^* = \frac{A_{dp}^*}{I_{bp}^*}. \quad (3.36)$$

Al combinar (3.35) y (3.36) junto con la ecuación (3.28) se obtiene

$$I_{bp} \cos \alpha_p = I_{bp}^* \cos \alpha_p^*, \quad (3.37)$$

al despejar I_{bp}^* se tiene

$$I_{bp}^* = I_{bp} \frac{\cos \alpha_p}{\cos \alpha_p^*}. \quad (3.38)$$

Esta es la expresión empleada para determinar la proyección de la radiación I_{bn} sobre el plano perpendicular al colector y al reflector I_{bp}^* .

El ángulo de la altura solar aparente, α_p , en el plano vertical con orientación, del eje del colector-reflecto, está dado por:

para el reflector este

si $\omega \leq 0$

$$\alpha_p = \arctan \left\{ \frac{\tan \alpha_s}{\cos \beta^* \cos(\gamma_s - \gamma_{cr})} \right\}, \quad (3.39)$$

pero si $\omega > 0$

$$\alpha_p = 180^\circ + \arctan \left\{ \frac{\tan \alpha_s}{\cos \beta^* \cos(\gamma_s - \gamma_{cr})} \right\}. \quad (3.40)$$

Mientras que para el reflector oeste

si $\omega \leq 0$

$$\alpha_p = 180^0 + \arctan \left\{ \frac{\tan \alpha_s}{\cos \beta^* \cos(\gamma_s - \gamma_{cr})} \right\}, \quad (3.41)$$

pero si $\omega > 0$

$$\alpha_p = \arctan \left\{ \cos \beta^* \frac{\tan \alpha_s}{\cos(\gamma_s - \gamma_{cr})} \right\}. \quad (3.42)$$

Para la evaluación de las contribuciones de los reflectores este y oeste a la irradiancia se presentan los mismos cuatro casos que para el reflector sur (ecuaciones 3.22, 3.23, 3.24 y 3.25) y las expresiones para el cálculo son las mismas.

3.1.5. Contribución del reflector norte

La configuración del reflector norte respecto al colector y reflector cumple las condiciones del modelo propuesto por Peres y Karlsson [6] para la época comprendida de marzo 8 a octubre 6, es decir, el plano perpendicular al colector y al reflector es un plano vertical, además el ángulo entre la horizontal y el reflector (por la parte de atrás) es menor a 90^0 . Por lo tanto para dicha época, el modelo no requiere modificación alguna y se emplean las expresiones (3.15) y (3.19) para la altura solar y para la I_{bp} , respectivamente, además de que se distinguen los mismos cuatro casos que para el reflector sur.

Sin embargo, para el periodo comprendido de octubre 7 a marzo 7, el ángulo entre la horizontal y el reflector (por la parte de atrás) es mayor a 90^0 motivo por el cual el modelo propuesto por Peres y Karlsson [6] se requiere modificar.

Las expresiones para α_p y para I_{bp} siguen siendo las mismas del modelo original (ecuaciones 3.15 y 3.19 respectivamente).

En esta configuración se presentan cuatro casos, definidos según el valor del ángulo de altura solar aparente con respecto a otros dos ángulos críticos.

$$\alpha_{c1} = 180^0 - (2\beta_r + \beta_{cr}), \quad (3.43)$$

y

$$\alpha_{c2} = 180^0 - (2\beta_r + \beta_{cr}) + \arctan \left\{ \frac{\frac{L_r}{H} \text{sen}(\beta_r + \beta_{cr})}{1 + \frac{L_r}{H} \cos(\beta_r + \beta_{cr})} \right\}. \quad (3.44)$$

Los casos son los siguientes:

Caso 1:

Cuando $\alpha_p < \alpha_{c1}$

Toda la irradiancia reflejada, I_r en W , se pierde por arriba del colector, entonces

$$I_r = 0 \quad (3.45)$$

Caso 2:

Cuando $\alpha_{c1} < \alpha_p < \alpha_{c2}$

Parte de la irradiancia reflejada por el reflector, I_r en W , se pierde arriba del colector y parte incide en él, en este caso

$$I_r = \frac{1}{2} I_c \rho \text{sen} \{2(\alpha_p + 2\beta_r + \beta_{cr})\} . \quad (3.46)$$

Caso 3:

Cuando $\alpha_{c2} < \alpha_p < 180^\circ - \beta$

Toda la irradiancia que incide sobre el reflector se refleja en el colector, I_r en W , entonces

$$I_r = I_c \rho \text{sen}(\beta_r + \alpha_p) . \quad (3.47)$$

Caso 4:

Cuando $180^\circ - \beta_r < \alpha_p$

Este caso nunca se presenta en la configuración del horno, por lo que no se dedujo la expresión correspondiente.

3.1.6. Efecto de sombreado

Los reflectores este y oeste producen sombra en los reflectores norte y sur para diferente época.

Debido a la ubicación, los efectos de sombreado en el reflector norte se presentan en la mayor parte del año. Durante el día, este efecto ocurre en dos ocasiones, el primero en la mañana, antes de las 10 : 00 h, y el segundo en la tarde, después de las 14 : 00 h, para tomar en cuenta este hecho se resta a la irradiancia calculada el efecto de sombreado. Esto se hace cuando los valores de α_p y de β_r del reflector este (o del reflector oeste) satisfacen $\alpha_p < \beta_r$, entonces la irradiancia que debe restarse al reflector norte por efecto de sombreado de colector este (o oeste) está dada por

$$I_{rsom} = -I_r \left\{ \frac{L_r \text{sen}(\beta_r - \alpha_p)}{H \text{sen}(\beta_c + \alpha_p)} \right\} , \quad (3.48)$$

donde los valores de los parámetros de esta última expresión L_r , H , β_r , β_c y α_p corresponden al reflector este u oeste, según sea el caso y I_r en W corresponde al reflector norte.

El efecto del sombreado en el reflector sur ocurre sólo en la época en la que el sol se encuentra orientado al norte, desde el 16 de mayo a julio 28. Para el

reflector sur se presentan los efectos análogos de sombreado del reflector norte, es decir, el reflector sur es sombreado por el reflector este por la mañana, antes de las 10 : 00 h, y por el oeste por la tarde, después de las 14 : 00 h, lo cual se presenta cuando los valores de α_p y de β_r del reflector este (o del reflector oeste) satisfacen $\alpha_p < \beta_r$, entonces la irradiancia que debe restarse al reflector sur por efecto de sombreado de colector este (o oeste) está dada por 3.48 en la cual los valores de los parámetros L_r , H , β_r , β_c y α_p corresponden al reflector este u oeste, según sea el caso y I_r corresponde al reflector sur en W .

La concentración, C , se define como

$$C = \frac{I_c + I_N + I_S + I_E + I_O}{I_c} \quad (3.49)$$

donde I_c es la potencia que incide directamente en el colector, I_N es la potencia que incide en el colector desde el reflector norte, I_S es la potencia que incide en el colector desde el reflector sur, I_E es la potencia que incide en el colector desde el reflector este y finalmente I_O es la potencia que incide en el colector desde el reflector oeste.

3.1.7. Parámetros geométricos del modelo

Dado el diseño del horno y que a lo largo del año se tienen cuatro diferentes configuraciones que implican cambios de orientación y/o cambios de lado que se usa como base del horno, los valores geométricos del modelo cambian para cada una de las cuatro épocas, tal como se presentan a continuación.

El cuadro 3.1 incluye los valores de los parámetros geométricos que usa el modelo a partir de octubre 7 hasta marzo 7.

	Colector	Ref norte	Ref sur	Ref este	Ref oeste
β_c	40.00				
β_{cr}		-40.00	40.00	0.00	0.00
β_r		105.00	30.00	65.00	65.00
γ_c	0.00	0.00	0.00	-90.00	90.00
γ_{cr}		0.00	0.00	-90.00	90.00
L_r		0.63	0.73	0.65	0.65
H		0.63	0.63	0.63	0.63
Ancho		0.66	0.66	0.79	0.79
Área	0.5214	0.4158	0.4848	0.5135	0.5135
β^*				40.00	40.00

Cuadro 3.1: Parámetros geométricos de octubre 7 a marzo 7.

El cuadro 3.2 muestra los parámetros geométricos que se utilizan en dos periodos: el primer periodo es de marzo 8 hasta mayo 15 y el segundo se inicia a partir de julio 30 hasta octubre 6.

	Colector	Ref norte	Ref sur	Ref este	Ref oeste
β_c	10.00				
β_{cr}		10.00	0.00	0.00	-10.00
β_r		55.00	65.00	65.00	80.00
γ_c					
γ_{cr}		90.00	-90.00	90.00	180.00
L_r		0.63	0.65	0.65	0.73
H		0.79	0.66	0.66	0.79
Ancho		0.66	0.79	0.79	0.66
Área	0.5214	0.4158	0.5135	0.5135	0.4818
β^*				10.00	10.00

Cuadro 3.2: Parámetros geométricos de marzo 8 hasta mayo 15 y julio 30 a octubre 6 .

Para el periodo comprendido de mayo 16 a julio 29 se emplean los parámetros presentados en el cuadro 3.3.

	Colector	Ref norte	Ref sur	Ref este	Ref oeste
β_c	10.00				
β_{cr}		-10.00	0.00	0.00	10.00
β_r		80.0	65.00	65.00	55.00
γ_c	180.00				
γ_{cr}		0.00	-90.00	90.00	0.00
L_r		0.63	0.65	0.65	0.63
H		0.79	0.66	0.66	0.79
Ancho		0.66	0.79	0.79	0.66
Área	0.5214	0.4158	0.5135	0.5135	0.4158
β^*				-10.00	-10.00

Cuadro 3.3: Parámetros geométricos de mayo 16 hasta julio 29.

Entonces las fechas propuestas para los cambios de configuración son marzo 8, mayo 15, julio 30 y octubre 7. Como se observa estas fechas no son equidistantes, esto debido a que en latitudes diferentes del Ecuador, como la de Temixco, Morelos (18.84°), las fechas de cambio de orientación norte-sur del ángulo cenital, θ_z , al medio día solar no son equidistantes.

Capítulo 4

Metodología experimental

Las pruebas realizadas en el horno solar propuesto por un grupo del CIE de la UNAM y construidos por [5] tienen dos objetivos fundamentales, el primero es llevar a cabo la caracterización térmica del horno y el segundo es poner a prueba el horno para cocinar alimentos. En la figura 4.1 se presenta el horno empleado en esta tesis, el cual es de acero inoxidable tipo 403, calibre 20 calidad espejo.

El horno es una cavidad con 7 lados, el perfil se aprecia en la figura 4.2. Dos lados funcionan como bases en diferentes épocas del año. Para el periodo de octubre 7 a marzo 7 se emplea la base d con orientación al sur, a partir del 8 de marzo y hasta el 15 de mayo la base que se usa como tal es la c , orientada también al sur. De mayo 16 a julio 29 se usa la base c pero con orientación al norte y para el periodo de julio 30 a octubre 6 se usa la base c pero con orientación al sur.

La metodología experimental empleada para la evaluación térmica del horno está basada en procedimientos internacionales estandarizados para pruebas en hornos y estufas solares [28]. Los detalles de los procedimientos internacionales, así como del cálculo de la carga y la selección de los recipientes empleados en las pruebas se encuentran en la investigación *Diseño, Construcción y Caracterización de un Horno Solar Rural* [5], la cual da origen a esta tesis.

En los dos tipos de pruebas realizadas con el horno, la caracterización térmica y la cocción de alimentos, se hicieron mediciones de dos tipos de variables: variables independientes y variables dependientes. Las variables independientes son la radiación solar global, la velocidad del viento y la temperatura ambiente, las cuales fueron medidas por la estación meteorológica del CIE-UNAM. Como variables dependientes se tiene la temperatura en distintos puntos del horno,

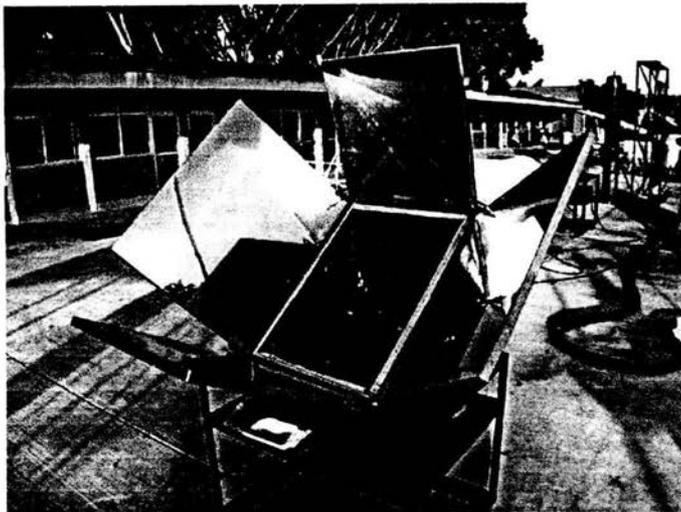


Figura 4.1: Vista del horno solar tipo caja propuesto por Acosta *et al.* [4] y construidos por Hernández-Luna[5].

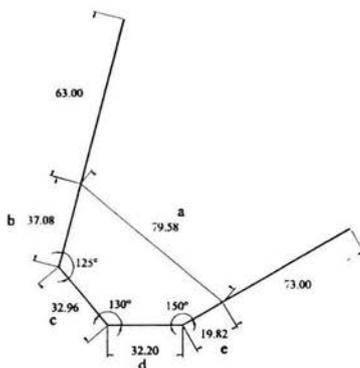


Figura 4.2: Vista del horno solar tipo caja propuesto por Acosta *et al.* [4] y construidos por Hernández-Luna[5].

incluyendo la carga dentro de los recipientes y en las pruebas con alimentos además se considera el tiempo de cocción. Las pruebas se realizaron del mes de

octubre del 2002 hasta el mes de marzo del 2003, realizando 6 pruebas distintas cada mes.

4.1. Medición de las variables independientes

La medición de las variables independientes se efectuó en forma automatizada con un sistema de adquisición de datos modelo *CR10X* de la *Campbell Scientific, Inc.* Este sistema forma parte de la estación meteorológica del CIE, localizada a 8.9 m de altura, de la cual está a cargo del Dr. Camilo Arancibia B.

4.1.1. Radiación solar global

El instrumento empleado en la medición de la radiación solar global se denomina piranómetro [29]. La parte sensora del piranómetro es una superficie circular plana que está constituida por diversas láminas blancas y negras colocadas alternadamente y unidas cada una a un termopar formando una termopila. La superficie sensora está dispuesta de tal forma que recibe radiación de todas direcciones con el campo de visión limitado al hemisferio celeste y sin obstáculos en el horizonte a su alrededor. Esta superficie se encuentra cubierta con un domo de vidrio que evita el efecto del viento y precipitaciones. El piranómetro usado en este trabajo es de la marca *Eppley*, modelo B&W (blanco y negro).

4.1.2. Velocidad del viento

La medición de la velocidad del viento se realiza empleando un anemómetro de copas marca *R. M. Young*, modelo *12102D*, colocado a 8.9 m de altura. Este instrumento consiste de un sistema giratorio que es accionado por el viento que incide en las copas. La frecuencia del giro es proporcional a la velocidad del viento. El sistema giratorio tiene 10 ventanas que permiten el paso de la luz, en forma pulzada, desde una fuente colocada en el centro hacia el fotoreceptor colocado en el exterior. Éste produce un pulso de salida que es medido por el contador de pulsos del sistema de adquisición *CR01X*.

4.1.3. Temperatura ambiente

La medición de la temperatura ambiente se realiza con dos instrumentos independientes. El primero es un termómetro de la estación meteorológica del CIE, marca *Campbell Scientific, Inc.* modelo *CS500*. Este instrumento es un termómetro termoresistivo que emplea como elemento sensor una resistencia de

platino de 1000 ohm. El segundo instrumento empleado es un termopar tipo "T" como los utilizados en la medición de las temperaturas del horno.

4.2. Medición de las variables dependientes

Como variables dependientes se toman las temperaturas del horno en diversos puntos y el tiempo de cocción del alimento. Las pruebas iniciaron a las 10 : 00 h en tiempo oficial, para el caso de los experimentos para la caracterización, éstas se realizaron hasta las 18 : 00 h y en el caso de las pruebas con alimentos, el periodo de prueba dependió del proceso de cocción.

4.2.1. Temperatura del horno

La medición de temperatura del horno se realizó en forma automatizada haciendo uso de un sistema de adquisición de datos de Hewlett-Packard (HP) modelo 34970A con un módulo multiplexor HP34908A de 40 canales [30]. Este sistema permite leer señales directas de los termopares, ya que cuenta con medición de temperatura de la junta de referencia.

La medición de la temperatura del horno, en las dos pruebas, se efectúa con 38 termopares tipo "T" (cobre-constantán) A. Se determinó usar 38 termopares, debido a la capacidad del sistema de adquisición de datos, ya que la tarjeta adquisidora cuenta con 40 canales. Se escogieron termopares calibre 36, el cual es relativamente pequeño, su baja inercia térmica y además son más adecuados para medir temperaturas de superficies. La distribución de los termopares en el horno se muestra en las siguientes figuras, en todas ellas se le asigna un número a cada termopar, lo que servirá para identificarlo en el capítulo de resultados.

En la figura 4.3 se aprecian 13 termopares (representados por los puntos) colocados en la caja interior del horno. Los termopares se agrupan en secciones de acuerdo a su ubicación.

La sección *I* la conforman los termopares colocados en las bases interiores (termopares 2 al 7) y en los lados norte-sur (termopares 1 y 8), la sección *II* contiene los termopares colocados en los lados interiores este-oeste (termopares del 9 al 13).

La sección *III* está formada por los termopares distribuidos en la carga (termopares 14, 15, 16 y 30), mismos que se aprecian en la figura 4.4. Es importante hacer notar que los termopares se encuentran colocados a 1 y a 10 cm de la base de cada olla y en el centro de la misma. Las características de las ollas se presentan en .

