

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

**INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



**“SIMULADOR TÉRMICO PARA EL DISEÑO DE CONSTRUCCIONES
AHORRADORAS DE ENERGÍA EN CLIMAS CÁLIDOS”**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA**

**PRESENTA
EMILIO HERNÁNDEZ MARTÍNEZ**

**Dra. GISELA MONTERO ALPÍREZ
Dr. ALEJANDRO ADOLFO LAMBERT ARISTA**

Mexicali, B. C.

11 De Diciembre 2009

ÍNDICE

Resumen		vii
Capítulo 1	Introducción _____	9
	Objetivos generales _____	14
	Objetivos particulares _____	14
Capítulo 2	Antecedentes _____	17
	2.1.- Humedad _____	17
	2.2.- Registro histórico de humedad relativa. _____	20
	2.3.- Análisis histórico de humedad relativa _____	23
	2.4.- Metodología de funciones de transferencia _____	28
	2.5.- Resistencia térmica _____	29
	2.6.- Coeficientes de transferencia _____	32
	2.7.- Parámetros Solares _____	33
	2.8.- Temperatura horaria _____	38
	2.9.- Horas – grado _____	39
	2.10.- Temperatura aire – sol _____	41
	2.11.- Coeficientes del espacio _____	43
	2.12.- Ganancia de calor _____	50
	2.13.- Ganancia de calor por infiltración _____	54
	2.14.- Carga de enfriamiento _____	56
	2.15.- Retiro de calor _____	57
	2.16.- Consumo, demanda y facturación eléctrica _	61

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA**

Capítulo 3	Simulación	66
	3.1.- Secuencia de simulación	66
	3.2.- Simulador térmico	71
Capítulo 4	Discusión de resultados	89
Capítulo 5	Conclusiones	96
Apéndice A		101
Apéndice B		108
Bibliografía		116

RESUMEN

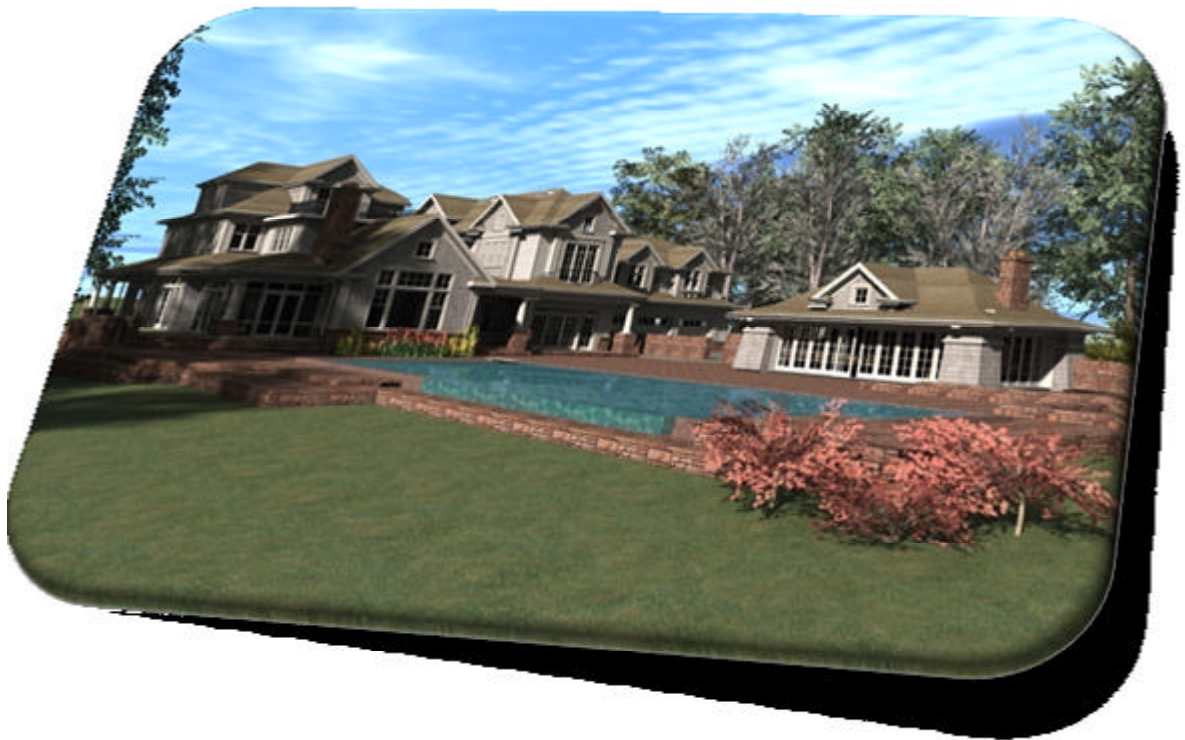
El uso eficiente de la energía en viviendas y edificios, es uno de los puntos importantes a estudiar en los diferentes países para lograr un desarrollo sustentable, la conservación del medio ambiente y el fortalecimiento de su economía. Este es el caso de Estados Unidos, Inglaterra, Alemania, España, México, Chile y otros mas, dichos países han desarrollado software de simulación térmica específicos para las diferentes zonas climáticas que se presentan en su territorio y en otros casos se adaptaron Software comerciales para obtener las simulaciones térmicas.

