



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA

SUSTITUCION DE GAS L.P. POR ENERGIA SOLAR
EN EL PROCESO DE COCCION DE MAIZ

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

CAMPO DE CONOCIMIENTO - SISTEMAS ENERGETICOS
P R E S E N T A :

JUAN JOSE VIDAL AMARO

TUTOR:
DR. ROBERTO BEST Y BROWN

CENTRO DE INVESTIGACION EN ENERGIA

2012



Centro de Investigación en Energía
UNAM

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. García Valladares Octavio
Secretario: Dr. Best y Brown Roberto
Vocal: Dra. Sheinbaum Pardo Claudia
1^{er} Suplente: Dr. Romero Domínguez Rosenberg Javier
2^{do} Suplente: Dr. Gomez Espinoza Victor Hugo

Lugar donde se realizó la tesis:

Temixco Morelos, Centro de Investigación en Energía (CIE), UNAM.

TUTOR DE TESIS

DR. ROBERTO BEST Y BROWN

FIRMA

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por haberme abierto sus puertas.

Al Centro de Investigación en Energía y su Departamento de Sistemas Energéticos por brindarme los recursos necesarios para el desarrollo de la presente tesis.

Al Dr. Roberto Best y Brown por brindarme en todo momento su apoyo incondicional.

Al Dr. Victor Hugo Gómez Espinoza y al Dr. Jorge Hernández Gutiérrez por su valiosa colaboración en el diseño y supervisión de las pruebas realizadas.

Al Ing. José de Jesús Quiñones Aguilar por su colaboración en cuanto a los datos de la estación meteorológica del CIE, sin los cuales hubiera sido difícil la realización de algunos cálculos.

A Emanuel Rey David Salazar Flores técnico encargado de pruebas por su asistencia y buena disposición en el desarrollo de las pruebas.

Con mucho amor y felicidad
A mis papás Rubén y Elia
por haber creado las mejores condiciones
para mi desarrollo... y lo que falta.
A toda mi gran familia Amaro y Vidal
por ser el complemento de alegrías, risas,
cobijo y cultura que siempre me han enseñado a valorar.
A todos mis demás seres cercanos y muy queridos
por las aventuras, desventuras
e inolvidables experiencias que hemos compartido

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Justificación.	3
1.2. Objetivos.	4
2. Panorama del gas licuado de petróleo.	7
2.1. Situación internacional del gas L.P.	7
2.2. Mercado Nacional de gas L.P.	11
2.2.1. Oferta de gas L.P. 2001-2011	12
3. El proceso de Nixtamalización.	15
3.1. Generalidades de la nixtamalización.	15
3.1.1. Tipos de maíces y su composición	15
3.1.2. El proceso de nixtamalización.	17
3.2. Condiciones óptimas del proceso de nixtamalización.	19
3.3. Costos económicos, energéticos y emisiones de CO_2 de la nixtamalización a nivel Nacional.	23
3.3.1. Consumo de maíz para nixtamalización.	23
3.3.2. Energía requerida en la nixtamalización.	24

4. Pruebas sobre el calentador solar de agua.	35
4.1. Características del calentador.	35
4.2. Pruebas de acuerdo a la NMX-ES-004-NORMEX-2010	37
4.2.1. Descripción de la norma.	37
4.2.2. Evaluación del colector de acuerdo a la norma.	41
4.3. Prueba de dos días de exposición.	51
5. Potencial de ahorros en el proceso de nixtamalización con la introducción de calentadores solares de agua.	55
5.1. Cálculo de ahorros posibles con participación del calentador solar de agua en el proceso de nixtamalización.	56
5.2. Potencial de ahorro considerando los valores de insolación en la República Mexicana.	59
6. Resumen para la presentación y difusión didáctica de los resultados.	67
7. Conclusiones y Trabajo a Futuro.	71
7.0.1. Trabajo a futuro.	73
A. Gráficas de irradiancia, temperatura ambiente y velocidad del viento de los días de pruebas.	75
B. Mapas de Insolación mínima y máxima en la República mexicana.	85
C. Cálculo de la insolación incidente sobre colector inclinado a $\beta=27^\circ$.	89
D. Características de los instrumentos de medición.	97
D.0.2. Termómetros.	97

D.0.3. Anemómetro.	98
D.0.4. Piranómetro PSP.	98
D.0.5. Bomba de recirculación.	98
D.0.6. Sensor de presión estática	98
Bibliografía	99

Índice de figuras

2.1. Precios internacionales de propano y butano, 1999-2009 (dólares por tonelada).	10
2.2. Ahorro de gas l.p residencial por mejoras técnicas.	12
2.3. Evolución de los precios nacionales del gas l.p.	14
3.1. Anatomía del grano de maíz.	16
3.2. Curvas de contenido de calcio en función del tiempo de reposo.	21
3.3. Curvas de cocción de las dos primeras horas de los proceso de nixtamalización (Pflugfelder et al., 1988).	22
3.4. Imágen de la forma en que se realiza la nixtamalización.	25
3.5. Diagrama de flujo de la nixtamalización.	26
4.1. Calentador solar de agua de 165 (l) marca Enerverde.	36
4.2. Esquema de la constitución y funcionamiento de un tubo de calor (heat pipe).	37
4.3. Esquema de la mesa de pruebas sobre el calentador solar.	42
4.4. Irradiancia global de los días 15, 16, 17 y 18 de abril de 2011.	45
4.5. Temperatura ambiente en los días de prueba 15, 16, 17 y 18 de abril de 2011.	46
4.6. Velocidad del viento en los días de prueba 15, 16, 17 y 18 de abril de 2011.	47

4.7.	Gráfica de temperaturas, insolación global, calor útil y eficiencia del calentador solar de agua, en la etapa diurna de la prueba de acuerdo a la NMX-ES-004.	48
4.8.	Curva característica del calentador solar de agua, etapa diurna de la prueba NMX-ES-004.	49
4.9.	Curva característica del calentador en la etapa nocturna de la prueba NMX-ES-004.	51
4.10.	Temperatura ambiente de los días 15, 16, 17 y 18 de abril de 2011, en la etapa nocturna de la prueba según la NMX-ES-004.	52
4.11.	Velocidad del viento en los días 15, 16, 17 y 18 de abril de 2011, en la etapa nocturna de la prueba según la NMX-ES-004.	53
4.12.	Curvas de temperatura, energía y eficiencia de la prueba de exposición de 2 días.	54
5.1.	Diagrama de flujo de la nixtamalización con calentador solar de agua.	65
6.1.	Cuanto emites y gastas por cada 100 (kg) de maíz nixtamalizado.	68
6.2.	Cuanto emites y gastas por cada 100 (kg) de maíz nixtamalizado si utilizas calentadores solares.	68
6.3.	Resultados sobre mapa político de la República Mexicana.	70
A.1.	Irradiancia global de los días 19, 20, 21 y 23 de abril de 2011.	76
A.2.	Irradiancia global de los días 24, 25, y 26 de abril de 2011.	76
A.3.	Irradiancia global de los días 20, 21, 22 y 27 de enero, 16 y 17 de febrero de 2011.	77
A.4.	Temperatura ambiente de los días 19, 20, 21 y 22 de abril de 2011.	77
A.5.	Temperatura ambiente de los días 23, 24, 25 y 26 de abril de 2011.	78
A.6.	Temperatura ambiente de los días 20, 21, 22 y 27 de enero, 16 y 17 de febrero de 2011.	78

A.7. Velocidad del viento en los días 19, 20, 21 y 23 de abril de 2011.	79
A.8. Velocidad del viento en los días 24, 25, y 26 de abril de 2011. .	79
A.9. Velocidad del viento en los días 20, 21, 22 y 27 de enero, 16 y 17 de febrero de 2011.	80
A.10. Temperatura ambiente de los días 19, 20, 21 y 23 de abril de 2011, en la etapa nocturna de la prueba NMX-ES-004.	80
A.11. Temperatura ambiente de los días 24, 25 y 26 de abril de 2011, en la etapa nocturna de la prueba NMX-ES-004.	81
A.12. Temperatura ambiente de los días 21, 22 y 27 de enero, 16 y 17 de febrero de 2011, en la etapa nocturna de la prueba NMX-ES-004.	81
A.13. Velocidad del viento en los días 19, 20, 21 y 23 de abril de 2011, en la etapa nocturna de la prueba NMX-ES-004.	82
A.14. Velocidad del viento en los días 24, 25, y 26 de abril de 2011, en la etapa nocturna de la prueba NMX-ES-004.	82
A.15. Velocidad del viento en los días 20, 21, 22 y 27 de enero, 16 y 17 de febrero de 2011, en la etapa nocturna de la prueba NMX-ES-004.	83
A.16. Irradiancia global de los días 08, 09, 23 y 24 de febrero de 2011. Prueba de exposición de 2 días.	83
A.17. Temperatura ambiente de los días 08, 09, 23 y 24 de febrero de 2011.	84
A.18. Velocidad del viento en los días 08, 09, 23 y 24 de febrero de 2011	84
B.1. Mapa de Insolación promedio mensual en la República Mexi- cana para el mes de Diciembre.	86
B.2. Mapa de Insolación promedio mensual en la República Mexi- cana para el mes de Abril.	87
C.1. Esquema de los ángulos de incidencia sobre superficies incli- nadas y horizontales.	90

C.2. Ángulo de incidencia para una superficie horizontal y para una con pendiente igual a 27°	91
---	----

Índice de tablas

1.	Propiedades de las sustancias utilizadas	xv
2.1.	Ventas Internas de gas LP por sector en México, 2001-2011 (miles de barriles diarios).	11
2.2.	Oferta de gas LP en México, 2001-2011 (miles de barriles diarios).	13
3.1.	Composición química (base seca) de las partes anatómicas del maíz (Ramos Carrillo, 2007).	16
3.2.	Producción de nixtamal en México.	24
3.3.	Consumo energético en la nixtamalización para algunas ciudades de México.	32
3.4.	Consumo de gas LP, emisiones de CO_2 y costos de la nixtamalización.	33
3.5.	Consumo de gas LP, emisiones de CO_2 y costos anuales de la nixtamalización en las regiones urbanas.	34
4.1.	Valores de la prueba diurna conforme a la NMX-ES-004.	48
4.2.	Valores de la prueba, etapa nocturna, conforme a la NMX-ES-004.	50
4.3.	Valores de la prueba de exposición de 2 días, etapa diurna.	52
5.1.	Consumo de gas L.P., emisiones de CO_2 y costos asociados a la nixtamalización con empleo de calentador solar de agua.	58

5.2.	Consumo de gas L.P., emisiones de CO_2 y costos evitados mediante el empleo del calentador solar de agua.	58
5.3.	Ahorros anuales posibles en la nixtamalización a nivel nacional.	59
5.4.	Temperatura dentro del tanque después de llenarlo con 65 (l) de agua a 92 ($^{\circ}C$) y 100 (l) a temperatura ambiente.	61
5.5.	Temperatura máxima alcanzable con la insolación disponible en la República Mexicana para las ciudades analizadas.	62
5.6.	Consumo de gas L.P., emisiones de CO_2 y costos asociados a la nixtamalización con empleo de calentador solar de agua, tomando en cuenta los valores de insolación disponible para la República Mexicana.	62
5.7.	Consumo de gas l.p., emisiones de CO_2 y costos evitados mediante el empleo del calentador solar de agua, tomando en cuenta los niveles de insolación disponible en la República Mexicana.	63
5.8.	Ahorros anuales posibles en la nixtamalización a nivel nacional, tomando en cuenta los niveles existentes de insolación en la República Mexicana.	63
5.9.	Esquema de utilización de calentadores solares en la nixtamalización diaria de 100 (kg) de maíz.	64
5.10.	Tiempo de recuperación de la inversión.	64
6.1.	Consumo de gas L.P., emisiones de CO_2 y costos asociados a la nixtamalización con empleo de calentador solar de agua, tomando en cuenta los valores de insolación disponible para la República Mexicana.	69
6.2.	Esquema de utilización de calentadores solares en la nixtamalización diaria de 100 (kg) de maíz.	69
C.1.	Estimaciones de insolación global sobre el colector inclinado a $\beta = 27^{\circ}$ en Temixco, Morelos de acuerdo al modelo de Liu y Jordan	94
C.2.	Estimaciones de insolación global sobre el colector inclinado a $\beta = 27^{\circ}$ para Cuernavaca, Mor., Oaxaca, Oax., Morelia, Mich. y Tijuana, B.C.	95

Tabla de propiedades utilizadas.

Propiedad	Valor	Unidades
C_{agua}	0($^{\circ}C$) @4.217 *	(kJ/kgK)
	7($^{\circ}C$) @4.198 *	(kJ/kgK)
	17($^{\circ}C$)@4.186 *	(kJ/kgK)
	27($^{\circ}C$)@4.179 *	(kJ/kgK)
	47($^{\circ}C$)@4.180 *	(kJ/kgK)
	67($^{\circ}C$)@4.188 *	(kJ/kgK)
	87($^{\circ}C$)@4.203 *	(kJ/kgK)
	100($^{\circ}C$)@4.218 *	(kJ/kgK)
$C_{Ca(OH)_2}^*$	1.186 *	(kJ/kgK)
C_{maiz}^*	1.5 +	(kJ/kgK)
g^*	9.8	(m/s ²)
$p_{1atm_0(m)}$	101.325	(kPa)
$h_{fg_{agua_{1atm}}}$	2246.6 *	(kJ/kgK)
R_{agua}	0.465 *	(kJ/kgK)
R_{aire}	0.28697 *	(kJ/kgK)
$PC_{g.l.p}$	50415.7 $^{\alpha}$	(kJ/kg)
$Precio_{g.l.p}$	11.13 $^{\alpha}$	(\$/kg)
$\rho_{g.l.p.}$	0.514 $^{\alpha}$	(kg/l)
$\rho_{g.l.p.}$	81.7194 $^{\alpha}$	(kg/barril)
Factor Emisión $_{g.l.p}$	0.0656 $^{\circ\circ}$	(kgCO ₂ /MJ)
Factor de conversión $^{\alpha}$	1(barril)	158.9873 (l)

Tabla 1: Propiedades de las sustancias utilizadas

* Fuente:(Wark Jr. and Richards, 2001).

* Considerados como constantes en todo el análisis.

+ Valor reportado por Jaramillo et. al. (Jaramillo Bastidas and Posada Flores, 1989).

$^{\alpha}$ Fuente: (Secretaría de Energía (SENER), 2010).

$^{\circ\circ}$ Fuente: (IPCC, 2006)

Capítulo 1

Introducción

El calentamiento del sistema climático del planeta es inequívoco. El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático de la ONU, (IPCC) por sus siglas en inglés, reporta en el Cuarto Informe de Evaluación un aumento anual en la temperatura del aire y del océano así como el consecuente aumento en su nivel. La tendencia lineal a 100 años es de 0.74 ($^{\circ}\text{C}$) [entre 0.56 ($^{\circ}\text{C}$) y 0.92 ($^{\circ}\text{C}$)] en la temperatura del aire y de 1.8 ($\frac{\text{mm}}{\text{año}}$) [entre 1.3 ($\frac{\text{mm}}{\text{año}}$) y 2.3 ($\frac{\text{mm}}{\text{año}}$)] en el nivel de los océanos. De igual manera la extensión de los hielos marinos árticos ha disminuido en un 2.7% [entre 2.1% y 3.3%] por decenio. Otros fenómenos se han presentado: un aumento en la precipitación en las partes orientales del norte de Norteamérica y Sudamérica, Europa septentrional, y Asia septentrional y central. Por otro lado, en todo el mundo, la superficie afectada por las sequías ha aumentado y las temperaturas del hemisferio norte durante la segunda mitad del siglo XX fueron *muy probablemente* superiores a las de cualquier otro período de 50 años de los últimos 500 años, y *probablemente* las más altas a lo largo de los últimos 1300 años. (Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático, 2007)

Las variaciones en las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI), entre otros factores, alteran el equilibrio energético del sistema climático terrestre. En el mismo documento, el IPCC reporta que las emisiones mundiales de GEI por efecto de actividades humanas han aumentado, desde la era preindustrial, en un 70% entre 1970 y 2004. Las concentraciones atmosféricas mundiales de CO_2 , metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) han aumentado notablemente por efecto de las actividades humanas desde 1750, y son actualmente muy superiores a los valores preindustriales, determinados a partir de núcleos de hielo. Las concentraciones atmosféricas de CO_2 (379 ppm) y CH_4 (1774 ppmm) en 2005 exceden con mucho el intervalo natural

de valores de los últimos 650,000 años. Los aumentos de la concentración mundial de CO_2 se deben principalmente a la utilización de combustibles de origen fósil y, en una parte apreciable pero menor, a los cambios de uso de la tierra. Con un grado de confianza muy alto, el efecto neto de las actividades humanas desde 1750 ha sido un aumento de la temperatura mundial.

El IPCC menciona también que existe abundante evidencia respecto a que con las políticas actuales de mitigación de los efectos del cambio climático y aún con las prácticas de desarrollo sostenible que aquellas conllevan, las emisiones mundiales de GEI seguirán aumentando en los próximos decenios.

El Informe Especial del IPCC sobre escenarios de emisiones (IEEE, 2000) proyecta un aumento de las emisiones mundiales de GEI de entre 25 % y 90 % (CO_2 eq) entre 2000 y 2030, suponiendo que los combustibles de origen fósil mantengan su posición dominante en el conjunto mundial de fuentes de energía hasta 2030 como mínimo. Lo anterior representa un aumento constante de aproximadamente 0.2 (°C) por decenio para cada uno de los escenarios de emisiones estimados, lo que significa que para finales del presente siglo se puede esperar un cambio de temperatura de entre 1.1 (°C) a 6.4 (°C) con respecto a los valores de 1980-1999.

Por lo anterior en 1992 se aprobó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (la Convención), con la adhesión de 194 países incluido México, con el objetivo de lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático (Organización de las Naciones Unidas, 1992). En 1997 se adoptó el protocolo de Kioto con un carácter vinculante sobre los países firmantes (partes), de tal manera que los objetivos de la Convención puedan alcanzarse (Organización de las Naciones Unidas, 1998).

El protocolo de Kioto obliga a los países incluidos en el anexo I del mismo (países en su mayoría desarrollados) entre otras cosas a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero a un nivel inferior en no menos de 5 % con respecto a los niveles de 1990 en el período comprendido entre el año 2008 y 2012.

México junto con los demás países incluidos en el anexo II del protocolo de Kioto, tiene el compromiso de formular programas para mejorar la calidad de los factores de emisión, así como a realizar y actualizar periódicamente los inventarios nacionales de las emisiones antropógenas de todos los gases de efecto invernadero.

También está comprometido a formular y aplicar programas nacionales y regionales que contengan medidas para mitigar el cambio climático, los cuales deben tener relación, entre otros, con los sectores del transporte, agricultura, silvicultura, gestión de desechos, la industria y energía. Promover modalidades eficaces para el desarrollo, la aplicación y difusión de tecnologías, conocimientos especializados, prácticas y procesos ecológicamente racionales en lo relativo al cambio climático y cooperar en investigaciones científicas y técnicas.

Por otro lado, el precio a nivel mundial de los combustibles fósiles ha mantenido una fuerte tendencia al alza durante la última década, tendencia que difícilmente cambiará, pues en la medida en que el agotamiento de los yacimientos de hidrocarburos ocurra, la oferta disminuirá provocando el aumento cada vez mayor en sus precios.

El gas LP no es la excepción; a nivel nacional el panorama de reservas de hidrocarburos se muestra por lo menos preocupante en el mediano plazo de acuerdo con las cifras oficiales y el precio del kilogramos de gas LP ha mantenido un incremento sistemático mes a mes con valores del orden de 6 % anual en los últimos 5 años.

1.1. Justificación.

Atender los requerimientos energéticos del proceso de cocción del maíz resulta relevante, pues la nixtamalización en las zonas urbanas del país se lleva a cabo mediante el empleo de grandes cantidades de gas LP como única fuente de energía. Por otro lado, el consumo de maíz para tortillas en México es considerable; de acuerdo con el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) el promedio de consumo anual de maíz para tortillas es superior a los 10 millones de toneladas, divididas prácticamente en tercios entre las zonas rurales, en donde la cocción se realiza mediante el empleo de biomasa (leña) como combustible, las grandes industrializadoras de maíz como MASECA o GRUMA y las zonas urbanas, donde la cocción se realiza mediante la quema de gas LP (Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación - SIAP, 2011).

Es pues que en la lógica de contribuir con la reducción de los factores de emisión, los niveles de consumo de gas LP y los costos en la cadena de producción de las tortillerías, se inserta la propuesta de incluir calentadores

solares de agua en el proceso de nixtamalización del maíz destinado a la elaboración de tortillas, alimento esencial en la dieta mexicana.

Por otro lado, la Secretaría de Economía mantiene un programa denominado “Mi tortilla” encaminado a realizar mejoras en los diversos procesos realizados en las tortillerías del país (Secretaría de Economía, 2012). En este programa se establece entre otros objetivos el de: “Aumentar la rentabilidad de los molinos de nixtamal y tortillerías, reduciendo sus costos de producción, mediante la adopción de nuevas tecnologías”, de modo que dentro del programa se tienen planteados esquemas de financiamiento para la sustitución de equipos viejos o la adquisición de tecnologías que permitan reducir los consumos energéticos.

Sin embargo, a pesar de que se incluyen dentro del catálogo de las nuevas tecnologías a los calentadores solares de agua y a pesar de que se encuentran registrados algunos proveedores dentro de la lista de oferentes, el programa carece de lineamientos, reglas o metodologías para la mejor selección de los equipos que pudieran incorporarse a los procesos de nixtamalización.

De manera que el desarrollo de esta investigación puede brindar los elementos que le hacen falta al programa “Mi tortilla” de la Secretaría de Economía, que le permitan establecer los criterios adecuados para la incorporación de proveedores y la selección de los equipos solares de calentamiento de agua, que tendrían los mejores resultados en los procesos de nixtamalización, así como de los esquemas de financiamiento y amortización de la inversión adecuados para los productores de tortillas.

1.2. Objetivos.

Por tanto, el propósito de esta investigación es el de evaluar la factibilidad de la introducción de equipos solares de calentamiento de agua capaces de producir temperaturas cercanas a la temperatura de ebullición del agua, en el proceso de nixtamalización de maíz.

De manera particular se pretende:

- 1.- Dimensionar los requerimientos energéticos del proceso de nixtamalización.
- 2.- Determinar los costos económicos que representa con los procesos actuales.

3.- Evaluar las emisiones de dióxido de carbono que significa la nixtamalización a nivel nacional.

4.- Determinar el potencial de ahorros en la nixtamalización de las zonas urbanas del país, tomando en cuenta las condiciones climáticas de algunas localidades representativas de la República Mexicana y evaluar la conveniencia energética y económica de la utilización de estos equipos.

Capítulo 2

Panorama del gas licuado de petróleo.

Se presenta el panorama del gas LP a nivel mundial y nacional de acuerdo con la información proporcionada por la Secretaría de Energía (SENER) y Petróleos Mexicanos (PEMEX) a través de sus correspondientes páginas electrónicas y la “Prospectiva del mercado de gas LP 2010-2025” (Secretaría de Energía (SENER), 2010). La sección 2.1 contiene una discusión sobre la producción de gas LP en términos de su origen así como de los principales productores, la demanda mundial y el destino final del mismo. También se presenta la evolución de los precios internacionales y la influencia que ha tenido la recesión económica de 2008 en los precios y en el consumo.

La sección 2.2 contiene el comportamiento del consumo y oferta de gas LP en México de 2001 a 2011. Se presentan los valores de la producción de los organismos subsidiarios de PEMEX, PEMEX Gas y Petroquímica Básica (PGPB), PEMEX Refinación (PR) y PÉMEX Exploración y Producción (PEP) así como el volumen de las importaciones en el mismo intervalo. Se presenta también el destino del gas LP en el país así como la evolución de los precios en el mercado interno.

2.1. Situación internacional del gas L.P.

El gas LP está compuesto por hidrocarburos ligeros llamados gases líquidos. En términos de su origen, se considera como un subproducto del procesamiento del gas natural y de la refinación del crudo. El gas LP es gaseoso

a presión atmosférica; sin embargo, a temperatura ambiente puede ser licuado a presiones relativamente bajas (un litro de líquido se transforma en 272 litros de gas para el propano y 237 litros de gas para el butano).

La demanda mundial total de gas LP en 2009 se situó en 7.6 millones de barriles diarios (mmbd), cifra 0.7 % superior respecto a 2008. La producción de gas LP sigue creciendo en la mayor parte de las regiones del mundo, con excepción de Estados Unidos de Norte América.

Las regiones más importantes de consumo siguen siendo Asia, Norteamérica y Europa con dos terceras partes del volumen mundial (28 %, 25 % y 17 % cada una respectivamente). El mercado latinoamericano, que incluye México, Centroamérica, Sudamérica y el Caribe, es el cuarto consumidor más grande del mundo de gas LP. Dentro de la región, el 75 % del gas LP se utiliza en el sector residencial/comercial.

A nivel mundial el sector residencial y comercial también es el principal destino final de la demanda de gas LP (50.6 %). En 2009, su consumo global fue de cerca de 3.82 mmbd. Le siguen en importancia: la industria petroquímica con 1.83 mmbd; el sector industrial 0.71 mmbd y el autotransporte con 0.67 mmbd; la refinación de crudo con 0.43 mmbd; así como otros usos con 0.08 mmbd.

Hasta el año pasado México encabezaba el primer lugar de consumo per cápita de gas LP a nivel mundial, al representar aproximadamente 68 (kg) por habitante, nivel de consumo que ahora mantiene Ecuador, mientras que ahora en la República Mexicana el consumo per cápita es del orden de 65 (kg) por habitante. Japón representa el tercer lugar en consumo per cápita con aproximadamente 60 (kg) por habitante.

Debido a que el gas LP se obtiene como subproducto de otros procesos, principalmente del procesamiento de gas natural asociado y no asociado y de la refinación del crudo, su producción dependió tanto de los proyectos para aumentar la capacidad de refinación de crudo y del procesamiento de gas natural. Este último proceso continúa siendo la principal fuente de producción de gas LP a nivel mundial. En los últimos 10 años esta fuente ha representando en promedio aproximadamente 60 % del total de la producción. Por su parte, las refinerías han contabilizado casi el resto de la producción de gas LP.

Asimismo, en términos de la producción de gas LP, se espera que el mayor crecimiento provenga de gas natural no asociado, que representará la

mitad del incremento en la oferta de gas LP debido a un aumento acelerado en la producción mundial de gas natural licuado (GNL). Por otro lado, la contribución a la producción debida al procesamiento del gas asociado, incrementará en la medida en que crezca la disponibilidad de crudo.

A pesar del crecimiento en la producción de gas LP en el Medio Oriente, Norteamérica continúa siendo el productor más grande de gas LP. Su producción alcanzó un nivel máximo en el año 2000 con aproximadamente 1.9 mmbd. Para 2005 se ubicó en 1.5 mmbd. Entre 2007 y 2008 se ha mantenido en niveles de 1.6 mmbd, y se espera que se mantenga en el futuro. El procesamiento de gas natural provee más del 60 % de la producción de gas LP en la región.

En Asia se estima que la producción alcance 1.7 mmbd y para los próximos años se espera una mayor producción de gas LP a partir de los proyectos de incremento en la capacidad de refinación y nuevas refinerías, principalmente de China. La realización de dichos proyectos supone que China pueda absorber su creciente demanda de combustibles en el sector transporte por medio de producción de destilados ligeros como la gasolina y la turbosina.

La producción de gas LP para la región de América Latina y el Caribe fue de aproximadamente 0.8 mmbd en 2009. Los principales productores son México, Brasil, Venezuela, Argentina, los países de la zona del Caribe y Perú. El procesamiento de gas natural aporta más del 60 % de la producción de gas LP en la región, proporción que se espera aumente en el futuro. Se estima que el mayor crecimiento en la producción de gas LP provenga de la región que conforman los países de Venezuela, Brasil, Perú y Bolivia.

El comercio mundial de gas LP se encuentra determinado por la capacidad de oferta del productor. Estados Unidos continúa siendo el principal centro de oferta y destino de gas LP del mercado mundial. Se caracteriza por una gran capacidad para almacenar el gas LP durante tiempos de exceso de oferta global, y también puede ofrecer por el contrario gas LP almacenado a otras regiones cuando las condiciones de mercado así lo requieren. Además, la industria petroquímica de Estados Unidos puede consumir grandes cantidades de gas LP cuando los precios son atractivos con respecto a otras alternativas.

El precio de los componentes de gas LP se encuentra estrechamente vinculado al movimiento del precio internacional de petróleo, principalmente en el mercado Norteamericano, donde se usa como materia prima para la industria petroquímica.

Desde 2007 y hasta mediados de 2008, los mercados tuvieron un periodo

con altos incrementos en sus precios. Hacia mediados de 2008, el precio del crudo llegó a niveles máximos históricos, en términos nominales, ubicándose en 150 dólares por barril. Los precios de los productos derivados del crudo, así como otros energéticos, siguieron el mismo patrón ascendente de precio.

Sin embargo, a medida que la recesión económica avanzaba en las economías más industrializadas y en las emergentes de mayor crecimiento (China e India principalmente), la demanda de hidrocarburos comenzó a disminuir, por lo que los precios empezaron a caer a partir de la segunda mitad de 2008 e, incluso, se encuentran por debajo de los niveles de 2006 y 2007 (ver figura 2.1).

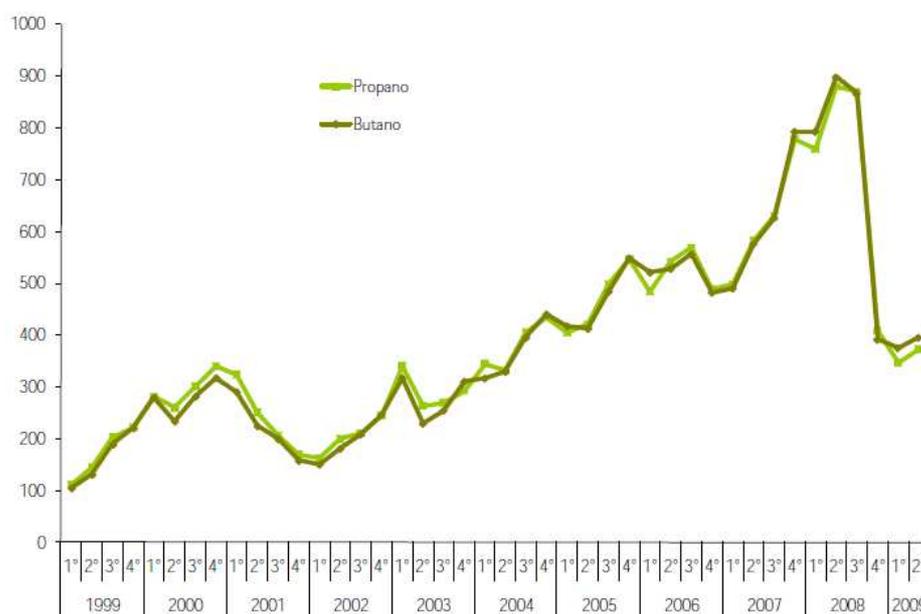


Figura 2.1: Precios internacionales de propano y butano, 1999-2009 (dólares por tonelada) Fuente: SENER-Prospectiva del gas LP 2010-2025.