La distribución de los termopares en la caja exterior fue dividida en 5 secciones. Continuando con la numeración anterior; la sección *IV* contiene a los

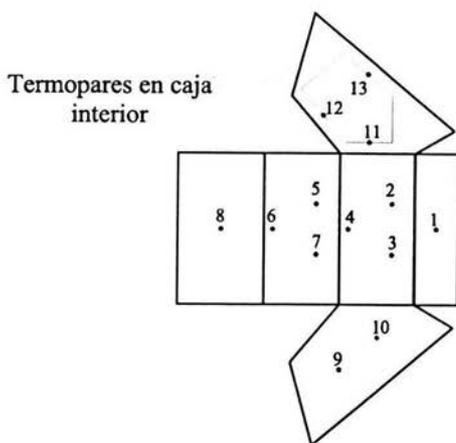


Figura 4.3: Termopares en caja interior del horno

Termopares en la carga

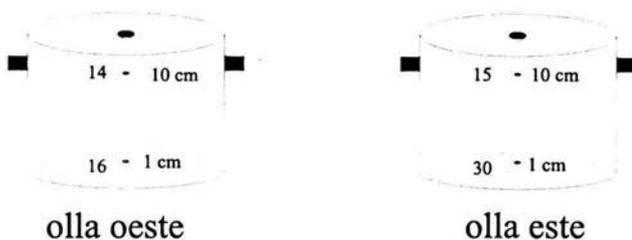


Figura 4.4: Termopares en la carga

termopares colocados en las bases exteriores (termopares 25 y 34) y también a los termopares colocados en los costados norte-sur del horno (termopares 20 y 32), mientras que los termopares colocados en las paredes exteriores (23, 24, 26, 27 y 28) se encuentran en la sección V. La sección VI está formada por los termopares colocados en los cuatro reflectores (termopares 17, 22, 29 y 31),

esquematisados en la figura 4.5.

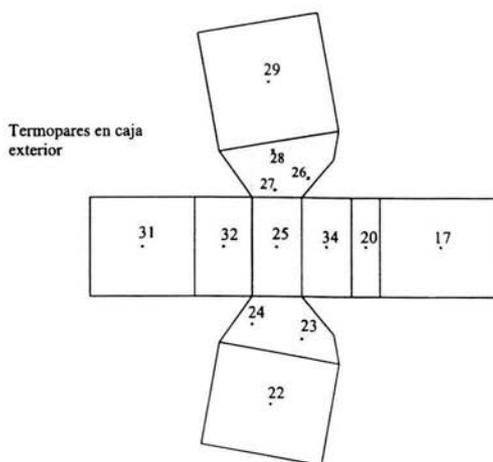


Figura 4.5: Termopares distribuidos en la caja exterior del horno

La sección *VII* contiene los termopares distribuidos en el marco que une a las cajas interior y exterior (termopares 35 al 38), finalmente la sección *VIII* la conforman los termopares distribuidos en el vidrio (termopar 18 en el interior del horno y el termopar 33 en el exterior, ambos en el mismo punto). La figura 4.6 muestra la distribución de los 4 termopares distribuidos en el marco que une a las cajas así como también muestra los 2 termopares en la superficie transparente.

4.2.2. Tiempos de cocción

La medición del tiempo de cocción se consideró sólo para las pruebas con alimentos. El tiempo de cocción se define como el tiempo desde que el alimento se expone al sol hasta su cocción. Cabe señalar que las pruebas iniciaron a las 10 : 00 h en el tiempo oficial (09 : 20 h en tiempo solar).

El tiempo de cocción se midió empleando el siguiente criterio. Cada media hora se observaba la temperatura en el interior de la carga, una vez que la carga alcanzaba la temperatura denominada de cocción, 80°C, se verificaba si el alimento en cuestión estaba cocinado tomando una muestra. Para el caso del frijol, éste se presionaba entre los dedos para comprimirlo, cuando se comprimía fácilmente, el alimento estaba cocinado. En las pruebas con maíz nixtamal, al tomar

Termopares en la superficie transparente

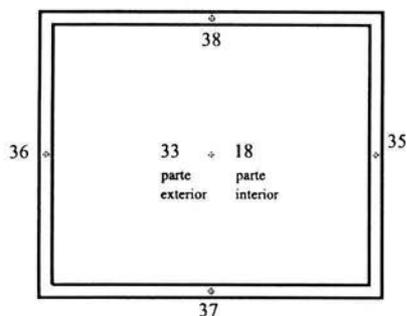


Figura 4.6: Termopares distribuidos en el marco de unión de las cajas en el colector

una muestra se verificaba que la primer capa que cubre al maíz se desprendiera fácilmente. En caso de no estar cocinado se revisaba cada media hora.

4.3. Carga

Para los dos tipos de pruebas se emplearon dos recipientes de aluminio recubiertos con pintura negra por la parte exterior. Las características detalladas de los recipientes y del recubrimiento se encuentran en el apéndice B.

4.3.1. Pruebas para caracterización

En la caracterización del horno se hicieron pruebas bajo tres distintas condiciones, con el horno vacío, con 6 litros de agua y con 6 litros de aceite. La tabla 4.1 presenta las condiciones climáticas bajo las cuales se realizaron las pruebas, a medio día solar, así como también la fecha de realización y el índice de claridad para cada día. La expresión para determinar el índice de claridad se presenta a detalle en el apéndice C. Vale la pena mencionar que los datos climáticos del mes de octubre no se presentan debido a problemas técnicos con la estación meteorológica del CIE. En total se hicieron 6 pruebas para cada condición.

No.	Condición	Fecha	R_z [W m ⁻²]	T_a [°C]	V_v [m s ⁻¹]	K_T
1	vacío	oct 1, 2002				
2	agua	oct 2, 2002				
3	aceite	oct 4, 2002				
4	vacío	nov 6, 2002	511	25	1	0.42
5	agua	nov 7, 2002	780	25	1	0.65
6	aceite	nov 8, 2002	840	26	1	0.68
7	vacío	dic 3, 2002	783	26	1	0.68
8	agua	dic 9, 2002	722	25	1	0.63
9	aceite	dic 13, 2002	670	23	1	0.47
10	vacío	ene 9, 2003	770	26	1	0.54
11	agua	ene 10, 2003	750	27	1	0.61
12	aceite	ene 20, 2003	765	25	6	0.66
13	vacío	feb 03, 2003	780	26	1	0.63
14	agua	feb 06, 2003	740	24	1	0.68
15	aceite	feb 07, 2003	820	28	1	0.69
16	vacío	mar 3, 2003	850	28	1	0.68
17	agua	mar 4, 2003	862	31	1	0.69
18	aceite	mar 6, 2003	930	29	1	0.71

Cuadro 4.1: Pruebas realizadas en el horno solar para la caracterización

4.3.2. Pruebas para cocción de alimentos

En las pruebas para la cocción de alimentos, las cantidades empleadas se determinaron con base al consumo de una familia de 5 miembros. Este dato se tomó del Censo Nacional de Población y Vivienda del INEGI del año 2000, el cual reporta 4.44 miembros en una familia, los cuales se aproximaron a 5 habitantes promedio por vivienda en toda la República Mexicana [26].

Considerando el uso del horno en comunidades rurales, los alimentos seleccionados fueron frijol y maíz, este último en dos modalidades: elote y nixtamal (para preparar tortillas). La idea de cocer nixtamal en el horno, radica en que éste es un proceso previo a la elaboración de tortillas, la cual consta de dos procesos. El primero de ellos es la preparación del nixtamal [20], esto es el cocimiento de los granos de maíz a fuego lento con agua de cal. Posteriormente, este maíz se muele en los molinos mecánicos para poder formar la masa del maíz y con esta masa se preparan las tortillas en un comal.

Las pruebas de cocción de alimentos se realizaron con 1 kg de maíz, 1 kg de frijol y de 5 a 6 elotes.

En las pruebas de maíz nixtamal, se emplearon 6 litros de agua por cada 1 kg

de maíz adicionado con 20 g de cal. En el caso de las pruebas empleando frijol, las proporciones para los líquidos variaron de 5 a 6 litros de agua, dependiendo del volumen que ocupaba el frijol en las ollas. Cabe mencionar que el frijol empleado en las pruebas fue previamente remojado, aproximadamente 12 horas antes de la prueba. Para las pruebas con elote se utilizaron de 5 a 6 piezas, dependiendo del tamaño de éstos, el contenido de agua también varió de 2.7 a 3 litros de agua por la misma razón. El cuadro 4.2 presenta los días en que se realizaron las pruebas y las condiciones en que éstas se llevaron a cabo. Las pruebas están numeradas para su posterior referencia.

No.	Condición	Fecha	R_z [W m ⁻²]	T_a [°C]	V_v [ms ⁻¹]	K_T
1	maíz	oct 09,2002				
2	frijol	oct 11,2002				
3	nixtamal	nov 18,2002	820	23	1	0.62
4	frijol	nov 19,2002	790	24	1	0.68
5	elote	nov 21,02	800	22	1	0.66
6	nixtamal	dic 10,2002	743	25	1	0.66
7	elote	dic 16,2002	342	23	1	0.40
8	frijol	ene 6,2003	270	27	1	0.60
9	nixtamal	ene 21,2003	765	25	1	0.65
10	frijol	ene 22,2003	760	23	1	0.60
11	elotes	ene 23,2003	720	26	1	0.61
12	nixtamal	feb 10,2003	820	28	1	0.66
13	frijol	feb 12,2003	825	26	1	0.68
14	elotes	feb 13,2003	821	26	1	0.67
15	nixtamal	mar 10,2003	930	29	1	0.68
16	frijol	mar 11,2003	870	30	1	0.62
17	elote	mar 12,2003	850	30	1	0.61

Cuadro 4.2: Pruebas de cocción de alimentos realizadas en el horno solar

4.4. Procedimiento diario

Los experimentos se realizaron en la plataforma experimental del Centro de Investigación en Energía de la UNAM en la ciudad de Temixco Morelos cuya latitud es 18°50.33'.

El procedimiento general seguido en las pruebas para la caracterización, así como en las pruebas de cocción de alimentos, se divide en dos etapas principales: preparación del horno y preparación del sistema de adquisición de datos (SAD).

Esta sección presenta únicamente un bosquejo de las dos etapas. Los detalles de los procedimientos que involucran al sistema de adquisición de datos se encuentran en [5].

La preparación del horno para la prueba implica verificar la orientación del horno y el ajuste del ángulo de los reflectores este y oeste, así como también la preparación de la carga, que varía según el tipo de prueba. La preparación del horno se debe a que éste se mantenía dentro de la caseta de la plataforma experimental.

La preparación del SAD tiene tres etapas: preparación del SAD, adquisición y vaciados de datos.

- Preparación del sistema de adquisición de datos. En el laboratorio se verifica que no existan datos almacenados en el SAD. En la plataforma experimental se introduce la tarjeta multiplexora y se programa el sistema.
- Toma de datos. La toma de datos se realiza en la plataforma de experimentación, está enmarcada entre las instrucciones al sistema de inicio y final de la adquisición.
- Vaciado de datos. El vaciado a la computadora de los datos capturados durante el experimento en la plataforma se realiza en el laboratorio. Los datos obtenidos se almacenan en un archivo con formato texto.

En las pruebas con alimentos, el tiempo de cocción se midió desde que inicia la prueba hasta que el alimento se encontraba cocinado. Para verificar la cocción del alimento, una vez que la carga alcanzó la temperatura de cocción, se hacían revisiones del alimento cada media hora hasta verificar la cocción.

En el siguiente capítulo se presenta el análisis de los resultados de las 35 pruebas realizadas bajo las seis distintas condiciones de prueba. Tres de estas condiciones se realizaron para dar continuidad al proceso de caracterización del horno y las tres restantes para evaluar el comportamiento del horno en el proceso de cocción de alimentos.

Capítulo 5

Resultados y análisis

En este capítulo se presentan los resultados de los experimentos y el análisis de los mismos en cuatro secciones. La primera sección muestra los resultados obtenidos de la caracterización térmica del horno solar junto con las variables climáticas bajo las cuales se realizaron los experimentos de las 10 : 00 h a las 18 : 00 h. La segunda sección presenta los resultados obtenidos del proceso de cocción. En la tercer sección se presenta la estimación del ahorro de leña que traería consigo la utilización del horno solar en la cocción de alimentos y finalmente la cuarta sección contiene las comparaciones del modelo teórico de concentración con los resultados obtenidos experimentalmente por Jaramillo y colaboradores [7].

5.1. Caracterización del horno

Para evaluar el comportamiento del horno y comparar su desempeño, sin carga y con carga (aceite o agua), se analizan las temperaturas registradas a las 12 : 00 h (dos horas después de iniciar las pruebas) en tiempo solar en las ocho secciones donde se colocaron los termopares, se incluye también la máxima temperatura y la hora en que ésta se registró para cada sección. Se presentan, al final de esta sección, gráficas de temperatura como función del tiempo para un experimento representativo de las pruebas.

5.1.1. Pruebas sin carga

A continuación se presenta el análisis de los resultados de las pruebas sin carga.

El promedio de la radiación global a medio día solar fue de $800 \pm 24 \text{ W m}^{-2}$. Las variaciones mayores de 100 W m^{-2} en la radiación global duraron menos que 10 minutos. Vale la pena mencionar que durante la prueba realizada en el mes de noviembre hubo un cielo despejado por la mañana y se presentó nubosidad por la tarde, esto es que los niveles de radiación fueron bajos en ese periodo, lo cual se ve reflejado en la bajas temperaturas obtenidas para ese día y en el índice de claridad.

La velocidad del viento en los días de pruebas fue en promedio 1 m s^{-1} con ráfagas mayores de 2.5 m s^{-1} por periodos menores que 10 minutos.

El promedio de la temperatura ambiente fue de $26.3 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a las 12 : 00 h en tiempo solar.

Bases interiores del horno La menor temperatura registrada en esta sección a las 12 : 00 h fue de 64°C por el termopar 08, colocado en la base orientada al sur el día 6 de noviembre. Es importante mencionar que la menor temperatura se registró en un día nublado (con una radiación global promedio al medio día solar de 500 W m^{-2} y un índice de claridad muy bajo, de 0.42). La mayor temperatura registrada a las 12 : 00 h en esta sección fue de 175°C , en este caso por dos termopares, el termopar 07 y el termopar 05, ubicados en la base del horno que se usa como lado el día 3 de diciembre. La máxima temperatura observada fue de 176°C a las 12 : 00 h por el termopar número 5, colocado en la base del horno que se usa como lado el mismo día en que se registró la mayor temperatura. Esta temperatura es la máxima registrada en todas las pruebas, lo cual es de esperarse debido a que el horno se encuentra vacío además de que el día de máxima temperatura es muy cercano al día de optimización del horno, 23 de diciembre.

Costados interiores Al medio día solar la menor temperatura registrada fue de 65°C por los termopares 11, 12 y 13 situados en el costado oeste del horno, alrededor de la puerta el día 6 de noviembre. La mayor temperatura registrada bajo estas condiciones, en esta sección fue de 140°C , por el termopar 10 el 3 de febrero, localizado en el costado este del horno. La máxima temperatura registrada fue de 143°C por el termopar 10 a las 12 : 00 h en un día despejado para el mismo día en que se presentó la máxima temperatura.

Carga Debido a que estas pruebas se realizaron sin carga, las temperaturas registradas corresponden al aire interior de las ollas. La menor temperatura

al medio día solar fue registrada por el termopar ubicado a 10 cm de altura en la olla oeste y fue de 70⁰C, el 6 de noviembre, mientras que la mayor fue de 165⁰C, el 3 de diciembre, registrada por el termopar colocado en la olla este a 1 cm de altura. La máxima temperatura la registró el termopar situado a 10 cm en la olla este a las 12 : 40 h y fue de 170⁰C el día 3 de diciembre.

Bases exteriores La menor temperatura que se registró en esta sección al medio día solar fue de 35⁰C por el termopar 25, colocado en la base del horno que se usa como lado el 6 de noviembre. La temperatura más elevada, 65⁰C, la registró el termopar 34, el día 9 de enero, colocado en la base del horno empleada como tal en esta época del año. La máxima temperatura fue de 68⁰C, registrada por el mismo termopar 34 pero a las 12 : 00 h el 3 de diciembre.

Costados exteriores A las 12 : 00 h, la menor temperatura registrada, 42⁰C, se localizó en el costado este del horno, donde se encuentra el termopar 23 el 6 de noviembre. La mayor temperatura registrada se registró el día 3 de diciembre y ascendió a 83⁰C, localizada en el costado oeste del horno, muy cerca de la puerta. La máxima temperatura, 84⁰C, la registró el termopar 26, a las 14 : 25 h, situado en la parte oeste del horno, a un costado de la puerta el mismo día que se registró la mayor temperatura.

Reflectores A las 12 : 00 h, la menor temperatura registrada en esta sección fue de 26⁰C, por el termopar localizado en el reflector este del horno el día 3 de febrero, mientras que la mayor temperatura, a esa misma hora, fue de 56⁰C localizada en el reflector norte del horno el 3 de marzo. Vale la pena mencionar que la temperatura de 26⁰C, es la temperatura más baja de todas las pruebas. La máxima temperatura se registró en el reflector norte y ascendió a 66⁰C el mismo día en que se registró la mayor temperatura.

Marco de unión La menor temperatura registrada en esta sección a las 12 : 00 h fue de 50⁰C por el termopar 36, localizado en la parte superior del marco de unión el 6 de noviembre, a esta misma hora la mayor temperatura fue de 97⁰C y la registró el termopar 35, localizado en la parte este del marco el día 3 de diciembre. La máxima temperatura en esta sección se registró a las 12 : 30h el 3 de diciembre y fue de 98⁰C, localizada en la parte norte del marco, lo cual indica que la radiación directa que incide en esta parte tiene una importante contribución al incremento de temperatura.

Cubierta transparente La menor temperatura registrada en esta sección a las 12 : 00 h fue de 50⁰C, localizada en la parte externa de la cubierta el

día 6 de noviembre, mientras que la mayor temperatura se registró en el interior de la cubierta y ascendió a 104°C el día 3 de diciembre. La máxima temperatura fue de 105°C , registrada a las 12 : 25 por el mismo termopar 18, localizado en el interior del horno el mismo día (3 de diciembre).

Es importante mencionar que tanto la mayor como la máxima temperatura para esta sección, se registraron en el mes de diciembre, muy cerca de una de las fechas de optimización del horno.

5.1.2. Pruebas con agua

A continuación se presenta el análisis de las temperaturas obtenidas al realizar pruebas con 6 litros de agua.