Es por esto que se desarrollo un Software de simulación térmica, con habiente Windows y escrito en lenguaje Visual Basic 2008, el cual es un lenguaje de programación orientada a objetos. El simulador térmico cuenta con una barra de herramientas que direcciona al usuario a las diferentes ventanas individuales de captura de las dimensiones de la vivienda o edificio de hasta cinco niveles para diferentes condiciones construcción, a los datos de materiales de construcción, a la información climatológica detallada de Mexicali, La Paz, Mazatlán, Guanajuato, Guadalajara, Querétaro, Los Mochis y Hermosillo y las diferentes tarifas eléctricas para estas ciudades, que se requieren para el cálculo térmico.

La simulación térmica se basa en el Método de Funciones de Transferencia (MFT) para el cálculo de ganancia de calor para una construcción, reportado por la Sociedad Americana de Ingeniería para Aire Acondicionado, Calefacción y Refrigeración (ASHRAE). El Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California se han realizado modificaciones a esta metodología, consistente en el cálculo de la temperatura horaria con un modelo matemático basado en una función periódica de Fourier, este modelo se obtuvo por un estudio histórico de las temperaturas de la región. Además se desarrolló un modelo matemático basado en una función periódica de Fourier que describe el comportamiento de la humedad horaria para cualquier día del año, a partir de registros históricos de humedad relativa para las ciudades de Mexicali, La Paz, Mazatlán, Guanajuato, Guadalajara, Querétaro.

A demás, para calcular la facturación mensual en el periodo de verano, en la simulación se utiliza la metodología Horas-grado y la tarifa reportada por Comisión Federal de Electricidad (CFE).

PROYECTO DE DISEÑO DE UN HOGAR PARA LA VEJEZ



Craig L. Meyer & Assoc. Inc. <http://www.craiglmeyer.com>

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día el uso eficiente de los recursos energéticos a nivel mundial se ha convertido en un tema central para el desarrollo de los países, este es el caso de México y específicamente de las regiones cálidas, donde el ahorro energético en viviendas, comercios e industrias permiten un mejor uso de los recursos naturales, la conservación del medio ambiente y el fortalecimiento de la economía de la región. Este ahorro de energía se basa en la simulación térmica de la construcción que permite observar el uso adecuado de la energía en la envolvente de una construcción.

En las regiones cálidas, el periodo de verano es un factor importante a considerar en el ahorro de energía, debido a que la carga de enfriamiento en muros y techo de una construcción es una parte considerable de la carga de enfriamiento total como se puede apreciar en la Figura 1.1.