La crisis económica que ha golpeado recientemente a varias naciones europeas ha tenido gran relevancia en la fuerte disminución en los precios del gas LP, de manera que los pronósticos en el corto plazo prevén que las cotizaciones de este insumo se mantengan estables, fluctuando alrededor de los precios actuales.

Debido a que las condiciones de la actividad económica y de crecimiento se han mantenido débiles a nivel global desde 2008, los precios de los energéticos permanecen bajos. Sin embargo, esta condición es inestable pues debido a al

depreciación del dólar éstas materias primas se han utilizado nuevamente como instrumentos de respaldo e inversión; de manera que en la medida en que la actividad económica se recupere, la demanda por energéticos y los precios de los mismos, tenderán a crecer. Si los precios del crudo se incrementan se esperaría que los precios de gas LP también aumenten.

2.2. Mercado Nacional de gas L.P.

El gas LP es utilizado en más del 70% de los hogares en México, que ocupa el segundo lugar en consumo per cápita de gas LP a nivel mundial, con un consumo de 65 kg por habitante. El uso del gas LP se encuentra destinado principalmente para el sector doméstico, compuesto por el sector residencial y servicios.

El consumo de gas LP en México en 2011 tuvo una disminución 1.0% con relación a 2010, ubicándose en 285.137 miles de barriles diarios (mbd) después un ligero aumento que, sin embargo, continua mantenido una tendencia decreciente des 2003 de aproximadamente -1.3%. El destino principal de la demanda se concentra en el sector residencial con el 66% del total nacional.

La dinámica del mercado de gas LP en el periodo 2001-2011 fue muy variable en su integración. La principal demanda la constituye el sector residencial que en 2011 representó el 68% de las ventas totales. Las ventas internas pasaron de 288.2 mbd a 285.4 mbd con un decrecimiento de 0.7%. Por su parte, el consumo en el sector autotransporte mostró un repunte en el último año al igual que el sector agropecuario, véase tabla 2.1.

Sector	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	tmca 2001- 2010	Var% 2010- 2011
Total	325.3	332.6	327.5	328.2	314.1	306.0	301.3	292.1	281.3	288.2	285.4	-1.2	-1.0
Residencial	209.3	209.2	208.2	210.1	200.1	198.1	196.0	193.7	184.1	194.4	194.8	-0.67	0.2
Servicios	45.7	48.2	45.8	44.4	44.1	45.8	42.5	40.4	40.4	37.7	35.6	-2.37	-5.5
Industrial	28.8	29.5	27.5	28.3	28.3	29.8	29.1	28.2	27.6	26.5	24.7	-1.44	-6.7
Autotransporte	35.4	39.4	40.2	39.8	35.4	28.1	30.5	26.2	25.9	26.2	26.6	-2.33	1.52
Agropecuario	6.1	6.3	5.7	5.5	6.2	4.2	3.3	3.5	3.6	3.42	3.87	-3.36	13.1

Incluye ventas de butano, isobutano y propano como materia prima en la región Centro.

Fuente: SIE-SENER e IMP, con base en Pemex y Sener.

Tabla 2.1: Ventas Internas de gas LP por sector en México, 2001-2011 (miles de barriles diarios).

A lo largo de esta última década, la demanda en el sector residencial de gas LP disminuyó 7%. Algunas de las razones que explican la disminución de

la demanda de gas LP en este sector incluyen: la expansión en infraestructura de gas natural en zonas urbanas y habitacionales, el ahorro de combustible derivado de los equipos de calefacción fabricados bajo la nueva norma de eficiencia térmica, el uso de hornos de microondas, el incremento de los precios al público del gas LP en los últimos años y el aprovechamiento de la leña y otras fuentes energéticas no comerciales en las áreas rurales. Al 2008, en este sentido, se ahorraron 10.6 mbd (ver figura 2.2).

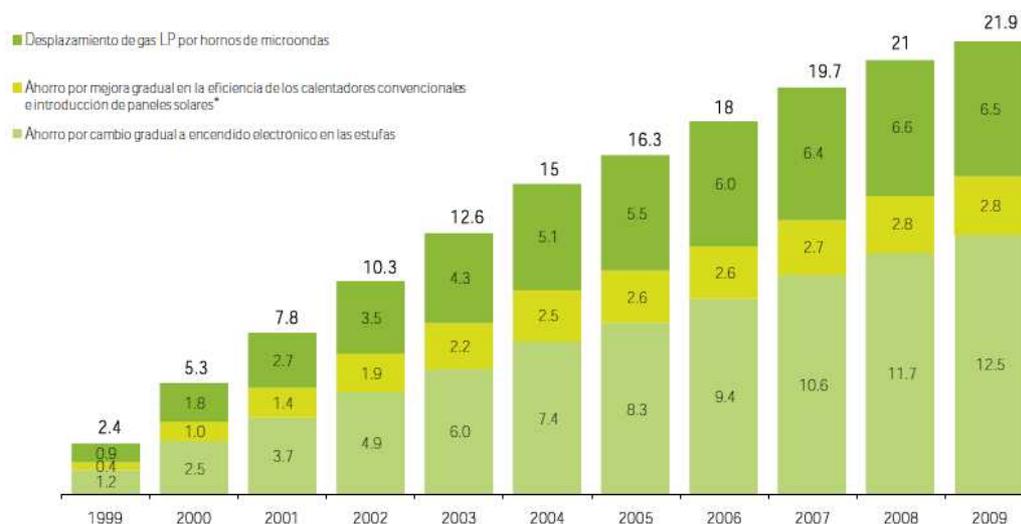


Figura 2.2: Ahorro de gas LP en el consumo residencial por mejoras técnicas y cambio en los patrones de consumo (miles de barriles diarios). Fuente: SNER-Prospectiva del gas LP 2010-225.

2.2.1. Oferta de gas L.P. 2001-2011

El gas LP distribuido en México generalmente está compuesto por una mezcla aproximada de 60 % propano y 40 % butano.

En 2011, la oferta de gas LP en México se situó en 291.6 mbd, 0.44 % mayor que en 2010. Para el periodo 2001-2011 la oferta presentó una tasa negativa de 1.3 % del volumen disponible, producto de una disminución de la producción por parte de PEMEX Gas y Petroquímica Básica (PGPB) y PEMEX Refinación (PR). De 2005 a 2008 la importaciones mostraron una tendencia creciente, llegando en 2008 a 88.7 mbd, a partir de esa fecha y a consecuencia del periodo de crisis a nivel mundial, las importaciones

comenzaron a disminuir para situarse en 2010 en los 78.7 mbd, sin embargo, en 2011 registraron un aumento de 4.7% para colocarse en los 82.4 mbd. En 2010 PGPB y PEP tuvieron un aumento en su producción con respecto a 2009 (1.9% y 63.6% respectivamente), proporción que se redujo en 2011 a 0.5% y 33%. Mientras que Pemex Refinación tuvo una disminución de 5.5% para 2010 y de 16% para 2011, véase la tabla 2.2.

Origen	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	tmca % 2001- 2011
Total	334.4	337.5	332.6	339.6	320.7	317.4	308.9	298.0	288.7	290.3	291.6	-1.3
Producción	234.6	235.9	247.2	255.0	247.8	241.8	226.0	209.3	208.6	211.6	209.2	-1.06
PGPB	195.9	204.5	212.1	224.9	215.4	215.3	198.9	182.4	180.5	184.1	185.4	-0.43
PR	29.0	31.2	34.7	28.9	31.4	26.1	26.8	26.4	27.0	25.51	21.4	-2.43
PEP	-	-	0.5	1.2	1.0	0.3	0.2	0.6	1.1	1.8	2.4	n.a.
Importación	99.8	101.6	85.3	84.6	72.9	75.6	82.9	88.7	80.1	78.7	82.4	-1.5

n.a.:no aplica

Fuente: IMP, con base en Pemex y SIE-SENER.

Tabla 2.2: Oferta de gas LP en México, 2001-2011 (miles de barriles diarios).

En términos de la composición del suministro de gas LP, la participación de la producción nacional fue de 72.9% y la de importaciones en 27.1% para 2010 y de 71.8% de participación nacional contra 28.12% de importaciones en 2011.

De acuerdo con la Prospectiva del mercado de Gas LP 2010-2025, la demanda interna de gas LP para el periodo 2010-2025 se concentrará en el sector residencial y servicios, consumiendo el 60% de la demanda sectorial. La región principal de consumo será la Centro con 40%, seguida de la Noreste y Centro-Occidente con 22.5% y 22.3% respectivamente. Las regiones del Sur sureste y Noreste del país representarán de forma conjunta poco más de una séptima parte de la demanda (15%).

Por otro lado, la oferta nacional de gas LP al 2025 se estima que alcance 282.8 mbd, representando un crecimiento anual de 1.9%. Se espera un mayor crecimiento medio anual por parte de PR (5.4%), y una producción de 220.8 mbd por parte de PGPB al final del periodo. La composición de la oferta nacional se seguirá concentrando mayoritariamente por aportaciones de PGPB, a pesar de la dicha tendencia a la baja. Al 2024, PGPB aportará 78.4%, cifra menor en 8.8% con respecto a 2008. Por su parte se espera que PR llegue a 21.6% en 2024 contra 12.6% en 2008.

La evolución de los precios del gas LP en el país ha seguido una tendencia distinta a la situación internacional; en el país la política de precios está determinada directamente por el ejecutivo nacional y de 2010 a la fecha se ha

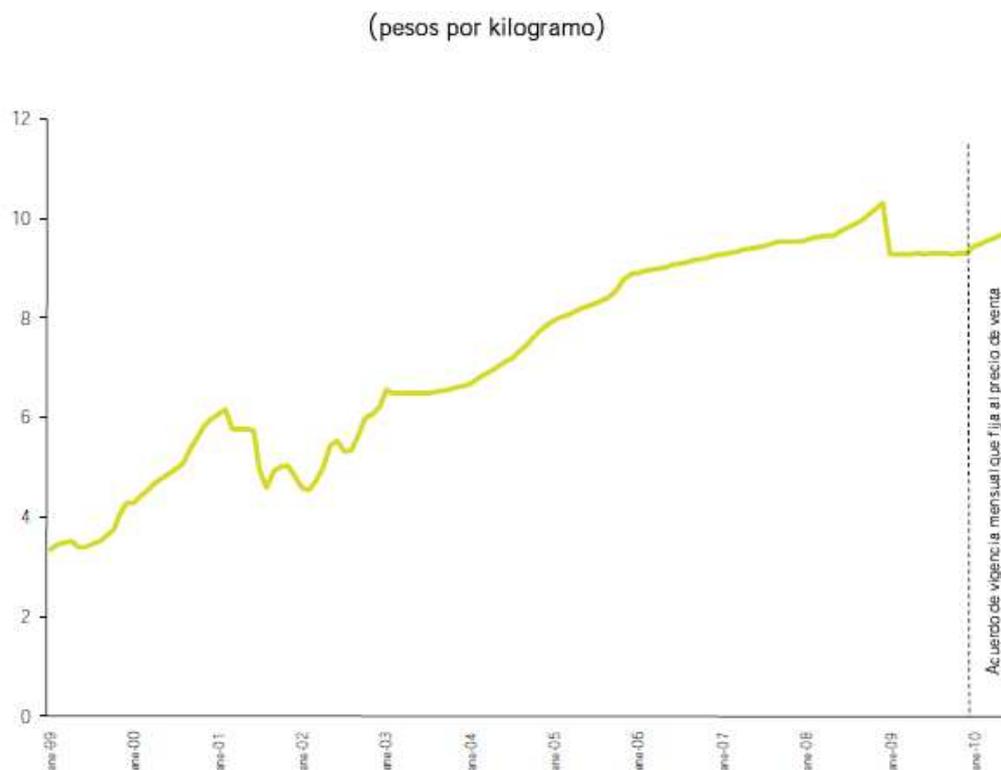


Figura 2.3: Evolución de los precios nacionales del gas LP Fuente: SENER-Prospectiva del gas LP 2010-225

establecido un acuerdo en el que el precio promedio ponderado nacional al público aumenta mensualmente 0.05 pesos por kilogramo antes del IVA, contemplado como una de las fuentes de ingresos del gobierno federal; de modo que el precio en el mes de febrero de 2012 se situó en 11 pesos con 13 centavos por kilogramo de gas l.p., situación que no ha correspondido con la disminución de precios a nivel internacional. La figura 2.3 muestra la evolución de los precios hasta el año 2010.

Capítulo 3

El proceso de Nixtamalización.

El presente capítulo contiene la descripción del proceso de nixtamalización, necesaria para el entendimiento de los requerimientos energéticos de dicho proceso. En la sección 3.1 se presenta a detalle la anatomía de los granos de maíz y se describen los cambios que le suceden a éstos durante la nixtamalización, que puede dividirse en dos etapas: la etapa de cocción y reposo. En la sección 3.2 se presenta el detalle del proceso de nixtamalización, esto es, la formulación idónea, los tiempos de cocción necesarios, así como los tiempos de reposo que producen las mejores características de los productos a obtener. Finalmente en la sección 3.3 se presentan los cálculos de los valores de gas L.P., emisiones de CO_2 y el costo que significa la nixtamalización a nivel nacional.

3.1. Generalidades de la nixtamalización.

3.1.1. Tipos de maíces y su composición

En México se producen diversas variedades de maíz entre las que destacan las de granos de color blanco, amarillo, azul y rojo, de las cuales las dos primeras son los de mayor producción. El maíz blanco generalmente es utilizado para la elaboración de tortillas y otros productos típicos como los tamales. El maíz amarillo tiene una mayor utilización en la industria, sobre todo para la elaboración de botanas y cereales.

Partes del grano	Peso %	Almidón %	Proteína %	Grasa %	Azúcares %	Ceniza %	*FCH %
Grano entero	100	70	10	5	2	1.7	9
Endospermo	83	87	9	1	0.5	0.2	2
Germen	12	8	20	34	12	10	14
Pericarpio	5	7	4	1	0.5	0.3	84

* FCH= Fibra cruda mas hemicelulosa.

Tabla 3.1: Composición química (base seca) de las partes anatómicas del maíz (Ramos Carrillo, 2007).

El grano de maíz está compuesto de tres estructuras completamente diferenciadas: el endospermo, germen y pericarpio (figura 3.1). En la tabla 3.1 se muestra la composición promedio de estas estructuras en el grano de maíz.

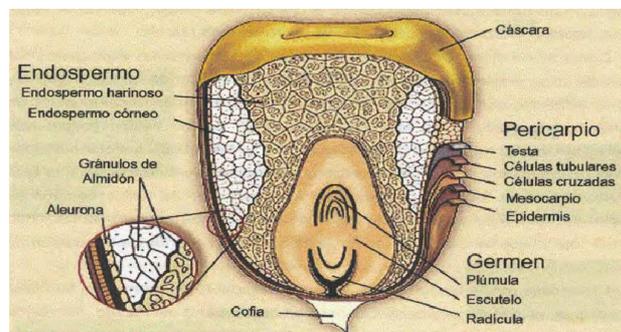


Figura 3.1: Anatomía del grano de maíz (Ramos Carrillo, 2007).

El germen comprende 12 % del total del grano y está compuesto principalmente de dos elementos, el eje embrionario (planta nueva) y el escutelo que constituye una gran reserva de alimento para la misma. Esta estructura está constituida por grasas (34 %), proteínas (20 %), azúcares (12 %), almidones (8 %), elementos minerales (10 %), fibra cruda y hemicelulosa (14 %), trazas de almidón y otros compuestos (2 %). La segunda estructura es el endospermo, que representa del 80 % al 83 % del total del grano y es la reserva energética del grano; está constituido principalmente con 87 % de almidón y 9 % proteínas, 1 % de grasa, 0.5 % de azúcares, 0.3 % de trazas de minerales y 2 % de fibra cruda, y otros componentes secundarios. El pericarpio es la capa protectora dura y fibrosa del grano y cubre por completo al endospermo y al germen, representa cerca del 5 % del peso del maíz y está compuesto mayoritariamente por fibras celulósicas naturales (Ramos Carrillo, 2007), (Reséndiz Mendoza, 2008).

3.1.2. El proceso de nixtamalización.

La nixtamalización es un proceso de cocción de maíz propio de las culturas mesoamericanas, practicado en México desde la época prehispánica, el cual todavía se utiliza para producir tortillas de buena calidad y otros productos alimenticios. Consiste en la cocción de los granos de maíz en una solución de hidróxido de calcio, seguido de un reposo en el licor de cocción conocido como nejayote. Posterior a esto, el maíz se lava para eliminar el exceso de cal y se muele en molinos de piedra para obtener una pasta conocida como masa (Reséndiz Mendoza, 2008), (Bello Pérez et al., 2002), (Pflugfelder et al., 1988), (Khan et al., 1982).

Este tratamiento tiene varios propósitos, tales como permitir el ablandamiento del pericarpio y su posterior remoción mediante un lavado, la gelatinización del almidón responsable de la textura de la masa, saponificación de lípidos, la solubilización de algunas proteínas que rodean los gránulos de almidón permitiendo de este modo su biodisponibilidad e incorporar calcio al grano de maíz para elevar los niveles nutricionales (Ramos Benítez, 2008), (Ramos Carrillo, 2007).

Durante la nixtamalización ocurren diversos procesos en cada una de las partes que componen al grano de maíz, a su vez estos cambios dependen de las características de la nixtamalización, como la temperatura y el tiempo de cocción, la concentración de hidróxido de calcio y fundamentalmente el tiempo de reposo en el nejayote (Ramos Carrillo, 2007), (Pflugfelder et al., 1988).

Durante la cocción y el reposo, en el pericarpio hay una absorción de agua, suavizando y ablandando tejidos celulares, provocando hinchamiento y cambio de volumen en el grano. El álcali actúa sobre los componentes de la pared celular degradándola y se modifica la permeabilidad del pericarpio facilitando la entrada del agua y de la solución alcalina. Después se presenta la precolación de esta estructura, luego el pericarpio se remueve, presentando primero una dilución de sólidos solubles (pectinas) presentes en el pericarpio y una modificación en la matriz fibrosa, desprendiéndose las fracciones de hemicelulosa y lignina. Por último hay una lixiviación del pericarpio en el nejayote, licor donde se lleva a cabo la cocción, por lo tanto hay una pérdida importante de materia que incluye fracciones de componentes estructurales del maíz, como el pericarpio, germen, endospermo, fibra dietética y calcio. Una alta concentración de calcio forma compuestos amarillentos (Gutierrez Cortéz, 2006), (Ramos Carrillo, 2007).

El almidón es el carbohidrato de reserva de los vegetales en los que se

acumula en forma de gránulos. En el endospermo se localiza la mayor cantidad del almidón y durante la nixtamalización algunos gránulos de almidón, son parcialmente gelatinizados, otros permanecen sin gelatinizar y otros son completamente gelatinizados (Reyes Sánchez, 2008).

El almidón se compone de dos tipos de moléculas de polisacárido, una lineal, amilosa, y otra ramificada, amilopectina. Cuando el almidón se calienta, el ordenamiento cristalino presente en el gránulo se pierde irreversiblemente en un intervalo de temperatura denominado temperatura de gelatinización. El almidón de maíz tiene una temperatura promedio de inicio de la gelatinización de 62-70 (°C) dependiendo de la variedad (Reyes Sánchez, 2008), (Ramos Carrillo, 2007).

Durante la gelatinización los gránulos absorben agua del medio incrementando su volumen hasta varias veces su tamaño inicial mientras que una gran parte de la amilosa y una menor proporción de la amilopectina migran hacia la fase acuosa generando un incremento sustancial en la viscosidad del sistema o la formación de un gel, dependiendo del tipo de almidón y de las condiciones de preparación tales como temperatura y pH. Por lo tanto, la fusión de las zonas cristalinas dentro del gránulo de almidón y la disolución de su organización estructural son las bases de la gelatinización (Reyes Sánchez, 2008).

Mucho almidón gelatinizado (debido a un cocimiento excesivo) produce masa pegajosa y difícil de manejar. Por otro lado poco cocimiento produce una masa sin cohesividad que da origen a tortillas de textura inadecuada y quebradiza (Bello Pérez et al., 2002).

El germen retiene 4 veces más calcio que el endospermo (por gramo de materia), pero dada la proporción del endospermo, ahí es donde se localiza la mayor cantidad de calcio. Finalmente la distribución uniforme de agua en el nixtamal se consigue durante la etapa de reposo.

Durante las etapas críticas de cocción y reposo del proceso de nixtamalización tradicional, los cambios físicos que se provocan al maíz facilitan la molienda, y con eso un menor gasto de energía en los molinos, porque se suaviza en grano por la entrada de agua y la difusión de iones de calcio (Ramos Carrillo, 2007).

La nixtamalización favorece algunos parámetros nutricionales de este cereal y empeora otros, entre los efectos negativos de la nixtamalización se encuentran la pérdida de vitaminas, que van desde un 30 % hasta un 70 %, durante la cocción, reposo y lavado, también se pierde parte de la fibra dietética

localizada en el pericarpio, así como tiamina, riboflamina y carotenoides, algunas proteínas, grasas y minerales (Ramos Carrillo, 2007).

Entre los efectos positivos de la nixtamalización puede citarse, además del mejoramiento de las características reológicas, un aumento en la relación isoleucina-leucina, que son dos aminoácidos indispensables en la alimentación humana. Durante la cocción alcalina se rompe la ligadura de niacina a la estructura del grano y este importante nutriente se hace biodisponible, este hecho se ha empleado para explicar la ausencia de la enfermedad conocida como Pelagra en los países consumidores de tortilla. La nixtamalización es responsable también de la disminución de micotoxinas como fumonisinós (producidas por varias especies de hongos *Fusarium*) y de la reducción significativa de los contenidos de aflatoxinas, (agentes tóxicos y hepatocarcinogénicos, producidos por los hongos *Aspergillus parasiticus* y *A. flavus*) (Ramos Carrillo, 2007).

Existe también un notable incremento de calcio en el maíz nixtamalizado, este macro elemento es indispensable en la nutrición humana, una insuficiente ingestión puede dar lugar a raquitismo, osteomalacia, osteoporosis, cáncer de colon y de la glándula mamaria, así como hipertensión arterial, además de que es un constituyente fundamental de los huesos y dientes. (Ramos Carrillo, 2007)

3.2. Condiciones óptimas del proceso de nixtamalización.

El proceso de nixtamalización, a pesar de estar bastante extendido en toda la República Mexicana y de practicarse desde la época prehispánica, no se encuentra estandarizado y tiene ligeras variaciones de una persona a otra en las regiones rurales y de una tortillería a otra en las zonas urbanas (Bello Pérez et al., 2002), (Rangel Meza et al., 2004).

De igual manera, los estudios realizados por diferentes autores reportan distintas formulaciones y características del proceso de nixtamalización: (Bello Pérez et al., 2002), (Billeb de Sinibaldi and Bressani, 2001), (Khan et al., 1982), (Fernández Muñoz et al., 2002), (Pflugfelder et al., 1988), (D. Shahai and J. P. Mua and I. Surjewan and M. O. Buendía and M. Rowe and D. S. Jackson, 1999), (Ramos Carrillo, 2007), (Reyes Sánchez, 2008), (Ramos Benítez, 2008), por citar algunos.

En el trabajo llevado a cabo por (Khan et al., 1982), que es un análisis sobre tres condiciones distintas de nixtamalización, se determina que las mejores propiedades de las masas producidas, corresponden a aquellas obtenidas mediante una nixtamalización tradicional, en comparación a los métodos utilizados por industrias de producción de harinas de maíz como MASECA y a un método propuesto por ellos que incluye un sistema presurizado de cocción. Se reporta también que existe una mayor cantidad de pérdidas de partes del grano a medida que aumenta el tiempo de cocción. Las pérdidas de materia durante las etapas de cocción, reposo y lavado son económicamente importantes al mismo tiempo que constituyen el mayor problema de contaminación asociado a la nixtamalización.

En (Fernández Muñoz et al., 2002) se estudió el proceso de difusión de los iones de calcio en los granos de maíz como función del tiempo de reposo en el nejayote y de la concentración de hidróxido de calcio. La formulación que utilizaron es de 10 (kg) de maíz en 20 (l) de agua con un 2% del peso del maíz de hidróxido de calcio. La cocción se realizó a 72 (°C) durante 40 (min) y 1 (h) y los tiempos de reposo fueron de 0, 1, 2, 3, 5, 7, 9, 11, 13 y 24 (h). Los resultados mostraron que el contenido de calcio dentro de los granos de maíz nixtamalizado no presenta un comportamiento lineal con respecto al tiempo de reposo, la máxima concentración de calcio se presenta entre las 7 y 9 horas (ver figura 3.2). Es necesario destacar que el contenido de calcio en los granos de maíz después de las 7 horas de reposo, es alrededor de 7 veces mayor que el de los granos que no se han dejado reposar en el nejayote. Así también las características óptimas de viscosidad de las masas producidas después, corresponden a un tiempo de reposo de entre 7 y 9 horas, lo anterior es consecuencia de la pérdida de cristalinidad de algunos gránulos de almidón dentro del endospermo del maíz.

El impacto de variables de la nixtamalización como la temperatura y el tiempo de cocción, la temperatura inicial de la etapa de reposo y la duración del mismo sobre las propiedades de la masa, fue estudiado por (D. Shahai and J. P. Mua and I. Surjewan and M. O. Buendía and M. Rowe and D. S. Jackson, 1999). Las temperaturas de cocción utilizadas fueron de 80 (°C), 89 (°C) y 98 (°C), mientras que los tiempos de cocción fueron de 15 (min), 52.5 (min) y 90 (min), las temperaturas iniciales de reposo fueron de 60 (°C), 79 (°C) y 98 (°C) con tiempos de reposo de 0 (h), 8 (h) y 16 (h). Las pruebas consistieron en la combinación de algunos de estos parámetros en la nixtamalización con el fin de determinar el valor la viscosidad de las masas producidas. Utilizaron 120 (kg) de agua, 200 (g) de Hidróxido de Calcio y 20 (kg) de maíz en cada caso. La preparación del nixtamal comenzó con la disolución del de hidróxido de calcio en agua, solución puesta a calentar

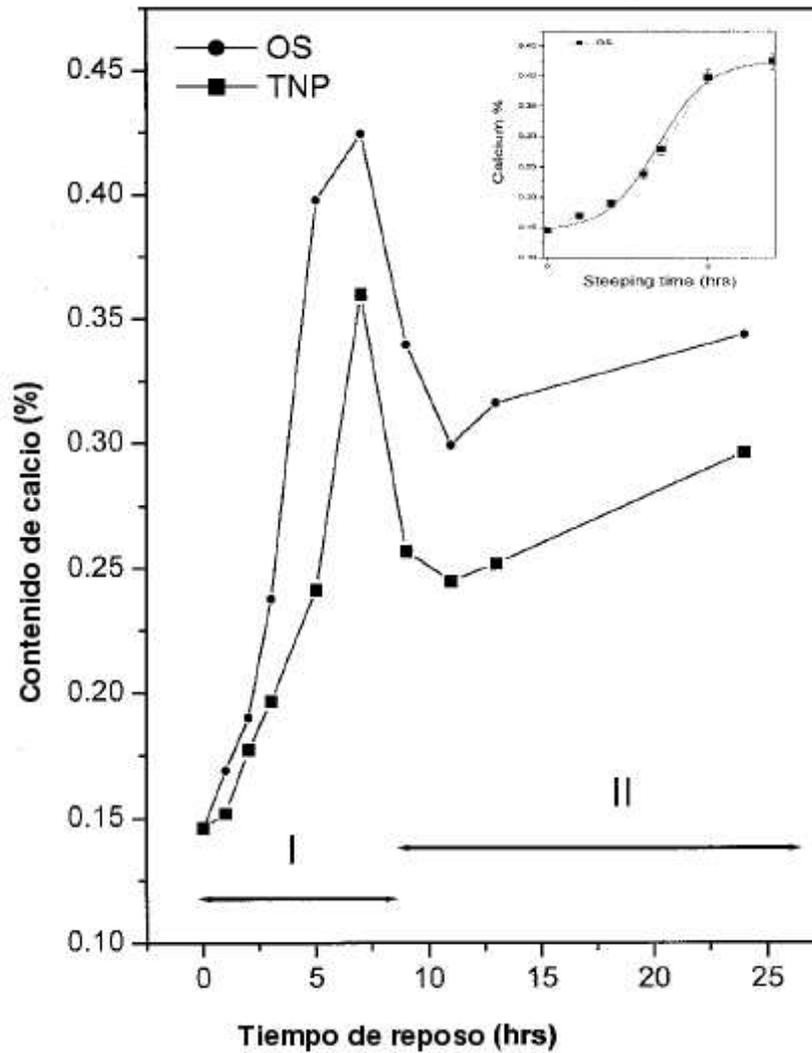


Figura 3.2: Contenido de calcio en función del tiempo de reposo. Curva con cuadros: contenido tradicional 2 % de calcio en la nixtamalización. Curva con círculos: muestra sobresaturada de calcio 3 %. En el recuadro se muestra el ajuste estadístico de los datos (Fernández Muñoz et al., 2002).

hasta la temperatura de operación correspondiente para, una vez conseguida, agregar el maíz y calentar hasta recuperar la temperatura de cocción que fue mantenida durante los tiempos mencionados, finalmente dejaron reposar el nixtamal durante los tiempos correspondientes. De acuerdo con este estudio, las temperaturas de cocción y de reposo elevadas así como los tiempos de cocción prolongados producen una reducción en la viscosidad de las masas de

nixtamal, produciendo masas con textura inadecuada para la elaboración de tortillas. Por otro lado el tiempo de reposo es el parámetro que puede influir de mejor manera sobre la viscosidad final y la calidad de las masas obtenidas, a medida que los tiempos de reposo son mayores, la viscosidad aumenta mejorando la calidad de los productos derivados. Así, una combinación de tiempos de cocción de 15 (min) a una temperatura constante de entre 80 (°C) y 90 (°C) y 10 (h) de reposo, produce valores satisfactorios de viscosidad y masas de buena textura.

El trabajo de (Pflugfelder et al., 1988) resulta particularmente relevante para éste estudio pues en él se comparan 5 condiciones diferentes de nixtamalización, cada una de ellas con un patrón de cocción (curva de cocción) diferente que además, fueron evaluadas en dos procesadoras distintas identificadas con las letras X y Z. La figura 3.3 muestra las curvas de cocción en las primeras dos horas de cada proceso, el tiempo de reposo restante transcurrió sin intervención alguna por lo que el enfriamiento sucedió de manera natural.

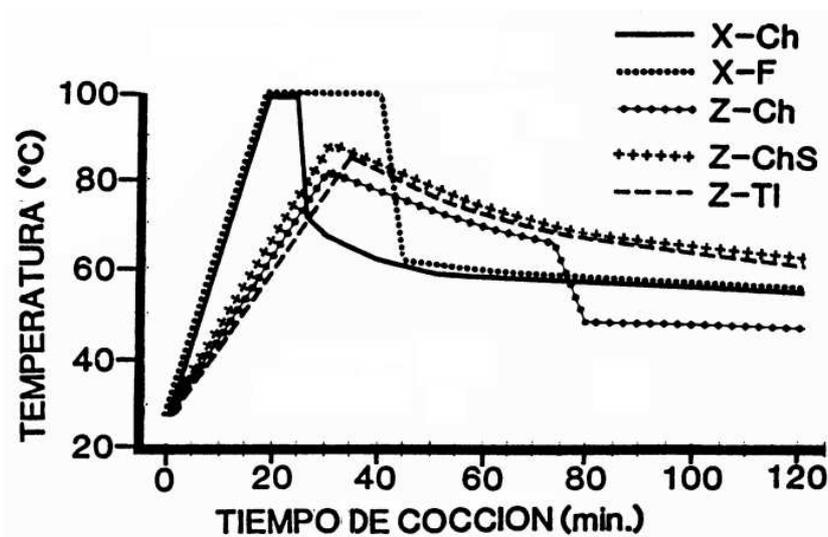


Figura 3.3: Curvas de cocción (Pflugfelder et al., 1988).