El promedio de la radiación global a medio día solar, fue de 795 W m^{-2} . Las variaciones de radiación mayores que 100 W m^{-2} duraron menos de 10 minutos.

La velocidad del viento en los días de pruebas, fue en promedio 1.3 m s^{-1} con ráfagas mayores que 5 m s^{-1} por periodos menores que 5 minutos.

El promedio de la temperatura ambiente bajo las cuales se realizaron las pruebas fue de $26.26 \pm 4^{\circ}\text{C}$ a las 12 : 00 h en tiempo solar.

Bases interiores A las 12 : 00 h, la menor temperatura registrada en estas pruebas fue de 52°C en la base del horno que se emplea como lado en esta época, el 7 de noviembre; mientras que a la misma hora, la mayor temperatura fue de 150°C , registrada el 6 de febrero y localizada en la base del horno del horno que se emplea como lado (termopar 6). La máxima temperatura se registró a las 13 : 45 h, por el termopar 6, el día 6 de febrero, esto debido al sitio en que se encuentra localizado el termopar y a la orientación del horno, este termopar recibe radiación solar directamente.

Costados interiores La menor y la mayor temperatura en esta sección, a las 12 : 00 h, fue de 55°C y 105°C , los días 2 de octubre y 6 de febrero respectivamente. La menor temperatura se registró en un costado de la puerta, mientras que la mayor temperatura se registró en el costado este. La máxima temperatura registrada en esta sección fue de 132°C , localizada en el costado este del horno a la 14 : 00 h el día 6 de febrero.

Carga Al igual que en las pruebas sin carga, la menor temperatura en esta sección, 42°C , fue registrada por el termopar localizado a 10 cm de altura en la olla oeste. La mayor temperatura, 95°C , se registró en la misma olla oeste a la misma altura. Es importante mencionar que las temperaturas menor y mayor se registraron en días distintos, la mayor temperatura se registró el día 2 de octubre y la mayor el 6 de febrero. La máxima temperatura registrada en la carga fue de 100°C a las 13 : 35 h y al igual

que la mayor temperatura a las 12 : 00 h, fue registrada por el termopar localizado a 10 cm de altura en la olla oeste.

Bases exteriores La temperatura más baja a las 12 : 00 h, 34°C , se registró el día 2 de octubre por el termopar 25, localizado en la base del horno empleada como lado en esta época. La temperatura más elevada a la misma hora fue de 55°C y se registró el mismo día que la menos por el termopar 32 localizado en la base orientada al sur. La máxima temperatura observada en esta sección, 70°C , se registró a las 15 : 10 en la base del horno el día 4 de marzo.

Costados exteriores La menor temperatura en esta sección fue registrada en tres días, 2 de octubre, 7 de noviembre y 9 de diciembre. Este mínimo valor fue de 40°C , localizada en el costado este del horno. La mayor temperatura a las 12 : 00 h, fue de 70° , ubicada en el costado oeste del horno, a un costado de la puerta el día 6 de febrero. La máxima temperatura se registró después del medio día solar, exactamente a las 14 : 30 h y fue de 80°C , localizada en el costado oeste del horno el día 4 de marzo.

Reflectores La menor temperatura en esta sección fue de 30°C , registrada por el termopar 22 el día 6 de febrero. El termopar que registró esta menor temperatura se encuentra localizado en el reflector este. La mayor temperatura a las 12 : 00h, 57°C , la registró el termopar 17, ubicado en el reflector norte del horno el día 7 de noviembre. Para esta sección, la máxima temperatura observada fue de 71°C , localizada en el reflector este 15 : 10 h el 4 de marzo.

Marco de unión En esta sección, la menor y la mayor temperatura, de 52°C y 85°C , respectivamente, fueron registradas por el termopar 35, localizado en la parte norte del marco. Es importante mencionar que estas temperaturas se registraron en diferentes días de prueba, 2 de octubre y 4 de marzo, además de que el día de menor temperatura, 2 de octubre, la radiación solar fue una de las más bajas registradas en todas las pruebas. Mientras que la mayor temperatura se registró en un día despejado con niveles de radiación al medio día solar de 750Wm^{-2} . Lo que confirma parte del aumento de la temperatura en la parte norte del marco se debe a la radiación directa.

Cubierta transparente En esta sección, bajo estas condiciones, la menor temperatura registrada fue de 40°C , localizada por la parte exterior del colector el día 6 de febrero, mientras que la mayor temperatura se registró en la parte interior del colector y fue de 89°C el 7 de noviembre.

La máxima temperatura en toda la prueba, para esta sección, fue registrada el día 7 de noviembre, 92°C , registrada en la parte interna del horno a las 12 : 55 h.

5.1.3. Pruebas con aceite

A continuación se presenta el análisis de las temperaturas obtenidas al realizar pruebas con 6 litros de aceite de maíz.

La radiación global promedio bajo la cual se realizaron las pruebas con aceite, a medio día solar, fue de $800 \pm 24 \text{ Wm}^{-2}$. Las variaciones mayores de $100 \pm 3 \text{ Wm}^{-2}$ permanecen por menos de 5 minutos. Vale la pena mencionar la nubosidad presente en las pruebas realizadas en el mes de noviembre.

La velocidad del viento en los días de pruebas, fue en promedio 1.9 ms^{-1} con ráfagas mayores de 5 ms^{-1} por periodos menores a los 5 minutos. En el mes de enero se presentaron las más altas velocidades del viento, ráfagas esporádicas.

La temperatura ambiente promedio bajo las cuales se realizaron las pruebas fue de $26.0 \pm 3^{\circ}\text{C}$ a las 12 : 00 h en tiempo solar.

Bases interiores La menor temperatura registrada en esta sección a las 12 : 00 h fue de 60°C , localizada en la base del horno empleada como lado el 6 de octubre. La mayor temperatura a la misma hora fue de 155°C y la registró el termopar 06, localizado también en la base del horno que se usa como lado para esa fecha, 7 de febrero. La máxima temperatura se alcanzó a las 12 : 40 y fue de 158°C , ubicada en la base empleada como tal el día de prueba el día 8 de noviembre.

Costados interiores En esta sección, a las 12 : 00 h, la menor temperatura fue de 53°C y la registró el termopar 11, localizado en el costado oeste del horno, donde se localiza la puerta el día 4 de octubre. La mayor temperatura la registró el termopar 12 ubicado también en la puerta del horno y fue de 115°C el día 7 de febrero. La máxima temperatura en esta sección, 142°C , se registró a las 14 : 00 h por el termopar 9, localizado en el costado oeste del horno, registrada también el día 7 de febrero.

Carga Las temperaturas alcanzadas en estas pruebas fueron superiores a las obtenidas al hacer pruebas con agua, como se esperaba, debido a los puntos de ebullición de los dos diferentes fluidos. La menor temperatura a las 12 : 00 h para esta sección fue de 55°C y se registró en el centro de la olla oeste a 1 cm de la base, el día 4 de octubre. La mayor temperatura para esta misma hora se registró en la olla oeste a 10 cm de la base y fue de 115°C el día 20 de enero. La máxima temperatura, 134°C , se presentó en el termopar localizado en la olla este a 10 cm de la base después del medío

día solar también el 20 de enero. Este hecho confirma que el reflector oeste contribuye de manera importante al calentamiento de la carga.

Bases exteriores Al igual que en las secciones anteriores, las temperaturas se reportan a las 12 : 00 h en tiempo solar, siendo la menor de esta sección 35⁰C, registrada por el termopar 25 localizado en la base del horno que se usa como lado para el día de prueba el día 4 de octubre y la mayor de 50⁰C ubicada en la base empleada en esta época, 8 de noviembre. La máxima temperatura para esta sección se registró el 6 de marzo a las 14 : 15 h en la base empleada como tal, en la cual se encuentra ubicado el termopar 34.

Costados exteriores A las 12 : 00 h, la menor temperatura, 38⁰C, la registró el termopar 23, localizado en el costado oeste del horno el 13 de diciembre. La mayor temperatura, 74⁰C, fue registrada por el termopar 27, localizado en el costado oeste del horno cerca de la puerta el 7 de febrero. La máxima temperatura en esta sección fue registrada el 6 de marzo y ascendió a 84⁰C, registrada a las 14 : 25 h por el termopar 26 localizado al oeste, a un costado de la puerta.

Reflectores La menor temperatura registrada a las 12 : 00 h en esta sección fue de 25⁰C en el reflector colocado al oeste del horno el 20 de enero y la mayor temperatura a esta misma hora fue de 54⁰C en el reflector oeste del horno el 4 de octubre. La máxima temperatura, 65⁰C, se presentó el día 6 de marzo a las 16 : 00 h en el reflector este del horno, en el que se encuentra el termopar 29.

Marco de unión En esta sección, la menor temperatura registrada a las 12 : 00 h fue de 55⁰C el 4 de octubre, mientras que la mayor fue de 85⁰C, registrada por el termopar 35, ubicado en la parte norte del marco el 6 de marzo. La máxima temperatura de esta sección se registró el día 6 de marzo por el termopar 38 a las 13 : 20 h y fue de 94⁰C.

Cubierta transparente A las 12 : 00 h, las temperaturas menor y mayor fueron de 40⁰C y de 90⁰C, respectivamente. La menor temperatura la registró el termopar 33 ubicado en el exterior del horno el día 13 de diciembre y la mayor la registró el termopar 18 el 7 de febrero en el interior del colector. La máxima temperatura, 97⁰C, como en las otras condiciones de prueba, la registró el termopar 18 a las 13 : 00 h el día 7 de febrero.

A continuación se presentan gráficas de temperatura como función del tiempo para un experimento representativo de las pruebas, en este caso utilizando agua como carga.

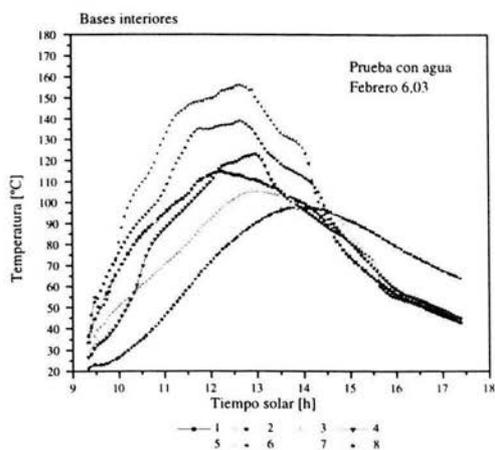


Figura 5.1: Evolución térmica típica en las bases interiores en pruebas usando agua como carga.

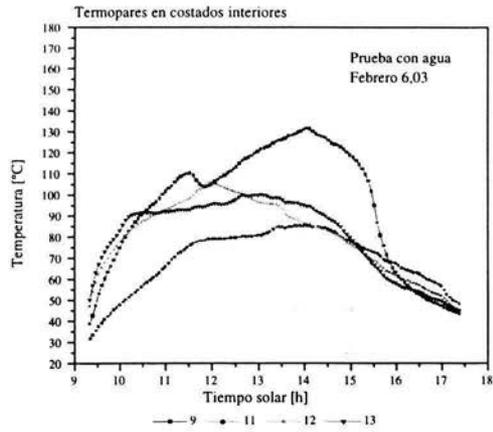


Figura 5.2: Evolución térmica típica en los costados interiores en pruebas usando agua como carga.

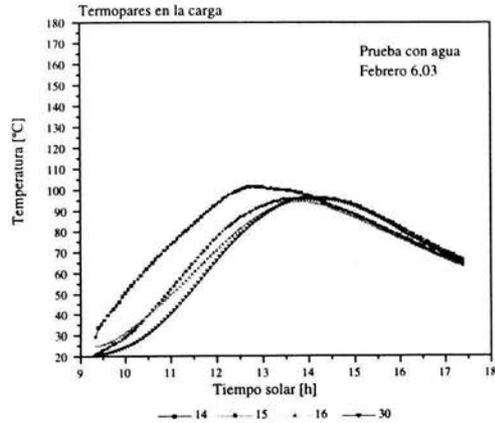


Figura 5.3: Evolución térmica típica en el agua.

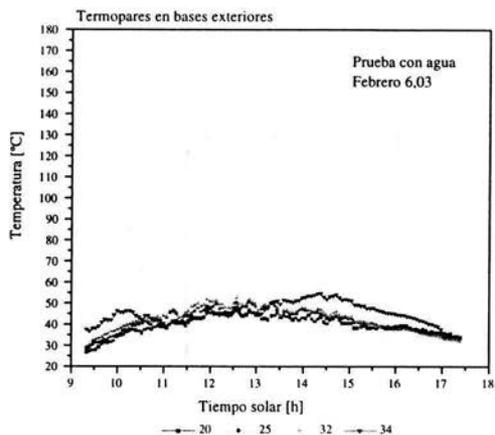


Figura 5.4: Evolución térmica típica en las bases exteriores en pruebas usando agua como carga.

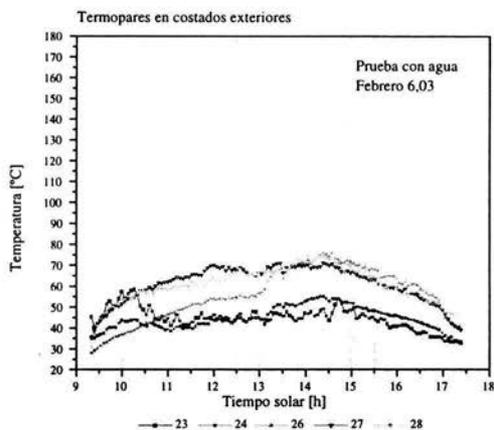


Figura 5.5: Evolución térmica típica en los costados exteriores en pruebas usando agua como carga.

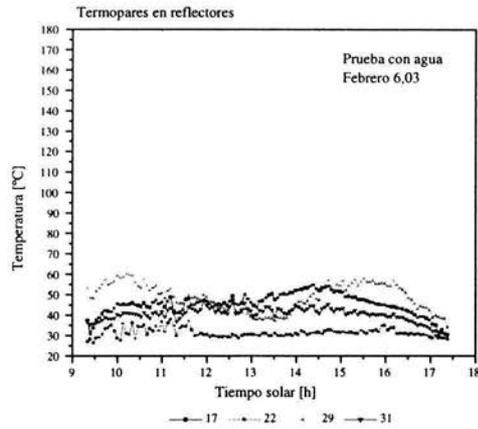


Figura 5.6: Evolución térmica típica en los reflectores en pruebas usando agua como carga.

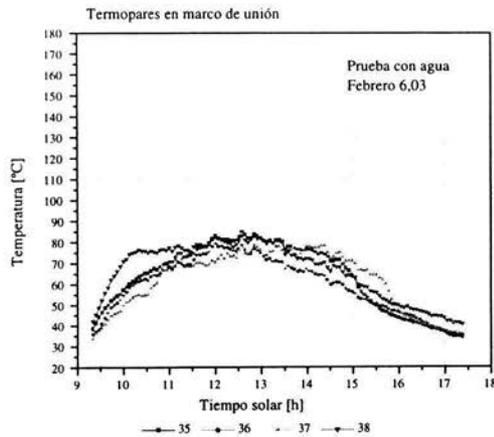


Figura 5.7: Evolución térmica típica en el marco de unión en pruebas usando agua como carga.

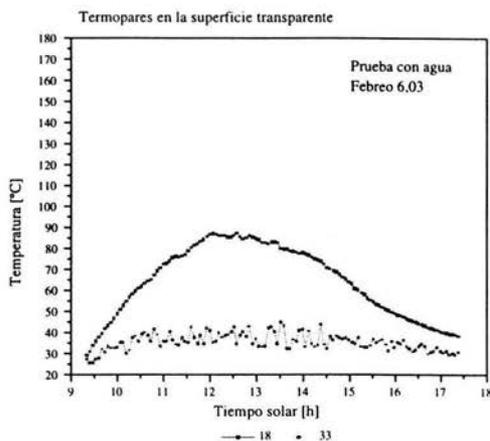


Figura 5.8: Evolución térmica típica en la cubierta transparente usando en pruebas usando agua como carga.

5.2. Análisis global

En esta sección se presenta un análisis de los resultados obtenidos en las pruebas para la caracterización del horno con los tres tipos de carga. Continuando con la presentación de los resultados en la caracterización, los comentarios se presentan por secciones.

Las temperaturas más altas de todos los experimentos se presentaron en las bases interiores del horno, tal como se esperaba.

Respecto a la carga interior (aire, agua y aceite), como se esperaba, las temperaturas más elevadas se presentaron al hacer pruebas con las ollas con aire en el interior, debido a que su calor específico es el menor de los tres fluidos empleados en las pruebas y que la temperatura no está limitada por el cambio de fase. Las temperaturas intermedias se observaron con aceite y las menores con agua, esto es debido a que el agua tiene un mayor calor específico y también un punto de ebullición bajo.

En todas las pruebas la mayor temperatura se registró en la olla oeste a 10 *cm* de altura en el centro de la misma, seguida de la temperatura registrada en la olla este a la misma altura. Los termopares colocados a 1 *cm* de la base de la

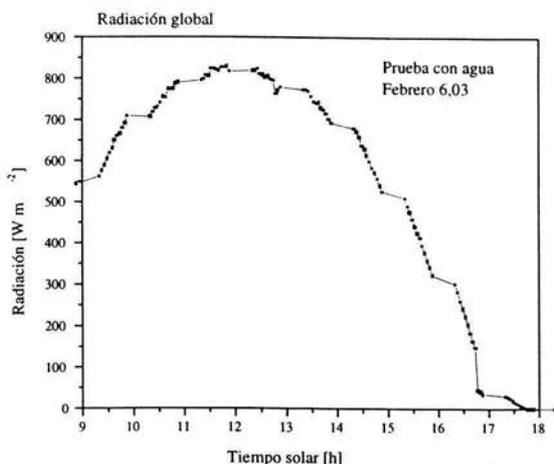


Figura 5.9: Evolución de la radiación global bajo la cual se realizó la prueba típica usando agua como carga.

olla fueron los últimos en lograr esta temperatura, siendo el tercero el termopar de la olla oeste y el último el de la olla este.

En la mayoría de las pruebas, el costado interior este registró su temperatura más elevada después del medio día solar, esto debido a que después del medio día solar recibe radiación solar directa. Cabe destacar que esta sección es la segunda en registrar temperaturas más altas después de las bases interiores.