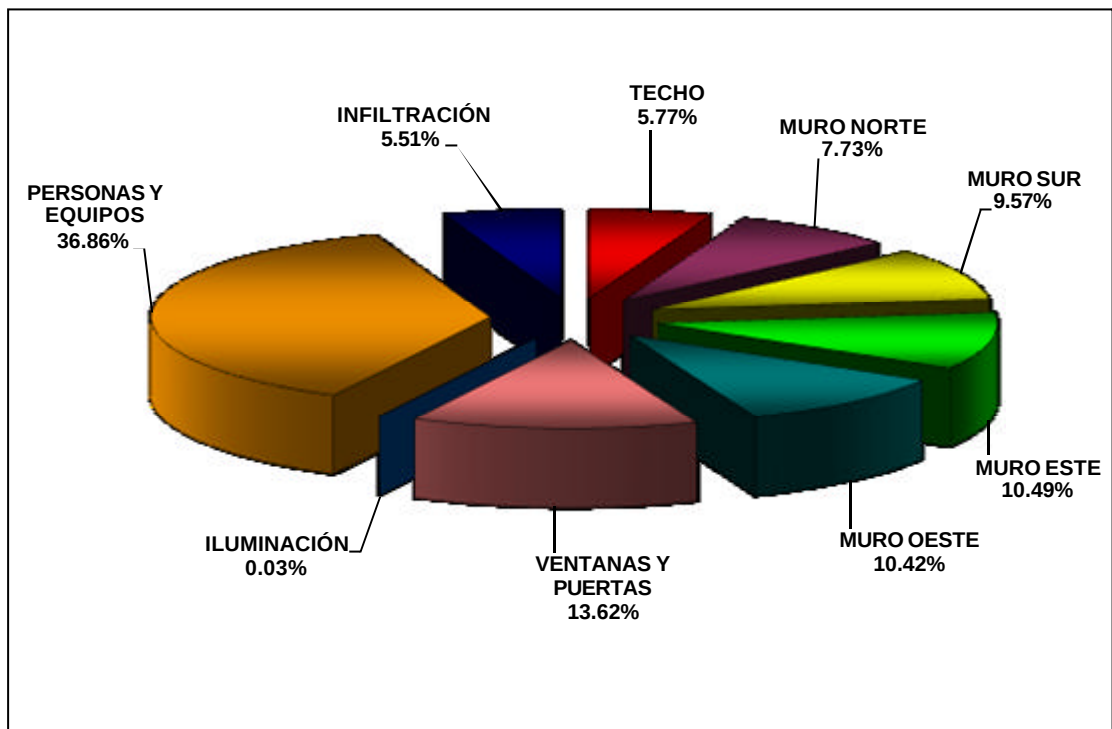


Figura 1.1. Carga de enfriamiento.

Esta carga de enfriamiento es debida a la ganancia de calor de la construcción durante el día ocasionada por el clima cálido de la región.

El estudio de los muros y techo permite tomar las medidas adecuadas para disminuir la carga de enfriamiento total de la construcción y por consiguiente esto favorecerá al ahorro energético de la región.

Otro factor importante a estudiar es la eficiencia energética de los equipos de aire acondicionado que actualmente están en el mercado.

Por último, el factor de carga de enfriamiento debido a ventanas y puertas en una construcción también es un factor que puede ocasionar un manejo adecuado de los recursos energéticos.

En regiones de climas cálidos, las condiciones climatológicas es un factor que contribuye a la captación de cargas térmicas por las

diferentes construcciones en la región y por ello en un incremento en el consumo de energía eléctrica para climatización y, por ende, una facturación mayor.

Actualmente existe un incremento en la construcción de fraccionamientos, establecimientos comerciales y naves industriales, cuyo consumo eléctrico depende del clima de la región, los materiales de construcción, aislamiento, ocupación, equipos, iluminación, etc. También existen construcciones no muy recientes a las cuales se requiere aplicar acciones correctivas para disminuir el consumo mensual.

Por ello es necesario disponer de una metodología que permita determinar las cargas de enfriamiento, el consumo y la facturación para realizar la simulación térmica de construcciones. Una vez conocido dicho comportamiento térmico se pueden plantear cambios y analizar estos como alternativas de ahorro de energía, por ejemplo, variar el material de construcción, el espesor de aislamiento, adquirir una mayor eficiencia del equipo de aire acondicionado, dimensiones y tipos de ventanas y puertas, entre otras medidas y posteriormente realizar una nueva evaluación y tomar una decisión en base a ella.

Para realizar esto es necesario contar con un programa de cómputo que opere en ambiente Windows, para que su manejo sea amigable a

los usuarios en general. A este paquete se le conoce como simulador térmico, y permite:

- Realizar el cálculo de ganancias de calor, cargas de enfriamiento, rapidez de retiro de calor y la facturación para una construcción determinada con resultados muy cercanos a los valores reales.
- Hacer modificaciones al diseño de la construcción en caso de así requerirlo con el propósito de hacer un mejor uso de la energía y reducir la facturación eléctrica.
- Analizar el impacto en el comportamiento energético de la construcción al variar diferentes condiciones ya sea climáticas, constructivas, equipos o de uso energético.