Los distintivos Ch y ChS se refieren al proceso que utilizan para la elaboración de tortillas destinadas sobre todo a la producción de tostadas; Z-Tl se refiere al proceso utilizado para producir tortillas; finalmente X-F es el proceso utilizado para la producción de hojuelas de maíz. Como es evidente los procesos para obtener los mismos productos suelen ser completamente distintos aún dentro de la misma procesadora. Las menores pérdidas de materia

entre los procesos evaluados se consiguen con una nixtamalización como la de las curvas Z-Chs y Z-Tl, con 1 (kg) de maíz, 1.7 (kg) de agua y 12.5 (g) de hidróxido de calcio. La máxima temperatura alcanzada con estas curvas de cocción es de 86 (°C) y 83 (°C) respectivamente y una vez alcanzada, la cocción continúa ya sin aporte de energía, dejándolo enfriar y reposar en el nejayote por 5 (h) en el primer caso y de 20 (h) a 24 (h) para el segundo. Las pérdidas de materia seca para dichas curvas son de 4.42 % y 9.46 % respectivamente. Tal diferencia se debe al tiempo de reposo en nejayote considerablemente alto en el proceso Z-Tl, sin embargo, las otras curvas de cocción con tiempos de reposo similares a esta última arrojaron pérdidas superiores al 11 %.

3.3. Costos económicos, energéticos y emisiones de CO_2 de la nixtamalización a nivel Nacional.

3.3.1. Consumo de maíz para nixtamalización.

El maíz es el cultivo más importante de la agricultura mexicana, no sólo por la relevancia que en materia de alimentación representa para la población, sino por sus múltiples usos como materia prima en la industria, ya sea como insumo directo o los subproductos de éste.

Prácticamente en toda la República Mexicana, el cultivo constituye el sustento directo de millones de personas y para algunos sectores de la población es el principal alimento, de ahí que al consumo humano de maíz blanco se destina más del 50 % de la producción nacional, el cual se ingiere en forma de tortilla, que se elabora a partir de masa de nixtamal o de harina de maíz nixtamalizada, así como atoles, tamales, pozole, etcétera. De acuerdo con las estadísticas de la Cámara Nacional del Maíz Industrializado, el consumo anual de tortilla en el país asciende a 13.6 millones de toneladas (CNMI, 2012).

En conjunto, la cadena maíz-tortilla representa por sí sola, el uno por ciento del producto interno bruto, con una derrama económica de 90,872 millones de pesos al año. Eso involucra a 2 millones de campesinos y agricultores de maíz, aproximadamente (Cámara Nacional del Maíz Industrializado, 2010).

Método de nixtamalización	2004	2005	2006
	Millones de Toneladas		
Harina de Maíz ¹	3.5	3.2	3.7
Productores Urbanos ²	3.3	3.0	3.4
Medio Rural ³	3.4	3.1	3.5
Total	10.2	9.04	10.6

1: MASECA, MINSA, AGROINSA, HARIMASA

2: Molinos y tortillerías que emplean gas LP.

3: Consumo a nivel familiar en el medio rural.

Fuente: SIAP 2011.

Tabla 3.2: Producción de nixtamal en México.

El consumo anual de maíz blanco para la producción de tortillas es de alrededor de 10 millones de toneladas como se muestra en la tabla 3.2, desafortunadamente las estadísticas más recientes datan de el año 2006 (Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación - SIAP, 2011). Cuatro grandes consorcios harineros controlan el 34.9% del consumo de las cuales, MASECA tiene la mayor participación con 71% mientras que MINSA, AGROINSA y HARIMASA se dividen el resto. En el medio rural, la nixtamalización se realiza con métodos tradicionales en pequeña escala a nivel familiar, el consumo de este sector representa el 33.01% del total del consumo de maíz nixtamalizado (Cámara Nacional del Maíz Industrializado, 2010). Finalmente, el 32.07% de total de producción de nixtamal es realizado por entre 10 y 12 mil molinos de nixtamal (Rosas Peña, 2005), pequeños productores dueños de tortillerías en el medio urbano, que producen nixtamal mediante métodos tradicionales en cantidades de entre 100 (kg) y 500 (kg) al día y donde el aporte de energía para la cocción lo consiguen mediante el uso de gas LP de acuerdo con la visita que realicé a tortillerías de Morelos, el Estado de México y el Distrito Federal.

De modo que el sector al que se enfoca la presente propuesta representa por lo menos 3,000 (Ton) de maíz al año.

3.3.2. Energía requerida en la nixtamalización.

Determinar la cantidad exacta de energía invertida en el proceso de nixtamalización es bastante complicado puesto que cada productor tiene su propia forma de nixtamalización y la formulación tiene ligeras variaciones de una

tortillería a otra, así como de un día a otro pues nunca se mide la cantidad exacta de ningún insumo y las unidades de medida pueden ser tan imprecisas como “tantas latas de cal” (botes de distintos tamaños según el nixtamalero) para el hidróxido de calcio o “hasta poquito antes de llenar el tanque” para la cantidad de agua, situación que pude constatar en las visitas realizadas a algunas tortillerías. Sin embargo, en general el proceso de nixtamalización se realiza en grandes contenedores de 200 (l) en los cuales se mezclan aproximadamente 100 (l) de agua, 100 (kg) de maíz y cantidades de entre 2(kg) y 3 (kg) de hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$, proporciones que se encuentran dentro de lo reportado en los diversos estudios presentados en la sección 3.2; el aporte de energía invariablemente se realiza mediante un quemador de gas LP colocado en la parte inferior del contenedor (ver figura 3.4).

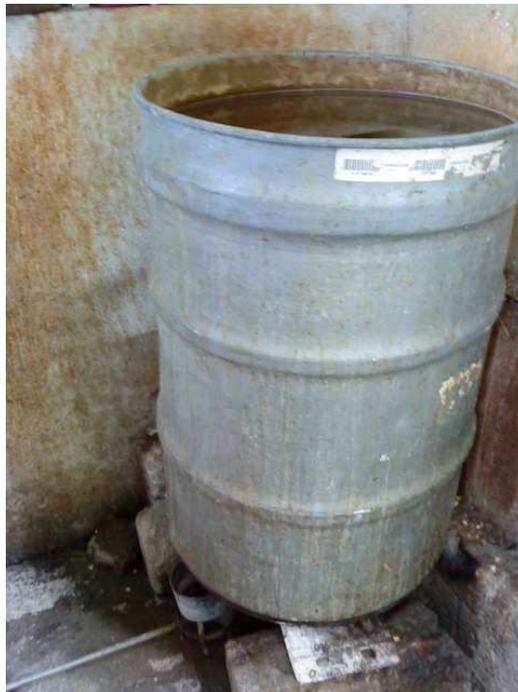


Figura 3.4: Imágen de la forma en que se realiza la nixtamalización.

Como puede apreciarse en la figura 3.4, la cocción se realiza con elementos muy sencillos, de modo que sería deseable inclusive el diseño de un equipo que permita realizar una cocción con mayores eficiencias de las que pueden presentarse en este tipo de arreglos.

La razón por la cual se eligen estos elementos para la cocción del maíz es que pueden encontrarse relativamente fácil en cualquier población, por otro

lado, el maíz es vendido en bultos de 50 (kg), de manera que lo mas sencillo es descargar el contenido de dos bultos de maíz en cada contenedor y llenarlo con agua hasta el límite, quedando en el interior una cantidad de 100 (kg) de maíz y otra aproximadamente igual de agua.

El modo de preparación consiste la mezcla de los insumos de la nixtamalización dentro del tanque para calentar hasta la ebullición. Una vez alcanzada ésta, la manera en que la cocción continúa pareciera ser de alguna manera poco relevante pues, de acuerdo con la información que pude recabar, en ese momento puede apagarse el quemador aunque por otro lado bien pueden dejar hervir por 5 minutos más, tiempo que evidentemente es un aproximado pues nadie lo mide o se mantiene en todo momento al pendiente de la cocción, por lo que no necesariamente registran el momento de inicio de la ebullición. La figura 3.5 muestra de manera esquemática el proceso de nixtamalización.

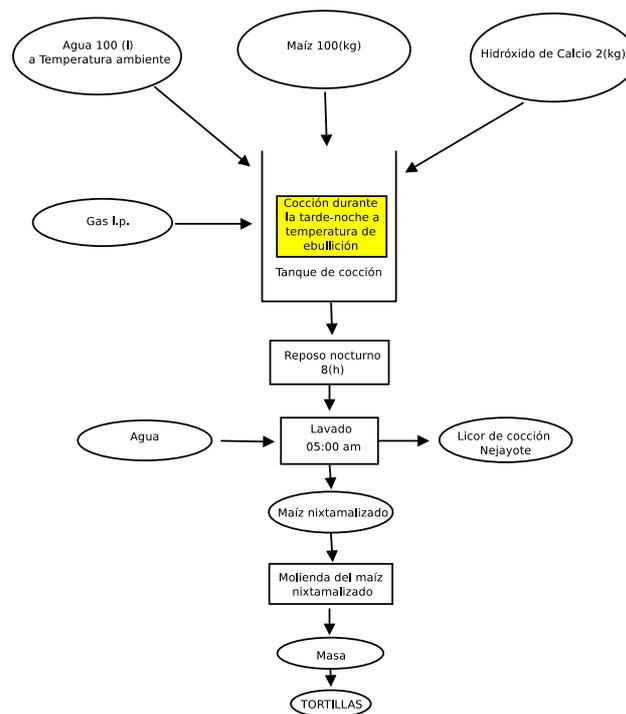


Figura 3.5: Diagrama de flujo de la nixtamalización. Los recuadros significan procesos, mientras que los óvalos representan insumos o subproductos de un proceso.

La cantidad de energía requerida en la cocción depende también de la temperatura ambiente, pues es esta la temperatura que tendrá cada elemento

al inicio del proceso de cocción, de este modo en ciudades o poblados de menores temperaturas se requerirá mayor consumo energético que en aquellas con climas más calurosos. Otro elemento a tomar en cuenta es que dependiendo de la altura sobre el nivel del mar, la temperatura de inicio de ebullición cambia y dado que ésta es la señal para determinar cuanto tiempo permanece encendido el quemador, la cantidad de energía requerida para realizar la cocción también cambiará ligeramente de un lugar a otro.

Sin embargo, con esta información se puede obtener un estimado de la cantidad de energía que se invierte en la cocción del nixtamal y por ende del volumen de gas consumido, así como del costo que significa el mismo y las emisiones de dióxido de carbono asociadas, como se muestra a continuación.

Podemos idealizar el tanque de cocción como un sistema cerrado en el cual el flujo de calor proveniente de la flama, es la única interacción con los alrededores. Evidentemente existen pérdidas de calor desde el tanque hacia el ambiente y la determinación de su valor significa un buen ejercicio de aplicación de las teorías y modelos de transferencia de calor, sin embargo, carece de sentido tratar de determinarlas puesto que la geometría de cada tanque puede ser diferente, así como las condiciones del ambiente cambian de un lugar a otro, además estas pérdidas pueden incluirse en el valor de la eficiencia de la transferencia de calor entre el quemador y el tanque.

Como es evidente, la eficiencia de los quemadores empleados en los diversos negocios dedicados a la producción de maíz nixtamalizado, es también un parámetro difícil de precisar, mas aún, debido a que suele escogerse el calentador de menor costo puede esperarse también que ésta no sea demasiado alta, la eficiencia también se ve disminuida por la proporción de oxígeno en el aire que depende de la altitud del lugar sobre el nivel del mar, sin embargo podemos suponer que los quemadores cumplen con lo mínimo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-019-SEDE-2002, "Aparatos domésticos para cocinar alimentos que utilizan gas LP o gas natural-Especificaciones y métodos de prueba", donde se establece una eficiencia mínima de 45 % para los quemadores (SENER. DOF, jueves 30 de Mayo de 2002, 2002).

Así podemos obtener un estimado del consumo energético en el proceso de nixtamalización, mediante un balance de energía para un sistema cerrado sobre el tanque de cocción, donde el flujo de calor proveniente del quemador, una vez incluido el valor de la eficiencia del mismo, es igual al cambio en la energía interna del sistema, equivalente al cambio en la energía interna de cada elemento.

Esto es:

$$Q_{util} = \Delta U_{sist} = \Delta U_{maiz} + \Delta U_{agua} + \Delta U_{Ca(OH)_2} \quad (3.1)$$

Donde:

Q_{util} es el flujo de energía desde el quemador, descontando pérdidas por eficiencia.

ΔU_{sist} es el cambio en la energía interna del sistema.

ΔU_{maiz} es el cambio en la energía interna del maíz.

ΔU_{agua} es el cambio en la energía interna en el volumen de agua.

$\Delta U_{Ca(OH)_2}$ es el cambio en la energía interna del hidróxido de calcio.

El cambio en la energía interna de cada componente de la mezcla depende de la capacidad térmica y de la cantidad de cada sustancia, así como del incremento de temperatura experimentado, de modo que la ecuación 3.1 adopta la siguiente forma:

$$Q_{util} = m_{agua}C_{agua}\Delta T_{agua} + m_{maiz}C_{maiz}\Delta T_{maiz} + m_{Ca(OH)_2}C_{Ca(OH)_2}\Delta T_{Ca(OH)_2} \quad (3.2)$$

Donde:

m es la masa de agua, maíz e hidróxido de calcio respectivamente.

C es la capacidad térmica específica del agua, maíz e hidróxido de calcio respectivamente cuyos valores se muestran en la tabla 1.

ΔT es el cambio en la temperatura de agua, maíz e hidróxido de calcio respectivamente.

Como la temperatura inicial es igual para todos los componentes del sistema, pues estos se encuentran a temperatura ambiente en el momento de iniciar el calentamiento y debido a que la temperatura final para todos es la del punto de ebullición del agua, el cambio de temperatura en todos es el mismo, por tanto la ecuación 3.2 queda:

$$Q_{util} = (m_{agua}C_{agua} + m_{maiz}C_{maiz} + m_{Ca(OH)_2}C_{Ca(OH)_2}) \Delta T_{sistema} \quad (3.3)$$

donde

$\Delta T_{sistema} = T_{eb_{agua}} - T_{ambiente}$ y ambas temperaturas depende por completo del sitio donde se lleva a cabo la nixtamalización.

La temperatura de ebullición del agua $T_{eb_{agua}}$ depende de la presión atmosférica del lugar, de acuerdo con la ecuación de Clausius-Clapeyron que establece la relación entre la variación de la presión de saturación y la temperatura, como se muestra en la siguiente ecuación 3.4.

$$\ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) = -\frac{h_{fg1}}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (3.4)$$

Donde:

P_1 y P_2 son las distintas presiones de saturación.

T_1 y T_2 son las temperaturas de ebullición correspondientes.

h_{fg1} es el valor de la entalpia de vaporización de la sustancia en el estado 1.

R es la constante particular de gas para la sustancia.

Después de realizar el álgebra correspondiente, la ecuación 3.4 conduce a la expresión para determinar la temperatura de inicio de ebullición en cada lugar (ecuación 3.5).

$$T_{eb_{lugar}} = \frac{h_{fg1atm}}{R_{agua} \left(\frac{h_{fg1atm}}{R_{agua} T_{1atm}} - \ln \left(\frac{P_{lugar}}{P_{1atm}} \right) \right)} \quad (3.5)$$

Donde:

T_{1atm} es la temperatura de ebullición del agua a nivel del mar.

P_{1atm} es la presión atmosférica a nivel del mar.

h_{fg1atm} y R_{agua} son la entalpia de vaporización del agua a nivel del mar y la constante particular del vapor de agua.

A partir del conocimiento de la temperatura, entalpia de vaporización y presión de saturación del agua a nivel del mar, puede conocerse la temperatura de inicio de ebullición en la localidad donde se realice la nixtamalización,

de manera que únicamente resta determinar el valor de la presión atmosférica en cada sitio.

La densidad del aire así como la presión atmosférica existente en el lugar dependen de la altura sobre el nivel del mar y también es posible determinarlas mediante el modelo de atmósfera estandar de la manera siguiente.

La ecuación de gas ideal relaciona los cambios en la presión, densidad y temperatura del aire como se muestra en la ecuación 3.6.

$$P = \rho R_{aire} T \quad (3.6)$$

donde R_{aire} es la constante particular del aire $R_{aire} = 286.97 \left(\frac{J}{kgK} \right)$ (Wark Jr. and Richards, 2001).

Por otro lado, la presión varía con la altura de acuerdo a la ecuación 3.7.

$$dP = -\rho g dh \quad (3.7)$$

Sustituyendo la densidad a partir de la ecuación 3.6 en la ecuación anterior 3.7, se obtiene la siguiente expresión 3.8.

$$\frac{dP}{P} = -\frac{g dh}{R_{aire} T} \quad (3.8)$$

De acuerdo con (Berberan Santos et al., 1997) el gradiente de la temperatura con respecto a la altura sobre el nivel del mar dentro de la tropósfera tienen un valor de $\kappa = 0.0065 \left(\frac{K}{m} \right)$, de modo que la variación de la temperatura puede ser modelada por la ecuación 3.9:

$$T = T_0 - \kappa h \quad (3.9)$$

donde $T_0 = 288(K)$ es el valor promedio de la temperatura del aire a nivel del mar (Berberan Santos et al., 1997).

De modo que al incluir esta última, considerando constante el valor de la aceleración de la gravedad $g = 9.8 \left(\frac{m}{s^2} \right)$ y con los límites de integración correspondientes, la ecuación 3.8 queda:

$$\int_{P_{1atm}}^{P_{lugar}} \frac{dP}{P} = -\frac{g}{R_{aire}} \int_0^{h_{lugar}} \frac{dh}{T_0 - \kappa h} \quad (3.10)$$

Después de integrar y realizar el álgebra correspondiente, la ecuación anterior 3.10 resulta:

$$P_{lugar} = P_{1atm} \left(1 - \frac{\kappa h_{lugar}}{T_0} \right)^{\frac{g}{\kappa R_{aire}}} \quad (3.11)$$

Al sustituir los valores de $T_0 = 288(K)$, $\kappa = 0.0065 \left(\frac{K}{m}\right)$, $R_{aire} = 286.97 \left(\frac{J}{kgK}\right)$ y $g = 9.8 \left(\frac{m}{s^2}\right)$ en la ecuación anterior 3.11, tenemos que la variación de la presión atmosférica con respecto a la altura $h(m)$ sobre el nivel del mar es descrita por la siguiente ecuación 3.12:

$$P_{lugar} = P_{1atm} \left(1 - 2.2557 \times 10^{-5} h_{lugar} \right)^{5.2538} \quad (3.12)$$

Donde:

P_{lugar} es la presión atmosférica existente en la localidad.

P_{1atm} es la presión atmosférica a nivel del mar.

h_{lugar} es la altura sobre el nivel del mar de la localidad.

Debido a que en la República Mexicana se cuenta con una gran diversidad de climas y las poblaciones se encuentran en distintas altitudes sobre el nivel del mar, los requerimientos energéticos son necesariamente distintos, sin embargo, es posible establecer un rango de consumos energéticos tomando en cuenta los valores de temperatura ambiente promedio anual así como la altura sobre el nivel del mar de algunas ciudades de la República Mexicana.

En la tabla 3.3 se muestra la energía requerida para la nixtamalización de 100 (kg) de maíz, con 2 (kg) de $Ca(OH)_2$ y 100 (kg) de agua, para algunas ciudades representativas, en la cual se puede apreciar la amplia gama de altitudes y temperaturas ambiente promedio anual, así como las diferencias de consumos energéticos.

Los valores de la tabla 3.3, se han calculado evaluando las ecuaciones 3.12, 3.5 y 3.3; los valores de las diversas constantes y propiedades del agua, maíz, $Ca(OH)_2$ y aire que se han utilizado se muestran en la tabla 1.

Ciudad	T_{amb}^+ °C	Altitud $^\psi$ m	P kPa	T_{ebagua} °C	ΔT °C	Q_{util}^* MJ
Campeche, Camp.	26.4	0	101.325	100.0	73.6	42.024
Villahermosa, Tab.	28.1	16	101.133	99.9	71.8	41.022
Tuxtla Gutiérrez, Chis.	24.5	550	94.893	98.1	73.6	42.039
Chilpancingo, Gro.	21.2	1260	87.082	95.7	74.5	42.540
Cuernavaca, Mor.	21.1	1530	84.253	94.8	73.7	42.069
Oaxaca, Oax.	20.2	1550	84.046	94.7	74.5	42.544
Morelia, Mich.	17.8	1900	80.496	93.5	75.7	43.229
Puebla, Pue.	16.6	2159	77.948	92.6	76.0	43.407
Distrito Federal	15.6	2230	77.261	92.4	76.8	43.839
Toluca, Méx.	12.2	2670	73.112	90.9	78.7	44.916

+ Temperatura promedio anual (Servicio Meteorológico Nacional, 2012)

ψ Altura sobre el nivel del mar.

* Energía requerida para 100 (kg) de maíz, 100 (l) de agua y 2 (kg) de $Ca(OH)_2$, proporciones usuales en la nixtamalización.

Tabla 3.3: Consumo energético en la nixtamalización para algunas ciudades de México.

Tomando en cuenta la eficiencia del quemador $\eta_{quemador} = 45\%$, la energía consumida total E_{total} es igual a:

$$E_{total} = \frac{Q_{util}}{\eta_{quemador}} \quad (3.13)$$

La cantidad de gas LP consumido es por tanto:

$$m_{g.l.p.} = E_{total} PC_{g.l.p.} \quad (3.14)$$

Donde $PC_{g.l.p.}$ es el poder calorífico del gas LP, que de acuerdo con la Secretaría de Energía tiene un valor de $PC_{g.l.p.} = 50,415.7 \left(\frac{kJ}{kg} \right)$ (Secretaría de Energía (SENER), 2010).

El costo asociado a la nixtamalización de tales cantidades de maíz se obtiene al multiplicar el valor obtenido de la ecuación 3.14 por el precio del gas LP que de acuerdo con el portal de la Secretaría de Energía, para el mes de abril de 2012 se encuentra en $11.13 \left(\frac{\$}{kg} \right)$.

Por último, las emisiones de CO_2 se calculan siguiendo la metodología TIER1 establecida por el IPCC (IPCC, 2006), para el cálculo de emisiones para diversas fuentes fijas, que establece un factor de emisión para el gas LP de $F_{e.g.l.p.} = 65,600 \left(\frac{kg_{CO_2}}{TJ} \right)$, mediante la ecuación 3.15.

$$m_{CO_2} = E_{total} F_{e.g.l.p.} \tag{3.15}$$

La metodología establecida por el IPCC para el cálculo de emisiones, ha sido adoptada en México y establecida por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) en el documento titulado “Metodologías para la Cuantificación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero y de Consumos Energéticos Evitados por el Aprovechamiento Sustentable de la Energía”(CONUEE, 2009).

Utilizando las ecuaciones anteriores, 3.13, 3.14 y 3.15, el consumo total de energía, de gas LP, las emisiones de dióxido de carbono y el costo de la nixtamalización de 100 (kg) de maíz, para las ciudades escogidas queda como se muestra en la tabla 3.4.

Ciudad	Q_{util} kJ	E_{total} kJ	Gas LP kg	Costo ⁺ \$	Emisiones CO_2 kg
Campeche, Camp.	42.024	93.386	1.85	20.62	6.13
Villahermosa, Tab.	41.022	91.160	1.81	20.12	5.98
Tuxtla Gutiérrez, Chis.	42.039	93.421	1.85	20.62	6.13
Chilpancingo, Gro.	42.540	94.532	1.88	20.87	6.20
Cuernavaca, Mor.	42.069	93.487	1.85	20.64	6.13
Oaxaca, Oax.	42.544	94.542	1.88	20.87	6.20
Morelia, Mich.	43.229	96.065	1.91	21.21	6.30
Puebla, Pue.	43.407	96.460	1.91	21.29	6.33
Distrito Federal	43.839	97.419	1.93	21.51	6.39
Toluca, Méx.	44.916	99.813	1.98	22.04	6.55

Cantidades asociadas la nixtamalización de 100 (kg) de maíz, 100 (l) de agua y 2 (kg) de $Ca(OH)_2$, proporciones usuales en la nixtamalización.

+ Pesos mexicanos.

Tabla 3.4: Consumo de gas LP, emisiones de CO_2 y costos de la nixtamalización.

Para los cálculos realizados y con el fin de obtener un panorama de los diversos requerimientos de energía, se escogieron desde aquellas ciudades ubi-

cadras a nivel del mar, como Campeche y Villahermosa, hasta aquellas con altitudes superiores a los 2,000 (m), como el Distrito Federal y Toluca en el Estado de México.

Como es evidente, los valores mayores de energía total requerida se encuentran en las localidades donde la temperatura ambiente es menor; localidades con alturas sobre el nivel del mar similares a Toluca y la Ciudad de México tendrán requerimientos de energía de al menos 97 (kJ) por cada 100 (kg) de maíz nixtamalizado, mientras que para poblaciones situadas a nivel del mar, las cantidades son un poco menores y del orden de los 91 (kJ).

Sin embargo, tales diferencias entre las condiciones de cada población pueden ser menos evidentes si, como mencioné líneas antes, se toma en cuenta el hecho de que una vez alcanzado el punto de ebullición, el aporte de energía puede ser mantenido durante tiempos difíciles de precisar. Razón por la cual, estas cantidades pueden ser tomadas como un mínimo en los consumos energéticos y costos asociados. De ahí que se pueden tomar los valores de la ciudad de Toluca como una estimación del consumo mínimo de gas LP, emisiones de dióxido de carbono y costos asociados al proceso de nixtamalización de 100 (kg) de maíz.

De esta manera, la estimación de los costos que significa el proceso de cocción de maíz en el medio urbano a nivel nacional, tomando en cuenta un consumo en ese sector de 3.5 (MTon) al año (ver tabla 3.2), resulta ser el que se muestra en la tabla 3.5.

Consumo de maíz MTon	E_{total} TJ	Gas LP Ton	Costo MDP	Emisiones CO_2 Ton
3.5	3,493.467	69,293.2	771.234	229,171.4

Tabla 3.5: Consumo de gas LP, emisiones de CO_2 y costos anuales de la nixtamalización en las regiones urbanas.

Capítulo 4

Pruebas sobre el calentador solar de agua.

El presente capítulo corresponde a las pruebas realizadas sobre el calentador solar de agua en diversos días, con diferentes temperaturas de inicio en el interior del termotanque.

Se realizaron pruebas de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-ES-004-NORMEX-2010 “Energía solar - Evaluación térmica de sistemas solares para calentamiento de agua - Método de prueba” (de ahora en adelante *la norma*), así como un tipo de prueba diferente a la establecida en la misma, consistente en la evaluación del calentador al ser expuesto a la insolación durante dos días completos sin extracciones de agua, prueba que evidentemente evalúa al sistema en un periodo de exposición mayor al establecido en la norma, la última prueba correspondió a la evaluación de seguridad del calentador en operación. Las pruebas se realizaron en fechas del 19 de Enero de 2011 al 15 de Abril de 2011, en el Centro de Investigación en Energía de la UNAM (CIE-UNAM) en Temixco Morelos.

4.1. Características del calentador.

El calentador solar de agua con el que se decidió trabajar es un calentador con un captador de tubos tipo “Heat pipe” de la marca Enerverde. El sistema está compuesto por un termotanque con una capacidad de 165 (l) y un captador de 18 tubos de calor con área de captación total (área negra)

de $2.3 \text{ (m}^2\text{)}$, con un precio al público aproximado de \$11,000.00 (no incluye costo de instalación) y con un ángulo de captador de $\beta = 27^\circ$ (figura 4.1).



Figura 4.1: Calentador solar de agua de 165 (l) marca Enerverde.

Un tubo de calor (heat pipe) es un dispositivo compuesto por un tubo cerrado de cobre con un fluido de trabajo en su interior a una presión de vacío, cubierto por una coraza de vidrio también al vacío (ver figura 4.2), que transfiere calor mediante la evaporación del fluido que circula en su interior mediante convección natural desde la zona de absorción de calor (evaporador) hacia la zona de condensación (condensador), donde entrega la energía térmica en forma de calor latente al sistema que se desea calentar, para regresar de nueva cuenta al evaporador y completar un ciclo (Mathioulakis and Belessiotis, 2002).

Este tipo de dispositivos tienen la característica de poder transferir grandes cantidades de energía aún en pequeñas diferencias de temperatura (Chun et al., 1999). Debido a que constituyen un sistema cerrado, no existe circulación del fluido que se pretende calentar (en este caso agua) en su interior por lo que se evitan problemas de sedimentación que disminuyen la eficiencia en sus paredes, así también se evita el inconveniente de la circulación inversa nocturna característica de los captadores planos. Por otro lado, los calenta-

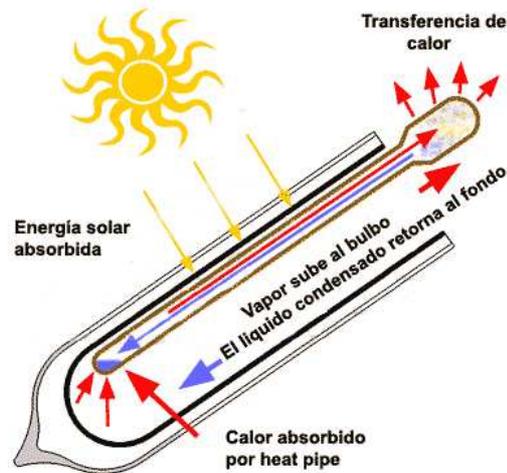


Figura 4.2: Esquema de la constitución y funcionamiento de un tubo de calor (heat pipe).

dores solares que cuentan con un captador de tubos de calor pueden alcanzar temperaturas cercanas a la temperatura de ebullición del agua (Mathioulakis and Belessiotis, 2002; Rittidech and Wannapakne, 2007), razón por la cual se han identificado como la opción para ser utilizados en los procesos de nixtamalización.

4.2. Pruebas de acuerdo a la NMX-ES-004-NORMEX-2010

4.2.1. Descripción de la norma.

La Norma (Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación S.C. (NORMEX), 2010) establece el método de ensayo para evaluar y comparar el comportamiento térmico de sistemas solares de calentamiento de agua, principalmente para uso doméstico hasta una capacidad máxima de 500 litros y hasta una temperatura máxima de 90 °C como dominio de temperaturas de agua caliente.

Se aplica a los sistemas solares domésticos para calentamiento de agua que funcionan mediante:

- a) Circulación natural o termosifónicos; y
- b) Circulación forzada;

Los cuales pueden funcionar a partir de una o más de las siguientes tecnologías:

- a) Colectores solares planos;
- b) Autocontenidos;
- c) Colectores de tubos evacuados con o sin tubos de calor y con y sin superficies reflejantes;
- d) Colectores con concentradores tipo parabólico compuesto (CPC).