Respecto a las temperaturas registradas en los reflectores, las más elevadas se observaron en los reflectores este y oeste, ya que éstos reciben mayor cantidad de radiación directa.

El marco de unión fue una de las secciones donde se observaron temperaturas por arriba de los 50⁰C con los tres tipos de prueba, lo que indica que éste es un medio por el cual la energía térmica fluye hacia el exterior del horno, hecho que se corrobora al observar que las temperaturas en los lados unidos al marco de unión, por la parte exterior, son también altas.

En todas las pruebas el vidrio colector presentó temperaturas elevadas en la parte interior, 35% arriba de la temperatura ambiente y en la mayoría de las pruebas fue incluso mayor que el 50%, lo que enfatiza la importancia de este elemento en la reducción de pérdidas energéticas por convección. Sin embargo, la diferencia entre las temperaturas al interior y el exterior del colector fueron

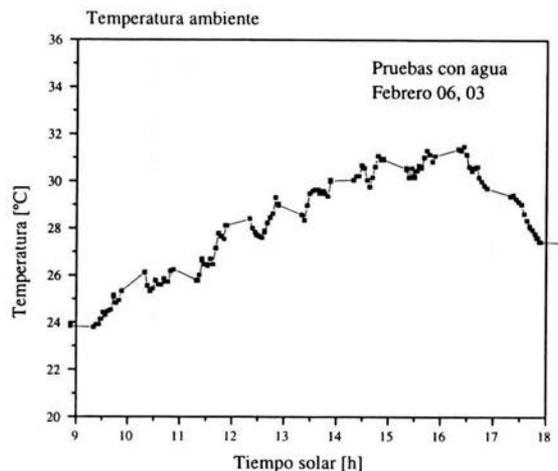


Figura 5.10: Evolución de la temperatura ambiente bajo la cual se realizó la prueba típica usando agua como carga.

cercanas al 10 %, lo que sugiere la conveniencia de añadir un segundo vidrio al horno.

En la sección de los costados exteriores, para los tres tipos de pruebas, las mayores temperaturas fueron observadas en puntos circundantes a la puerta a pesar de que ésta no recibía radiación directa, lo cual indica la fuga térmica a través de la unión de las cajas en la puerta y en el marco de la puerta.

5.3. Análisis temporal

En esta sección se destacan las diferencias de temperatura observadas en el horno solar debido a la época en que se realizaron los experimentos. Es posible realizar la comparación si se tienen condiciones de radiación similares para los días de prueba, por lo cual, esta comparación se realiza considerando sólo dos tipos de prueba: las pruebas empleando agua y aceite como fluidos de carga. Las temperaturas se comparan a las 12 : 00 h y de acuerdo a la ubicación de los termopares.

La primera comparación se realiza para los días en los que se empleó agua como fluido de trabajo 10 de enero, 4 de marzo y 7 de noviembre. El 10 de enero

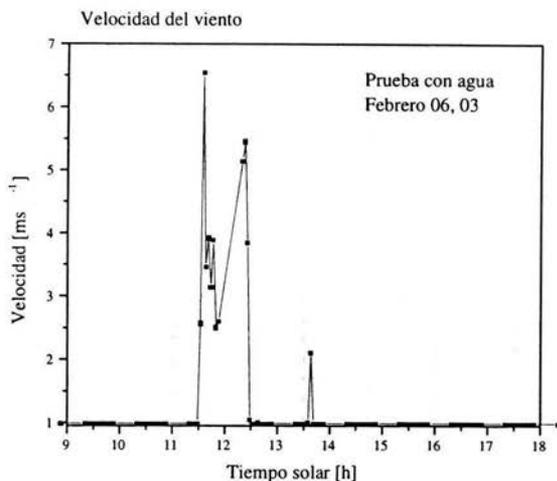


Figura 5.11: Evolución de la velocidad del viento bajo la cual se realizó la prueba típica usando agua como carga.

y el 7 de noviembre se empleó la base *d* del horno como tal, con orientación al sur y el 4 de marzo se utilizó la base *c*, también con orientación al sur. En las pruebas la temperatura ambiente a medio día solar fue de $26.5 \pm 4.5^{\circ}\text{C}$ (esta variación representa un 17%) y la temperatura promedio durante toda la prueba fue de $25.5 \pm 4.5^{\circ}\text{C}$ (17%). La radiación global promedio, R_n , fue de $800 \pm 50 \text{ Wm}^{-2}$ (6%), con días completamente despejados.

En las tres pruebas se observaron diferencias de temperatura en las bases interiores menores al 15%, que no son significativas, ya que éstas pueden atribuirse a las variaciones climáticas. De igual forma que en las bases interiores, en los costados interiores y en la carga tampoco se observaron diferencias de temperatura significativas. La temperatura en las bases y en los costados exteriores presentan diferencias menores al 5% en las tres pruebas. Las diferencias de temperatura en los reflectores norte, sur y oeste no son significativas, ya que son menores al 6%. Sin embargo en el reflector este se observó que empleando la base *d*, la temperatura en esos dos días presenta diferencias del 5%, y para el día en que se se empela la base *c*, la temperatura registrada se incrementó un 12% respecto a los otros dos registros. Esto se debe a que la concentración para el día en que se usa la base *c* es mayor respecto a la concentración de los otros

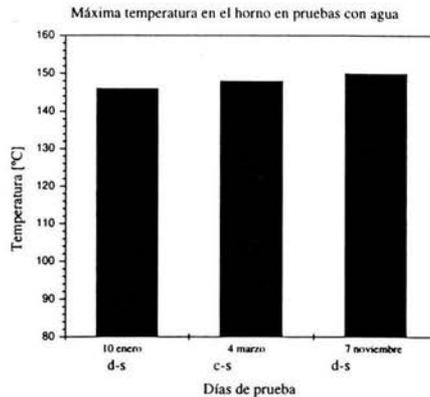


Figura 5.12: Temperatura observada en el horno para tres pruebas utilizando agua como carga

dos días. La diferencia de temperatura en las tres pruebas para el colector tanto en la parte interna como externa tampoco fue significativa ya que es menor del 10 %.

De las tres pruebas comparadas, las máximas temperaturas registradas en el interior del horno fueron el día 7 de noviembre, presentado en la figura 5.12. Esto se puede explicar comparando las concentraciones a las 12 : 00 horas obtenidas del modelo teórico de concentración, figura 5.13. A pesar de la radiación global y la temperatura ambiente del día 7 de noviembre no fueron las más altas, como se aprecia en las figuras 5.14 y 5.15, la concentración ese día es mayor a los otros dos días.

La segunda comparación se realiza para los días 8 de noviembre, 20 de enero y 6 de marzo en los que se empleó aceite como fluido de trabajo. De manera análoga a las pruebas con agua, la base empleada para los días 8 de noviembre y el 20 de enero fue la base *d* del horno y el 6 de marzo se empleó como tal la base *c*, ambas con orientación al sur. Las condiciones climáticas bajo las cuales se realizaron las pruebas son las siguientes. La temperatura ambiente promedio al medio día solar fue de $26.17 \pm 2.5^{\circ}\text{C}$ (9.35 %) y la temperatura promedio durante toda la prueba de $24.4 \pm 3.5^{\circ}\text{C}$ (14.3 %). La radiación global promedio R_n , al medio día solar fue de $831 \pm 90 \text{ Wm}^{-2}$ (10.8 %) y los tres días en los que se realizaron las pruebas, fueron días despejados.

En las bases y costados interiores del horno se observan diferencias de temperatura menores al 15 %, no significativas, mismas que pueden ser atribuidas a las condiciones climáticas.

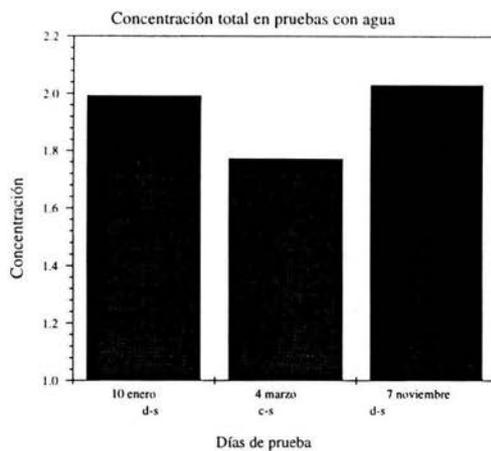


Figura 5.13: Concentración calculada por el modelo en el horno en tres pruebas utilizando agua como carga

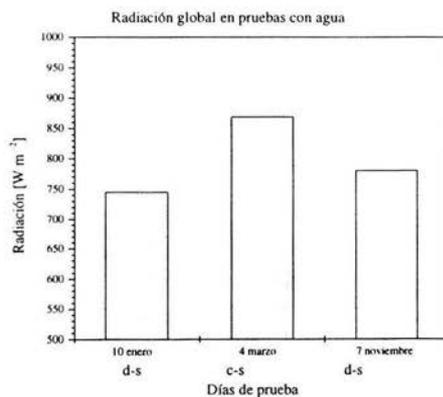


Figura 5.14: Radiación global en tres pruebas utilizando agua como carga

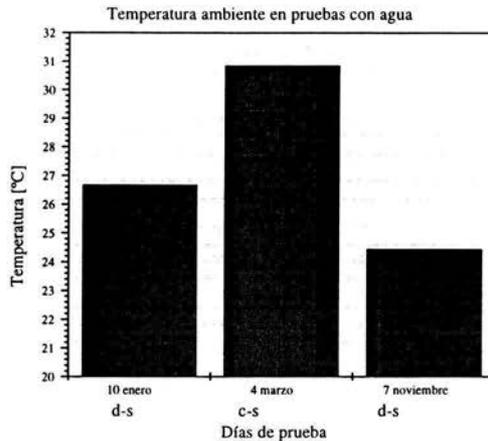


Figura 5.15: Temperatura ambiente en tres pruebas utilizando agua como carga

Las máximas temperaturas al realizar pruebas con aceite se presentaron el día 8 de noviembre a pesar de que en este día los niveles de radiación no fueron los más altos, esto se debe a que en esta fecha, los niveles de concentración calculados fueron los más altos.

Las diferencias de temperatura observadas en las bases y costados exteriores, en la carga y en el marco de unión son menores al 15 %, por lo que se determinaron diferencias no significativas que pueden ser ocasionadas por las condiciones climáticas bajo las cuales se desarrollaron las pruebas.

En los reflectores norte, sur y este se observaron diferencias de temperatura mínimas, menores al 15 %, mismas que se consideran no significativas.¹

Al igual que en las pruebas con agua, la temperatura en el colector se midió en el centro de éste con dos diferentes puntos, en la parte externa e interna del horno, en esta sección no se observaron diferencias de temperatura significativas debido a las épocas en que se realizaron las pruebas. Cabe señalar que las diferencias de la temperatura en el interior del horno respecto a la temperatura ambiente son superiores al 60 %, con lo que se corrobora que el colector tiene un importante papel en la disminución de pérdidas convectivas.

¹En el reflector oeste se observó una diferencia de temperatura superior al 60 %, que no es atribuible a las distintas épocas de prueba, sino al desprendimiento del termopar colocado en esta sección, lo cual se corrobora al comparar que la temperatura registrada en ese termopar es prácticamente igual a la temperatura ambiente.

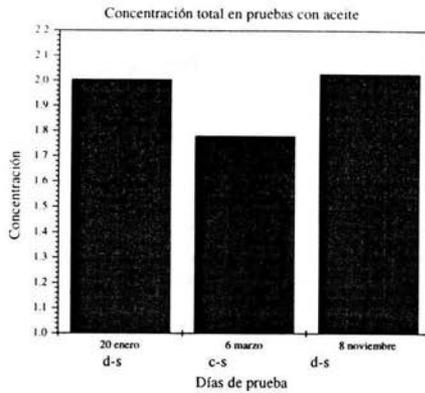


Figura 5.16: Concentración calculada en el horno en tres pruebas utilizando aceite como carga

En la figura 5.16 se grafica la concentración, calculada con el modelo teórico a medio día solar, para los días en que se realizaron las pruebas con aceite. Como se observa, las concentraciones más altas de los días de prueba son las del mes de noviembre, lo cual se ve reflejado al observar temperaturas más altas en el interior del horno, ver figura 5.17, a pesar de que los niveles de radiación y temperatura ambiente durante el mes de noviembre no fueron los más altos de las tres pruebas, 5.18 y 5.19.

En la figura 5.20 se grafica la concentración calculada a medio día solar para diversos días de interés, días de diseño, días de cambios y días en que se realizaron los experimentos. Los días de diseño son representados del 1 al 3, correspondientes a 8 de marzo, 29 de julio y 23 de diciembre, respectivamente. Los días de cambio de base se representan del 4 al 7 correspondientes a marzo 7, mayo 15, julio 30 y octubre 7, respectivamente. Finalmente los días en que se realizaron los experimentos son de 8 al 13 correspondientes a 10 y 20 de enero, 4 y 6 de marzo, 7 y 8 de noviembre, respectivamente.

Como se observa, las concentración más alta se obtiene el 30 de julio. La razón por la cual la concentración más alta se observa en este mes se debe a que en esta época el horno se encuentra más iluminado que en otras épocas, es decir, en esta fecha la contribución a la radiación que incide en la cubierta transparente debida a todos los reflectores es mayor que en otra época.

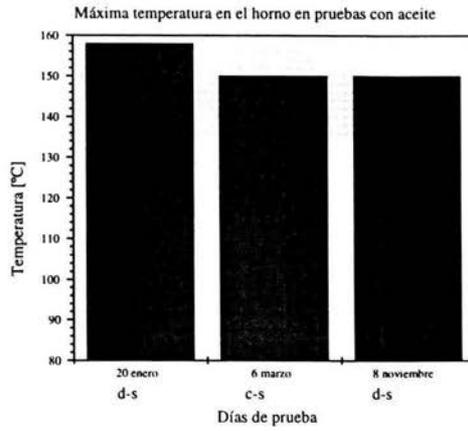


Figura 5.17: Temperatura observada en el horno para tres pruebas utilizando aceite como carga

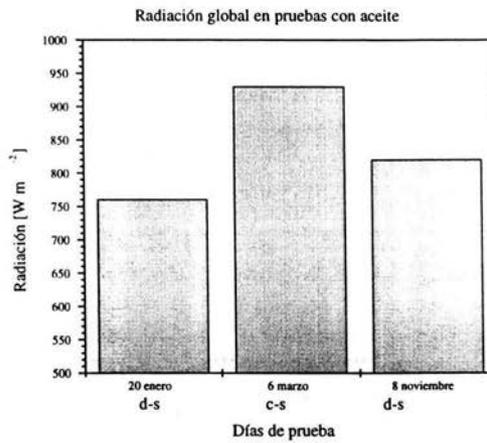


Figura 5.18: Radiación global en tres pruebas utilizando aceite como carga

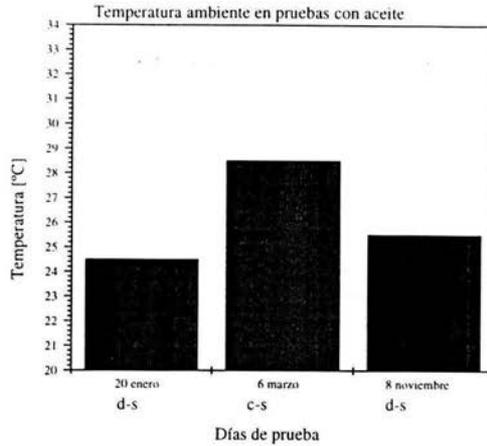


Figura 5.19: Temperatura ambiente en tres pruebas utilizando aceite como carga

5.3.1. Eficiencia

La eficiencia térmica del horno solar se definió en este trabajo como el incremento de energía térmica de la carga hasta el momento en que alcanza la máxima temperatura dividida entre la cantidad de energía proveniente de la radiación solar que incide en el colector del horno desde el momento en que se coloca la carga en el horno hasta el momento en que la carga alcanza la máxima temperatura. Su expresión matemática es:

$$\eta = \frac{mC_p(T_{max} - T_i)}{\int_{t_i}^{t_{max}} I dt}, \quad (5.1)$$

donde m es la masa del fluido empleado en los experimentos, expresado en kg, el calor específico del fluido se respresenta por C_p y es expresado en $J/kg^{\circ}C$, T_{max} es la máxima temperatura alcanzada por la carga, T_i es la temperatura de la carga al iniciar el experimentos, ambas expresadas en $^{\circ}C$. I es la radiación total incidente en el colector expresada en W , t_i es el tiempo de inicio del experimento y t_{max} es el tiempo en el cual la carga alcanza la máxima temperatura, ambos expresados en s .

Al hacer el cálculo (ecuación 5.1) para los experimentos con agua se obtiene una eficiencia de 19.55 % con una desviación estándar de $\pm 3.5\%$ y de 13.19 $\pm 2.5\%$ para el caso del aceite.

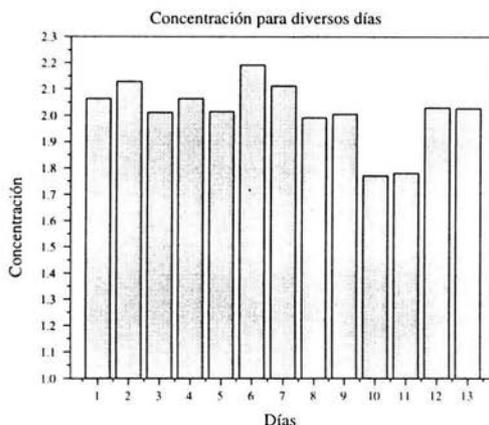


Figura 5.20: Concentración para los días de diseño del horno y para los días en que se relizaron puebas.

Como se observa, la eficiencia del horno al emplear agua como fluido de trabajo es mayor que empleando aceite, a pesar de que con aceite se logran mayores temperaturas. Esto por dos razones, la primera es que el calor específico del agua es dos veces mayor que el calor específico del aceite, por esto la energía que el agua adquiere para elevar su temperatura es mucho más que la del aceite, a pesar de la menor temperatura alcanzada. Otra razón es la disipación radiativa y la convectiva presentes, ya que al hacer pruebas con aceite éstas son mayores debido a las temperaturas que se alcanzan con este fluido. Estos resultados concuerdan con los resultados obtenidos previamente en [5].