Hoy en día existen diferentes simuladores térmicos comerciales y educativos (estos simuladores se revisaran con mayor detalle en el capítulo 3) que se pueden utilizar para la evaluación térmica de una región en el planeta, pero no existe un simulador térmico específico para las regiones que se analizan en el contexto del presente trabajo y que se orientan a climas de México y regiones tropicales así como a los sistemas constructivos típicos del países latinoamericanos. Por eso el Departamento de Sistemas Energéticos del Instituto de Ingeniería de la UABC ha venido trabajando en dicha área de trabajo desde hace tiempo. Se ha avanzado en la adecuación de la metodología general de

evaluación técnica a las regiones específicas de Mexicali, Tijuana, Ensenada, Hermosillo en México y Cienfuegos en Cuba.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo matemático basado en una función periódica de Fourier que describe el comportamiento de la humedad horaria para cualquier día del año, a partir de registros históricos de humedad relativa para las diferentes ciudades de México. Así como el desarrollo de un Simulador en ambiente Windows y escrito en lenguaje Visual Basic 2008 para simulación térmica de viviendas en ciudades de climas cálidos a nivel nacional, basada en el Método de funciones de Transferencia reportado por la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE), Horas-Grado y una función periódica de Fourier que describe el comportamiento de la humedad relativa horaria, para que su manejo sea amigable a los usuarios en general.

1.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Utilizar Horas-Grado con Carga de enfriamiento y retiro de calor y determinar la facturación mensual durante todo el periodo de verano utilizando la tarifa que aplica Comisión Federal de Electricidad (CFE) para las diferentes ciudades de México.
- Calcular ganancias de calor por infiltración utilizando una función periódica de Fourier que describe el comportamiento de la

humedad relativa horaria, para las diferentes ciudades de México.

- Desarrollar una base de datos que caractericen los diferentes materiales y sistemas constructivos a nivel nacional que actualmente se están utilizando para las diferentes ciudades de México.
- Realizar la validación del simulador térmico 2008, utilizando casos reales de construcciones, realizados por el Departamento de Sistemas Energéticos de la UABC.

RENDERING 3D



<http://blog.michaelpachdesign.com/?tag=3d-renderings>

2. ANTECEDENTES

Las personas en general al realizar sus actividades diarias deben sentirse en un ambiente confortable, ¿qué significa esto?, que desde el punto de vista de la temperatura, no debe ser un ambiente muy caliente o muy frío pero tampoco debe ser un ambiente muy húmedo o muy seco y deberá tener una velocidad del aire debe ser la adecuado. En base a esto se puede concluir que existen tres factores muy importantes para determinar si un ambiente es cómodo para las personas, estos factores son:

- Temperatura.
- Humedad relativa.
- Flujo de aire.

Es importante mencionar que un ambiente de confort también depende de otro factor que es un tanto subjetivo y se refiere a la persona misma. Así, mientras ciertas condiciones de temperatura, humedad relativa y flujo de aire pueden ser agradables para una persona, para otra no lo son. Esto hace evidente la necesidad de definir los límites e intervalos de temperatura, humedad relativa y flujo de aire, la combinación de ellos produce la sensación de confort o incomodidad en las personas. La Tabla 2.1 muestra los intervalos reportados de estas variables.

Tabla 2.1. Intervalos de confort

Código	Factor	Intervalo
1	Temperatura	22 °C - 27 °C
2	Humedad relativa	40 % - 60 %
3	Velocidad del aire	15 m/min

(Yunus A. Cengel y Michael A Boles, Termodinámica, 2003)

De esta manera, una persona buscará un ambiente cuyas condiciones sean de confort ya sea en su lugar de trabajo o residencia aunque en diversas ocasiones no se logra por diferentes razones de índole económica, laboral, etc. La solución a este problema es el acondicionamiento del espacio donde se encuentra la persona, y, en el caso de regiones con clima cálidos se vuelve un aspecto no de confort sino de supervivencia (Pérez et al, 1997).