Las pruebas establecidas en la norma corresponden a la evaluación del captador en dos etapas: una diurna, cuyo objetivo es determinar la energía térmica útil después de 8 horas de exposición a la radiación solar (de las 8:00 a las 16:00 horas tiempo solar) y una prueba nocturna para determinar las pérdidas térmicas durante un período de 15 horas (de las 16:00 a las 7:00 horas tiempo solar del día siguiente).

Como parte del procedimiento de prueba se deben determinar:

- a) El volumen máximo de agua disponible útil en el sistema solar.
- b) El área de apertura del captador solar.
- c) La relación (volumen del sistema)/(área de apertura).
- d) La temperatura promedio después de una homogenización en el interior del termotanque.
- e) La energía térmica útil después de 8 horas de exposición a la radiación solar (de las 8:00 a las 16:00 horas tiempo solar);
- f) La energía térmica útil después de 8 horas de exposición a la radiación solar pero iniciando la prueba a alta temperatura para simular el comportamiento del sistema solar con una diferencia de temperatura entre el agua contenida en el sistema y la temperatura ambiente equivalente a la utilización del sistema en la ciudad con el clima más desfavorable que se desea incluir dentro de la curva de evaluación térmica.
- g) Las pérdidas térmicas durante un período nocturno de 15 horas (de las 16:00 a las 7:00 horas tiempo solar del día siguiente)

h) Las pérdidas térmicas durante un período nocturno de 15 horas (de las 16:00 a las 7:00 horas tiempo solar del día siguiente) pero después de la evaluación a alta temperatura descrita en el inciso f.

Para determinar lo anterior es preciso poder medir parámetros como la temperatura del agua en el interior del termotanque al inicio y al final de la prueba diurna y nocturna, la temperatura ambiente a lo largo de la prueba, la irradiancia solar y adicionalmente la presión al interior del tanque, así como la velocidad del viento en el exterior del sistema.

Se deberán obtener los valores de la temperatura ambiente promedio $T_{amb,diurna/nocturna}$ y velocidad promedio del viento $v_{diurna/nocturna}$, así como integrar los valores instantáneos de irradiancia sobre el período de 8 horas para obtener el valor de la irradiación solar $H \left(\frac{MJ}{m^2} \right)$.

$$H \left(\frac{J}{m^2} \right) = \Delta t(s) \sum_{n=0}^{npts} G \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (4.1)$$

Donde:

H = Irradiación solar comprendida en las 8 horas de insolación, $H(J/m^2)$.

G = Irradiancia solar, $G(W/m^2)$.

Δt = Intervalo entre registros del valor de la Irradiación solar, $\Delta t(s)$.

npts = Número de registros de Irradiación solar equivalente a la división de las 8 horas en segundos entre Δt .

$$T_{amb,diurna/nocturna} = \frac{1}{npts} \sum_{n=0}^{npts} T_{amb,reg} (^\circ C) \quad (4.2)$$

$$v_{diurna/nocturna} = \frac{1}{npts} \sum_{n=0}^{npts} v_{reg} \left(\frac{m}{s} \right) \quad (4.3)$$

$T_{amb,reg}$ = Valor de cada registro de temperatura ambiente, $T_{amb,reg}(^\circ C)$.

v_{reg} = Valor de cada registro de la velocidad del viento, $v_{reg}(m/s)$.

La evaluación correspondiente a la etapa diurna de un sistema de calentamiento de agua con energía solar puede ser descrita de forma precisa por la siguiente relación:

$$\frac{Q_{u,diurno}}{H} = K_1 - U_{1,diurno} \frac{(T_{ini} - T_{amb})_{diurno}}{H} = \frac{m_v C (T_{fin} - T_{ini})_{diurno}}{H} \quad (4.4)$$

Donde:

- $Q_{u,diurno}$ es el calor útil contenido en el agua almacenada en el tanque al final del período diurno, $Q_u(MJ)$.

- H es la radiación solar incidente sobre el plano del captador solar, durante el período de la prueba diurna, $H(\frac{MJ}{m^2})$.

- K_1 constante del sistema que pudiera representar a un valor equivalente del sistema de un absorptividad por un área de captación, $K_1 m^2$.

- $U_{1,diurno}$ es un coeficiente de pérdidas del sistema para el período diurno, $U_{1,diurno}(\frac{MJ}{\circ C})$.

- $T_{ini,diurno}$ es la temperatura homogénea del agua contenida en el equipo al inicio de la prueba diurna, $T_{ini,diurno}(\circ C)$.

- $T_{amb,diurno}$ es la temperatura promedio del medio ambiente durante el período de la prueba diurna, $T_{amb,diurno}(\circ C)$.

- m_v es la masa de agua contenida en el equipo, $m_v(kg)$.

- $T_{fin,diurno}$ es la temperatura homogénea del agua contenida en el equipo al final de la prueba diurna, $T_{fin,diurno}(\circ C)$.

- C es la capacidad térmica específica del agua en fase líquida. Por tratarse de una sustancia incompresible para los rangos de temperatura y presión involucrados, las variaciones en el valor de esta propiedad se deben fundamentalmente a la temperatura, sin embargo éstas son relativamente pequeñas, de apenas 2.3% entre el valor mayor de $C = 4.218 (\frac{MJ}{kg \circ C})$ a 99 ($\circ C$) y el valor menor igual a $C = 4.179 (\frac{MJ}{kg \circ C})$ correspondiente a 27 ($\circ C$). En todo caso, para cualquier cambio de temperatura puede utilizarse el valor correspondiente a la temperatura media entre los estados inicial y final. De este modo, se ha escogido el valor correspondiente a una temperatura de 50 ($\circ C$) igual a $C = 0.004182(\frac{MJ}{kg \circ C})$, que tiene una desviación con respecto a los valores

máximo y mínimo de 0.8 % y 0.07 % respectivamente (Wark Jr. and Richards, 2001).

Mientras que la etapa nocturna de la prueba sobre el calentador solar de agua puede ser descrita por la siguiente expresión:

$$Q_{perdido} = m_v C (T_{ini} - T_{fin})_{nocturno} = K_2 - U_{nocturno} (T_{ini} - T_{amb})_{nocturno} \quad (4.5)$$

Donde:

- K_2 es una constante del sistema que puede representar un remanente de energía o bien una diferencia debida a los errores inherentes a las incertidumbres de las mediciones cuando $T_{ini} = T_{amb}$, $K_2(MJ)$.

- $U_{nocturno}$ es un coeficiente de pérdidas característico del equipo para el período nocturno, $U_{nocturno}(MJ/^\circ C)$.

- $T_{ini,nocturno}$ es la temperatura homogénea del agua contenida en el equipo al inicio de la prueba nocturna, $T_{ini,nocturno}(^\circ C)$.

- $T_{amb,nocturno}$ es la temperatura promedio del medio ambiente durante el período de la prueba nocturna, $T_{amb,nocturno}(^\circ C)$.

- $T_{fin,nocturno}$ es la temperatura homogénea del agua contenida en el equipo al final de la prueba nocturna, $T_{fin,nocturno}(^\circ C)$.

4.2.2. Evaluación del colector de acuerdo a la norma.

Las pruebas de acuerdo a la norma se realizaron los días 20, 21, 22 y 27 de enero, 16 y 17 de febrero, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25 y 26 de abril de 2011. Las pruebas se realizaron con diferentes temperaturas de inicio del agua dentro del termotanque en un rango de $3(^\circ C)$ hasta $63(^\circ C)$, procurando intervalos de $10(^\circ C)$.

Siguiendo el procedimiento establecido en la norma, se fijó un intervalo de $30(s)$ entre un registro y otro de todas las variables involucradas: temperatura en el interior el termotanque, temperatura ambiente, velocidad del viento, irradiancia global y presión en el interior del termotanque.

La figura 4.3 ilustra esquemáticamente el banco de pruebas empleado para la evaluación del calentador solar, constituido por una bomba de recirculación, un piranómetro PSP, tres termómetros, un sensor de presión estática y un anemómetro para medir la velocidad del viento. Las especificaciones de cada uno de estos instrumentos se encuentran en el apéndice D.

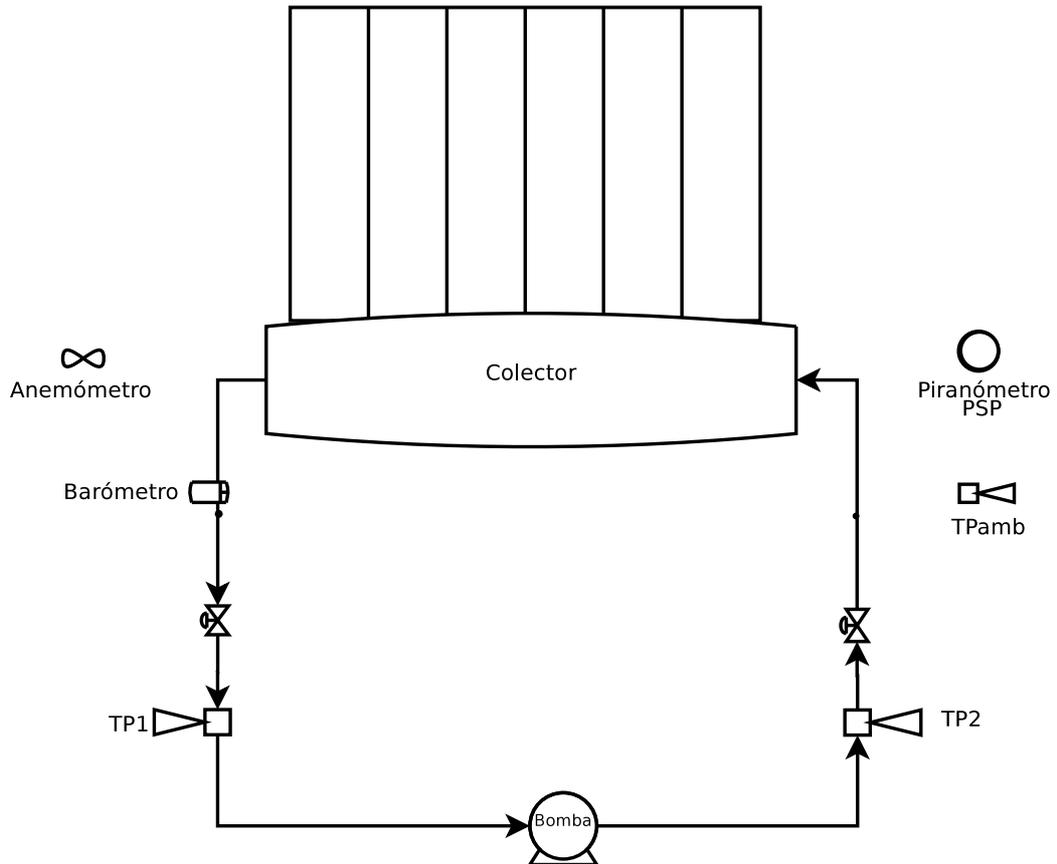


Figura 4.3: Esquema de la mesa de pruebas sobre el calentador solar.

En cada uno de los días de la prueba, alrededor de las 8:00 hr tiempo solar, se llenó el termotanque con agua que se hizo recircular por medio de la bomba hasta homogenizar la temperatura de la misma en su interior, momento que ocurre cuando la temperatura registrada por los termómetros TP1 y TP2 tiene variaciones menores a 5 ($^{\circ}\text{C}$). Este hecho constituye el inicio de la prueba diurna, momento en que comenzaron a registrarse en la computadora los valores de las variables antes mencionadas.

Transcurridas 8 horas de exposición, alrededor de las 16:00 hr tiempo

solar, se hizo recircular de nueva cuenta el agua en el interior del termotanque hasta homogenizar su temperatura y de esta manera registrar el valor de temperatura correspondiente al final de la prueba diurna. Este momento marca también el inicio de la prueba nocturna y la temperatura en el interior del termotanque antes mencionada corresponde a la primer lectura de esta etapa que concluye alrededor de las 7:30 horas del día siguiente, momento en que se hace recircular de nueva cuenta el agua en el interior del termotanque para registrar su temperatura al final de la prueba nocturna. Durante este tiempo de cerca de 24 horas, se registraron en la computadora de manera ininterrumpida los valores de todas las variables mencionadas, quedando almacenados en un archivo con formato de texto simple para cada día de prueba.

Una vez concluido el registro y después de haber guardado el archivo correspondiente, se extrajo una cierta cantidad de agua caliente del termotanque para ser llenado de nueva cuenta con agua a temperatura ambiente.

Habiendo hecho esto, se recirculó el agua en el interior del mismo para tener una temperatura homogénea y de esta manera dar comienzo a la siguiente prueba con temperatura inicial mayor. La cantidad de agua extraída del termotanque depende de su temperatura y de la temperatura del agua de relleno, de tal manera que al llenar de nueva cuenta el termotanque, la temperatura sea la deseada en el inicio de la prueba siguiente, procurando intervalos de $10^{\circ}C$ entre una prueba y la inmediata.

El cálculo de la cantidad de agua extraída del termotanque se realiza de la siguiente manera:

La mezcla no reactiva de dos sustancias en un sistema aislado es un proceso termodinámico isoentálpico, de manera que la cantidad de energía interna de todo el sistema se mantiene constante en todo momento, a pesar de que cada una de las sustancias sufra cambios en su cantidad de energía interna, esto es:

$$\Delta U_{sustancia1} + \Delta U_{sustancia2} = \Delta U_{sistema} = 0 \quad (4.6)$$

donde $\Delta U_{sustancia}$ representa el cambio en la cantidad de energía interna de la sustancia de que se trate, mientras que por constituir un sistema aislado, el cambio de energía interna total del sistema es igual a cero $\Delta U_{sistema} = 0$.

Para este caso particular, las sustancias por mezclar son dos cantidades distintas de agua a diferentes temperaturas, de modo que al sustituir las expresiones para calcular el cambio en la energía interna del agua en la expresión anterior (ecuación 4.6), ésta adopta la siguiente forma

$$m_{caliente}C(T_{caliente} - T_{final}) + m_{ambiente}C(T_{ambiente} - T_{final}) = 0 \quad (4.7)$$

donde C es la capacidad térmica del agua que depende de la temperatura cuyos valores para cada incremento de temperatura se han tomado dentro del rango mostrado en la tabla 1, $m_{caliente}$ y $m_{ambiente}$ representan la masa de agua caliente y de agua a temperatura ambiente que serán mezcladas, $T_{caliente}$ representan la temperatura del agua en el interior del termotanque que después de un día de prueba se encuentra a una temperatura mayor que la temperatura ambiente y T_{fria} es la temperatura del agua de relleno, T_{final} es la temperatura que alcanzará la mezcla una vez llevada a cabo.

Tomando en cuenta que la masa total del sistema (capacidad del termotanque) es igual a la suma de la masa de las dos sustancias por mezclar: $m_{ambiente} = m_{total} - m_{caliente}$. De modo que al sustituir la expresión anterior en la ecuación 4.7 y realizar las manipulaciones adecuadas, la cantidad de agua caliente que es preciso tener en el interior del termotanque para mezclarla con agua a temperatura ambiente para obtener la temperatura final deseada es:

$$m_{caliente} = \frac{m_{total}(T_{final} - T_{ambiente})}{T_{caliente} - T_{ambiente}} \quad (4.8)$$

La cantidad de agua caliente que hay que extraer del termotanque para dejar la masa de agua caliente requerida, dada por la expresión anterior (ecuación 4.8), es igual a $m_{extraccion} = m_{total} - m_{caliente}$.

Debido a que se conoce el gasto producido por la bomba de recirculación \dot{m}_{bomba} , se puede calcular el tiempo que es necesario accionarla para extraer del termotanque la cantidad de agua requerida de la manera siguiente:

$$t_{extraccion} = \frac{m_{total} - m_{caliente}}{\dot{m}_{bomba}} \quad (4.9)$$

Valores de la prueba en la etapa diurna.

La figura 4.4 es la gráfica de los valores de irradiancia global en el plano del captador ($\beta = 27^\circ$) en los días 15, 16, 17 y 18 de abril de 2011, correspondientes a la etapa diurna de la prueba de acuerdo a la norma, con temperaturas de inicio dentro del termotanque de $52.7(^{\circ}C)$, $63.89(^{\circ}C)$, $45(^{\circ}C)$ y $58(^{\circ}C)$ respectivamente. Las gráficas muestran la forma típica de la irradiancia global a lo largo de un día, en las que se aprecian ligeros nublados ocasionales, teniendo el máximo de irradiancia global evidentemente en el medio día tiempo solar, que por la latitud del municipio de Temixco Morelos difiere de la hora oficial, establecida por el uso horario correspondiente al paralelo 90° O al que pertenece.

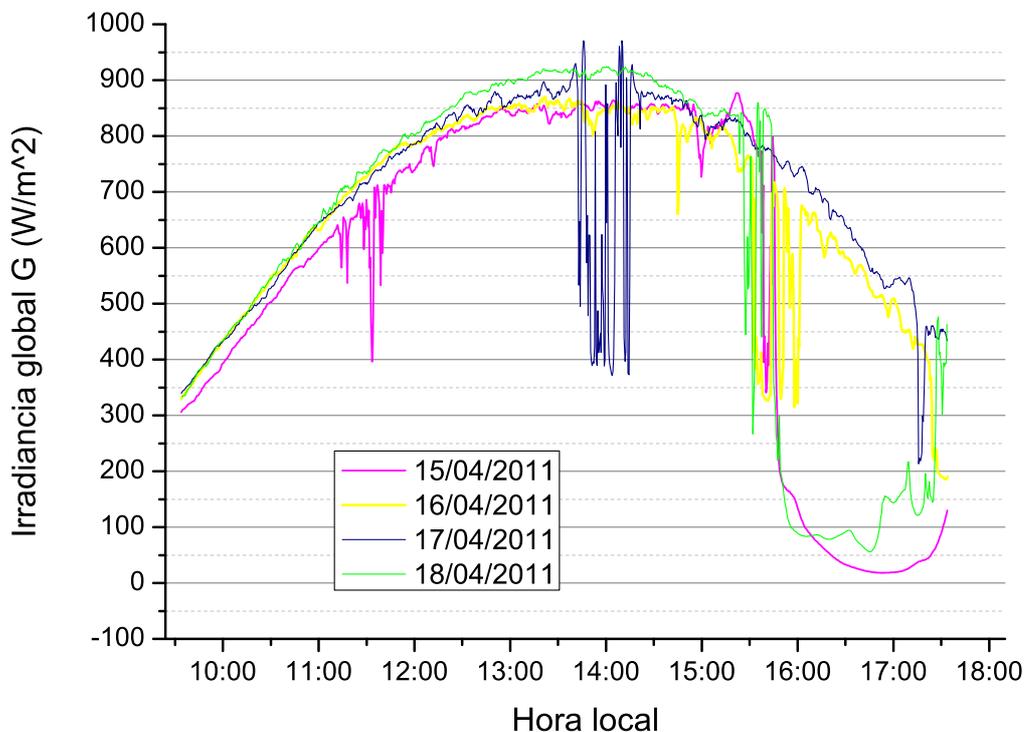


Figura 4.4: Irradiancia global en el plano del captador $\beta = 27^\circ$.

Las gráficas de temperatura ambiente y de velocidad del viento en los días de prueba antes mencionados se presentan en las figuras 4.5 y 4.6 respectivamente. Las gráficas correspondientes a la irradiancia global, temperatura ambiente y velocidad del viento en los días de prueba restantes se presentan en el apéndice A.

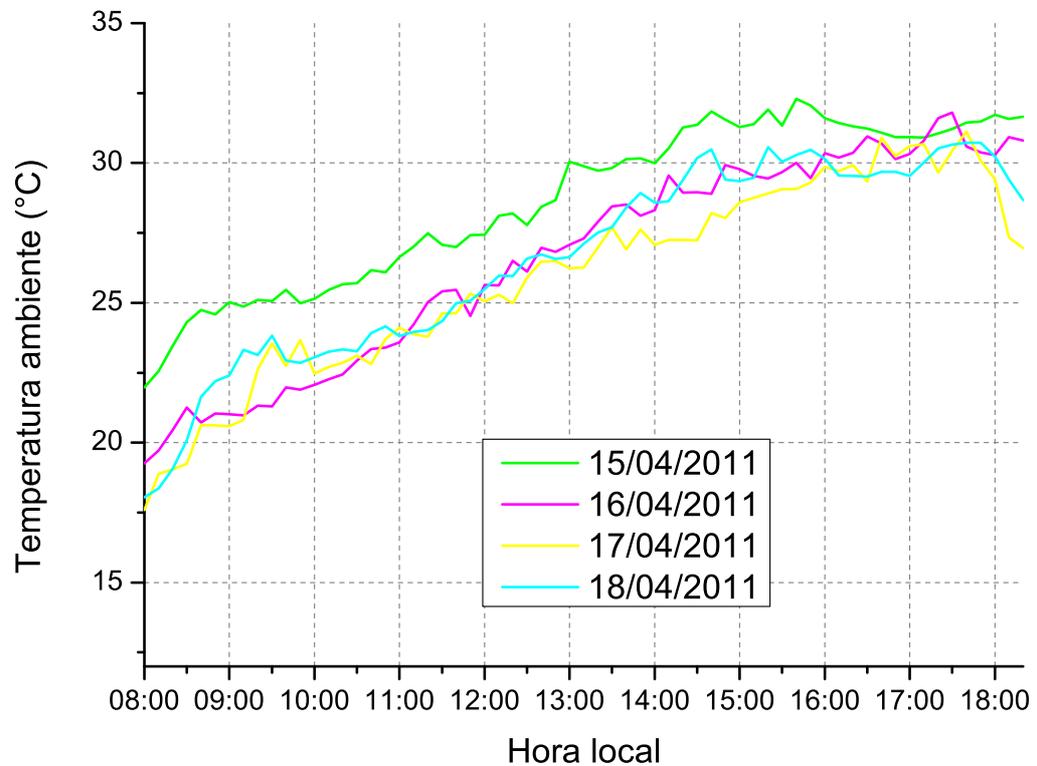


Figura 4.5: Temperatura ambiente de los días de prueba 15, 16, 17 y 18 de abril de 2011.

En la tabla 4.1 se presentan los datos obtenidos en la etapa diurna de la prueba, mientras que la figura 4.7 es la gráfica de estos valores, en donde es posible apreciar la disminución en el incremento de temperatura $\Delta T = T_{fin} - T_{ini}$ obtenible en el calentador, a medida que la temperatura inicial de prueba es cada vez mayor. Dicha disminución evidentemente es consecuente con una reducción en la ganancia de energía térmica Q_{util} y con una sensible disminución de la eficiencia del sistema a medida que aumenta la temperatura inicial.

Tal y como lo establece la norma, el calentador solar de agua queda plenamente caracterizado por la expresión que relaciona la ganancia de energía térmica $\frac{Q_{util}}{H}$ con la diferencia entre la temperatura inicial de prueba y la temperatura ambiente $\frac{T_{ini} - T_{amb}}{H}$, ambas divididas por la irradiancia global, ecuación 4.4. De modo que la curva característica del calentador mostrada en la gráfica de la figura 4.8, resultado del ajuste lineal de ambos parámetros, representa el comportamiento del calentador solar en la etapa diurna de la

prueba de acuerdo a la norma.

De acuerdo con los resultados de dicha gráfica 4.8, la ecuación característica del calentador es:

$$\frac{Q_u}{H} = -0.1285 \left(\frac{MJ}{^\circ C} \right) \frac{T_{ini} - T_{amb}}{H} + 1.0514(m^2) \quad (4.10)$$

De dicha expresión se puede inferir que el calentador tiene un área equivalente de captación de $1.0514(m^2)$, parámetro que refleja la absortividad total del equipo, mientras que presenta un coeficiente de pérdidas característico de $0.1285 \left(\frac{MJ}{^\circ C} \right)$, este último corresponde a las pérdidas que se presentan en el calentador a medida que la temperatura en el interior del termotanque supera a la temperatura del ambiente, es decir, por cada $1(^\circ C)$ de diferencia entre el

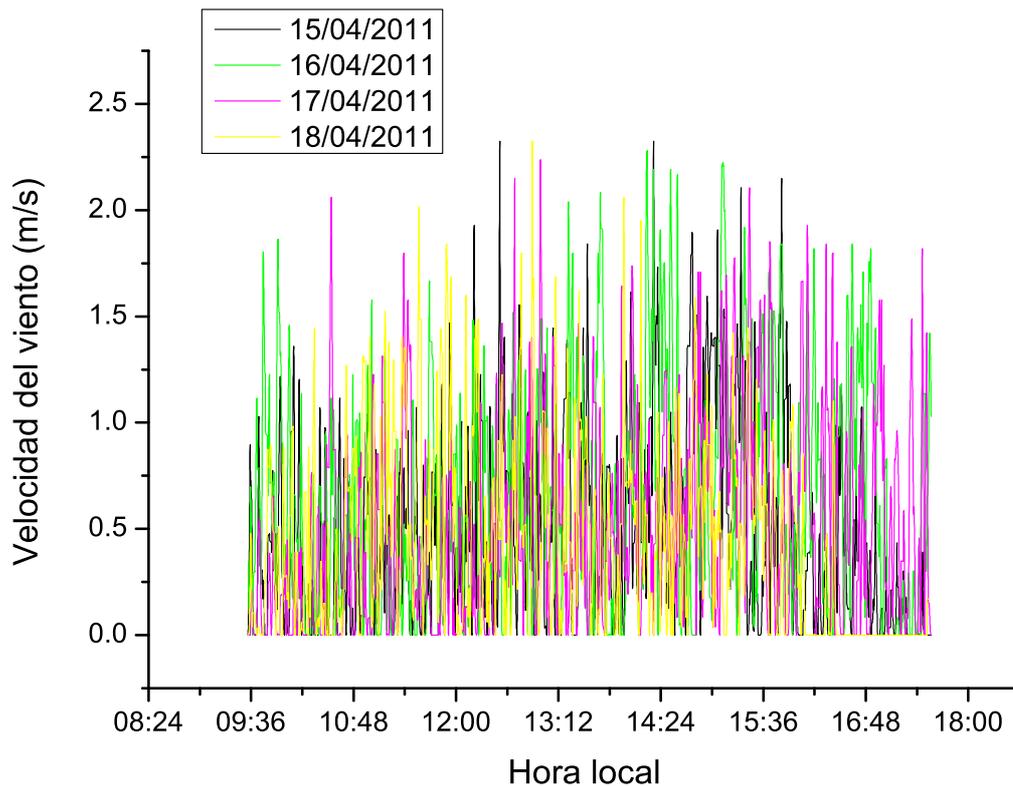


Figura 4.6: Velocidad del viento en los días de prueba 15, 16, 17 y 18 de abril de 2011.

Fecha	T_{ini} (°C)	T_{fin} (°C)	DT (°C)	T_{amb} (°C)	Vel (m/s)	H (MJ/m ²)	H_{dia} (MJ)	Q_u (MJ)	Q_u/H (m ²)	$(T_{ini} - T_{amb})/H$ (°Cm ² /MJ)	Eficiencia %
02/16/2011	2.98	45.59	42.61	30.10	1.13	24.17	55.59	28.89	1.19	-1.12	51.97
02/17/2011	10.30	51.00	40.70	30.03	0.98	23.05	53.03	27.60	1.19	-0.85	52.03
01/27/2011	18.22	58.42	40.20	30.86	0.70	24.50	56.36	27.26	1.11	-0.51	48.36
04/14/2011	18.45	54.72	36.27	38.35	0.49	20.21	46.49	22.16	1.09	-0.98	47.68
04/25/2011	19.35	52.54	33.18	35.30	0.39	17.45	40.15	20.28	1.16	-0.91	50.51
04/23/2011	23.15	57.51	34.35	33.96	0.47	18.81	43.27	20.99	1.11	-0.57	48.52
01/20/2011	27.89	67.08	39.18	35.14	0.59	24.66	56.73	26.57	1.07	-0.29	46.83
04/24/2011	36.68	65.75	29.07	33.70	0.67	17.76	40.86	17.76	1.00	0.16	43.48
04/26/2011	41.02	70.18	29.16	38.16	0.64	17.91	41.19	17.82	0.99	0.15	43.26
01/21/2011	43.50	79.65	36.15	32.63	1.31	24.44	56.22	24.51	1.00	0.44	43.60
04/19/2011	45.02	77.04	32.02	35.39	0.56	20.20	46.46	19.56	0.96	0.47	42.11
04/17/2011	45.94	77.34	31.40	36.99	0.52	19.96	45.91	19.19	0.96	0.44	41.80
01/22/2011	49.19	83.64	34.44	33.31	0.03	24.42	56.18	23.36	0.95	0.65	41.57
04/21/2011	49.37	81.92	32.55	38.71	0.70	21.01	48.34	19.89	0.94	0.50	41.15
04/20/2011	49.98	80.83	30.85	36.13	0.55	20.10	46.23	18.85	0.93	0.68	40.79
04/15/2011	52.71	75.92	23.20	32.98	0.49	16.28	37.45	14.18	0.87	1.21	37.86
04/18/2011	58.36	83.16	24.79	33.84	0.43	17.75	40.84	15.15	0.85	1.38	37.10
04/16/2011	63.89	91.00	27.11	36.28	0.66	19.33	44.47	16.56	0.85	1.42	37.24

H_{dia} : Insolación total sobre el colector en todo el día de prueba $H_{tot} = H A$

A: Área de captación

Tabla 4.1: Valores de la prueba diurna conforme a la NMX-ES-004.

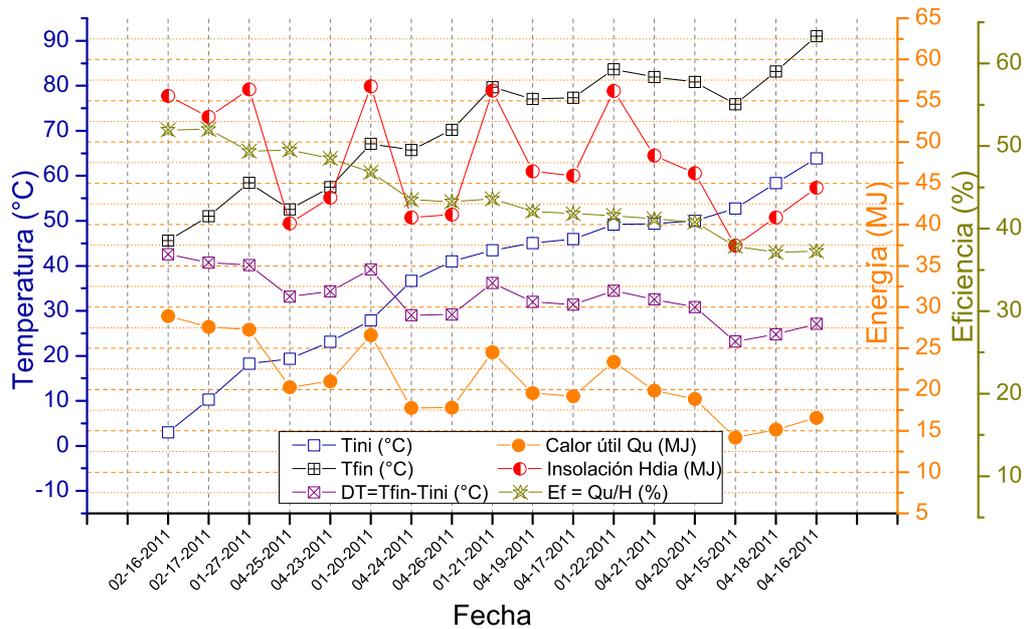


Figura 4.7: Gráfica de temperaturas, insolación global, calor útil y eficiencia del calentador solar de agua, en la etapa diurna de la prueba de acuerdo a la NMX-ES-004.