5.4. Cocción de alimentos

Para evaluar el comportamiento del horno en el proceso de cocción se analizan las temperaturas registradas en el contenido de las ollas. Los termopares se localizan a 1 y a 10 cm de la base en el centro de las mismas, tal como se estableció en el capítulo 4, Metodología experimental.

Los resultados obtenidos de los experimentos se presentan para cada uno de los tipos de alimentos probados. Vale la pena mencionar que para realizar el proceso de cocción, es necesario alcanzar temperaturas superiores a la denominada temperatura de cocción, misma que es posible alcanzar en el horno solar. Aunque

no se conoce el valor exacto de esta temperatura para los tres tipos de alimentos estudiados ésta se puede considerar 80°C [31].

5.4.1. Pruebas con maíz nixtamal

El tiempo de cocción, definido como el tiempo en que tarda el alimento en cocinarse, se muestra en la gráfica 5.21 como función del promedio de la radiación global durante este tiempo, para las pruebas con maíz nixtamal. El menor tiempo de cocción observado fue de 4 horas, bajo niveles de radiación global promedio, \bar{R}_n , de $580 \pm 17.5 \text{ W m}^{-2}$ y en un tiempo de máximo de cocción de 8 horas con $\bar{R}_n = 400 \pm 12 \text{ W m}^{-2}$. Los tiempos en alcanzar la temperatura de cocción variaron de 2 horas como mínimo y 3 horas como máximo, esto debido a los niveles de radiación bajo los cuales se realizaron los experimentos. Una vez alcanzada la temperatura de cocción, ésta se logró mantener o superar por periodos desde 1.5 hasta 2.5 horas, tiempo suficiente para llevar a cabo el proceso de cocción.

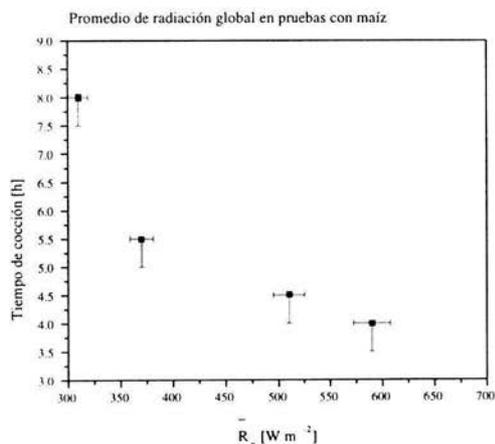


Figura 5.21: Tiempo de cocción del maíz nixtamal como función del promedio de la radiación global

Es importante mencionar que durante las pruebas realizadas con este alimento, el proceso de cocción se llevó a cabo satisfactoriamente.

La gráfica 5.22 representa la evolución típica de las temperaturas logradas en una de las pruebas. Se observa que la temperatura de 80°C fue registrada primero

por el termopar colocado a 10 cm de la base de la olla oeste. Posteriormente, esta temperatura la registró el termopar de la olla este situado a 10 cm de la base, los termopares colocados a 1 cm de la base de las ollas fueron los últimos en alcanzar esta temperatura, siendo el tercero en registrarla el termopar de la olla oeste, seguido de la olla este. Este orden es el mismo que se presenta en las pruebas para la caracterización térmica. La radiación global promedio bajo la cual se realizó esta prueba fue de $650 \pm 19 \text{ Wm}^{-2}$ en un día despejado.

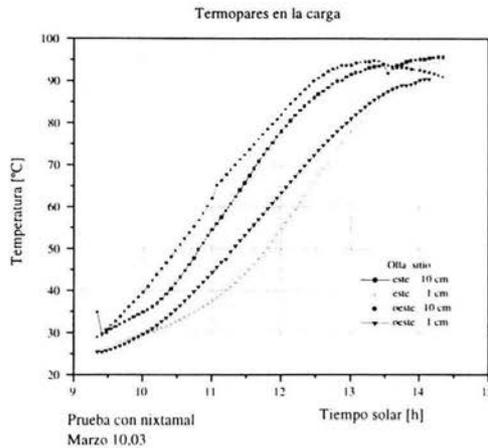


Figura 5.22: Evolución térmica durante las pruebas con maíz nixtamal.

5.4.2. Pruebas con frijol

El tiempo mínimo para la cocción del frijol fue de 5 horas bajo condiciones de $\bar{R}_n = 575 \pm 17 \text{ Wm}^{-2}$ y máximo de 8 horas con $\bar{R}_n = 325 \pm 10 \text{ Wm}^{-2}$. Como se observa en la figura 5.23 el tiempo que tardó la carga en alcanzar la temperatura de cocción fue de 2.5 a 3 horas, misma que logró mantener o superar por periodos de 3 a 4.5 horas. Desafortunadamente en cuatro de las pruebas realizadas con niveles de \bar{R}_n entre 300 ± 9 y $325 \pm 10 \text{ Wm}^{-2}$, por la presencia de nubes, no se llevó a cabo el proceso de cocción. Con los resultados obtenidos es posible establecer que para niveles de \bar{R}_n menores de 300 Wm^{-2} no es posible completar el proceso de cocción de este tipo de alimento, sin embargo, se puede realizar un precocimiento del frijol.

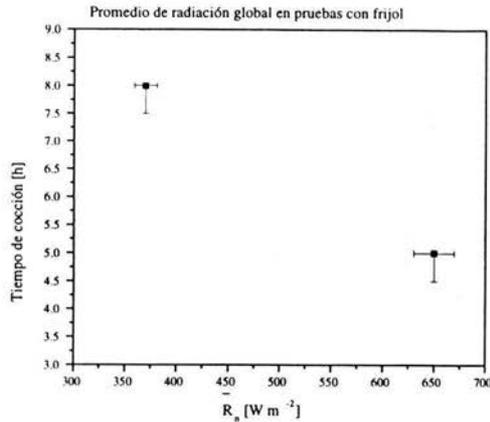


Figura 5.23: Promedio de la radiación global en las pruebas con frijol

En la figura 5.24 se presentan las gráficas de temperatura en el interior de las ollas para un día de prueba empleando frijol como carga. En la mayoría de las pruebas, el orden en alcanzar la temperatura de $80^{\circ}C$ es el mismo que para las pruebas con maíz nixtamal.

5.4.3. Pruebas con elote

En la figura 5.25 se grafica el tiempo en que tardó el elote en cocinarse bajo distintos niveles de radiación promedio. Como se observa, el tiempo mínimo fue 6 horas bajo niveles \bar{R}_n de $550 \pm 17 W m^{-2}$ y el máximo fue de 8 horas bajo una radiación promedio de $300 \pm 9 W m^{-2}$.

El proceso de cocción se llevó a cabo exitosamente en cuatro de las cinco pruebas realizadas empleando este tipo de alimentos, las condiciones climáticas en las cuales no se llevó a cabo el proceso de cocción fueron desfavorables, ya que los niveles de \bar{R}_n fueron muy bajos, aproximadamente $175 \pm 5 W m^{-2}$.

La gráfica 5.26 muestra las temperaturas alcanzadas durante una de las pruebas realizadas con elote. El tiempo en que la carga tardó en alcanzar la temperatura de cocción fue de 3 a 3.5 horas y se mantuvo arriba de este valor por periodos de 2 a 3.5 horas, tiempo suficiente para que el proceso de cocción se realizase satisfactoriamente. El orden en alcanzar la temperatura de cocción fue el mismo que el de las pruebas con maíz nixtamal y con frijol.

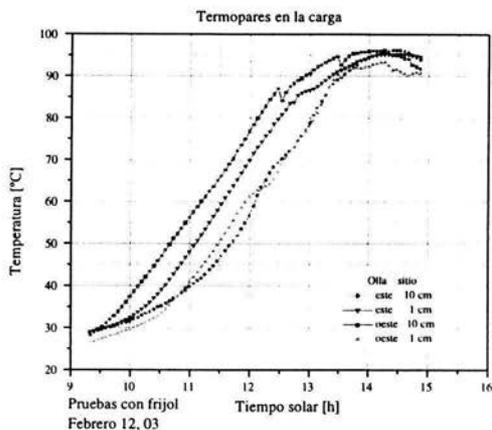


Figura 5.24: Evolución térmica durante las pruebas con frijol.

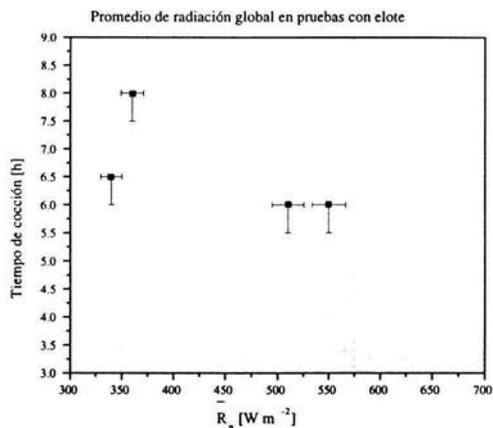


Figura 5.25: Promedio de la radiación global en las pruebas con elote

5.4.4. Análisis global

En la figura 5.27 se grafica el tiempo de cocción como función del promedio de radiación global por unidad de área, \bar{R}_n , durante el periodo de prueba, Δt ,

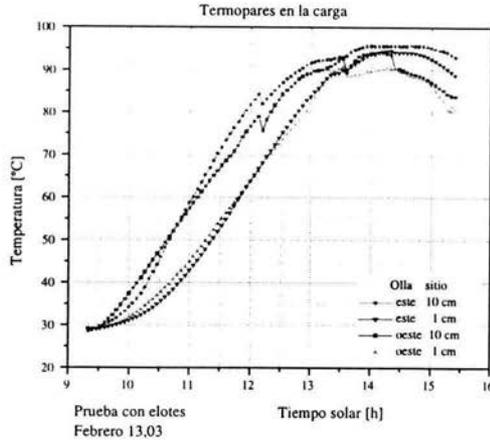


Figura 5.26: Evolución térmica durante pruebas con elote.

para los tres tipos de alimentos. \bar{R}_n se define como

$$\bar{R}_n = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_i}^{t_f} R_z dt \quad (5.2)$$

donde R_z es la radiación incidente sobre el plano horizontal por unidad de área y Δt es el periodo de prueba del experimento. Como se observa cuando la radiación global aumenta, el tiempo de cocción disminuye. Es importante resaltar que los niveles de radiación bajo los cuales se realizaron las pruebas y los tiempos de cocción obtenidos establecen límites respecto al tiempo en el cual se dispone del recurso solar y límites en cuanto a los niveles de radiación bajo los cuales el proceso de cocción no se llevaría a cabo. Así con niveles de $\bar{R}_n \leq 300 \text{ Wm}^{-2}$ el proceso de cocción no se lleva a cabo como tampoco sería posible llevarlo a cabo en menos de 4 horas.

En la figura 5.28 se grafica el tiempo de cocción de los tres tipos de alimentos probados en los experimentos en función de la radiación promedio que incide en el colector, \bar{I}_c . Para determinar \bar{I}_c se emplea la expresión

$$\bar{I}_c = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_i}^{t_f} C(t) I_c(t) dt \quad (5.3)$$

donde $C(t)$ es la concentración en el colector definida por la expresión 3.49 y $I_c(t)$ es la radiación que incide en el colector y se encuentra definida por la expresión

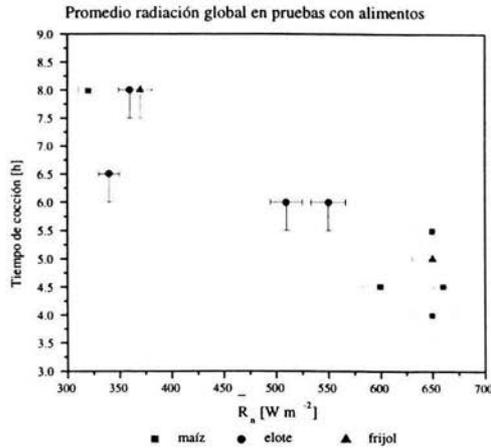


Figura 5.27: Tiempo de cocción como función de la radiación global promedio, \bar{R}_n , durante las pruebas con alimentos

3.8, la definición de ambas se encuentra en el modelo teórico de concentración descrito en el capítulo 3.

En la figura se observa, como se esperaba, que cuando la radiación que incide en el colector aumenta, el tiempo de cocción disminuye. Vale la pena señalar que esta tendencia se encuentra limitada, por una lado a las horas en las que el Sol se encuentra presente, 8 horas en las pruebas iniciadas a las 10 : 00 h, es decir, no es posible concluir el proceso de cocción con valores de \bar{I}_c menores a $250 W$ en 8 horas. Por el otro lado tampoco es posible realizar el proceso de cocción en tiempos menores a las 4 horas en condiciones de máxima radiación debido a los niveles de radiación presentes en el sitio en que se realizaron las pruebas. Los niveles mínimos y máximos de \bar{I}_c para los cuales se desarrollaron los experimentos indican tiempos de cocción máximos y mínimos, respectivamente. Para niveles de $\bar{I}_c \simeq 260 W$ el tiempo de cocción es de 8 horas, mientras que para $\bar{I}_c \simeq 600 W$ el tiempo de cocción es de 4 horas.

En la figura 5.29 se grafica la energía E que incide en el colector como función del tiempo, definida como

$$E = \int_{t_i}^{t_f} I_c dt \quad (5.4)$$

para los tres tipos de alimentos donde I_c es la radiación solar por unidad de tiempo

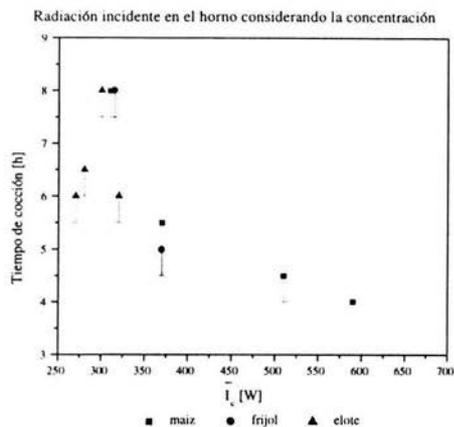


Figura 5.28: Tiempo de cocción como función de la radiación incidente en colector, \bar{I}_c , durante las pruebas con alimentos

que incide directamente en el colector, que se calcula mediante la ecuación 3.8. Como se observa los tres alimentos cocinados presentan la misma tendencia.

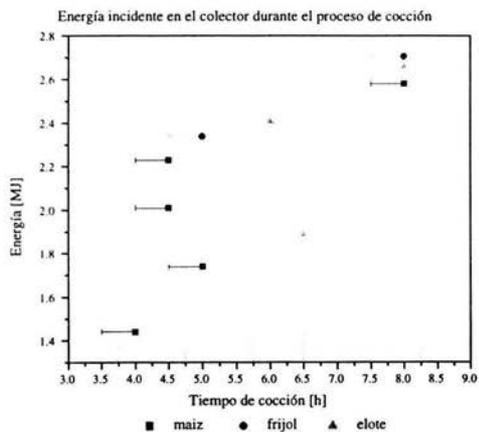


Figura 5.29: Energía que incide en el colector durante las pruebas con alimentos

Al observar la figura 5.29 se puede resaltar la diferencia del consumo energético entre los tres tipos de alimentos cocinados. El maíz nixtamal requiere menor cantidad de energía para cocinarse, seguido del elote y el que más requiere es el frijol, esto coincide con la experiencia al cocinar, por ejemplo al cocinar empleando ollas de presión.

De los resultados más importantes se destaca la expresión única, 5.5, obtenida para calcular el tiempo de cocción de alimentos con el horno solar propuesto, misma que se presenta a continuación

$$t_c = 11. \pm 1 - 0.010 \pm 0.003 \bar{R}_n \quad (5.5)$$

donde t_c es el tiempo de cocción en horas y \bar{R}_n es el promedio durante ese tiempo de la radiación global del sitio donde se quiera usar el horno en W m^{-2} . Cabe mencionar que \bar{R}_n está limitado entre 350 y 700 W m^{-2} , esto por dos motivos, el primero es la duración del día y el segundo es que con radiaciones menores a 350 W m^{-2} no es posible realizar el proceso de cocción, sin embargo se puede llevar a cabo el precocimiento de los alimentos. Vale la pena destacar que los límites de \bar{R}_n y la expresión para t_c obtenidos son independientes de la concentración para ese periodo de prueba, ya que las variaciones de este parámetro están dentro de las incertidumbres asociadas.

De los resultados obtenidos se establece que la radiación solar global en el plano horizontal, R_z , mínima necesaria para realizar el proceso de cocción a medio día solar es de 700 W m^{-2} . Con este dato se obtiene un factor de corrección, F_c , que multiplica al valor máximo estimado del ahorro de leña que con el uso del horno solar, mismo que varía a lo largo y ancho del país. El factor de corrección para cada estado de la República Mexicana se presenta en el apéndice C.

5.5. Estimación del ahorro de leña

Una vez comprobado que es posible utilizar el horno solar para realizar satisfactoriamente la cocción de alimentos, en esta sección se hace una estimación del ahorro de leña que traería la utilización del horno en la cocción de alimentos en un hogar rural típico.

El consumo de leña está basado en las investigaciones realizadas por Masera y colaboradores [20], ya que ésta fue la única fuente donde se pudo consultar datos concretos del uso de leña para la cocción de alimentos.

Considera también que es posible usar el horno solar para realizar la cocción de nixtamal además de cocinar el 50 % de los alimentos denominados como *otros* en la investigación de Masera [20], presentada en el capítulo 2 de esta tesis.

El consumo de leña para la cocción de nixtamal y de los alimentos denominados como *otros* se presenta en el cuadro 5.1.

Tipo de alimento	10 ³ kg leña/año por persona	kg leña/año por familia
maíz nixtamal	109.53	271.78
<i>otros</i>	335.25	831.90

Cuadro 5.1: Uso de leña empleada en la cocción de alimentos

Como ya se mencionó la estimación en el ahorro del consumo de leña considera que es posible realizar en el horno solar la cocción del maíz nixtamal y también el 50 % de los alimentos denominados como *otros*, considera además el poder calorífico de la leña como de 3800 kcal/kg y que 1.0 m³ de leña equivale a 565.25 kg [21].

Al hacer uso de estos factores y de las consideraciones anteriores, se estima que el máximo de cantidad de leña que sería posible ahorrar en un año con un horno solar de este tipo es de 440.6 kg por familia y el ahorro de energía de este combustible sería de aproximadamente 7000 MJ, misma que representa un 15 % del consumo total de leña al año por familia en la comunidad de estudio.

Considerando que para la colecta de leña la comunidad invierte 107352 horas/familia anual de trabajo humano y animal distribuidos como lo muestra el cuadro 2.5 y además teniendo en cuenta que el ahorro de leña estimado es del 36 % del consumo total, el tiempo que se ahorraría una familia en la colecta de leña sería de 15580 horas anuales, de las cuales 4440 horas corresponden al hombre, 6780 horas a la mujer, 2100 horas a los niños y 2260 horas a los animales.

Colecta de leña	Horas de trabajo anual ahorradas [h]
hombre	11100
mujer	16940
niños	5250
animal	5650

Cuadro 5.2: Tiempo ahorrado en la colecta de leña usando el horno solar

5.6. Comparación del modelo teórico de concentración con resultados experimentales

Al aplicar el modelo teórico de la concentración, descrito en el capítulo 3, se realizan predicciones teóricas de la concentración del horno solar para cualquier época del año.

Los resultados obtenidos para los días de diseño del horno se comparan con los resultados obtenidos experimentalmente por Jaramillo y colaboradores [7].

La experimentación que Jaramillo y colaboradores [7] realizaron surgió con la necesidad de validar o modificar la geometría propuesta del horno solar por Acosta y colaboradores [4]. Ésta se realizó con un modelo a escala del horno solar, un heliodón y un arreglo matricial de fotoresistencias para evaluar la concentración en los tres días de diseño, 23 de diciembre, 8 de marzo y 29 de julio para un periodo comprendido entre las 10 : 00 *h* y las 12 : 00 *h*.

La contribución de cada uno de los reflectores en la concentración, así como la concentración total obtenidas con el modelo teórico de concentración se comparan con los resultados experimentales para cada uno de los días.

Para el día 8 de marzo, la figura 5.30 muestra la contribución de cada uno de los reflectores predichas por el modelo teórico, descrito en 3, (representado por líneas) y los resultados experimentales (representado por símbolos). En esta figura se observa que a las 10 : 00 *h* la contribución a la concentración del reflector norte es sobrestimada, sin embargo la contribución del reflector sur es estimada satisfactoriamente por el modelo. Respecto al reflector este, se puede afirmar que el modelo predice la contribución ya que a esa hora, tanto el modelo como los resultados experimentales determinan que no hay contribución del reflector este a la concentración. Para el caso del reflector oeste, el modelo determina una contribución que sobreestima a los resultados experimentales, dentro de la incertidumbre. A las 11 : 00 *h* el modelo sobrestima la contribución del reflector norte, pero logra predecir la contribución del reflector sur. El modelo sobrestima la contribución a la concentración de los reflectores este y oeste. Finalmente a las 12 : 00 *h*, el modelo teórico predice la cocontribución del reflector norte, pero sobrestima la del reflector sur. La contribución de los reflectores este y oeste

es sobrestimada y subestimada, respectivamente aunque el modelo predice la tendencia de los resultados experimentales.

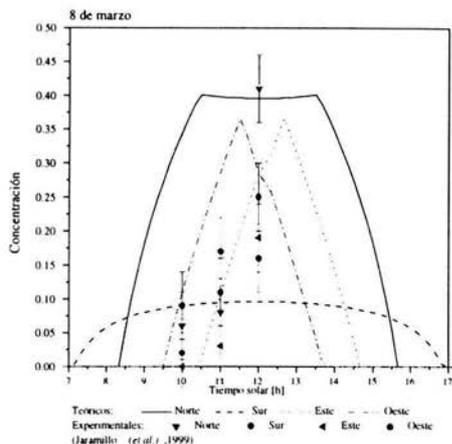


Figura 5.30: Comparación de concentraciones individuales experimentales y teóricas el 8 de marzo

En la figura 5.31 se observa que aunque el modelo no logra predecir las contribuciones individuales de cada uno de los reflectores, las diferencias se compensan obteniendo una concentración total calculada teóricamente igual a la experimental dentro de la incertidumbre, excepto a las 11 : 00 h en la que el modelo teórico sobrestima al experimental. Al comparar las áreas obtenidas del modelo teórico y de los resultados experimentales, se observa que la experimental es mayor en un 14 %.

Para el día 29 de julio, presentado en la figura 5.32, los resultados indican que a las 10 : 00 h la contribución experimental del reflector norte es sobrestimada por el modelo teórico, sin embargo, la contribución a la concentración experimental del reflector sur es subestimada teóricamente. Para el reflector este, el modelo predice la contribución ya que a esa hora, los resultados experimentales determinan que no hay contribución del reflector a la concentración. Para el caso del reflector oeste, el modelo determina una contribución que sobrestima a los resultados experimentales. A las 11 : 00 h el modelo sobrestima la contribución a la concentración del reflector norte, sin embargo subestima la contribución del reflector sur, pero logra predecir la contribución del reflector este. Para el caso del reflector oeste, la contribución experimental es sobrestimada por el modelo

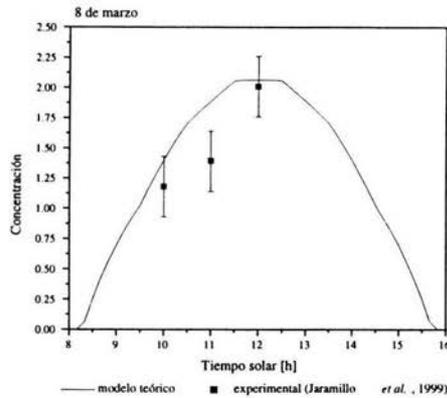


Figura 5.31: Comparación de concentración total experimental y teórica el 8 de marzo

teórico. Para finalizar, a las 12 : 00 h el modelo logra predecir la contribución del reflector norte dentro de la incertidumbre, pero continua subestimando la contribución del reflector sur. La contribución experimental de los reflectores este y oeste es sobrestimada por el modelo aunque predicen la tendencia de los resultados experimentales.

La concentración total para el día 29 de julio se presentan en la figura 5.33. En esta figura se observa que el modelo teórico predice, dentro del error experimental, la concentración total compensando las diferencias de las contribuciones individuales. De manera análoga a la comparación del 8 de marzo, se comparan las áreas bajo la curva del modelo teórico con los resultados obtenidos experimentalmente, y se observa que la teórica es mayor en 14%.

La figura 5.34 presenta la contribución de cada reflector obtenida experimental y teóricamente para el día 23 de diciembre. Se observa que a las 10 : 00 h la contribución experimental del reflector norte es sobrestimada por el modelo teórico, sin embargo la contribución de los reflectores sur, este y oeste se logra predecir satisfactoriamente. A las 11 : 00 h el modelo logra predecir la contribución de los reflectores norte y sur pero sobrestima la contribución del reflector este sin embargo predice satisfactoriamente la contribución del reflector oeste. Finalmente a las 12 : 00 h, el modelo logra predecir la contribución experimental del reflector norte, sin embargo sobrestima la del reflector sur. Para los reflectores este y oeste, la contribución se logra predecir dentro de la incertidumbre.

A pesar de las diferencias entre los resultados teóricos y los experimentales en

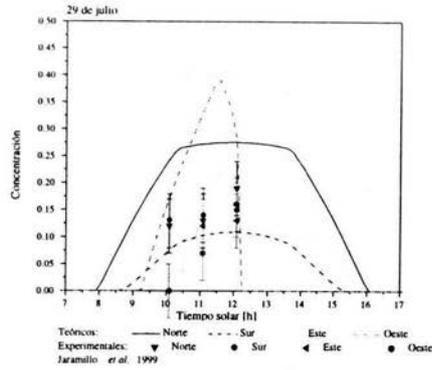


Figura 5.32: Comparación de concentraciones individuales experimentales y teóricas el 29 de julio

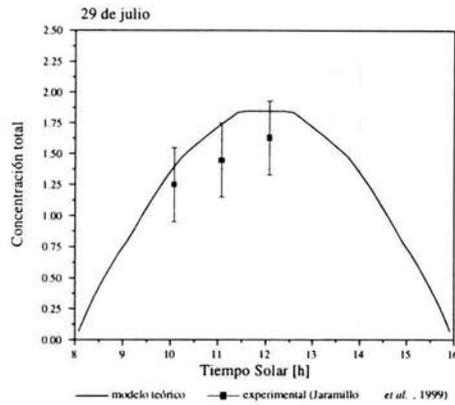


Figura 5.33: Comparación de concentración total experimental y teórica el 29 de julio

las contribuciones individuales de los reflectores, la concentración total calculada es igual a la experimental, dentro de la incertidumbre. Vale la pena mencionar que al relizar una comparación de las áreas bajo la curva experimental y teórica se observa que la teórica es mayor en un 5 %.

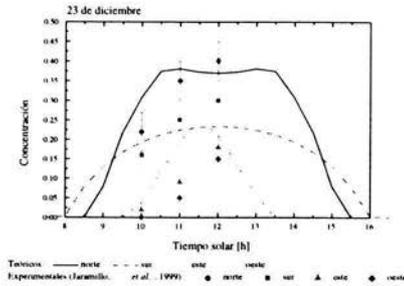


Figura 5.34: Comparación de concentración experimental y teórica el día 23 de diciembre

Estos resultados indican que a pesar de la simplicidad del modelo, éste es capaz de reproducir el comportamiento global del horno con un error, respecto a los resultados experimentales, menor de 15 %. Es importante hacer notar que durante los experimentos para medir la concentración en el horno se presentó una variable experimental difícil de controlar, la horizontalidad de las fotorresistencias, por lo cual el error de los resultados no se distribuye de forma equidistante, si no que tiene una desviación mayor por arriba del valor determinado experimentalmente.

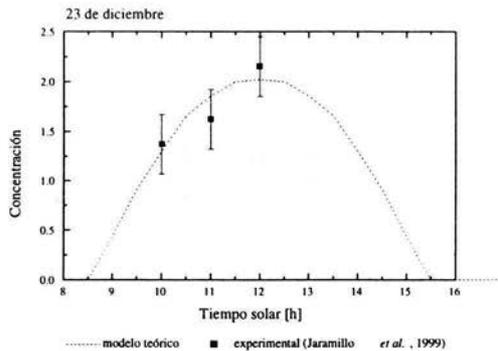


Figura 5.35: Comparación de la concentración total teórica y experimental el día 23 de diciembre

Una vez validado el modelo teórico a través de la comparación con los resultados experimentales obtenidos por Jaramillo y colaboradores [7], se realizó un análisis de concentración para los días propuestos para cambio con el fin de confirmar o modificar la fecha en que se deben realizar dichos cambios. Se calculó la concentración en el día propuesto para el cambio de base y también algunos días anteriores y posteriores, bajo dos distintas condiciones, en la primera condición se empleó la base y orientación anterior y en la segunda condición se empleó la base y orientación del cambio. Los resultados muestran que los días de cambio propuestos para octubre 6, marzo 8 y mayo 16 son los más adecuados, sin embargo indican un ajuste de un día para el cambio en julio, el día propuesto es 30 y se modifica a 29. En las figuras 5.36 y 5.37 se observan los resultados de las concentraciones obtenidas para los días cercanos al día de cambio propuesto para el cambio en mayo y julio, respectivamente.

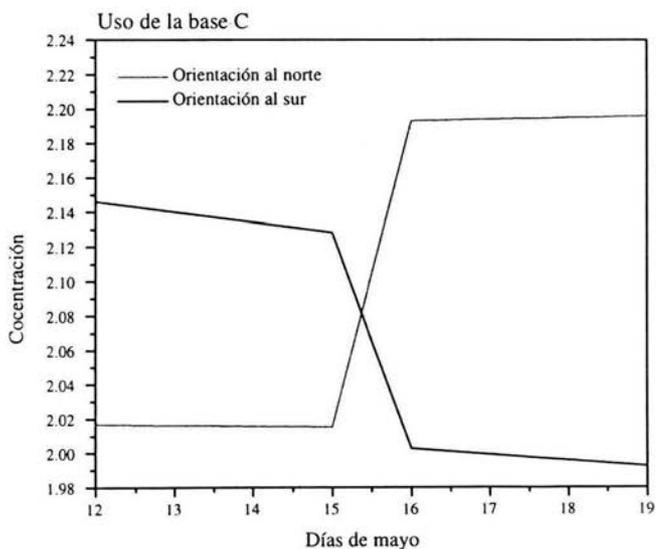


Figura 5.36: Concentración empleando dos diferentes bases para el mes de mayo

En mayo, inicialmente la base c se encuentra al sur y el día de cambio se orienta hacia el norte. Los resultados (5.36) confirman que el día anterior al cambio (15 de mayo) la mayor concentración se obtiene con la orientación sur y el

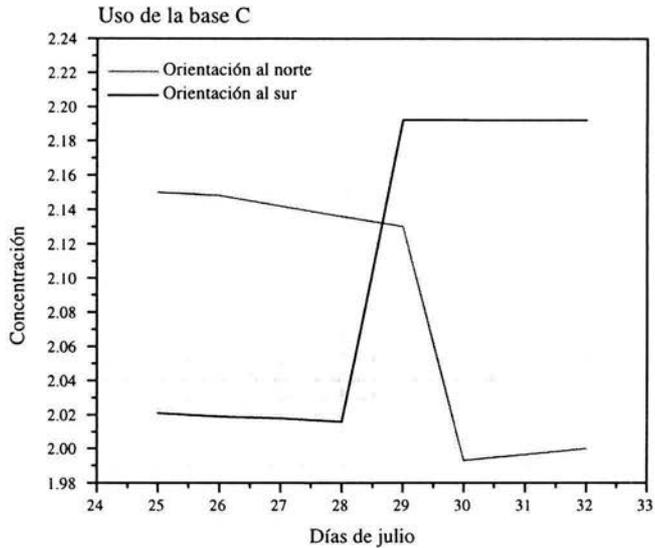


Figura 5.37: Concentración empleando dos diferentes bases para el mes de julio

día de cambio (16 de mayo) la mayor concentración se obtiene con la orientación norte.

Para el mes de julio, la base c inicialmente se encuentra orientada al norte y el día de cambio se orienta hacia el sur. De los resultados (5.37) se observa que el día anterior al cambio (29 de julio) se obtienen concentraciones más altas con la orientación al sur que con la norte, por lo que se propone se realice el cambio de orientación de base ese día.

Capítulo 6

Nuevo prototipo del horno solar

Una vez demostrado, teórica y experimentalmente, que el diseño opto-geométrico de Acosta *et. al.* [4] es satisfactorio, pero que el prototipo construido tiene una eficiencia relativamente baja (12 % en pruebas con agua y 8 % en pruebas con aceite) se analizan las causas de esta baja eficiencia. Las principales causas que se identificaron son: la relación de volumen de la carga con respecto al volumen de la cavidad interior (0.03); las pérdidas de energía a través de la unión de las cajas interior y exterior en la puerta y en el marco del vidrio, las pérdidas a través del vidrio. Por lo que se decidió diseñar y construir un nuevo prototipo conservando el diseño opto-geométrico.

Para este nuevo prototipo también se consideró el aspecto económico en la elaboración; y se buscó reducir el costo de construcción con la posibilidad de reproducir el horno en herrerías y carpinterías disponibles en ciudades pequeñas.

La propuesta original de este nuevo prototipo consiste en utilizar una olla *ad hoc* a la geometría del horno y que funge al mismo tiempo como caja interior mientras que la caja exterior funge al mismo tiempo como aislante térmico. Con este diseño no existe unión entre las cajas interior y exterior.

Las dimensiones exteriores del nuevo prototipo son $1/2$ de las del primer prototipo. El nuevo prototipo tiene una relación de volumen de la carga con respecto al volumen de la cavidad interior de 0.25.

6.1. Materiales de construcción

Al igual que el modelo actual, se propone usar este nuevo prototipo bajo las mismas condiciones de trabajo. También se considera emplear materiales que

resistan las inclemencia del clima, pero con la intención de reducir el costo de fabricación. El material seleccionado para la construcción de la cavidad exterior, así como las bases en las que se encuentran los reflectores es madera de pino de 1.9 cm de espesor recubierta con pintura blanca libre de plomo. La caja interior es de lámina galvanizada calibre 20 recubierta con pintura negra libre de plomo. La cubierta del horno es vidrio común de 5 mm de espesor, se consideró únicamente un vidrio en el horno para no incremental el costo de construcción.

En las siguientes secciones se presentan las figuras que conforman en horno solar acompañadas de una breve descripción.

6.2. Caja exterior y reflectores

La cavidad exterior del horno es el elemento que se expone directamente al ambiente, en su interior se encuentra la caja interior u olla. Los reflectores norte y sur constituyen parte de esta caja pues son la prolongación de las paredes del horno. Se determinó construirlo de esta forma para facilitar la construcción y hacer más rígida la estructura. Las figuras que contienen los parámetros de la cavidad exterior se presentan a continuación.

La figura 6.1 muestra el perfil de la caja, las longitudes de cada uno de lo elementos que lo conforman y los ángulos que forman las paredes.

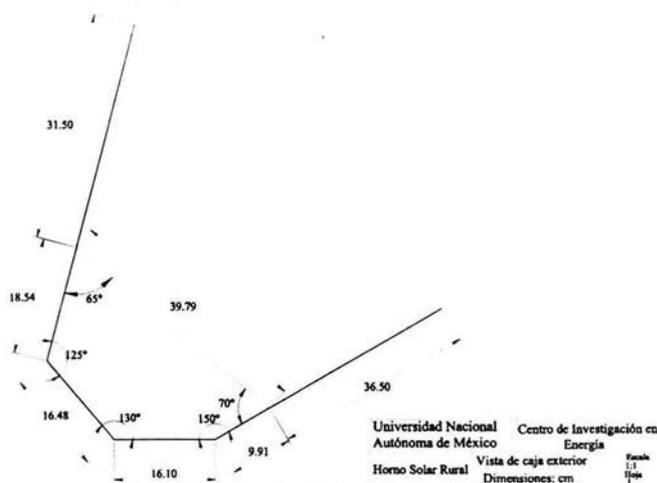


Figura 6.1: Perfil exterior del horno

Una vista isométrica del horno se aprecia en la figura 6.2, con los cuatro reflectores alrededor de éste. Los reflectores este y oeste se encuentran unidos al horno por medio de bisagras. Para darles la inclinación adecuada se emplean dos cadenas que unen al reflector (este y oeste) con el reflector norte, las cuales se aprecian mejor en la fotografía de la figura 6.3.