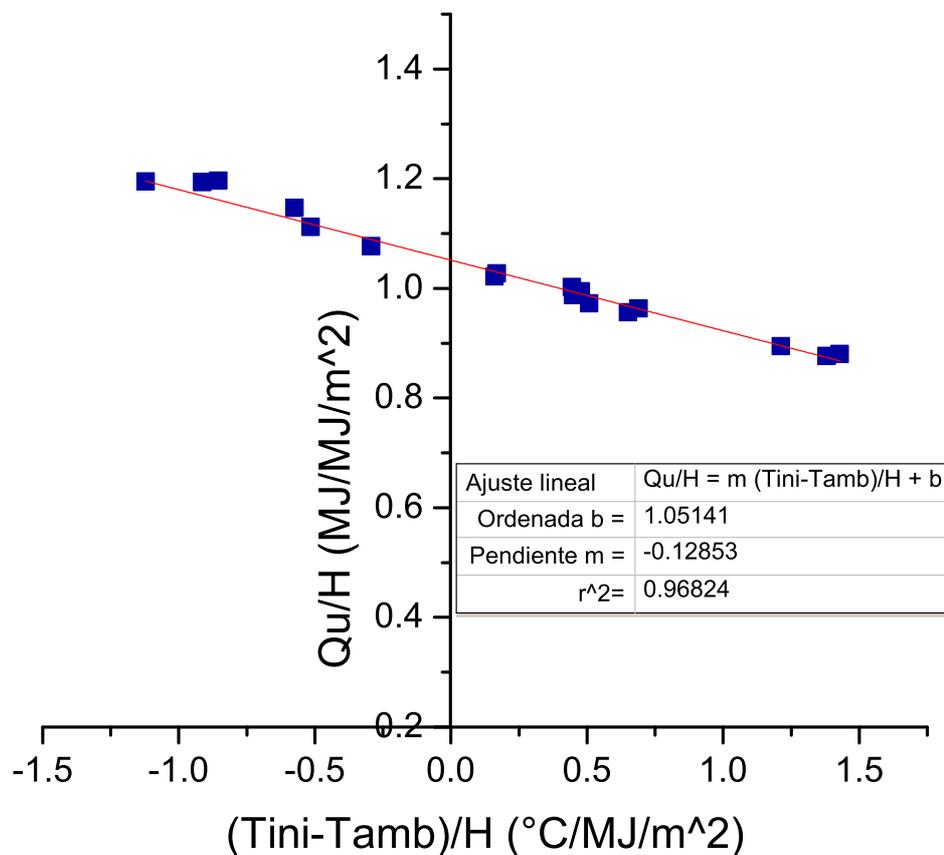


Figura 4.8: Curva característica del calentador solar de agua, etapa diurna de la prueba NMX-ES-004.

calentador de agua y el ambiente, el sistema perderá $0.1285(MJ)$, parámetro que explica la disminución en la eficiencia a medida que la temperatura de prueba aumenta.

Valores de la prueba en la etapa nocturna.

En la tabla 4.2 se muestran los valores de la etapa nocturna de la prueba de acuerdo a la norma. La caracterización del calentador en la etapa nocturna se realiza mediante el cálculo de un ajuste lineal entre los datos de pérdida de calor $Q_{per,nocturno}$ y la diferencia entre la temperatura inicial de prueba y la temperatura ambiente promedio $(T_{ini} - T_{amb})_{nocturno}$, conforme a lo establecido en la ecuación 4.5.

Fecha	Tini °C	Tfin °C	Tfin-Tini °C	Tamb °C	Qper MJ	Tini-Tamb °C	Vel m/s
16-04-2011	91.00	81.84	-9.16	26.82	-6.2150	64.18	0.240
22-01-2011	83.64	75.89	-7.74	19.91	-5.2534	63.72	0.216
18-04-2011	83.16	75.38	-7.78	26.91	-5.2782	56.25	0.153
21-04-2011	81.92	74.86	-7.06	27.68	-4.7876	54.24	0.285
20-04-2011	80.83	72.83	-8.00	27.86	-5.4314	52.97	0.239
21-01-2011	79.65	73.00	-6.64	19.92	-4.5072	59.72	0.439
17-04-2011	77.34	69.79	-7.54	24.23	-5.1195	53.11	0.192
19-04-2011	77.04	69.32	-7.72	26.17	-5.2361	50.87	0.190
15-04-2011	75.92	68.42	-7.49	25.71	-5.0846	50.20	0.400
26-04-2011	70.18	65.52	-4.65	27.83	-3.1580	42.35	0.296
20-01-2011	67.08	62.65	-4.42	20.71	-3.0037	46.37	0.353
24-04-2011	65.75	61.65	-4.09	28.12	-2.7786	37.63	0.051
24-04-2011	57.51	54.19	-3.31	27.98	-2.2493	29.52	0.089
18-02-2011	56.38	51.80	-4.58	19.62	-3.1105	36.76	0.200
25-04-2011	52.54	50.81	-1.73	28.30	-1.1738	24.24	0.025
17-02-2011	51.00	47.97	-3.02	21.08	-2.0540	29.91	0.162
16-02-2011	45.59	43.53	-2.05	21.14	-1.3949	24.44	0.078

Tabla 4.2: Valores de la prueba, etapa nocturna, conforme a la NMX-ES-004.

La figura 4.9 es la gráfica de los valores de pérdida de calor contra la diferencia de temperatura inicial de prueba y la temperatura ambiente nocturna.

El ajuste lineal de tales valores produce la ecuación característica del calentador solar para la etapa nocturna de la prueba, de modo que:

$$Q_{per_{nocturno}} = 0.1135 \left(\frac{MJ}{\circ C} \right) (T_{ini} - T_{amb})_{nocturna} - 1.3121(MJ) \quad (4.11)$$

implica que el calentador solar tiene un coeficiente de pérdidas nocturno de $U_{nocturno} = 0.1135 \left(\frac{MJ}{\circ C} \right)$. El valor de la ordenada al origen de ecuación anterior 4.11 puede ser un indicativo de la energía que el calentador aún recibió después de iniciada la etapa nocturna, pues ésta dió inicio al rededor de las 5 pm cuando en el día aún restaban algunas horas de sol y de la capacidad térmica del aislamiento como del tanque.

Las gráficas de la temperatura ambiente y de velocidad del viento a lo largo de la etapa nocturna para el 15, 16, 17 y 18 de abril de 2011 se muestran en las figuras 4.10 y 4.11 respectivamente, mientras que las gráficas de los días de prueba restantes se incluyen en el apéndice A.

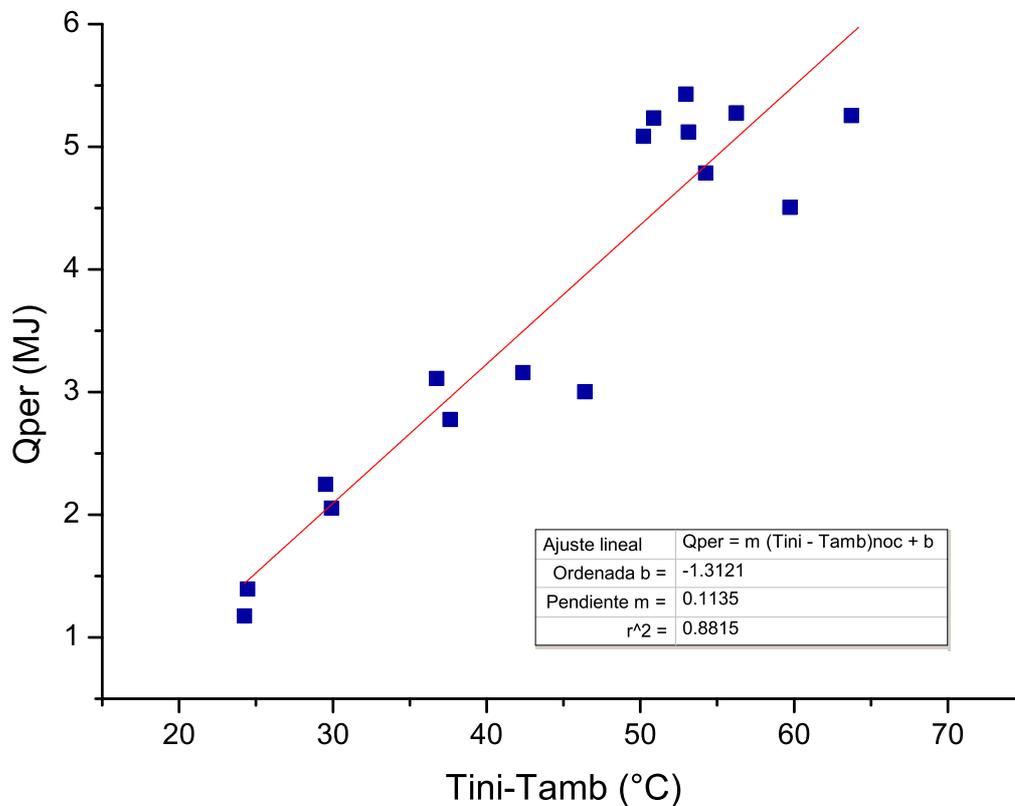


Figura 4.9: Curva característica del calentador en la etapa nocturna de la prueba NMX-ES-004.

4.3. Prueba de dos días de exposición.

La segunda prueba sobre el calentador solar consistió en una exposición a dos días completos de insolación sin extracción alguna de agua, a fin de determinar la temperatura máxima alcanzable por el calentador en ese tiempo.

Los incrementos de temperatura alcanzables con el calentador en un día completo de exposición con buena insolación se encuentran en un rango de 30 (°C) a 40(°C), de modo que para los propósitos de la nixtamalización es necesario dejar el calentador expuesto a dos jornadas de insolación, para alcanzar temperaturas cercanas a la de ebullición del agua.

La prueba se realizó en dos sesiones con fecha 08/02/2011 y 23/02/2011, las temperaturas en el inicio de la prueba fueron de 23.5(°C) y 10.21 (°C) respectivamente. La elección de estos valores de temperatura se debe a la

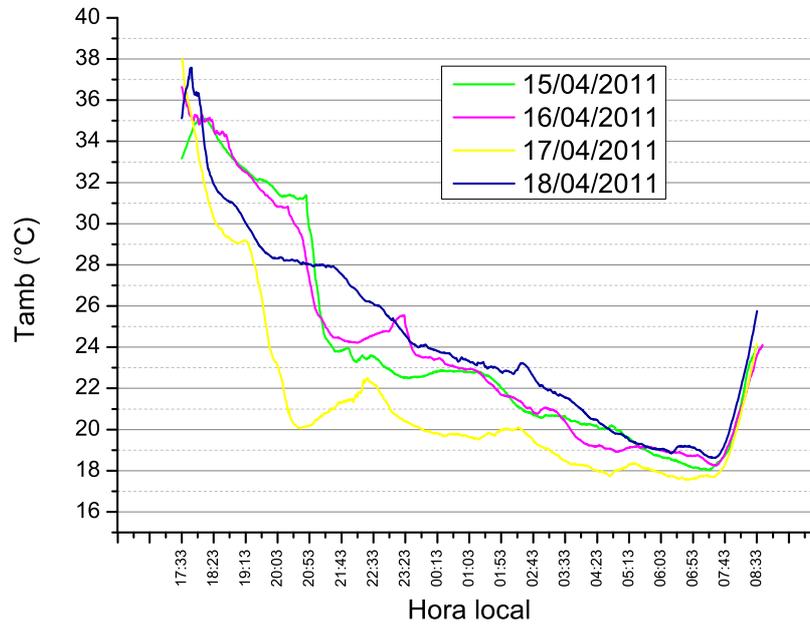


Figura 4.10: Temperatura ambiente de los días 15, 16, 17 y 18 de abril de 2011, en la etapa nocturna de la prueba según la NMX-ES-004.

Fecha	Tini °C	Tfin °C	DT °C	Tamb °C	Vel m/s	Tini-Tamb °C	H MJ/m ²	Htot MJ	Qu MJ	Qu/H m ²	(Tini-Tamb)/H °Cm ² /MJ	Ef %
08/02/2011	23.53	64.52	40.90	29.61	0.6742	-6.0772	24.562	56.494	25.053	1.01	-0.247	44.34
08/02/2011	59.02	92.87	33.84	28.11	0.2860	30.905	25.056	57.628	20.685	0.82	1.233	35.89
23/02/2011	10.21	51.40	41.18	28.02	0.8833	-17.806	23.268	53.518	25.171	1.08	-0.765	47.03
23/02/2011	47.47	81.56	34.08	29.26	0.0296	18.217	24.292	55.872	20.834	0.85	0.749	37.28

Tabla 4.3: Valores de la prueba de exposición de 2 días, etapa diurna.

intención de hacer una prueba que se asemeje a la situación en la que el calentador tenga que operar en un lugar con condiciones muy desfavorables de temperatura de agua (10(°C)), como es el caso de ciudades situadas a grandes altitudes como Toluca en el Estado de México o aquellas que durante el invierno presentan bajas temperaturas, así como en aquellos lugares donde las temperaturas son menos extremas.

De acuerdo con resultados de la prueba de dos días y con los obtenidos en la prueba realizada conforme a la NMX-ES-004, el calentador evaluado puede alcanzar temperaturas superiores a los 90 (°C); la temperatura máxima alcanzada en las pruebas fue de 92.87 (°C), registrada en la prueba de exposición de dos días (ver tabla4.3).

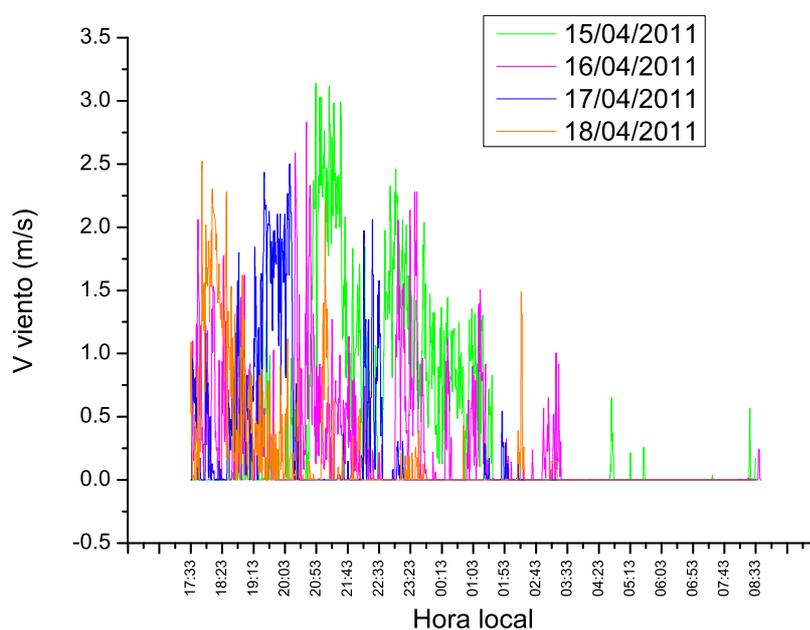


Figura 4.11: Velocidad del viento en los días 15, 16, 17 y 18 de abril de 2011, en la etapa nocturna de la prueba según la NMX-ES-004.

Debido a que el calentador es más eficiente en menor sea la temperatura de operación, los mayores aumentos de temperatura se presentan cuando la temperatura inicial de prueba es baja, así cuando ésta tiene valores de $10(^{\circ}\text{C})$ o $20(^{\circ}\text{C})$ se pueden alcanzar al final del día incrementos de alrededor de $41(^{\circ}\text{C})$, mientras que cuando la temperatura al inicio de la jornada de exposición es de entre $50(^{\circ}\text{C})$ y $60(^{\circ}\text{C})$ el incremento es un tanto mayor a $30(^{\circ}\text{C})$. De acuerdo con lo anterior, durante el periodo de 2 días el incremento de temperatura alcanzable puede ser de $70(^{\circ}\text{C})$, como se puede apreciar en los datos de la tabla 4.3 y en la gráfica 4.12. Es pertinente hacer la aclaración de que estos incrementos de temperatura dependen de los valores de la temperatura ambiente, velocidad del viento y sobre todo de los niveles de irradiancia disponible en el día, niveles que fueron altos en los días de la prueba para los cuales $H > 23 \left(\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}\right)$ en el plano del captador.

Por otro lado, de acuerdo a los valores de la prueba NMX-ES-004, para una temperatura de $50(^{\circ}\text{C})$ y $60(^{\circ}\text{C})$ es posible alcanzar incrementos de temperatura de alrededor de $30(^{\circ}\text{C})$ con niveles de irradiancia de $H = 20 \left(\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}\right)$, como lo muestran los datos de los días 16 y 20 de abril de 2011 de la tabla 4.1.

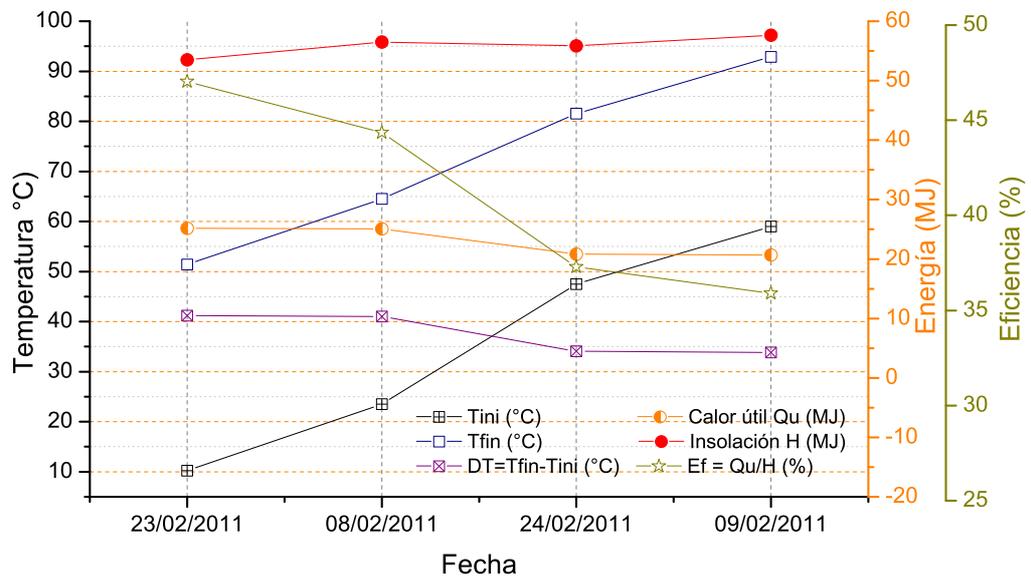


Figura 4.12: Curvas de temperatura, energía y eficiencia de la prueba de exposición de 2 días.

Así que se puede esperar que después de un tiempo de exposición de dos días con niveles de $H \geq 20 \left(\frac{MJ}{m^2}\right)$, se obtengan incrementos de temperatura de alrededor de $70(^{\circ}C)$, lo que significa que con temperaturas de inicio de operación $T_{ini} \geq 20(^{\circ}C)$, el calentador solar podría alcanzar temperaturas cercanas a los $90(^{\circ}C)$, temperatura requerida en el proceso de nixtamalización.

Las gráficas de los niveles de irradiancia global, velocidad del viento y temperatura ambiente de los días en los que se realizó la prueba de dos días de exposición se presentan en el apéndice A.

Capítulo 5

Potencial de ahorros en el proceso de nixtamalización con la introducción de calentadores solares de agua.

En este capítulo se presenta el análisis de los potenciales de ahorro en el consumo de gas l.p., ahorro económico y cantidad de CO_2 evitado, con la introducción de los calentadores solares de agua en el proceso de nixtamalización en las totillerías del país.

En la sección 5.1 se describe la metodología empleada para calcular los consumos energéticos y ahorros potenciales en el proceso de nixtamalización que emplea calentadores solares de agua, considerando condiciones ideales de insolación.

En la sección 5.2 se muestra el ahorro posible a lo largo del año, tomando en cuenta los valores de irradiación disponibles para algunas ciudades del país, así como el costo y el tiempo de retorno de la inversión de los calentadores.

5.1. Cálculo de ahorros posibles con participación del calentador solar de agua en el proceso de nixtamalización.

De acuerdo con lo establecido en la sección 3.2, la nixtamalización se puede realizar obteniendo resultados satisfactorios en términos de la calidad de las masas producidas, de aumento en la cantidad de calcio en el maíz y de minimización de pérdidas de materia, con un proceso similar al descrito como el de menores pérdidas de materia por Pflugfelder et.al. en su evaluación de 5 métodos distintos de nixtamalización practicados en dos distintas tortillerías (Pflugfelder et al., 1988).

Dicho proceso consiste en el calentamiento de los insumos de la nixtamalización hasta una temperatura de 86 (°C), momento en el cual se elimina el aporte de energía, dando comienzo a un lento enfriamiento sin intervención de ningún tipo durante la etapa de reposo, etapa de gran relevancia pues es precisamente durante este lapso que suceden los principales cambios en todo el grano de maíz.

Como se mencionó en el capítulo 3, dichos cambios incluyen el reblandecimiento del pericarpio, difusión de calcio hacia el interior del grano, gelatinización del almidón responsable de la textura de la masa, etc. Sabemos también que estos cambios comienzan a presentarse desde una temperatura superior a los 62 (°C) y que por el contrario presentan menor dependencia de la temperatura máxima que se pudiera alcanzar durante la cocción y del tiempo durante el cual ésta se mantiene, en cambio el tiempo de reposo resulta tener una mayor importancia para que éstos cambios tengan efecto.

Por las razones aquí expuestas, es posible proponer el empleo del calentador solar en el proceso de nixtamalización de la siguiente manera: debido a que se puede realizar una adecuada nixtamalización con temperaturas relativamente bajas, el calentador puede ser empleado para, una vez alcanzada la máxima temperatura posible en él después de dos días de exposición sin extracción alguna, descargar agua caliente en el tanque de cocción que contiene al $Ca(OH)_2$ y al maíz por nixtamalizar, el resultado de esto será una mezcla con una temperatura posiblemente menor a la propuesta por Pflugfelder y colaboradores; para alcanzarla, se puede hacer uso del quemador con el que los propietarios ya cuentan y sin embargo los consumos de gas L.P., las emisiones de dióxido de carbono y los costos serán todavía menores.

Para conocer la temperatura que tendrá la mezcla, una vez realizada la

descarga de agua caliente en el tanque de cocción, podemos ahora idealizar al tanque de cocción como un sistema aislado y realizar el balance de energía siguiente.

$$\Delta U_{sistema} = \Delta U_{maiz} + \Delta U_{Ca(OH)_2} + \Delta U_{agua} = 0 \quad (5.1)$$

El cambio de energía interna de cada uno de los componentes es igual a $\Delta U = mC(T_{ini} - T_{fin})$ donde m es la masa de cada componente, C es la capacidad térmica, T_{ini} y T_{fin} son la temperatura inicial y final de cada elemento. De esta manera la ecuación 5.1 queda:

$$m_{maiz}C_{maiz}(T_{amb} - T_{fin}) + m_{Ca(OH)_2}C_{Ca(OH)_2}(T_{amb} - T_{fin}) + m_{agua}C_{agua}(T_{ini_{agua}} - T_{fin}) = 0 \quad (5.2)$$

En la ecuación anterior 5.2, la temperatura inicial del maíz y del hidróxido de calcio es la temperatura ambiente, mientras que una vez llevada acabo la mezcla, cada uno de los componentes tendrá la misma temperatura final T_{fin} . De modo que una vez realizada el álgebra correspondiente, la temperatura final de todo el sistema puede ser calculada mediante la siguiente expresión.

$$T_{fin} = \frac{T_{amb} (m_{maiz}C_{maiz} + m_{Ca(OH)_2}C_{Ca(OH)_2}) + m_{agua}C_{agua}T_{ini_{agua}}}{m_{maiz}C_{maiz} + m_{Ca(OH)_2}C_{Ca(OH)_2} + m_{agua}C_{agua}} \quad (5.3)$$

Una vez que se ha determinado la temperatura final, se puede calcular la cantidad de energía que es necesario proporcionar mediante el uso del quemador a fin de alcanzar la temperatura de nixtamalización de $T_{nixt} = 86(^{\circ}C)$.

El calentador es capaz de aumentar la temperatura de 165 (l) de agua hasta los 92($^{\circ}C$) (ver sección 4.3); suponiendo que en todo momento se pueda alcanzar esta temperatura, al evaluar la ecuación 5.3 con este dato y con los valores de las propiedades del agua, el hidróxido de calcio y del maíz, podemos determinar la temperatura final de la mezcla; no se consideran las pérdidas de llevar el agua desde el calentador solar hasta el tanque de cocción las cuales pueden ser del orden de 3 ($^{\circ}C$) sin embargo, pueden reducirse con un adecuado aislamiento en la tubería de descarga. También se puede conocer el consumo de gas L.P., costos y emisiones de dióxido de carbono asociados

Ciudad	$T_{f-mezcla}$ °C	ΔT_{nixt}^+ °C	Q_{util} kJ	E_{total} kJ	Gas L.P. kg	Costo \$	Emisiones kg CO_2
Campeche, Camp.	74.49	11.51	6.570	14.599	0.2896	3.22	0.9577
Villahermosa, Tab.	74.95	11.05	6.311	14.024	0.2782	3.10	0.9200
Tuxtla Gutiérrez, Chis.	73.99	12.01	6.859	15.243	0.3023	3.37	0.9999
Chilpancingo, Gro.	73.11	12.89	7.362	16.360	0.3245	3.61	1.0732
Cuernavaca, Mor.	73.08	12.92	7.377	16.394	0.3252	3.62	1.0755
Oaxaca, Oax.	72.84	13.16	7.514	16.699	0.3312	3.69	1.0954
Morelia, Mich.	72.20	13.80	7.880	17.511	0.3473	3.87	1.1488
Puebla, Pue.	71.88	14.12	8.063	17.918	0.3554	3.96	1.1754
Distrito Federal	71.61	14.39	8.215	18.256	0.3621	4.03	1.1976
Toluca, Méx.	70.70	15.30	8.733	19.408	0.3850	4.28	1.2731

+ Diferencia entre la temperatura final de mezcla y la temperatura de nixtamalización ($T_{nixt} = (86^\circ C)$).

Cálculos realizados de acuerdo a lo establecido en la sección 3.3 para 100 (kg) de maíz, 100 (l) de agua y 2 (kg) de $Ca(OH)_2$.

Tabla 5.1: Consumo de gas L.P., emisiones de CO_2 y costos asociados a la nixtamalización con empleo de calentador solar de agua.

a la nixtamalización que emplea un calentador de gas L.P., así como los consumos evitados en comparación con la situación actual (no se consideran las pérdidas de llevar el agua desde el calentador hasta el tanque de cocción).

La tabla 5.1 muestra el consumo energético, de gas L.P., emisiones de CO_2 y costos asociados a la nixtamalización, resultado de la incorporación de un calentador solar de agua en el proceso de nixtamalización, donde además se ha tomado en cuenta que de acuerdo a los diversos estudios sobre este proceso, no es necesario alcanzar temperaturas de cocción iguales a las del punto de ebullición del agua. Los costos evitados se muestran en la tabla 5.2.

Ciudad	Consumos evitados al incluir un Calentador Solar					
	Q_{util} kJ	E_{total} kJ	Gas L.P. kg	Costo \$	Emisiones kg CO_2	Evitados %
Campeche, Camp.	35.454	78.786	1.56	17.39	5.17	84.4
Villahermosa, Tab.	34.711	77.136	1.53	17.03	5.06	84.6
Tuxtla Gutiérrez, Chis.	35.180	78.178	1.55	17.26	5.13	83.7
Chilpancingo, Gro.	35.177	78.172	1.55	17.26	5.13	82.7
Cuernavaca, Mor.	34.692	77.093	1.53	17.02	5.06	82.5
Oaxaca, Oax.	35.029	77.843	1.54	17.19	5.11	82.3
Morelia, Mich.	35.349	78.554	1.56	17.34	5.15	81.8
Puebla, Pue.	35.344	78.542	1.56	17.34	5.15	81.4
Distrito Federal	35.623	79.163	1.57	17.48	5.19	81.3
Toluca, Méx.	36.183	80.406	1.59	17.75	5.27	80.6

Valores para 100 (kg) de maíz, 100 (l) de agua y 2 (kg) de $Ca(OH)_2$.

Tabla 5.2: Consumo de gas L.P., emisiones de CO_2 y costos evitados mediante el empleo del calentador solar de agua.

En este caso, la temperatura ambiente es la variable que determina el valor de la temperatura final de la mezcla. Como la temperatura de nixta-

malización es la misma para todas las localidades, la temperatura ambiente también influye sobre la cantidad de energía que es preciso aportar mediante el quemador de gas L.P. y en consecuencia, también sobre el valor de los consumos evitados.

Evidentemente las localidades con climas fríos demandan mayores consumos energéticos y por consecuencia, los ahorros serán menores que en las localidades mas calurosas, pero como podemos apreciar en las tablas 5.1 y 5.2, la diferencia entre aquellas con temperaturas bajas y las más calientes es del orden de 4%.

	E_{total} TJ	Gas L.P. Ton	Costo MDP	Emisiones CO_2 Ton
Situación Actual	3,493.467	69,293.244	771.234	229,171.462
Con calentador solar	698.693	13,858.649	154.247	45,834.292
Evitado 80 %	2,794.774	55,434.595	616.987	183,337.170

Ahorros sobre un consumo de 3.5 millones de toneladas de maíz.

Tabla 5.3: Ahorros anuales posibles en la nixtamalización a nivel nacional.

Por lo anterior se puede afirmar que al incluir un calentador solar se pueden obtener idealmente ahorros superiores al 80%, cifra que significa a nivel nacional un ahorro económico de 616.987 millones de pesos, como se muestra en la tabla 5.3.

5.2. Potencial de ahorro considerando los valores de insolación en la República Mexicana.

Tomando en cuenta los valores obtenidos de la prueba MMX-ES-004 mostrados en la tabla 4.1 y los valores de la prueba de exposición de dos días (ver tabla 4.3), la temperatura límite del colector es alcanzable si la temperatura al inicio del segundo día de exposición es de por lo menos 60 (°C), temperatura que se consigue con agua al inicio del primer día con temperaturas de entre 20 (°C) y 30 (°C). Si al inicio del segundo día de exposición se tienen 60 (°C) el incremento de temperatura necesario para alcanzar la

temperatura límite es de 32 (°C); la energía requerida para tal incremento $Q_u = m_{agua}C_{agua}\Delta T$, recordando que la capacidad del calentador es de 165 (l) y tomando un valor de la capacidad térmica específica del agua a 75 (°C) igual a $C = 4.194(\frac{kJ}{kg})$, es de 19.594 (MJ).