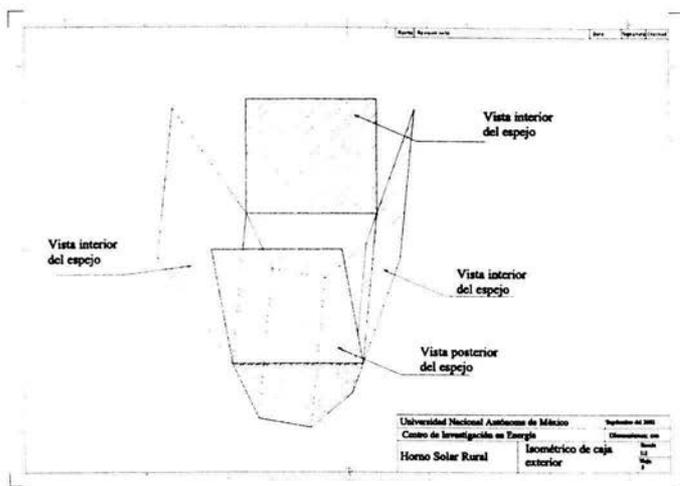


Figura 6.2: Vista isométrica de la caja exterior con reflectores

La figura 6.4 presenta una vista superior de la caja exterior así como las longitudes de los extremos de la cavidad, se aprecian además los cortes en la base de la cavidad.

En la figura 6.5 se presenta una fotografía del nuevo prototipo del horno solar con la olla a su costado. Con esta vista se aprecia la puerta.

6.3. Caja interior - olla

La cavidad interior del horno es a su vez una olla con una geometría similar al horno, tal como se aprecia en la figura 6.6. Esta figura presenta las dimensiones de la cavidad y los ángulos que forman los catetos. Al igual que el horno, la olla tiene dos posibles bases a ser utilizadas, con distinta inclinación, dependiendo de la época del año. Empleando la base con la mayor inclinación, la capacidad de

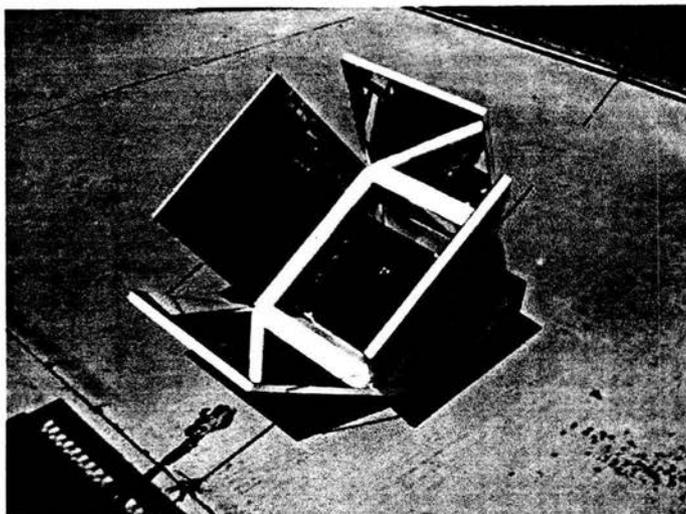


Figura 6.3: Horno solar adaptado con olla en el interior

la olla es de 4.5 litros utilizando la segunda base, la base menos inclinada, su capacidad se incrementa a 5.1 litros.

En la figura 6.7 se encuentra una vista isométrica de la cavidad interior u olla.

La tapa de la olla, se aprecia en la figura 6.8, tiene una geometría un cóncava, esto es con la idea de hacer más eficiente la absorción de la energía radiativa directamente por las ollas [5]. La olla se encuentra recubierta de negro mate por la parte exterior con una pintura libre de plomo.

6.4. Puerta

Un aspecto importante en el diseño del horno es la puerta. Ésta sigue la geometría de la olla y se aprecia en la figura 6.9. La puerta es de madera de pino de 1.9 cm de espesor, al igual de los lados de la caja interior se encuentra unida al horno por medio de una visagra y está colocada en uno de los costados este-oeste del horno solar.

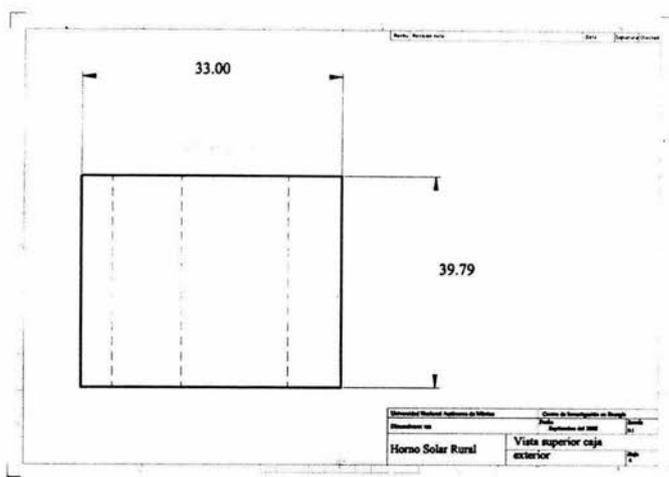


Figura 6.4: Vista superior del horno

6.5. Enfoque económico

En la construcción del nuevo prototipo se cumplió uno de los objetivos más importantes, la reducción del costo de construcción.

El costo del horno de acero inoxidable ascendió a aproximadamente \$6000 con un volumen de carga de 6.0 litros mientras que el nuevo prototipo costó cerca de los \$1000 con un volumen de aproximadamente 5 litros. Al evaluar el costo de cocción por litro en cada horno, se obtiene, para el horno de acero inoxidable, un costo de \$1000 y para el horno de madera, el costo es de \$200, es decir, cocinar con el horno solar de madera cuesta sólo el 20 % de lo que cuesta cocinar con el horno solar de acero inoxidable.

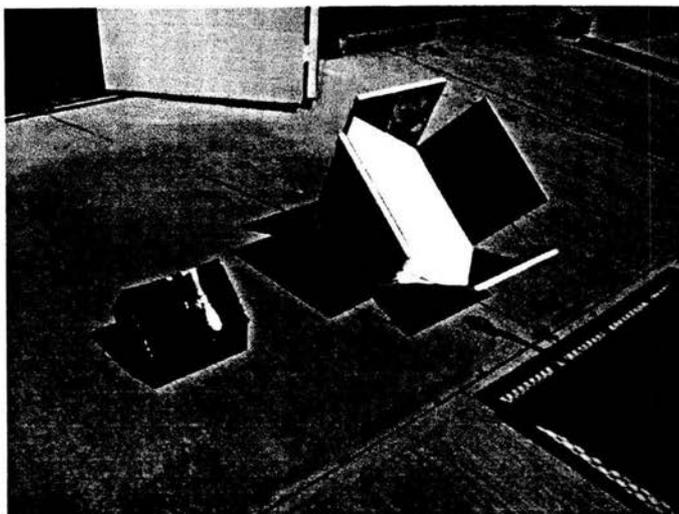


Figura 6.5: Vista del nuevo prototipo del horno solar con la olla a su costado

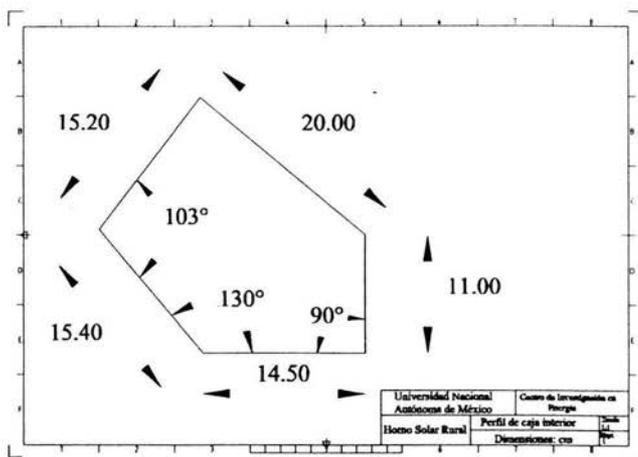


Figura 6.6: Cavidad interior del horno u olla.

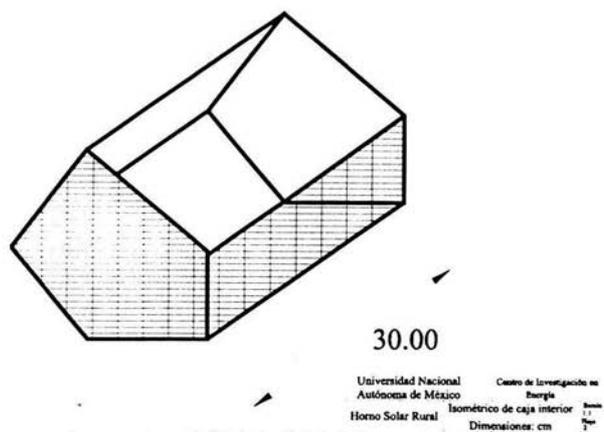


Figura 6.7: Vista isométrica de la cavidad interior u olla

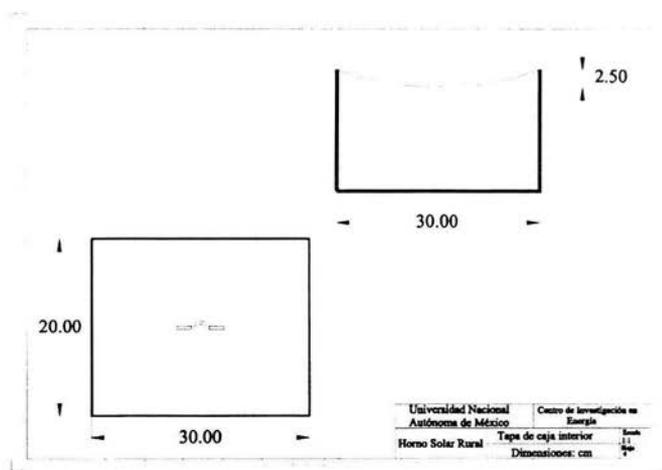


Figura 6.8: Cubierta de la olla del horno

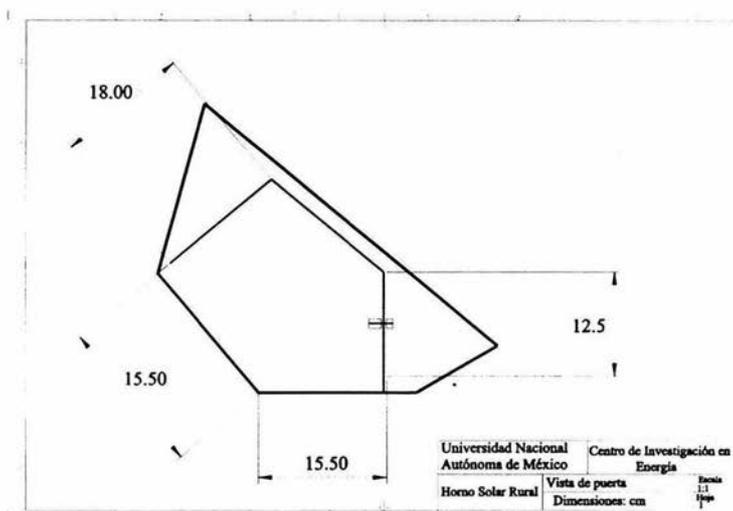


Figura 6.9: Perfil de la puerta del horno solar

Capítulo 7

Conclusiones

En esta tesis se cumplieron los objetivos propuestos al inicio de la investigación: se realizó satisfactoriamente la evaluación térmica del horno solar, se probó el funcionamiento del horno en la cocción de alimentos. Además, se cuenta con un modelo teórico que determina la concentración solar en el horno todo el año y finalmente se cuenta con un nuevo prototipo del horno solar, cuya principal diferencia es que la cavidad interior es al mismo tiempo la olla similar a la geometría del horno.

En este último capítulo se presentan conclusiones y recomendaciones, con base a los resultados obtenidos en esta investigación. El orden en que se presentan las conclusiones es el siguiente, primero las conclusiones respecto a la caracterización del horno, seguidas de las obtenidas del proceso de cocción de alimentos, posteriormente se presentan las conclusiones obtenidas de la estimación en el consumo de leña que traería consigo la utilización del horno y se presentan las conclusiones de comparar el modelo teórico de concentración con los resultados obtenidos experimentalmente por Jaramillo y colaboradores [7] y las conclusiones generales del estudio con el primer prototipo.

En la caracterización del horno, tal como se esperaba, las temperaturas más altas se presentaron al realizar pruebas con el horno vacío, seguidas de las temperaturas obtenidas al realizar pruebas con aceite y las temperaturas más bajas se obtuvieron al hacer pruebas con agua. En todas las pruebas las máximas temperaturas se registraron en las bases interiores del horno. Al realizar pruebas con agua, la máxima temperatura en la carga está limitada a la temperatura de ebullición del fluido, eventualmente se presenta alguna medición con temperatura mayor debido a burbujas de vapor en el interior de la olla. La energía que incide

en el colector después de alcanzar la temperatura de ebullición es utilizada para el cambio de fase, lo cual se confirma al observar que el colector, por la parte interna, se empañaba después del medio día solar. Las temperaturas más altas se presentaron en los meses de noviembre, diciembre y lo cual confirma que el horno es más eficiente cerca de la fecha de optimización y se corrobora al observar que los niveles de concentración más altos se presentaron en ese periodo.

Las temperaturas registradas al realizar pruebas con alimentos alcanzan la temperatura de cocción ¹ y la superan por periodos mayores a 3.5 horas en días cuya radiación promedio en el periodo de prueba, es superior a los 350 Wm^{-2} . En este dispositivo es posible realizar la cocción de los alimentos en tan sólo 4 horas, en un día despejado con radiación promedio superior a los 600 Wm^{-2} (radiación global al medio día solar $\simeq 800 \text{ Wm}^{-2}$). En nuestro país no es posible realizar el proceso de cocción por más de 8 horas, debido a las horas de insolación y tampoco en periodos menores a las 3.6 horas debido a los niveles de radiación presentes (máximo 1000 Wm^{-2} al medio día solar). Cabe destacar que más del 50 % del territorio nacional cuenta con niveles de radiación superiores al mínimo para realizar el proceso de cocción por más del 50 % del año. A pesar de que el proceso de cocción en algunas pruebas no se logró realizar satisfactoriamente, puede considerarse a éste como un proceso de precocción de alimentos, con lo cual contribuye de manera significativa a reducir al tiempo en que los alimentos se cocinan empleando tecnologías convencionales. Con los resultados obtenidos en este estudio, se comprueba que es factible emplear el horno para la cocción de alimentos, por lo que se propone usar este horno en comunidades rurales, con la idea de observar su desempeño y conocer la opinión de los potenciales usuarios respecto al uso y a los beneficios del horno.

El uso de este horno solar podría reducir el consumo de leña que se usa en la cocción de alimentos, principalmente en comunidades rurales. Se estima un ahorro máximo de 440.6 kg de leña anual, equivalentes a 1 m^3 por horno. Esto implica un ahorro en el tiempo para la recolección de leña, estimado en 15580 h anuales o en la reducción del gasto por la compra de este combustible. Estos valores deben multiplicarse por un factor de corrección dado por la disponibilidad de radiación solar en el lugar de uso. También la emisión de desechos debido a la combustión de leña se reduciría al hacer uso del horno solar.

Al comparar los resultados del modelo teórico de concentración desarrollado en esta tesis con los resultados experimentales obtenidos por Jaramillo y colaboradores [7], se concluye que el modelo determina satisfactoriamente la concentración solar total por lo que se puede conocer la energía solar incidente en el horno como función del tiempo a partir de las mediciones de la energía solar global en el plano horizontal. A pesar de las discrepancias al comparar las

¹La temperatura de cocción se consideró como 80° C . [31]

contribuciones individuales teóricas y experimentales de los reflectores, el modelo es capaz de reproducir la concentración total obtenida experimentalmente con un error menor que el 15%. Este modelo teórico de concentración, validado y aplicado a la época en que se realizaron los experimentos, es posible emplearlo para calcular concentraciones y energías incidentes en el horno para todo el año.

El modelo teórico de concentración se validó para tres días de diseño con los resultados experimentales de Jaramillo y colaboradores [7], por lo que se asume que el modelo es adecuado para calcular la concentración todo el año. Al aplicar este modelo se obtuvieron concentraciones que varían de 1.75 a 2.20 durante todo el año, lo que representa una desviación de $\pm 11\%$ del valor central. Para la época en que se realizaron experimentos sobre cocción de alimentos (de noviembre a marzo), los valores de concentración obtenidos del modelo están entre 1.78 y 2.15, estos valores representan una desviación de -10 a 9% del valor central anual. Ya que los límites establecidos para el promedio de la radiación en un plano horizontal para el proceso de cocción \bar{R}_n y la expresión para determinar el tiempo mínimo de cocción t_c no dependen, dentro de la incertidumbre asociada a estos valores, de la concentración para el rango de experimentación y éste es prácticamente igual al rango anual, se puede considerar que los límites de \bar{R}_n y la expresión para t_c son válidos para todo el año.

Un nuevo prototipo del horno solar se diseñó y se contruyó con adaptaciones para incrementar la relación de volumen horno-olla y disminuir el costo de fabricación. La relación horno-olla se incrementó por más de un orden de magnitud, lo cual se verá reflejado en el incremento de la eficiencia del horno. El costo de este nuevo modelo representa aproximadamente el 20% del costo del horno solar actual. Adicionalmente se espera que tenga menores pérdidas de energía al ser la caja exterior el aislante y no estar en contacto con la interior a través del marco de la puerta y del marco que unía a las cavidades en el primer prototipo.

Bibliografía

- [1] Rincón M. E. and Moreno L. D. and Vera F. *Desarrollo de cocinas solares con base a concentradores CPC*. Memorias de la XXI Reunión Nacional de Energía Solar ANES. Chihuahua, Chihuahua, pp 445-449, 1991.
- [2] N. M. Nahar. *Performance and testing of an improved hot box solar cooker*. Energy Conversion and Management, 30(1):9-16, 1990.
- [3] M. B. Habeebullah and A. M. Khalifa and I. Owi. *The oven receiver: and approach toward the revival of concentrating solar cooker* Solar Energy, 54(4):227-237, 1995.
- [4] Acosta R. and Jaramillo O. A. and Vázquez J. J. and Del Río J. A. *Diseño y emulación de un horno solar tipo caja*. Memorias de la XX Reunión Nacional de Energía Solar ANES. Xalapa, Veracruz. pp 76-80, 1996.
- [5] Hernández-Luna G. *Diseño, Construcción y Caracterización de un Horno Solar Rural*. Tesis de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Junio 2001.
- [6] Peres B. and Karlsson B. *External reflectors for large solar collector arrays, simulation model and experimental results*. Solar Energy, 51(5):327-337, 1993.
- [7] Jaramillo O. A. and Arriaga L. G. and Vázquez J. J. and Acosta R. and Huelisz G. *Análisis de la distribución de energía incidente en un horno solar tipo caja mediante un heliódon*. Memorias de la XXIII Reunión Nacional de Energía Solar ANES, pp 621-625, 1999.
- [8] Khalifa A. M. A. *Solar cookers for outdoors and indoors*. Energy, 32(6):567-641, 1985.

- [9] Ghougassian B. *Cooking with solar ovens, energy and environment into the 90's*. Proceedings of the 1st world Renewable Energy Congress, 2:1334-1338, 1990.
- [10] Jonh S. and Shanmugan N V. and Vidyasagaran E. and Raghavan M. and Ramaia P. and Sooriamoorthy C. E. *Studied on a new combined concentrating oven type solar cooker*. Energy Convers and Management, 32(6):537-541, 1991.
- [11] Rakhes Kumar and R. S. Adhikari and H.P. Garg and Ashvini Kumar. *Thermal performance of solar pressure cooker based on evacuated tube solar collector*. Applied Thermal Engineering, 3(31):1699-1706, 2001.
- [12] J. Antonio Urbano C. and Yasuhiro Matsumoto and René Asozoma and P. Francisco Aceves H. and Alfonso Sotelo Trujillo and Antonio Jácome R. and Angélica Heredia. *Propuesta de diseño de una estufa solar de 7.5 kWh por día*. Memorias de la XXVI Reunión Nacional de Energía Solar ANES. Chetumal, Quintana Roo, pp 263-268, 2002.
- [13] Buddhi D. and Sahoo L. K. *Solar cooker with latent heat storage: desing and experimental testing*. Energy Conversion and Management, 38(5):493-498, 1997.
- [14] Herliyani S. and Abdullah K. and Sayigh A. *The solar oven: development and field testing of user-made desing in Indonesia*. Solar Energy, 64(4-6):121-132, 1998.
- [15] Herliyani Suharta and A. M. Sayigh and K Abdullah and K. Mathew. *The comparison of three types of Indonesian solar box cookers*. Renewable Energy, 22:379-387, 2001.
- [16] Emam Sharaf. *A new desing for an economical, highly efficient, conical solar cooker*. Renewable Energy, 27:299-619, 2002.
- [17] George O. G. Löf. *Recent investigations of the use of solar energy for cooking*. Solar Energy, 7(3):125-133, 1963.
- [18] Galip Oturan, Necdet Ozbalta and Ali Gungor. *Performance analysis of a solar cooker in Turkey*. International Journal of Energy Research, 26:105-111, 2002.
- [19] Vázquez J. J. and Arriaga L. G. and Acosta R. and Jaramillo O. A. and Huelsz. G. *Evaluación del trazado de rayos mediante un heliodón para horno solar tipo caja*. Memorias de la XXII Reunión Nacional de Energía Solar ANES. Mexicali, Baja California, pp 475 – 478, 1998.

- [20] Omar Raúl Masera Cerruti and Ruan Sergio Almeida Nuche and Jesús Cervantes Cervin and Gutam Shankar Dutt and Luis García Galiano and José Francisco Garza Caligarias and Roselio Joaquín López and Cartarino Juárez Granados and Celia Márquez and Marco Antonio Martínez Negrete and Jaime Navia Antezana and Alfonso Ortiz Álvares and Mateo Pérez Ramírez and Claudia Sheinbaun Pardo. *El padrón de consumo energético y su diferenciación social. Estudio de un caso en una comunidad rural*. Reporte Técnico. Grupo de Energía, Departamento de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México. 1987.
- [21] Rodolfo Díaz Jiménez. *Consumo de leña en el sector residencial de México. Evolución histórica y emisiones de CO₂*. Tesis de Maestría, DEPMI-UNAM, 2000.
- [22] Renewable Energy Report. *Energy Information Administration*. www.eia.doe.gov, 2002.
- [23] Food and Agricultural Organization of the United Nations. *Forest products and services*. Wood Energy. www.fao.org, 2003.
- [24] Delgado-Arellano Víctor G. *Modelo a cerca del consumo doméstico de leña basado en la identificación y cuantificación de sus usos finales dentro de una población de usuarios exclusivos de leña*. Memorias de la XXVI Reunión Nacional de Energía Solar ANES. Chetumal, Quintana Roo, pp 685-688, 2002.
- [25] Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. *Balance Energético Nacional*. www.conae.org.mx, 2001.
- [26] Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. *Censo nacional de población 2000*. www.inegi.gob.mx, 2000.
- [27] Duffie J. A. and Beackman W. A. *Solar Engineering of thermal process*. Wiley Interscience Publications, 1980.
- [28] P. A. Funk. *Evaluating international standar procedure for testing solar cookers and reporting performance*. Solar Energy, 68(1):1-7, 2000.
- [29] Donald Rapp. *Solar Energy*. Englerood Cliffs, New Jersey, 1981.
- [30] HP34970A. *Data adquisition/Switch unit, Users guide*. Hewlett Packard.
- [31] Rincón Mejía E. and Osorio Jaramillo Fidel A. *Los horno y comales solares Tolucazin*. Memorias de la XXVI Reunión Nacional de Energía Solar ANES. Chetumal, Quintana Roo, pp 269-275, 2002.

- [32] Pilatowski Figueroa Isaac (responsable de la publicación). *Notas del Curso de Actualización en Energía Solar*, 2000.
- [33] Gaur A. and Singh O. P. and Pamdey G. N. *Performance study of solar cooker with modified utensil*. *Renewable Energy*. 18:121-129, 1999.
- [34] José Luis Fernandez Zayas and Vicente Estrada Cajigal. *Cálculo de la radiación solar instantánea de la República Mexicana*. Reporte Técnico. Series del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. 1983.

Apéndice A

Calibración de termopares

Este apéndice presenta el método empleado para la calibración de los termopares.

Un termopar consiste de dos diferentes conductores, con los que se hace un par de juntas alternando los conductores formando un circuito cerrado. En los termopares tipo "T", el alambre de cobre es el positivo y el alambre de constantán (aleación cobre y níquel) es el negativo, este tipo de termopares se recomienda para rangos de temperatura entre -270 a 400°C y es adecuado para ambiente con humedad. El comportamiento de los termopares se basa en un fenómeno descubierto por Seebeck que consiste en crear una fuerza electromotriz térmica, función de la densidad de portadores de carga (o electrones en los metales) que es diferente de un conductor a otro y depende de la temperatura de la junta; en un termopar cuyas juntas se mantienen a diferentes temperaturas, ocurre una difusión de cargas a diferente razón en cada junta; el efecto neto es la aparición de una corriente eléctrica en el circuito provocada por un campo no electrostático. En un circuito de termopares se presentan dos fuerzas electromotrices más, una de estas fuerzas es denominada Peltier, ocasionada por el flujo de corriente en el circuito y la otra fuerza electromotriz, denominada fem de Thompson, la cual se debe a los gradientes de temperatura en el metal [32]. Si las dos juntas del termopar se encuentran a diferentes temperaturas, un voltaje proporcional a la diferencia de temperaturas se induce en los termopares. Cuando la temperatura en la junta de referencia es conocida, la temperatura de la junta de medición puede ser determinada midiendo el voltaje del termopar y adicionando la correspondiente diferencia de temperatura a la temperatura de referencia.

En este anexo se incluye el procedimiento realizado en la calibración de los

termopares utilizados en la medición de la temperatura del horno. Esta calibración consistió en la comparación de la temperatura registrada por cada termopar desde el sistema de adquisición de datos (SAD), teniendo al termopar dentro del baño térmico de un sistema calibrador, y la temperatura señalada por el sistema calibrador.

Los pasos previos a la calibración de cada uno de los termopares utilizados en este trabajo son los siguientes:

1. Construcción del termopar Para construir el termopar, se unen las puntas de los dos alambres procurando que los alambres sólo se toquen en las puntas, se aplica un arco eléctrico ($\sim 5V$) para fundir los metales y formar la unión termopar. Esta unión debe soportar esfuerzos mecánicos para asegurar el funcionamiento del termopar durante los experimentos.
2. Instalación en la tarjeta del sistema adquisidor Una vez armados los termopares, el siguiente paso es conectar cada termopar a la tarjeta del sistema adquisidor. El alambre de cobre (color azul) se conecta al puerto positivo y el constantán (rojo) al puerto negativo.
3. Verificación Verificar que las lecturas registradas por los termopares sean congruentes con la temperatura ambiente, aunque no se tenga una exactitud adecuada.
4. Calibración La calibración de los termopares se realizó con un sistema calibrador estándar *Temperature Calibrator*, marca *Jofa* modelo *D55SE*. Entre las características principales de este sistema se destacan las siguientes: sistema portátil, programable en un rango de temperaturas de -20 a $120^{\circ}C$, cuenta con probetas de diferente diámetro donde se introduce el dispositivo a calibrar. La calibración se realiza en un rango de temperaturas de 20° a $120^{\circ}C$ en intervalos de $10^{\circ}C$ cada lectura. Este rango de temperaturas es el esperado para el horno solar. Los pasos seguidos para calibrar son los siguientes:

Programación del sistema calibrador a la temperatura deseada.

Introducción de cada termopar a la probeta del sistema calibrador.

Se registra la temperatura del sistema calibrador y la temperatura leída en el sistema adquisidor para cada termopar, se repite esto para cada temperatura.

Para verificar el comportamiento del termopar respecto al sistema calibrador, se grafica la temperatura de los termopares en el eje x y la temperatura del sistema calibrador en el eje y , tal como se aprecia en la figura A.1.

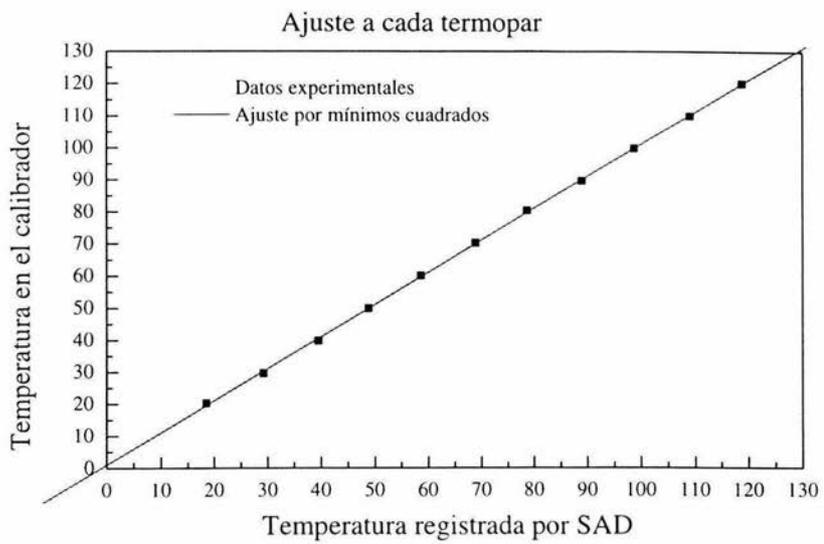


Figura A.1: Gráfica obtenida para la calibración de los termopares

Apéndice B

Selección de los recipientes, ollas

Este apéndice contiene las características geométricas de los recipientes empleados en los experimentos.

La metodología seguida para la evaluación térmica del horno está basada en Los procedimientos internacionales estandarizados para prueba de hornos y estufas solares [28] propuestos en la Tercera Conferencia Mundial sobre Cocinas Solares (celebrada en 1997 en la India). Se decidió por la aplicación de este estándar puesto que es un híbrido de procedimientos aportados por diversos investigadores y expertos en el área de distintas partes del mundo. Este estándar establece límites para condiciones ambientales y procedimientos de prueba específicos.

Dado el volumen de carga recomendado por el estándar internacional, se decidió utilizar dos ollas comerciales. Los requisitos que cada una de estas ollas debe satisfacer son los siguientes:

1. Tamaño adecuado para la puerta.
2. Con mínima área total para disminuir la energía utilizada para calentar el recipiente.
3. De material cuya capacidad calorífica sea baja para disminuir la energía utilizada para calentar el recipiente, el material seleccionado fue aluminio.
4. Con tapa curva, esto con la finalidad de incrementar la captación de energía radiativa por la olla misma al utilizar la tapa en forma invertida [33].

Para contar con un tamaño de ollas adecuado se aplicó un análisis de máximos y mínimos, el cual se describe a continuación.

Como se sabe, el volumen de un cilindro se calcula mediante la siguiente expresión:

$$V = \pi hr^2 \quad (\text{B.1})$$

donde V es el volumen del cilindro, π es un número adimensional utilizado para determinar área y volúmenes de geometrías en la que se encuentren involucradas circunferencias, h es la altura del recipiente que se desea conocer y r es el radio del recipiente. La figura B.1 facilita la visualización del recipiente.

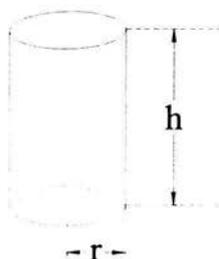


Figura B.1: Características geométricas de los recipiente empleados en las pruebas

Es posible determinar también el área del recipiente mediante la siguiente ecuación:

$$A = 2\pi r^2 + 2\pi rh \quad (\text{B.2})$$

donde A es al área del recipiente y la descripción de las demás variables involucradas corresponde a la misma que en la ecuación anterior. Despejando r de la ecuación B.1, se obtiene la siguiente expresión:

$$r = \left\{ \frac{V}{\pi h} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.3})$$

sustituyendo la expresión B.3 en la ecuación B.2, se obtiene la siguiente expresión:

$$A = \left\{ \frac{2V}{h} + 2\pi^{\frac{1}{2}} h^{\frac{1}{2}} V^{\frac{1}{2}} \right\}, \quad (\text{B.4})$$

y aplicando la derivada con respecto a h , se obtiene la expresión:

$$\frac{dA}{dh} = -\frac{2V}{h^2} + \frac{\pi^{\frac{1}{2}}V^{\frac{1}{2}}}{h^{\frac{1}{2}}}, \quad (\text{B.5})$$

que se iguala a cero, para obtener un máximo o un mínimo. Así se llega a la siguiente expresión

$$h = \left\{ \frac{4V}{\pi} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.6})$$

que conjuntamente con la ecuación B.3 se aplican para establecer los límites del recipiente, una vez determinado el volumen deseado.

Las dimensiones de las ollas empleadas en los experimentos son:

$$h = 0.14 \text{ m}$$

$$r = 0.10 \text{ m}$$

Para hacer más eficiente la absorción de energía radiativa directamente por las ollas, se realizaron dos modificaciones sencillas. La primera fue invertir la tapa de la olla para tener una superficie cóncava expuesta a la radiación solar y la segunda fue cubrirlas de pintura negra en su exterior. Se utilizó la pintura negra libre de plomo, de la marca *COMEX* tipo *acqua* 100 Esmalte de agua anticorrosivo exteriores-interiores.

Apéndice C

Factor de corrección por estado de la República Mexicana

Este apéndice contiene una estimación de los días en los cuales la radiación solar global mensual por unidad de tiempo y área, R_{2m} , es mayor que 700 W m^{-2} para cada estado de la República Mexicana con lo cual se obtuvo un factor de corrección. Los datos comparados están basados en la investigación Cálculo de la radiación solar instantánea en la República Mexicana [34]. El factor de corrección se obtuvo para cada estado de la República Mexicana al obtener un cociente entre los días del año cuya radiación global es superior a la radiación global mínima requerida para realizar el proceso de cocción y los días total en un año.

Para facilitar la lectura, la información se presenta en tres columnas. En la primera columna se presenta el estado de la República Mexicana, en la segunda columna se presenta los días en los que se presentan radiaciones globales mayor a los 700 W m^{-2} con su equivalente en porcentaje anual.

Estado	Días que $R_{zm} \geq 700$ [W m^{-2}]	F_c [%]
Aguascalientes	304	83
Baja California Norte	306	83
Baja California Sur	306	83
Campeche	61	16
Chiapas	91	25
Chihuahua	245	67
Coahuila	245	67
Colima	121	33
Distrito Federal	121	33
Durango	304	83
Estado de México	90	25
Guanajuato	274	75
Guerrero	213	58
Hidalgo	213	58
Jalisco	304	83
Michoacán	121	33
Morelos	121	33
Nayarit	303	83
Nuevo León	62	17
Oaxaca	305	83
Puebla	214	58
Querétaro	245	67
Quintana Roo	61	16
San Luis Potosí	122	33
Sinaloa	182	50
Sonora	306	83
Tabasco		
Tamaulipas	92	25
Tlaxcala	153	42
Veracruz		
Yucatán	93	25
Zacatecas	334	92

Cuadro C.1: Factor de corrección para al estimar el ahorro de leña de acuerdo a la región [34]

C.1. Índice de claridad

En esta sección se presenta la expresión empleada para calcular el índice de claridad, K_T , [27], el cual se reporta para cada día con las condiciones

experimentales en el capítulo 4. La ecuación para calcular K_T es la siguiente

$$K_T = \frac{H}{H_o} \quad (C.1)$$

donde H es la radiación solar total medida en el plano horizontal y H_o se encuentra definido por la ecuación C.2, misma que se presenta a continuación

$$H_o = \left\{ \frac{24X3600G_{sc}}{\pi} \right\} \left\{ 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right\} \quad (C.2)$$

$$X \left\{ \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right\}$$

donde G_{sc} es la constante solar cuyo valor se tomó de 1367 W m^{-2} , n es el día del año y ω_s es el ángulo de puesta de sol que se calcula con la expresión C.3

$$\omega_s = -\tan \phi \tan \delta \quad (C.3)$$

ϕ y δ se encuentran definidas en la nomenclatura.