A partir de esta información y haciendo uso de la ecuación característica del calentador solar (ecuación 4.10), podemos determinar el valor de la irradiancia requerida sobre el colector para tales condiciones mediante la expresión 5.4, derivada de la ecuación característica.

$$H = \frac{1}{1.0394(m^2)} \left(Q_u + 0.14 \left(\frac{MJ}{^\circ C} \right) (T_{ini} - T_{amb}) \right) \quad (5.4)$$

Al evaluar la ecuación anterior para las condiciones de cada una de las localidades seleccionadas, se obtienen los requerimientos mínimos de insolación global H_t diaria incidente sobre el colector en cada lugar, los cuales deben ser de entre 22 (MJ/m^2) y 24 (MJ/m^2), valores bastante elevados.

Sin embargo, si tomamos en cuenta que el tanque contiene 165 (l) de agua y que para la nixtamalización se requieren 100 (l), se cuenta aún con 65 (l) de agua a $T_{max} = 92(^\circ C)$, temperatura que siempre es alcanzable aumentando tanto como sea necesario los días de exposición. Ahora bien, la temperatura que se tendrá dentro del calentador solar después de llenarlo nuevamente con agua a temperatura ambiente está dada por la ecuación 5.5, resultante de un balance de energía considerando al tanque como un sistema aislado.

$$T_{tanque} = \frac{65(kg)T_{max} + 100(kg)T_{ambiente}}{165(kg)} \quad (5.5)$$

La tabla 5.4 muestra los valores de la temperatura dentro del tanque una vez que se ha llenado con agua a temperatura ambiente; la temperatura inicial podrá ser por tanto superior a 37 (°C) al inicio del primer día de exposición a la radiación solar, lo cual constituye una gran ventaja.

Por otro lado, los mapas de insolación mostrados en las figuras B.1 y B.2 del apéndice B tomados de (Almanza et al., 2003), muestran los valores mínimos y máximos diarios disponibles en la República Mexicana, niveles que como es evidente son menores a los requerimientos energéticos calculados a partir de una temperatura de 60 (°C), sin embargo, éstos son registrados sobre una superficie horizontal y la inclinación de 27° del colector puede tener un efecto en la cantidad de energía que puede ser captada; de modo

Ciudad	T_{uamb} (°C)	T_{tanque} (°C)
Campeche, Camp.	26.4	52.24
Villahermosa, Tab.	28.1	53.27
Tuxtla Gutiérrez, Chis.	24.5	51.09
Chilpancingo, Gro.	21.2	49.09
Cuernavaca, Mor.	21.1	49.03
Oaxaca, Oax.	20.2	48.48
Morelia, Mich.	17.8	47.03
Puebla, Pue.	16.6	46.30
Distrito Federal	15.6	45.70
Toluca, Méx.	12.2	43.64

Tabla 5.4: Temperatura dentro del tanque después de llenarlo con 65 (l) de agua a 92 (°C) y 100 (l) a temperatura ambiente.

que es preciso determinar la cantidad de insolación que incidirá en el colector inclinado a lo largo del año, tal y como se describe en el apéndice C.

Se realizó el cálculo para todas las ciudades analizadas de acuerdo al análisis descrito en el apéndice C. Uno de los datos más relevantes es el hecho de que el ángulo de inclinación del colector favorece la ganancia de apenas un 3% a un 5% con respecto a los niveles de insolación horizontal para las localidades que se encuentran dentro del trópico, en las cuales un ángulo menor podría tener mejores resultados. De manera que se determinó el valor promedio de la insolación incidente sobre el colector a 27° tomando en cuenta la latitud de cada ciudad.

A partir del valor de la insolación incidente en el colector y de la temperatura en el tanque después de mezclar 65 (l) de agua a 92 (°C) con 100 (l) de agua a temperatura ambiente, se puede calcular el valor del calor útil obtenible en el calentador haciendo uso de su ecuación característica (ecuación 4.10); una vez hecho esto, se puede conocer el valor de la temperatura al final del día de exposición y el empleo de la ecuación característica para el periodo nocturno (ecuación 4.11) proporcionará las pérdidas de calor durante la noche; de modo que también se puede determinar la temperatura al inicio del segundo día de exposición y repitiendo el ejercicio con la ecuación característica del periodo diurno, se determina la temperatura final del segundo día de exposición. Considerando que ahora estas temperaturas y no una de 92 (°C) son las máximas disponibles, se tiene que repetir el ejercicio para ajustar nuevamente los valores, sin embargo después de esta primera iteración, la temperatura máxima ya no disminuye más del 1% o 2%.

La tabla 5.5 muestra los valores de insolación promedio, calor útil durante los días de exposición, pérdidas durante la noche y las temperaturas máximas

alcanzables con el calentador solar de agua en cada una de las ciudades analizadas, tomando en cuenta los niveles de insolación promedio anual para la República Mexicana.

Ciudad	Latitud	T_{amb} (°C)	Primer día				Segundo día			
			T_{tanque} (°C)	$H_{t,i}^*$ (MJ/m ²)	Q_u (MJ)	T_{fin} (°C)	Q_{per} (MJ)	T_{ini} (°C)	Q_u (MJ)	T_{fin} (°C)
Campeche	19.9	26.4	52.24	17.99	15.59	74.82	4.18	68.76	13.47	88.26
Villahermosa	18.0	28.1	53.27	16.45	14.07	73.64	3.86	68.05	12.16	85.67
Tuxtla	16.8	24.5	51.09	16.94	14.39	71.93	4.07	66.03	12.47	84.09
Chilpancingo	17.6	21.2	49.09	17.11	14.40	69.95	4.22	63.83	12.51	81.94
Cuernavaca	18.9	21.1	49.03	21.98	19.52	77.29	5.07	69.95	16.83	94.31
Oaxaca	17.0	20.2	48.48	19.85	17.24	73.44	4.73	66.59	14.91	88.17
Morelia	19.7	17.8	47.03	18.29	15.48	69.44	4.55	62.85	13.44	82.32
Puebla	19.0	16.6	46.30	20.29	17.51	71.66	4.94	64.51	15.17	86.48
D.F.	19.1	15.6	45.70	17.89	14.94	67.32	4.56	60.72	13.00	79.55
Toluca	19.1	12.2	43.64	17.89	14.77	65.01	4.68	58.23	12.89	76.89

* Insolación promedio anual disponible para un colector con ángulo inclinación de $\beta = 27^\circ$

Tabla 5.5: Temperatura máxima alcanzable con la insolación disponible en la República Mexicana para las ciudades analizadas.

Debido a lo anterior, los valores de ahorros posibles en el proceso de nixtamalización tienen que ser ajustados y los valores finales son los mostrados en las tablas 5.6 y 5.7.

Ciudad	$T_{f-mezcla}$ °C	ΔT_{nixt}^+ °C	Q_{util} kJ	E_{total} kJ	Gas L.P. kg	Costo \$	Emisiones kgCO ₂
Campeche, Camp.	71.76	14.24	8.133	18.074	0.3585	3.99	1.1856
Villahermosa, Tab.	70.30	15.70	8.962	19.916	0.3950	4.40	1.3065
Tuxtla Gutiérrez, Chis.	68.19	17.81	10.172	22.603	0.4483	4.99	1.4828
Chilpancingo, Gro.	65.73	20.27	11.572	25.715	0.5101	5.68	1.6869
Cuernavaca, Mor.	74.78	11.22	6.408	14.241	0.2825	3.14	0.9342
Oaxaca, Oax.	70.03	15.97	9.116	20.259	0.4018	4.47	1.3290
Morelia, Mich.	65.10	20.90	11.933	26.518	0.5260	5.85	1.7396
Puebla, Pue.	67.83	18.17	10.375	23.055	0.4573	5.09	1.5124
Distrito Federal	62.49	23.51	13.426	29.836	0.5918	6.59	1.9572
Toluca, Méx.	59.63	26.37	15.057	33.460	0.6637	7.39	2.1950

+ Diferencia entre la temperatura final de mezcla y la temperatura de nixtamalización ($T_{nixt} = (86^\circ C)$).
Cálculos para 100 (kg) de maíz, 100 (l) de agua y 2 (kg) de $Ca(OH)_2$.

Tabla 5.6: Consumo de gas L.P., emisiones de CO₂ y costos asociados a la nixtamalización con empleo de calentador solar de agua, tomando en cuenta los valores de insolación disponible para la República Mexicana.

Finalmente los ahorros a nivel nacional, tomando en cuenta la cantidad de maíz consumido anualmente, son los que se muestran en la tabla 5.8.

Debido a que se necesita una exposición de dos días para alcanzar las temperaturas máximas y tomando en cuenta que la nixtamalización se realiza

Ciudad	Consumos evitados al incluir un Calentador Solar					
	Q_{util} kJ	E_{total} kJ	Gas L.P. kg	Costo \$	Emissiones kg CO_2	Evitados %
Campeche, Camp.	33.890	75.312	1.49	16.63	4.94	80.6
Villahermosa, Tab.	32.060	71.244	1.41	15.73	4.67	78.2
Tuxtla Gutiérrez, Chis.	31.868	70.817	1.40	15.63	4.65	75.8
Chilpancingo, Gro.	30.968	68.818	1.37	15.19	4.51	72.8
Cuernavaca, Mor.	35.661	79.246	1.57	17.49	5.20	84.8
Oaxaca, Oax.	33.428	74.284	1.47	16.40	4.87	78.6
Morelia, Mich.	31.296	69.548	1.38	15.35	4.56	72.4
Puebla, Pue.	33.032	73.405	1.46	16.21	4.82	76.1
Distrito Federal	30.413	67.584	1.34	14.92	4.43	69.4
Toluca, Méx.	29.859	66.353	1.32	14.65	4.35	66.5
Promedio	32.25	71.66	1.42	15.82	4.70	75.51

Valores para 100 (kg) de maíz, 100 (l) de agua y 2 (kg) de $Ca(OH)_2$.

Tabla 5.7: Consumo de gas l.p., emisiones de CO_2 y costos evitados mediante el empleo del calentador solar de agua, tomando en cuenta los niveles de insolación disponible en la República Mexicana.

	E_{total} TJ	Gas L.P. Ton	Costo MDP	Emissiones CO_2 Ton
Situación Actual	3,493.467	69,293.244	771.234	229,171.462
Con calentador solar	855.550	16,969.916	188.875	56,124.091
Evitado 75.51 %	2,637.917	52,323.329	582.359	173,047.371

Ahorros sobre un consumo de 3.5 millones de toneladas de maíz.

Tabla 5.8: Ahorros anuales posibles en la nixtamalización a nivel nacional, tomando en cuenta los niveles existentes de insolación en la República Mexicana.

diariamente, se necesitan dos calentadores solares por cada 100 (kg) de maíz a nixtamalizar, de modo que al utilizarlos de manera alternada se cubra la demanda energética para el proceso. El esquema de utilización de los dos calentadores para la nixtamalización diaria es la que se muestra en la tabla 5.9.

El esquema propuesto se adapta perfectamente a las costumbres en el proceso de nixtamalización, pues esta ocurre generalmente por las tardes, mientras que la etapa de reposo sucede durante el transcurso de la noche; es hasta la madrugada, alrededor de las 5 a.m., que la etapa de reposo finaliza, comenzando el lavado del maíz nixtamalizado para dar paso a su inmediata molienda y producir la masa de la cual se prepararán las tortillas que se

venderan en dicha mañana. La figura 5.1 muestra el esquema del proceso de nixtamalización con la incorporación del calentador solar de agua.

		Dia 1	Dia2	Dia3	Dia 4	Dia 5
Calentador 1	Llenado matutino	SI	NO	SI	NO	
	T inicial	T_{mezcla}	$T_{finexp1} - Q_{per}$	T_{mezcla}	$T_{finexp1} - Q_{per}$	
	Descarga nocturna	NO	SI	NO	SI	
	T final	$T_{finexp1}$	T_{max}	$T_{finexp1}$	T_{max}	
Calentador 2	Llenado matutino		SI	NO	SI	NO
	T inicial		T_{mezcla}	$T_{finexp1} - Q_{per}$	T_{mezcla}	$T_{finexp1} - Q_{per}$
	Descarga nocturna		NO	SI	NO	SI
	T final		$T_{finexp1}$	T_{max}	$T_{finexp1}$	T_{max}

Tabla 5.9: Esquema de utilización de calentadores solares en la nixtamalización diaria de 100 (kg) de maíz.

Se requiere por tanto de una inversión de \$ 22,000.00, por cada 100 (kg) de maíz nixtamalizado, para la adquisición de los dos calentadores solares de agua, mas un porcentaje correspondiente a la instalación de la tubería y válvulas necesarias que puede ser de hasta \$ 2,000.00 o \$ 3,000.00 de pen diendo de la distancia entre el tanque y el punto de descarga. En el capítulo 2 se presentó la tendencia a futuro del precio del gas l.p., de donde es posible concluir que éste seguira aumentando en el futuro inmediato, sin embargo, suponiendo que se mantuviera constante con un valor de 11.13 $\left(\frac{\$}{kg}\right)$ (precio del mes de febrero de 2012), con los ahorros económicos diarios que permiten estos equipos, el tiempo de recuperación de la inversión sería el que se muestra en la tabla 5.10.

Ciudad	Ahorro diario	Recuperación de inversión	
	\$	Años*	Años ^{oo}
Campeche, Camp.	16.6	3.6	4.1
Villahermosa, Tab.	15.7	3.8	4.3
Tuxtla Gutiérrez, Chis.	15.6	3.9	4.3
Chilpancingo, Gro.	15.2	4.0	4.5
Cuernavaca, Mor.	17.5	3.4	3.9
Oaxaca, Oax.	16.4	3.7	4.1
Morelia, Mich.	15.4	3.9	4.4
Puebla, Pue.	16.2	3.7	4.2
Distrito Federal	14.9	4.0	4.5
Toluca, Méx.	14.6	4.1	4.6
Promedio	15.8	3.8	4.3

* Considerado únicamente el costo de 2 calentadores \$ 22,000.0

^{oo} Si se considera un costo adicional de \$ 3,000.00 de instalación

Tabla 5.10: Tiempo de recuperación de la inversión.

Los tiempos de recuperación de la inversión son adecuados pues se encuentran aún en los rangos de las tasas de retorno aceptables, tomando en

cuenta que el tiempo de vida de estos equipos puede ser de hasta 15 años de acuerdo con la información proporcionada por el fabricante. Por otro lado, estos sistemas no requieren un mantenimiento especial y sólo es necesario mantener limpio el vidrio de cada uno de los tubo de calor, sin embargo el desempeño de los mismos puede disminuir por pérdidas de vacío en los tubos y no se puede descartar el rompimiento accidental de alguno de ellos, casos en los que tendría que haber un remplazo de tubos que de acuerdo al fabricante tienen un costo individual de \$ 200.0.

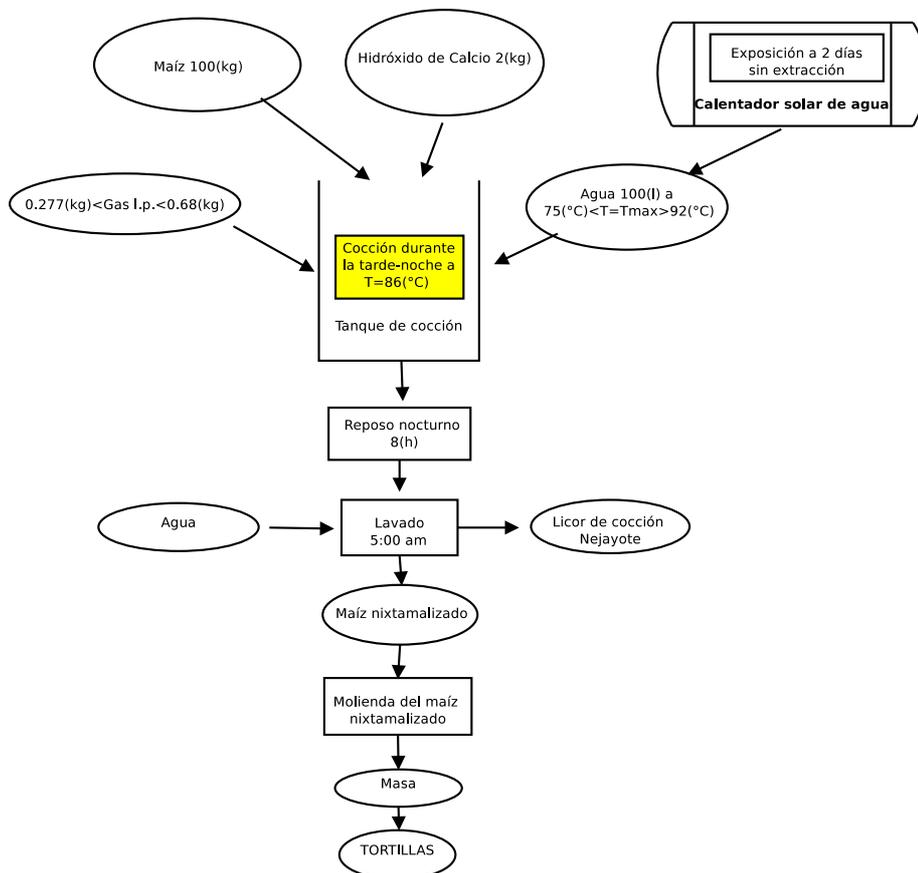


Figura 5.1: Diagrama de flujo de la nixtamalización con calentador solar de agua. Los recuadros significan procesos, mientras que los óvalos representan insumos o subproductos de un proceso.

Capítulo 6

Resumen para la presentación y difusión didáctica de los resultados.

Este capítulo se inserta con la intención de hacer accesible y en breves páginas, los resultados obtenidos a la población a la cual se dirige el presente análisis, a fin de que puedan ser difundidos con facilidad y procurar un mayor impacto social.

¿Cuáles son los costos actuales de Nixtamalizar Maíz?

¿Sabías Que? Cuando coces 100 (kg) de maíz estás consumiendo alrededor de 2 (kg) de gas L.p., gastas poco mas de 22 pesos y contribuyes al calentamiento global con 6.5 (kg) de dióxido de carbono (CO_2), principal gas de efecto invernadero.

¿Y si usaras calentadores solares de agua?

¿Sabías Que? Con un calentador solar se pueden alcanzar temperaturas de entre 76 (°C) y 92(°C); el agua a esa temperatura se puede descargar en el tanque de cocción con el maíz y la cal para nixtamalizar obteniendo una mezcla con una temperatura de entre 60 (°C) y 70 (°C) por lo que te puedes ahorrar hasta un 80 % del consumo y costo del gas (17 pesos de \$ 22).

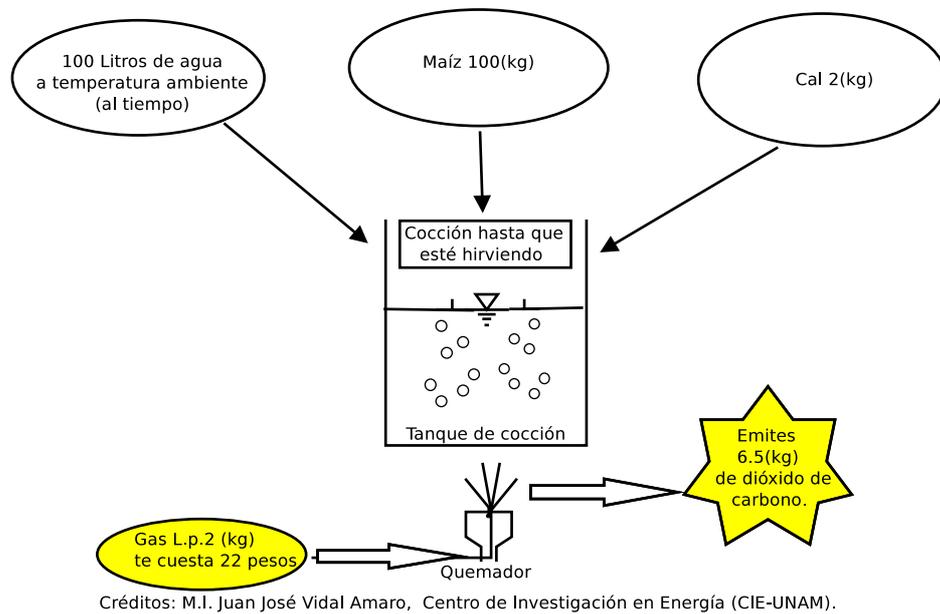


Figura 6.1: Cuanto emites y gastas por cada 100 (kg) de maíz nixtamalizado.

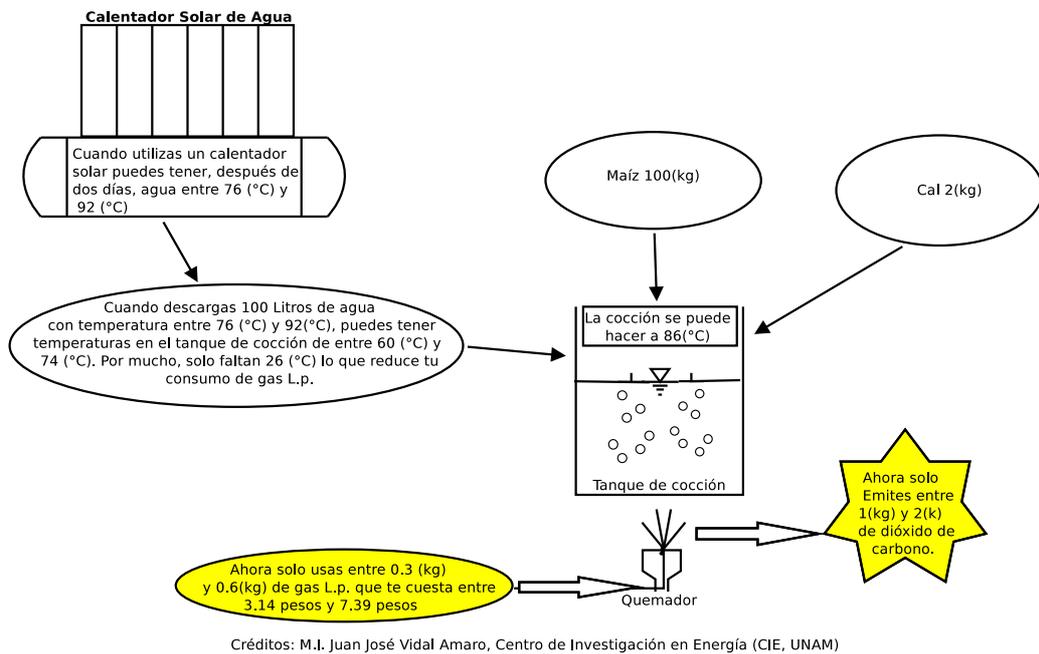


Figura 6.2: Cuanto emites y gastas por cada 100 (kg) de maíz nixtamalizado si utilizas calentadores solares.

Sin embargo, como se requieren dos días de exposición solar para alcanzar esas temperaturas, se necesitan dos calentadores por cada 100 (kg) de maíz para poder nixtamalizar diariamente. El costo de ambos equipos puede estar entre los \$22,000.00 y \$25,000.00 incluyendo el costo de instalación pero el tiempo de recuperación de la inversión es de 3.5 a 4.5 años dependiendo de las condiciones climáticas donde sea instalado, mientras que el calentador tiene un tiempo de vida mayor a 10 años. Aún cuando la inversión es elevada, la Secretaría de Economía tiene un programa enfocado a este sector denominado “Mi tortilla”, en donde te pueden ofrecer el financiamiento necesario, visita la página de internet siguiente: <http://www.economia.gob.mx/mexico-emprende/19-mexico-emprende/115-mi-tortilla>

Ciudad	$T_{f-mezcla}^*$ °C	ΔT_{nixt}^+ °C	E_{total} kJ	Gas L.P. kg	Costo \$	Emisiones kg CO_2	Recuperación de inversión Años
Campeche, Camp.	71.76	8.133	18.074	0.3585	3.99	1.1856	3.6-4.1
Villahermosa, Tab.	70.30	8.962	19.916	0.3950	4.40	1.3065	3.8-4.3
Tuxtla Gutiérrez, Chis.	68.19	10.172	22.603	0.4483	4.99	1.4828	3.9-4.3
Chilpancingo, Gro.	65.73	11.572	25.715	0.5101	5.68	1.6869	4.0-4.5
Cuernavaca, Mor.	74.78	6.408	14.241	0.2825	3.14	0.9342	3.4-3.9
Oaxaca, Oax.	70.03	9.116	20.259	0.4018	4.47	1.3290	3.7-4.1
Morelia, Mich.	65.10	11.933	26.518	0.5260	5.85	1.7396	3.9-4.4
Puebla, Pue.	67.83	10.375	23.055	0.4573	5.09	1.5124	3.7-4.2
Distrito Federal	62.49	13.426	29.836	0.5918	6.59	1.9572	4.0-4.5
Toluca, Méx.	59.63	15.057	33.460	0.6637	7.39	2.1950	4.1-4.6

* Es la temperatura que tendrás al descargar 100 litros de agua caliente a 100 (kg) de maíz.

+ Diferencia entre la temperatura final de mezcla y la temperatura de

nixtamalización ($T_{nixt} = (86^\circ C)$).

Cálculos para 100 (kg) de maíz, 100 (l) de agua y 2 (kg) de $Ca(OH)_2$.

Tabla 6.1: Consumo de gas L.P., emisiones de CO_2 y costos asociados a la nixtamalización con empleo de calentador solar de agua, tomando en cuenta los valores de insolación disponible para la República Mexicana.

El esquema de utilización de ambos calentadores es el que se muestra en la siguiente tabla 6.2.

	Dia 1	Dia2	Dia3	Dia 4	Dia 5
Llenado matutino	SI	NO	SI	NO	
Calentador 1	T inicial T_{mezcla}	$T_{finexp1} - Q_{per}$	T_{mezcla}	$T_{finexp1} - Q_{per}$	
Descarga nocturna	NO	SI	NO	SI	
T final	$T_{finexp1}$	T_{max}	$T_{finexp1}$	T_{max}	
Llenado matutino		SI	NO	SI	NO
Calentador 2	T inicial	T_{mezcla}	$T_{finexp1} - Q_{per}$	T_{mezcla}	$T_{finexp1} - Q_{per}$
Descarga nocturna		NO	SI	NO	SI
T final		$T_{finexp1}$	T_{max}	$T_{finexp1}$	T_{max}

Tabla 6.2: Esquema de utilización de calentadores solares en la nixtamalización diaria de 100 (kg) de maíz.



Figura 6.3: Ahorros en diversas ciudades, ubica aquella con condiciones más parecidas a la tuya.

Capítulo 7

Conclusiones y Trabajo a Futuro.

La producción de maíz nixtamalizado en las zonas urbanas del país es realizada por alrededor de 11 mil pequeños productores, dueños de tortillerías que procesan una cantidad superior a los 3 millones de toneladas de maíz al año, equivalente al 32 % del consumo nacional para uso humano; dicho consumo de maíz representa, con los métodos de nixtamalización actuales, un consumo de por lo menos 69,293 toneladas de gas L.P., que a precios de febrero de 2011 equivalen a una cantidad superior a los 771 Millones de pesos; asociado a esto, las emisiones de CO_2 ascienden a las 229,171 toneladas.

La incorporación de sistemas solares de calentamiento de agua en la producción del maíz nixtamalizado presenta grandes oportunidades de reducción de consumos de gas L.P., costos asociados y emisiones de CO_2 a la atmósfera.

El valor de los ahorros posibles depende en gran medida de la temperatura ambiente y los niveles de insolación existentes en cada localidad en particular; se pueden esperar ahorros de entre un 66 % y un 84 % dependiendo de las condiciones de cada sitio, en donde una temperatura ambiente baja representa la mayor desventaja. A nivel nacional se puede esperar una reducción promedio anual del 75 % equivalente a poco mas de 52,000 toneladas de gas L.P. con un ahorro de 582 millones de pesos; las correspondientes emisiones evitadas de CO_2 son de 173,047 toneladas.

Por cada 100 (kg) de maíz nixtamalizado se requieren 2 calentadores solares de agua con un costo total de entre \$ 22,000.00 y \$25,000.00, sin embargo, debido a que el uso de estos equipos resultaría intensivo en los

procesos de nixtamalización donde pueden aportar más del 70 % de la energía requerida, el tiempo de recuperación de la inversión se encuentra entre 3.5 años y 4.6 años, dependiendo de las condiciones climáticas de cada localidad. Lo anterior los convierte en opciones atractivas para este sector.

La incorporación de éstos equipos en cada tortillería puede realizarse sin mayores complicaciones debido a que no implican ningún cambio adicional en la infraestructura existente; por lo tanto no se requieren procesos difíciles de adaptación por parte de los productores ni modificaciones mayores en sus hábitos de producción: horarios de trabajo, capacidad de producción, personal empleado, etc; aún así es preciso que adopten un sistema de monitoreo de la temperatura de cocción, pues debido a que no es necesario llegar a las temperaturas de ebullición del agua para realizar una adecuada nixtamalización, se debe interrumpir el suministro de energía al alcanzar 86 (°C) en el tanque de cocción.

El ángulo de inclinación del colector solar no provoca grandes aumentos de la insolación disponible para las poblaciones del centro y sur del país, sin embargo estos pueden ser de hasta un 5 % mayor a los niveles registrados horizontalmente. Por otro lado la mitad del país se encuentra en latitudes mayores al trópico de cáncer, donde el calentador tendrá un mejor desempeño y donde se podrán conseguir mayores ahorros energéticos que en las ciudades analizadas.

Para las localidades dentro del trópico, como aquellas que se mencionan en este análisis, sería mas adecuado un ángulo de inclinación menor al que se tiene en el calentador solar usado, sin embargo tendría que analizarse el efecto de este cambio en la eficiencia de la transferencia de calor en los tubos, pues ésta se debe al ciclo de evaporación y condensación del fluido en su interior, fenómeno para el cual los mayores ángulos de inclinación pueden resultar más favorables.

Se ha desarrollado una metodología que permite mediante el empleo de la ecuación característica de cualquier calentador solar, obtenida a partir de la metodología de prueba establecida en la norma NMX-ES-004-NORMEX-2010, evaluar las posibilidades de ahorro en el proceso de nixtamalización para los diferentes calentadores que actualmente se comercializan en el país. Esta metodología puede ser utilizada por la Secretaría de Economía para mejorar sus criterios de selección de los equipos solares de calentamiento de agua en el programa denominado “Mi tortilla” enfocado a los productores de este esencial alimento consumido a nivel nacional.

7.0.1. Trabajo a futuro.

Se podría realizar un estudio mas detallado y preciso sobre los ahorros posibles si se conociera la cantidad de maíz que se nixtamaliza en cada estado de la República, así como de las condiciones particulares de temperatura del agua, temperatura ambiente e insolación en cada localidad representativa.

Sería pertinente una medición de los consumos de gas L.P. en los sitios de producción de nixtamal a fin de comparar los resultados obtenidos con las mediciones en campo.

Se podría evaluar el funcionamiento de ambos calentadores en un arreglo en serie, es decir que el agua de salida de uno sea el agua de alimentación del otro en el segundo día de exposición y determinar cual de los dos arreglos, en serie o en paralelo como se describió en el análisis, presenta el mejor desempeño.

Como un trabajo posterior y a partir de los resultados obtenidos, resulta también pertinente un análisis acerca de la posibilidad de colocar la reducción de las emisiones CO_2 en el mercado de bonos de carbono, derivado de los mecanismos de desarrollo limpio establecidos en el protocolo de Kioto, cuya vigencia está próxima a expirar pero, es de esperarse la adopción de algunas medidas similares a nivel mundial, toda vez que las grandes potencias económicas que se han comprometido de manera obligada a reducir sus niveles de emisiones de gases de efecto invernadero para este año 2012 y sin embargo, no han conseguido al 100 % sus objetivos signados.

Apéndice A

Gráficas de irradiancia, temperatura ambiente y velocidad del viento de los días de pruebas.

Irradiancia Global de la prueba NMX-ES-004, etapa diurna.

Temperatura ambiente de la prueba NMX-ES-004, etapa diurna.

Velocidad del viento de la prueba NMX-ES-004, etapa diurna.

Temperatura ambiente de la prueba NMX-ES-004, etapa nocturna.

Velocidad del viento de la prueba NMX-ES-004, etapa nocturna.

Irradiancia Global de la prueba de exposición de 2 días.

Temperatura ambiente de la prueba de exposición de 2 días.

Velocidad del viento de la prueba de exposición de 2 días.

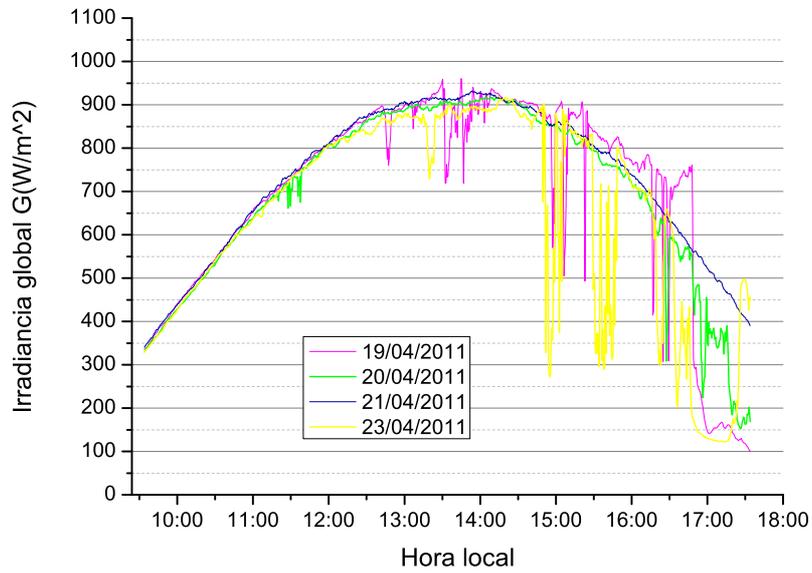


Figura A.1: Irradiancia global en el plano del captador de los días 19, 20, 21 y 23 de abril de 2011. Etapa diurna prueba NMX-ES-004.

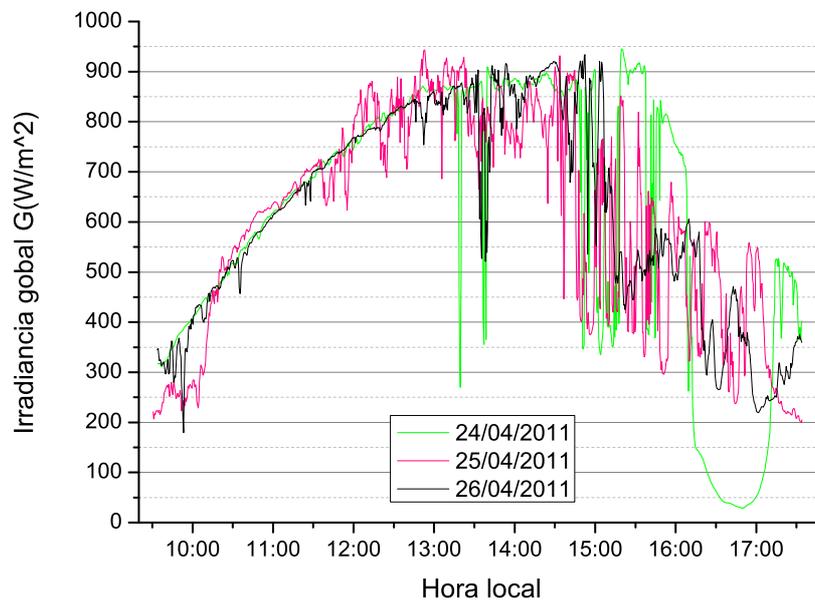


Figura A.2: Irradiancia global en el plano del captador de los días 24, 25, y 26 de abril de 2011. Etapa diurna prueba NMX-ES-004.

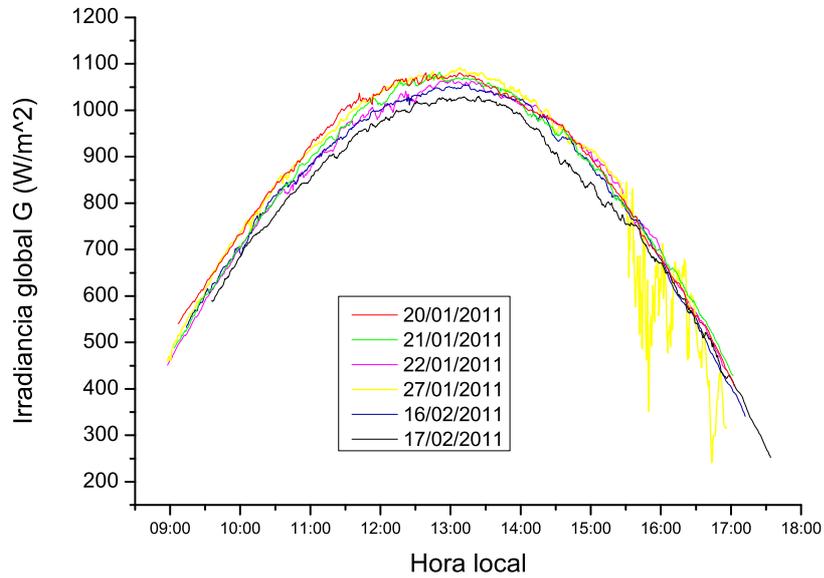


Figura A.3: Irradiancia global en el plano del captador de los días 20, 21, 22 y 27 de enero, 16 y 17 de febrero de 2011. Etapa diurna prueba NMX-ES-004.

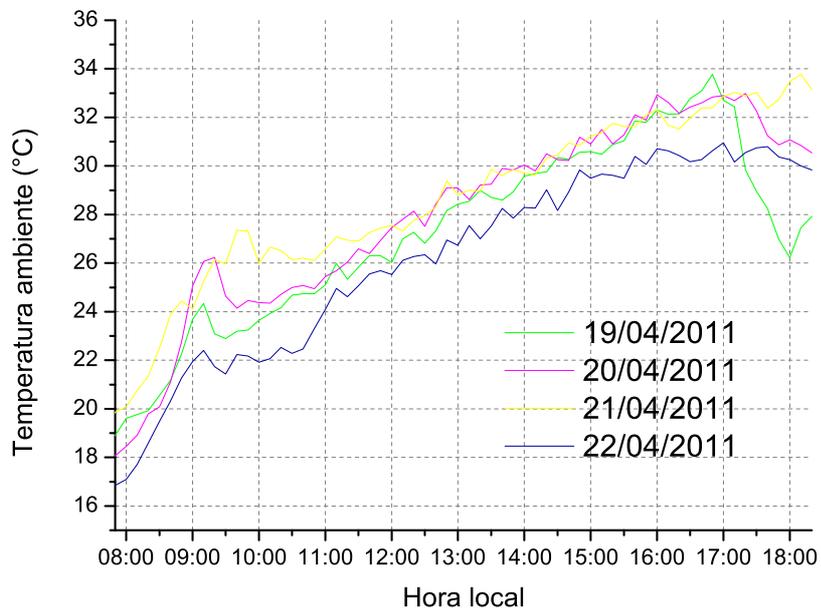


Figura A.4: Temperatura ambiente de los días 19, 20, 21 y 22 de abril de 2011. Etapa diurna prueba NMX-ES-004.

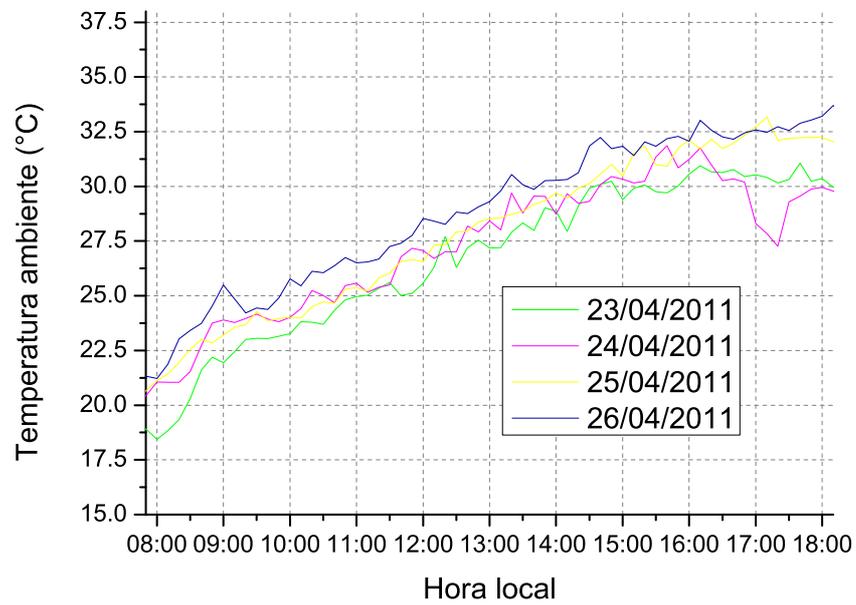


Figura A.5: Temperatura ambiente de los días 23, 24, 25 y 26 de abril de 2011. Etapa diurna prueba NMX-ES-004.

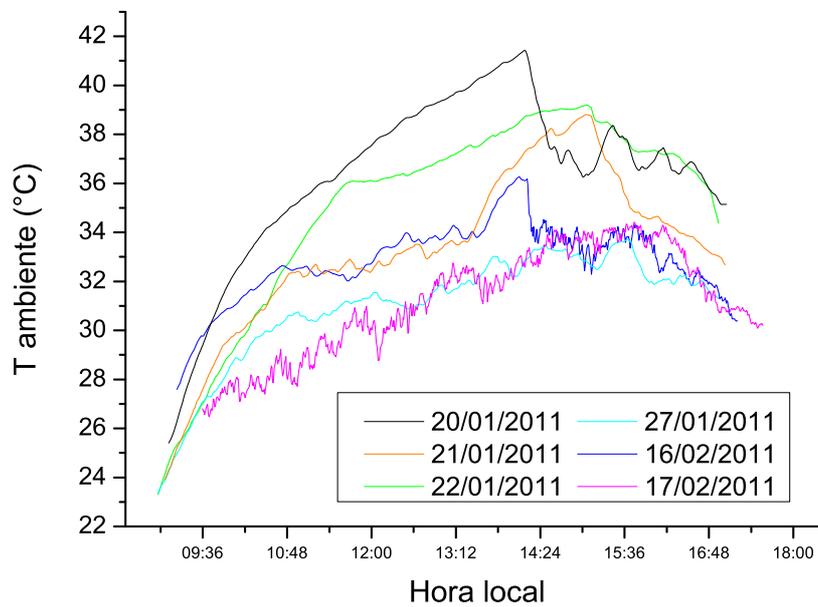


Figura A.6: Temperatura ambiente de los días 20, 21, 22 y 27 de enero, 16 y 17 de febrero de 2011. Etapa diurna prueba NMX-ES-004.

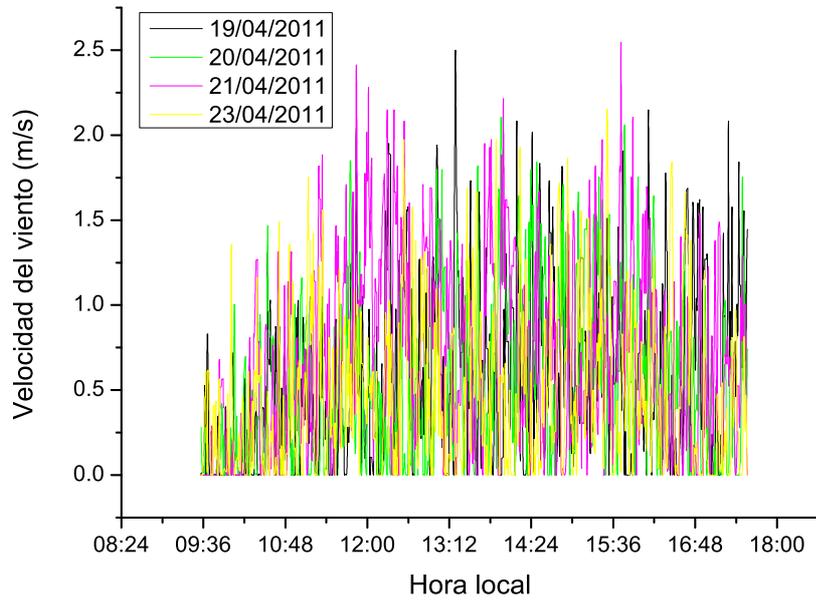


Figura A.7: Velocidad del viento en los días 19, 20, 21 y 23 de abril de 2011. Etapa diurna prueba NMX-ES-004.

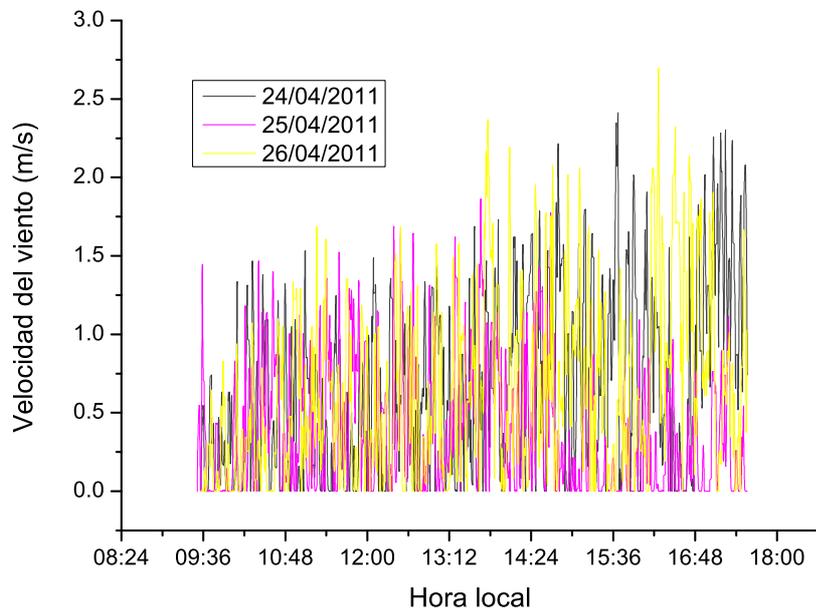


Figura A.8: Velocidad del viento en los días 24, 25, y 26 de abril de 2011. Etapa diurna prueba NMX-ES-004.

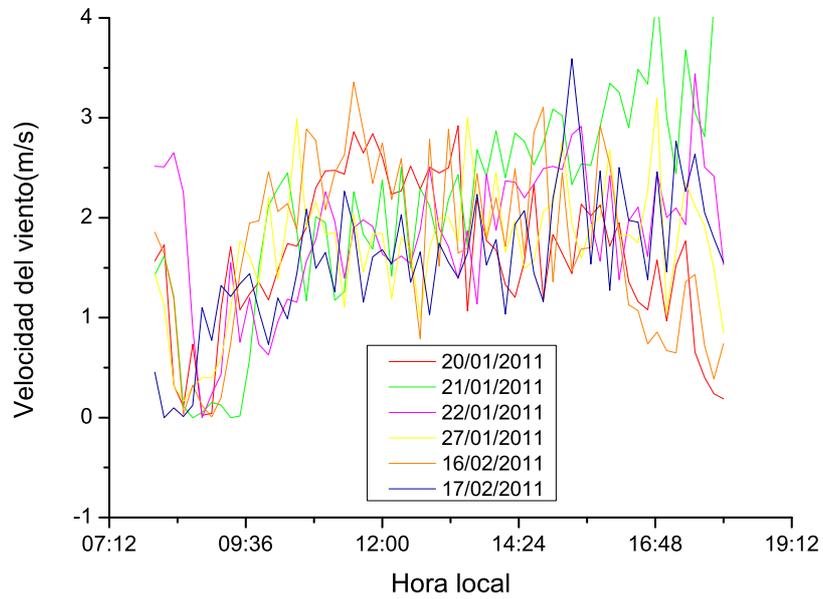


Figura A.9: Velocidad del viento en los días 20, 21, 22 y 27 de enero, 16 y 17 de febrero de 2011. Etapa diurna prueba NMX-ES-004.

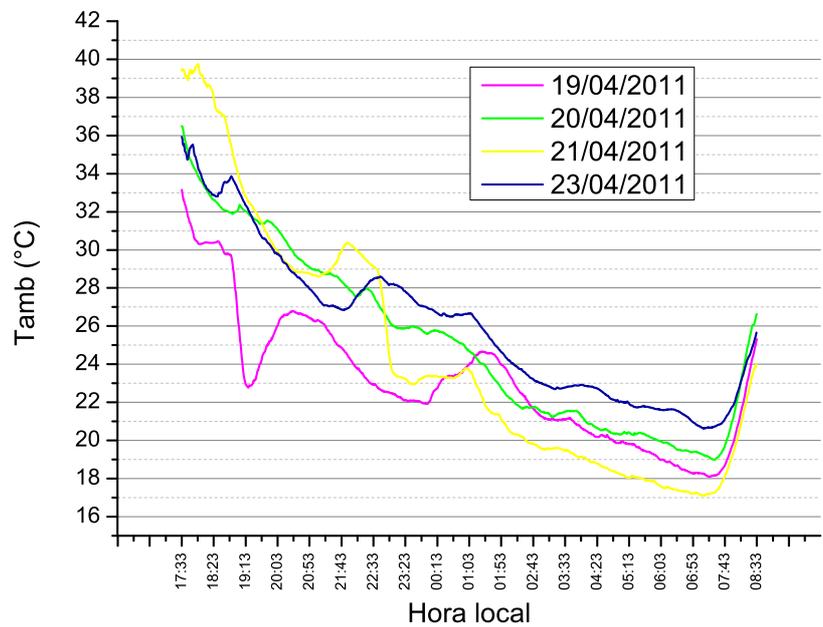


Figura A.10: Temperatura ambiente de los días 19, 20, 21 y 23 de abril de 2011, en la etapa nocturna de la prueba NMX-ES-004.

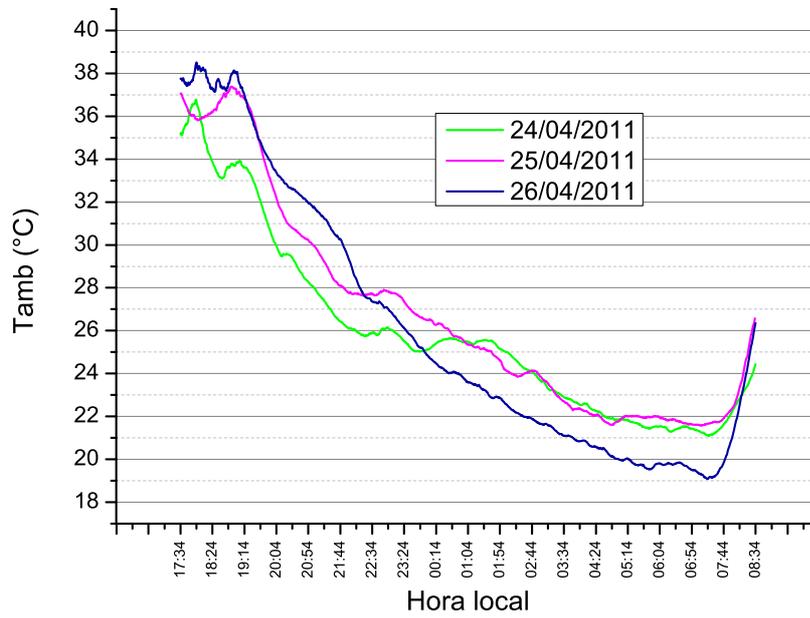


Figura A.11: Temperatura ambiente de los días 24, 25, y 26 de abril de 2011, en la etapa nocturna de la prueba NMX-ES-004.

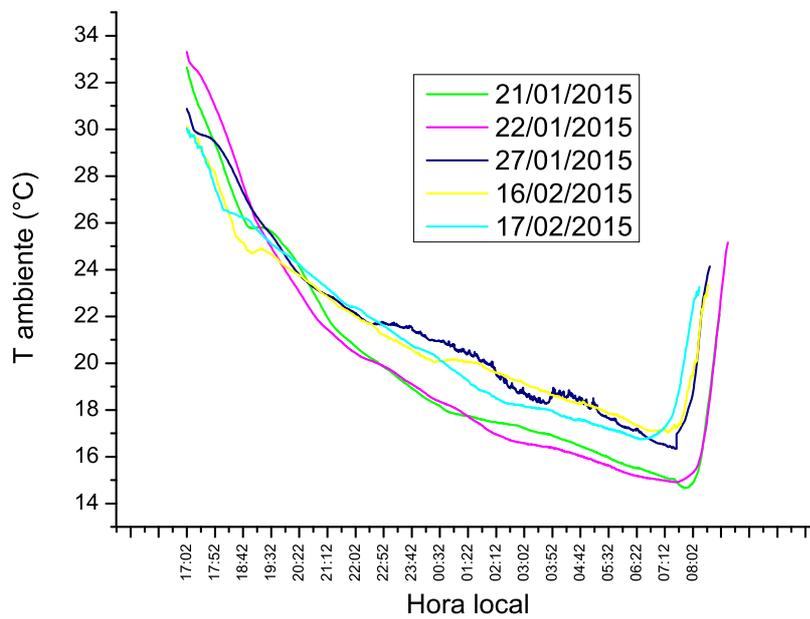


Figura A.12: Temperatura ambiente de los días 21, 22 y 27 de enero, 16 y 17 de febrero de 2011, en la etapa nocturna de la prueba NMX-ES-004.

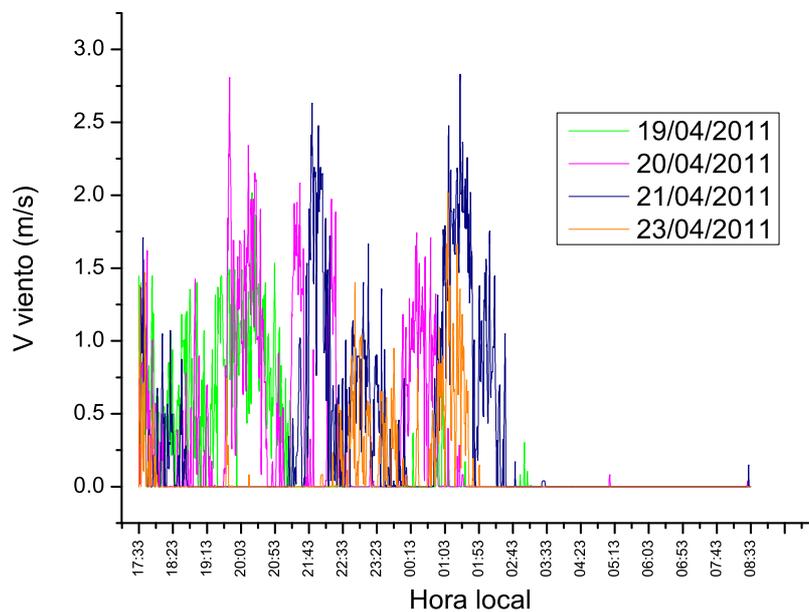


Figura A.13: Velocidad del viento en los días 19, 20, 21 y 23 de abril de 2011, en la etapa nocturna de la prueba NMX-ES-004.

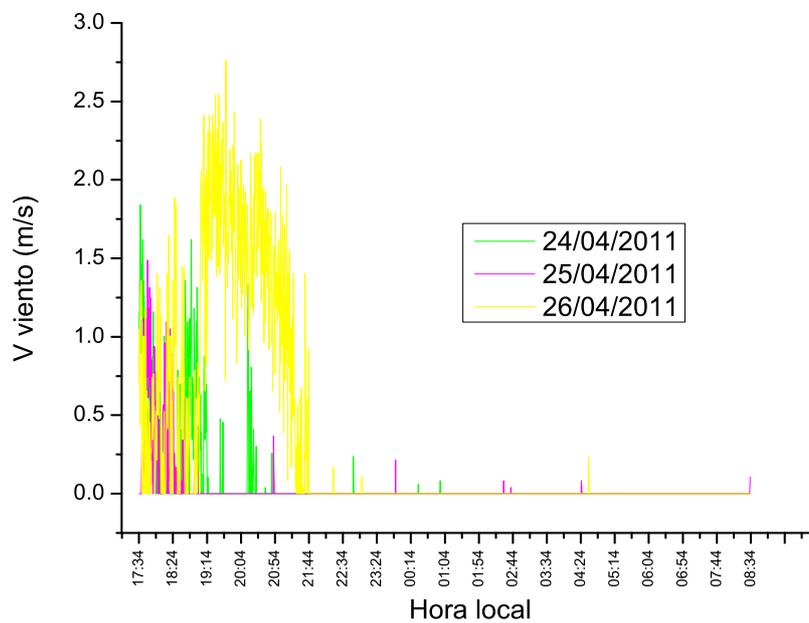


Figura A.14: Velocidad del viento en los días 24, 25, y 26 de abril de 2011, en la etapa nocturna de la prueba NMX-ES-004.

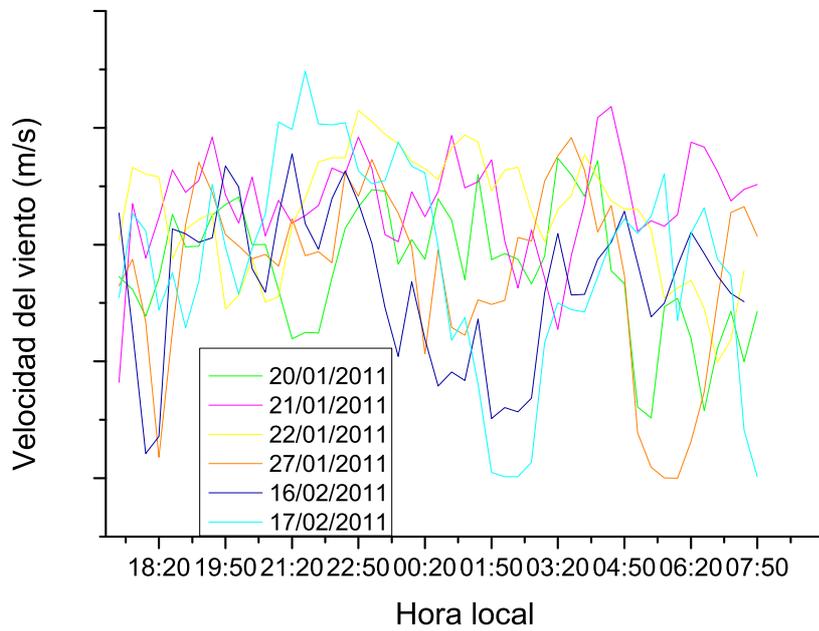


Figura A.15: Velocidad del viento en los días 20, 21, 22 y 27 de enero, 16 y 17 de febrero de 2011, en la etapa nocturna de la prueba NMX-ES-004.

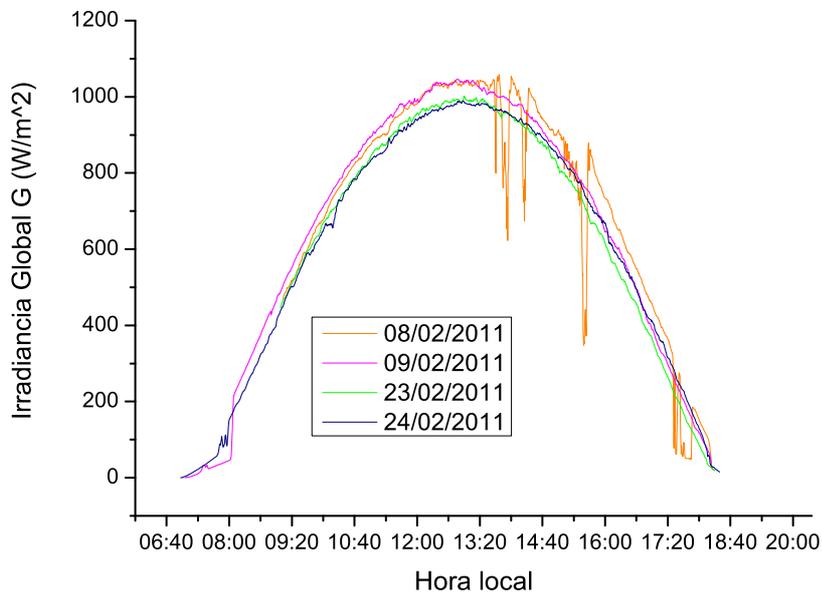


Figura A.16: Irradiancia global de los días 08, 09, 23 y 24 de abril de 2011. Prueba de exposición de 2 días.

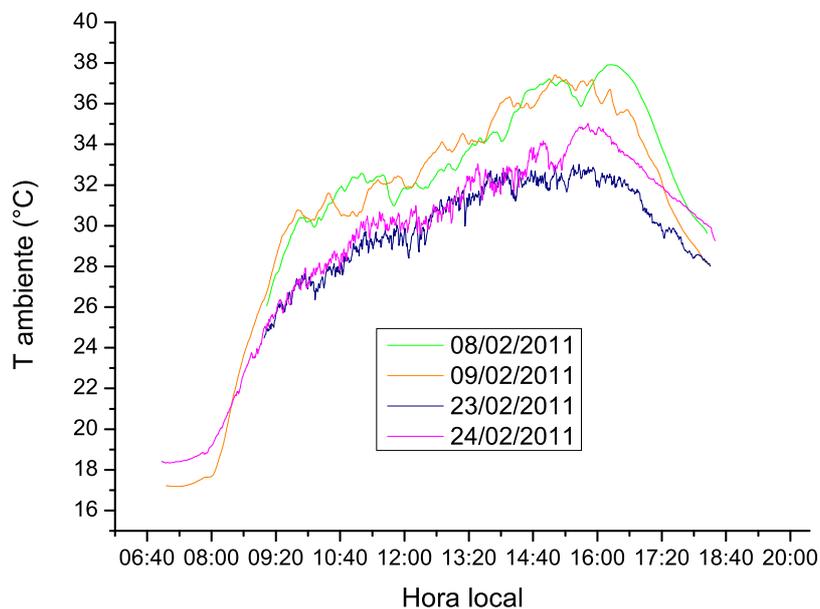


Figura A.17: Temperatura ambiente de los días 08, 09, 23 y 24 de febrero de 2011. Prueba de exposición de 2 días.

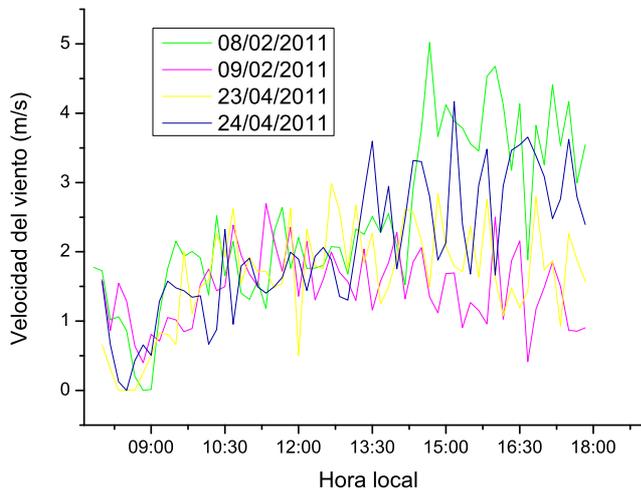


Figura A.18: Velocidad del viento en los días 08, 09, 23 y 24 de febrero de 2011. Prueba de exposición de 2 días.

Apéndice B

Mapas de Insolación mínima y máxima en la República mexicana.

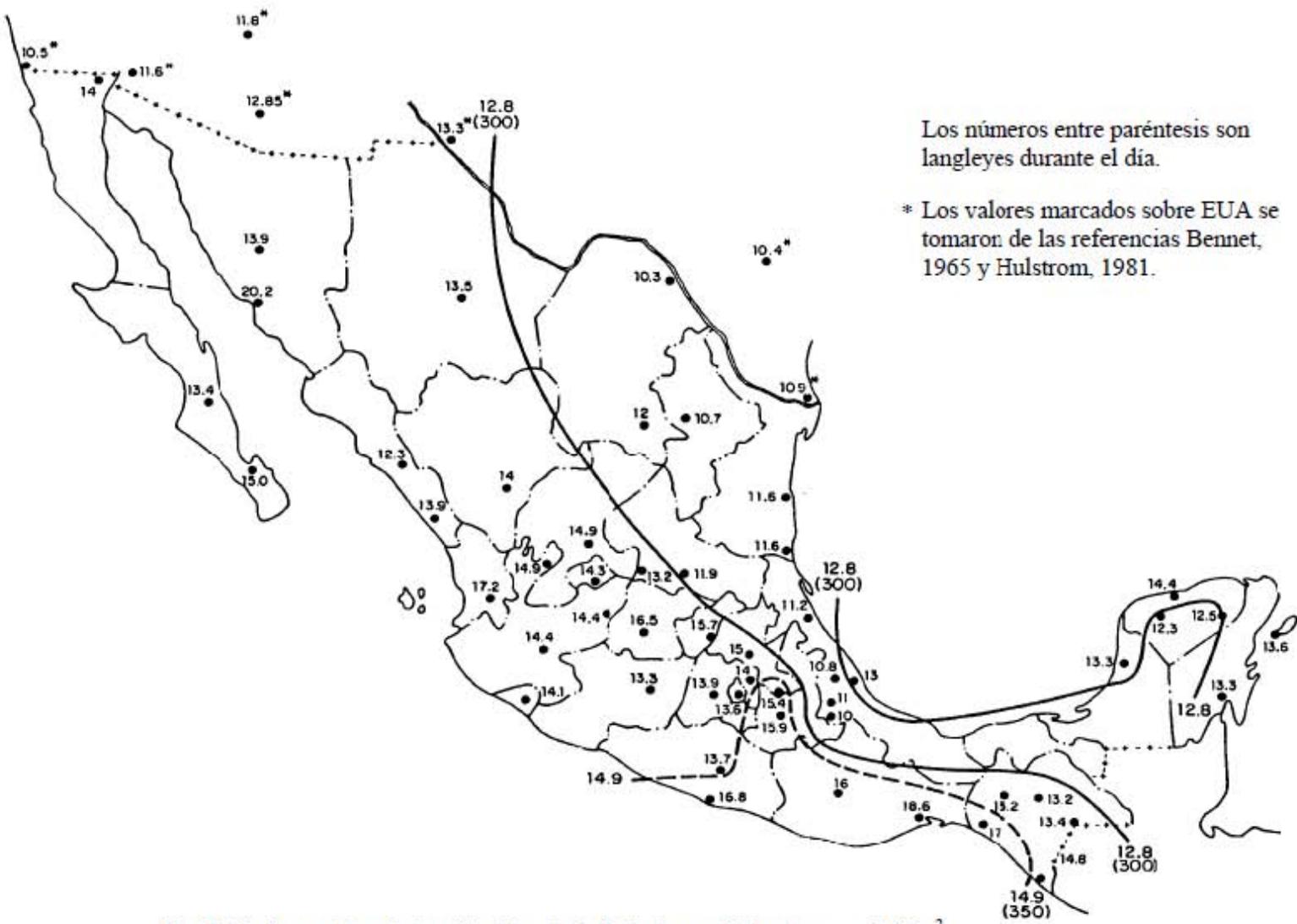


Fig 1.14 Promedio de irradiación global diaria en diciembre, en MJ/m²

Figura B.2: Mapa de Insolación promedio mensual en la República Mexicana para el mes de Abril, fuente:(Almanza et al., 2003).

Apéndice C

Cálculo de la insolación incidente sobre colector inclinado a $\beta=27^\circ$.

Para conocer los valores de irradiancia incidente sobre el colector inclinado es preciso, en primer lugar, tomar en cuenta que los niveles de irradiancia varían a lo largo del año según el valor de la declinación solar determinada mediante la siguiente expresión.

$$\delta = 23.45 \cos \left(360 \frac{284 + n}{356} \right) \quad (\text{C.1})$$

Donde:

δ es la declinación solar, que varía entre los 23.45° latitud norte y 23.45° latitud sur. Para fines de cálculo, las declinaciones correspondientes al hemisferio sur se consideran con un signo negativo, mientras que en el hemisferio norte son positivas.

n es el número de día del año, entre 1 y 365.

Como se ha mencionado, los valores de irradiancia también dependen del ángulo de inclinación β de la superficie expuesta, pues éste modifica al ángulo de incidencia θ de la irradiancia solar directa G_b (ver figura C.1) y como ésta componente de la radiación es la que aporta la mayor cantidad de energía, cualquier modificación en el ángulo de incidencia puede resultar

significativo para los valores de energía esperables. La otra componente de la radiación solar es la irradiancia difusa G_d y la participación de ambas a lo largo del día determina la cantidad de irradiancia total o global G_t que puede incidir sobre la superficie expuesta. La integración con respecto al tiempo de estas cantidades a lo largo todo un día son la insolación difusa H_d , insolación directa H_b e insolación global H_t .

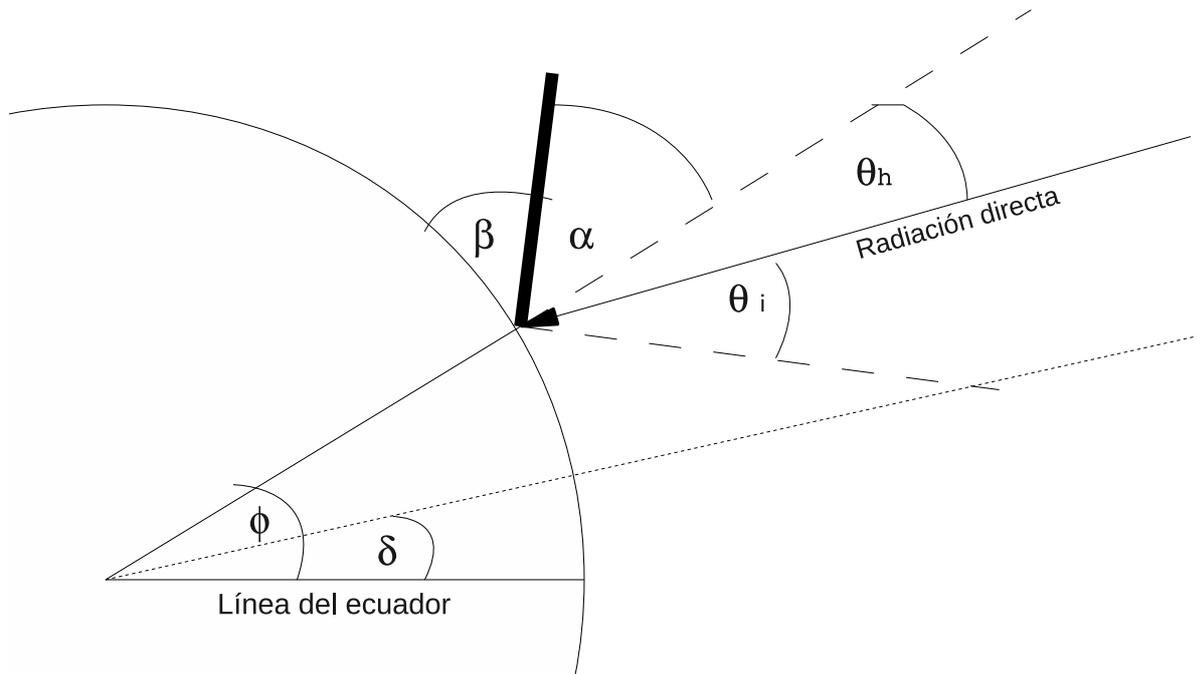


Figura C.1: Esquema de los ángulos de incidencia sobre superficies inclinadas y horizontales.

De manera que para una superficie colocada horizontalmente, el ángulo de incidencia (θ_{hor}) al medio día es equivalente a la diferencia entre el valor de la latitud del lugar (ϕ) y el valor de la declinación solar:

$$\theta_{hor} = |\phi - \delta| \quad (C.2)$$

Por otro lado, tomando en cuenta la figura C.1, una superficie inclinada con una pendiente cualquiera β , tendrá un ángulo de incidencia (θ_i) igual a:

$$\theta_i = |\phi - \delta - \beta| \quad (\text{C.3})$$

Los resultados de tal diferencia en los ángulos de incidencia pueden ser sustancialmente distintos; a mayores valores de éstos la cantidad de energía correspondiente a la radiación directa será menor, debido a que se ve afectada en una proporción que depende del coseno de dicho ángulo.

La figura C.2 permite tener una idea de la relevancia de la pendiente de la superficie; en ella se muestra la diferencia en los ángulos de incidencia resultantes de la evaluación de las ecuaciones C.2 y C.3, entre una superficie colocada horizontalmente y otra con un ángulo de inclinación de 27° , inclinación correspondiente al colector de tubos de calor del calentador solar de agua, tomando en cuenta la latitud de las ciudades elegidas en los capítulos anteriores.

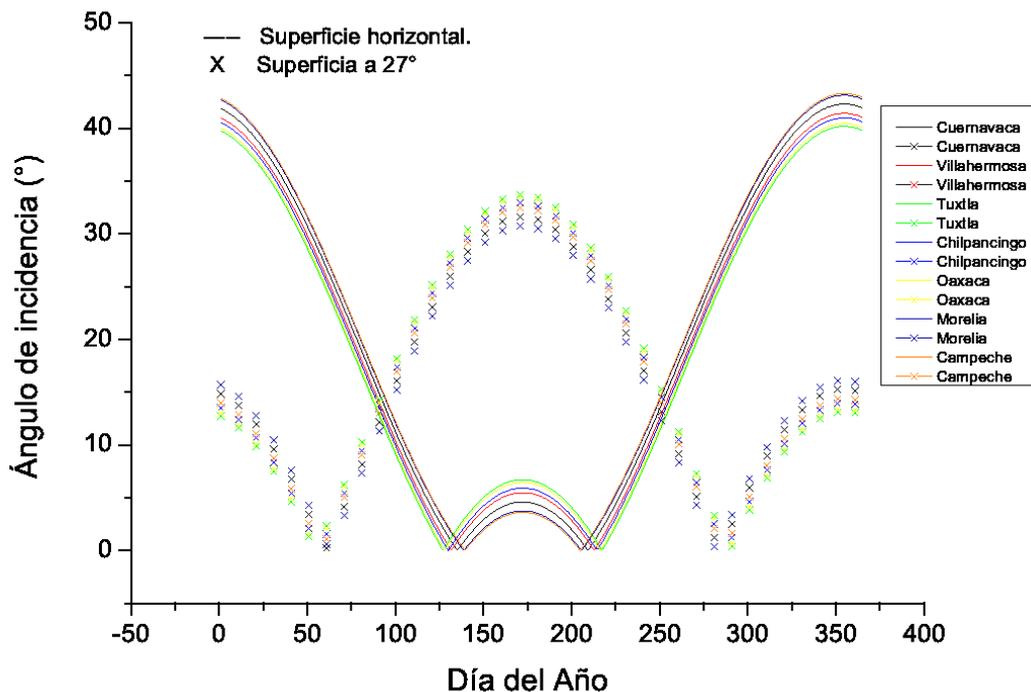


Figura C.2: Ángulo de incidencia para una superficie horizontal y para una con pendiente igual a 27° .

Como puede apreciarse en las gráficas de la figura C.2, en los días de invierno cuando el sol se encuentra en el hemisferio sur, el ángulo de incidencia

sobre la superficie horizontal es notablemente mayor al correspondiente a la superficie inclinada a 27° , mientras que en verano, cuando el sol se encuentra en latitudes al norte del ecuador, la superficie a 27° es ahora la que presenta mayores valores del ángulo de incidencia. Otro efecto de la pendiente de la superficie, es que ahora no se tienen ángulos de incidencia superiores a los 35° en ninguna época del año y esto evidentemente favorece a la cantidad de energía que puede ser captada.

Existen algunos modelos para poder determinar los valores de insolación total que incidirá sobre una superficie inclinada $H_{t,i}$ a partir de los datos disponibles de insolación global registrada sobre una superficie horizontal $G_{t,h}$.

El modelo propuesto por Liu y Jordan en 1977, descrito en (A.Duffie and Beckman, 1980), supone que la atmósfera tiene una distribución uniforme por lo que se suponen condiciones isotrópicas en el cielo y permite calcular la cantidad de insolación global incidente sobre la superficie inclinada $H_{t,i}$ de la manera siguiente:

$$H_{t,i} = H_t \left(1 - \frac{H_d}{H_t} \right) R_b + H_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + H_t \rho_g \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad (C.4)$$

Donde:

$\frac{H_d}{H_t}$ es la proporción de la insolación difusa entre la insolación global o total, medidas sobre una superficie horizontal.

ρ_g es la reflectancia del terreno, que por tratarse de zonas urbanas puede corresponder a la reflectancia de materiales como concreto y ladrillo, con un valor de $\rho = 0.4$ (A.Duffie and Beckman, 1980).

R_b es la proporción de la insolación directa entre la insolación global o total incidente sobre la superficie horizontal, y puede ser estimada mediante la siguiente ecuación:

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta)\cos\delta\text{sen}\omega'_s + (\pi/180)\omega'_s\text{sen}(\phi - \beta)\text{sen}\delta}{\cos\phi\cos\delta\text{sen}\omega'_s + \pi/180)\omega'_s\text{sen}\phi\text{sen}\delta} \quad (C.5)$$

donde ω'_s es el ángulo horario solar del ocaso (medido a partir de la línea del meridiano local), del día medio del mes de referencia y puede ser calculado de la siguiente manera:

$$w'_s = \min \left[\begin{array}{l} \text{acos}(-\tan\phi \tan\delta) \\ \text{acos}(-\tan(\phi - \beta)) \tan\delta \end{array} \right] \quad (\text{C.6})$$

donde *min* significa el valor que resulte menor de las dos ecuaciones encerradas entre corchetes.

La proporción de insolación difusa sobre la insolación total $\frac{H_d}{H_t}$ en una superficie horizontal puede ser estimada mediante la ecuación C.7.

$$\frac{H_d}{H_t} = 1.391 - 3.560K_t + 4.189K_t^2 - 2.137K_t^3 \quad (\text{C.7})$$

donde K_t es el índice de claridad en el día promedio del mes correspondiente; este índice es una medida del efecto de todas las partículas suspendidas en la atmósfera, que mediante fenómenos de absorción, reflexión y dispersión de la radiación solar, disminuyen la cantidad de energía que proviene del sol y llega a la superficie de la tierra. De este modo la insolación total horizontal en la superficie terrestre será K_t veces menor que la insolación disponible fuera de la atmósfera terrestre H_0 .

$$K_t = \frac{H_t}{H_0} \quad (\text{C.8})$$

La insolación global o total H_t es medida en cada lugar con piranómetros y se puede encontrar reportada por las instituciones meteorológicas, datos que permiten construir los mapas de insolación nacionales. La radiación solar fuera de la atmósfera tiene un valor de $G_{sc} = 1,367(W/m^2)$, parámetro al que se le conoce como constante solar.

La insolación a lo largo de un día completo fuera de la atmósfera H_0 es una fracción de esta constante que depende de factores como la latitud del lugar, el ángulo de ocaso ω_s debido a la rotación de la tierra y la declinación solar correspondiente al día n del año, y su valor puede ser calculado por la siguiente ecuación:

$$H_0 \left(\frac{J}{m^2} \right) = \frac{24 \times 3600 H_{sc}}{\pi} \left(1 + 0.03 \cos \frac{360n}{365} \right) \left(\cos\phi \cos\delta \text{sen}\omega_s + \frac{\pi\omega_s}{180} \text{sen}\phi \text{sen}\delta \right) \quad (\text{C.9})$$

El ángulo de ocaso es:

$$\omega_s = \text{acos}(-\tan\phi \tan\delta) \tag{C.10}$$

De modo que al evaluar las expresiones anteriores, para la latitud de Temixco Morelos ($\phi = 18.83^\circ$) y utilizando los datos de insolación global horizontal promedio mensual H_t en 2011 de la estación meteorológica del CIE, los valores en los días representativos de cada mes de las proporciones de insolación directa sobre superficie horizontal Rb (ecuación C.5), insolación difusa horizontal H_d/H_t (ecuación C.7) y la insolación total (ecuación C.4) incidente sobre el colector con ángulo de inclinación de 27° , son los que se muestran en la tabla C.1.

Mes	δ	Valores medidos en la estación del CIE					Cálculos modelo Liu y Jordan				
		H_b MJ/m ²	H_d MJ/m ²	H_t^+ MJ/m ²	Rb	$\frac{H_d}{H_t}$	H_0 MJ/m ²	K_t	Rb	$\frac{H_d}{H_t}$	$H_{t,i}^*$ MJ/m ²
1	-21.3	26.058	3.752	18.408	1.416	0.204	27.380	0.672	1.400	0.242	24.457
2	-13.3	24.417	4.761	20.033	1.219	0.238	31.061	0.645	1.249	0.264	24.185
3	-2.8	23.246	5.602	22.460	1.035	0.249	34.940	0.643	1.086	0.266	24.038
4	9.4	21.472	7.164	23.028	0.932	0.311	37.869	0.608	0.926	0.295	20.712
5	18.8	18.894	8.734	22.650	0.834	0.386	38.686	0.585	0.823	0.314	19.752
6	23.3	N/D	N/D	21.363	N/D	N/D	38.594	0.554	0.776	0.341	18.043
7	21.5	10.939	7.501	19.121	0.572	0.392	38.524	0.496	0.794	0.395	16.536
8	13.8	16.881	8.384	23.693	0.713	0.354	38.081	0.622	0.877	0.283	21.490
9	1.8	16.544	7.851	20.911	0.791	0.375	35.885	0.583	1.021	0.316	21.082
10	-9.6	21.637	5.674	21.137	1.024	0.268	32.270	0.655	1.188	0.256	24.033
11	-19.1	22.353	4.806	18.984	1.177	0.253	28.266	0.672	1.357	0.242	24.079
12	-23.3	25.516	3.497	17.989	1.418	0.194	26.295	0.684	1.445	0.232	24.302

+ Insolación total horizontal promedio mensual medida en la estación meteorológica del CIE, UNAM en el año 2011.

* Estimación de la insolación total incidente en el colector con inclinación de 27° .

N/D Valores no disponibles debido a fallas en la estación en ese mes.

Tabla C.1: Estimaciones de insolación global sobre el colector inclinado a $\beta = 27^\circ$ en Temixco, Morelos de acuerdo al modelo de Liu y Jordan

La tabla C.1 presenta también los valores registrados de insolación directa, difusa y global sobre superficie horizontal, registrados en la estación meteorológica del CIE en 2011, a fin de poder compararlos con las predicciones del modelo propuesto por el modelo de Liu y Jordan. Como puede apreciarse, los valores de Rb y H_d/H_t son bastante cercanos a los niveles registrados en la estación, mas aún, los niveles de irradiancia global sobre el plano del colector ($\beta = 27^\circ$) registrados en las pruebas sobre el colector se encuentran en los niveles predichos por el modelo, pues como se muestra en la tabla 4.1 (capítulo 4), la irradiancia en los meses de enero y febrero fue de alrededor de $H_{t,i} = 24(MJ/m^2)$, mientras que en abril se registraron valores

cercanos a $H_{t,i} = 19(MJ/m^2)$, cifras en el rango de lo predicho por el modelo de Liu y Jordan.

La inclinación del colector influye directamente en la cantidad de insolación que se puede captar, sin embargo la pendiente debe ser seleccionada en función de la latitud de cada lugar; para latitudes que se encuentran dentro de los trópicos ($+23.45^\circ > \phi > -23^\circ$) resulta menos significativo el efecto de la pendiente del colector sobre la insolación total en el año, pues aunque evidentemente favorece la ganancia de energía en los meses de invierno, elevando considerablemente los niveles hasta valores de $H_{t,i} = 24(MJ/m^2)$, en los meses del verano la insolación se reduce hasta valores de $16(MJ/m^2)$ o $17(MJ/m^2)$, tomando la Ciudad de Cuernavaca como ejemplo. De modo que el efecto real de este ángulo del colector es un intercambio en las fechas de menores valores de irradiancia incidente en él, mientras que el promedio de insolación total a lo largo del año aumenta ligeramente entre 3% y 5% como puede apreciarse en la tabla C.2. Sin embargo para localidades ubicadas fuera de los trópicos el efecto de la pendiente es mas notorio y los niveles de insolación a lo largo de todo el año tienen un aumento mayor de alrededor de 15%, como en el caso de Tijuana, ciudad que se escogió para ilustrar este efecto.

Mes	Cuernavaca		Oaxaca		Morelia		Tijuana	
	H_t	$H_{t,i}$	H_t	$H_{t,i}$	H_t	$H_{t,i}$	H_t	$H_{t,i}$
1	18.41	24.46	17.60	22.68	15.00	19.25	14.90	23.91
2	20.03	24.19	20.50	24.41	17.60	20.92	15.80	21.47
3	22.46	24.04	20.90	21.99	19.70	20.92	18.00	20.96
4	23.03	21.71	19.70	18.43	21.00	19.84	20.00	20.32
5	22.65	19.75	21.50	18.61	21.10	18.51	23.50	22.08
6	21.36	18.04	19.60	16.36	18.70	15.81	26.20	23.84
7	19.12	16.54	21.20	17.97	18.00	15.66	25.20	23.12
8	23.69	21.49	20.20	18.25	18.50	16.95	21.80	21.36
9	20.91	21.08	18.10	17.97	17.80	17.85	22.00	24.45
10	21.14	24.03	17.80	19.59	16.40	18.16	19.80	25.83
11	18.98	24.08	17.40	21.30	15.25	18.67	16.10	24.58
12	17.99	24.30	16.00	20.62	13.30	16.98	14.00	23.18
Promedio	20.81	21.98	19.21	19.85	17.70	18.29	19.78	22.92

Insolación horizontal y en plano a $\beta = 27^\circ$ para Cuernavaca $\phi = 18.8^\circ$,
Oaxaca $\phi = 15^\circ$, Morelia $\phi = 19^\circ$ y Tijuana $\phi = 32.45^\circ$

Tabla C.2: Estimaciones de insolación global sobre el colector inclinado a $\beta = 27^\circ$ para Cuernavaca, Mor., Oaxaca, Oax., Morelia, Mich. y Tijuana, B.C.

La pendiente de las superficies por lo general se escoge con un valor cercano al de la latitud del lugar y para las latitudes tropicales de la República Mexicana, una pendiente de alrededor de $\beta = 20^\circ$ puede brindar los mejores resultados, con incrementos en los niveles de insolación de cerca del 10% con

respecto a los medidos en una superficie horizontal. Como el calentador es producido en China e importado de manera íntegra, el ángulo del colector es de 27° sin embargo de acuerdo con información brindada por el proveedor del sistema, este valor del ángulo es solicitado por ellos mismos al fabricante en China.

Los valores de la insolación global horizontal empleados en los cálculos se tomaron de los mapas de insolación de la República Mexicana de Almanza et. al. (Almanza et al., 2003).

Apéndice D

Características de los instrumentos de medición.

A continuación se presentan las características de los instrumentos de medición utilizados en las pruebas realizadas sobre el calentador solar de agua.

D.0.2. Termómetros.

Termómetro Ambiental.

El sensor es un RTD PT-1000 cuyas características son:

Rango de operación: -10 a +200 ($^{\circ}C$)

Tiempo de respuesta: menor a 5 (s)

Exactitud: ± 0.5 ($^{\circ}C$)

Precisión : ± 0.2 ($^{\circ}C$)

Termómetros para el agua dentro del termotanque.

Dos termistores marca YS-400 con las siguientes características:

Rango de operación: -20 a +150 ($^{\circ}C$)

Tiempo de respuesta: menor a 5 (s)

Exactitud: ± 0.1 ($^{\circ}C$)

Precisión: ± 0.1 ($^{\circ}C$)

D.0.3. Anemómetro.

Medidor de velocidad y dirección del viento marca Davis.

Alcance de la medición: de 0 a 35 (m/s)

Exactitud: ± 0.5 (m/s)

D.0.4. Piranómetro PSP.

El piranómetro empleado es uno marca Kipp and Zonen con exactitud menor de $\pm 2\%$.

D.0.5. Bomba de recirculación.

La bomba de recirculación es marca Grundfos modelo F y alcanza flujos volumétricos cercanos a los 45 (l/min).

D.0.6. Sensor de presión estática

El sensor tiene una exactitud de $\pm 0.5\%$

Bibliografía

- A. Duffie, J. and Beckman, W. A. (1980). *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, Inc.
- Almanza, R., Óscar Callejas, Correa, G., and Flores, V. (2003). *Ingeniería de la Energía Solar*. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Bello Pérez, L. A., Osorio Díaz, P., Agama Acevedo, E., Núñez Santiago, C., and Paredes López, O. (2002). Propiedades químicas, fisicoquímicas y reológicas de masas y harinas de maíz nixtamalizado. *Agrociencias*, 36(3):319–328.
- Berberan Santos, M. N., Boduonov, E. N., and Pogliani, L. (1997). On the barometric Formula. *American Journal of Physics*, 65(5):Agosto 404–412.
- Billeb de Sinibaldi, A. C. and Bressani, R. (2001). Características de cocción por nixtamalización de once variedades de maíz. *Archivos Latinoamericanos de nutrición*, 51:86–94.
- Chun, W., Kang, Y. H., Kwak, H. Y., and Lee, Y. S. (1999). An experimental Study of the utilization of heat pipes for solar water heaters. *Applied Thermal Engineering*, 19:807–817.
- CNMI (Consulta 2012). Cámara Nacional del Maíz Industrializado: <http://www.cnmaiz.org.mx/estadisticas.html#tres>.
- CONUEE (2009). Metodologías para la Cuantificación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero y de Consumos Energéticos Evitados por el Aprovechamiento Sustentable de la Energía. Technical report, Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía.
- Cámara Nacional del Maíz Industrializado (2010). La industria del Maíz.

- D. Shahai and J. P. Mua and I. Surjewan and M. O. Buendía and M. Rowe and D. S. Jackson (1999). Assessing degree of cook during corn nixtamalization: Impact of Processing Variables. *Cereal Chemistry*, 76(6):850–854.
- Fernández Muñoz, J. L., Rodríguez, M. E., Pless, R. C., Martínez Flores, H. E., Leal, M., Martínez, J., and Baños, L. (2002). Changes in Nixtamalized Corn Flour Dependent on Postcooking Steeping Time. *Cereal Chemistry*, 79(1):162–166.
- Gutierrez Cortéz, E. (2006). Cambios físicos en pericarpio de maíz durante la nixtamalización y su influencia en la cinética de difusión de calcio. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- IPCC (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Technical Report Vol 2, Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jaramillo Bastidas, G. and Posada Flores, E. (1989). Determinación de algunas propiedades físicas del café pergamino. *Colloque Scientifique International sur le Café, 13. Paipa (Colombia)*, Resúmenes:Agosto 21–25.
- Khan, M. N., Des Rosiers, M. C., Rooney, L. W., Morgan, R. G., and Sweat, V. E. (1982). Corn Tortillas: Evaluation of Corn Cooking Procedures. *Cereal Chem.*, 59(4):289–284.
- Mathioulakis, E. and Belessiotis, V. (2002). A new heat-pipe type solar domestic hot water system. *Solar Energy*, 72(1):13–20.
- Organización de las Naciones Unidas (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático.
- Organización de las Naciones Unidas (1998). Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático.
- Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (2007). *Cambio Climático 2007 Informe de Síntesis*. IPCC OMM PNUMA.
- Pflugfelder, R. L., Rooney, L. W., and Waniska, R. D. (1988). Dry matter losses in commercial corn masa production. *Cereal Chem.*, 65(2):127–132.
- Ramos Benítez, M. (2008). Contenido de fibra dietética total y almidón resistente en diferentes variedades de maíz, crudos y cocidos. Tesis de licenciatura, Facultad de Química, UNAM.

- Ramos Carrillo, E. (2007). Análisis comparativo de la fijación de calcio en granos de maíz, durante el proceso de nixtamalización. Tesis de licenciatura, Facultad de estudios superiores Cuautitlán, UNAM.
- Rangel Meza, E., Muñoz Orozco, A., Vázquez Carrillo, G., Cuevas Sánchez, J., Merino Castillo, J., and Miranda Colín, S. (2004). Nixtamalización, elaboración y calidad de tortilla de maíces de Ecatlán, Puebla, México. *Agrociencia*, 38:53–61.
- Reséndiz Mendoza, M. (2008). Diseño, construcción, instrumentación y caracterización de un sistema prototipo para realizar el tratamiento térmico-alkalino durante el proceso de nixtamalización. Tesis de licenciatura, FES-CUAUTITLÁN, UNAM.
- Reyes Sánchez, F. (2008). Efecto de las condiciones térmicas de cocción sobre las propiedades viscoelásticas de almidón de maíz ceroso nativo y modificado químicamente. Tesis de licenciatura, Facultad de Química, UNAM.
- Rittidech, S. and Wannapakne, S. (2007). Experimental study of the performance of a solar collector by closed-end oscillating heat pipe (CEOHP). *Applied Thermal Engineering.*, 27:1978–1985.
- Rosas Peña, A. M. (2005). Un Mercado Hecho Bolas. *La Jornada*, 17 de Enero.
- Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación - SIAP (2011). Maíz, Situación Actual y Perspectivas 1996-2010.
- Secretaría de Economía (Consulta 2012). Sitio en internet: <http://www.economia.gob.mx/mexico-emprende/19-mexico-emprende/115-mi-tortilla>.
- Secretaría de Energía (SENER) (2010). Prospectiva del mercado de gas L.P. 2010-2025.
- SENER. DOF, jueves 30 de Mayo de 2002 (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-019-SEDG-2002, Aparatos domésticos para cocinar alimentos que utilizan gas L.P. o gas natural-Especificaciones y métodos de prueba.
- Servicio Meteorológico Nacional (Consulta 2012). Temperatura media anual - Sitio en Internet <http://smn.cna.gob.mx>.
- Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación S.C. (NORMEX) (2010). NMX-ES-004-NORMEX-2010.

Wark Jr., K. and Richards, D. E. (2001). *Termodinámica*. Mc. Graw Hill.