2.1 HUMEDAD

El aire seco está compuesto por una mezcla de gases de nitrógeno, oxígeno, argón y trazas de otros gases (ver Tabla 2.22), en el medio ambiente no existe el aire seco, pero siempre lo podremos encontrar acompañado con una cantidad de vapor de agua llamada humedad que varía dependiendo de las condiciones del clima de la región, esta variación de humedad es uno de los factores que marca la pauta del nivel de comodidad para un persona en una región por lo tanto es importante conocer la cantidad de humedad presente en el aire atmosférico el cual puede adecuarse mediante climatización hasta las condiciones de confort para el ser humano. El estudio de las

operaciones con aire y humedad se denomina psicrometría y en ella destaca, entre otros, dos conceptos importantes:

● **Humedad absoluta**

Es la masa de vapor de agua presente en una masa unitaria de aire seco que existe en el aire húmedo, expresada de la siguiente forma:

$$X = \frac{m_v}{m_a} \quad (\text{kg Vapor de agua / kg Aire seco}) \quad (2.1)$$

$$X = \frac{0.622 P_v}{P - P_v} \quad (2.2)$$

Donde:

X = Humedad específica o absoluta.

m_v = Masa de vapor de agua.

m_a = Masa de aire seco.

P = Presión total (presión de la mezcla vapor de agua y aire seco).

P_v = Presión de vapor del agua.

En la simulación térmica para el cálculo de ganancia de calor por infiltración se emplea la humedad específica, por lo tanto la humedad relativa proveniente del modelo matemático no se puede utilizar directamente, debido a lo antes mencionado se tiene que convertir a una humedad específica. La obtención del modelo

matemático se encuentra descrita detalladamente en la sección 2.13.

Humedad relativa

Se define como la relación entre la masa de vapor de agua que existe en el aire y la masa máxima de vapor de agua que puede contener el aire a la misma temperatura, expresada de la siguiente forma:

$$r = \frac{m_v}{m_g} \quad (2.3)$$

$$r = \frac{P}{0.622 (P - P_g)} \quad (2.4)$$

Donde:

r = Humedad relativa.

r = Humedad específica o absoluta.

P = Presión total (presión de la mezcla vapor de agua y aire seco).

P_g = $P_{sat@T}$ = Presión de saturación del agua a una temperatura.

La humedad relativa varía entre 0 y 1, en la mayoría de bibliografía especializada se reporta como porcentaje de humedad relativa, la ecuación 2.4 se tiene que multiplicar por 100 para dejarla en base a porcentaje. La información histórica de la humedad relativa proporcionada por el grupo de Meteorología del Instituto de Ingeniería se encuentra reportada en porcentaje, entonces es necesario convertir la humedad relativa a humedad específica mediante la ecuación 2.5 para utilizar en el simulador térmico.

$$p = \frac{0.622 p_g}{P - p_g} \quad (2.5)$$

Tabla 2.2: Composición del aire seco.

Código	Gas	Composición (%)
1	Nitrógeno	78
2	Oxígeno	20.95
3	Argón	0.93
4	CO ₂ , CO, SO ₂ , SO ₃	0.03
5	Xenón, Kriptón	Trazas

(José M. Pinazo Ojer, Manual de Climatización Tomo I, 1999)

2.2 REGISTRO HISTÓRICO DE HUMEDAD RELATIVA

El grupo de Meteorología del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California es el encargado de realizar la medición de la humedad relativa horaria de Mexicali y así como llevar un registro de la misma, para diferentes años. Estos registros fueron proporcionados al Área de Sistemas Energéticos del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, para hacer un estudio detallado del comportamiento de la humedad relativa a través del tiempo.

Así como la Comisión Nacional del Agua (CNA) de México es la encargada de realizar la medición de humedad relativa para las diferentes ciudades de la república mexicana, CNA proporciona información de humedad relativa para las ciudades de La Paz, Mazatlán, Guanajuato, Guadalajara y Querétaro, se utilizan en el presente trabajo.

Además se utilizaron registros de humedad relativa del portal TuTiempo.net de las ciudades de Mexicali, La Paz, Mazatlán, Guanajuato, Guadalajara, Querétaro, Los Mochis y Hermosillo.

El procedimiento que se describe a continuación es para Mexicali, pero este procedimiento se sigue para las ciudades antes mencionadas, utilizando los registros históricos de humedad relativa con los que se cuenta.

La Figura 2.1 muestra el comportamiento horario de la humedad relativa para el día 11 julio de los años 2004, 2005, 2006 y 2007. A simple vista se puede observar que la humedad relativa horaria para un día ha estado cambiando con el paso de los años, debido a esto se toma la humedad relativa horaria promedio diaria para el tratamiento estadístico.

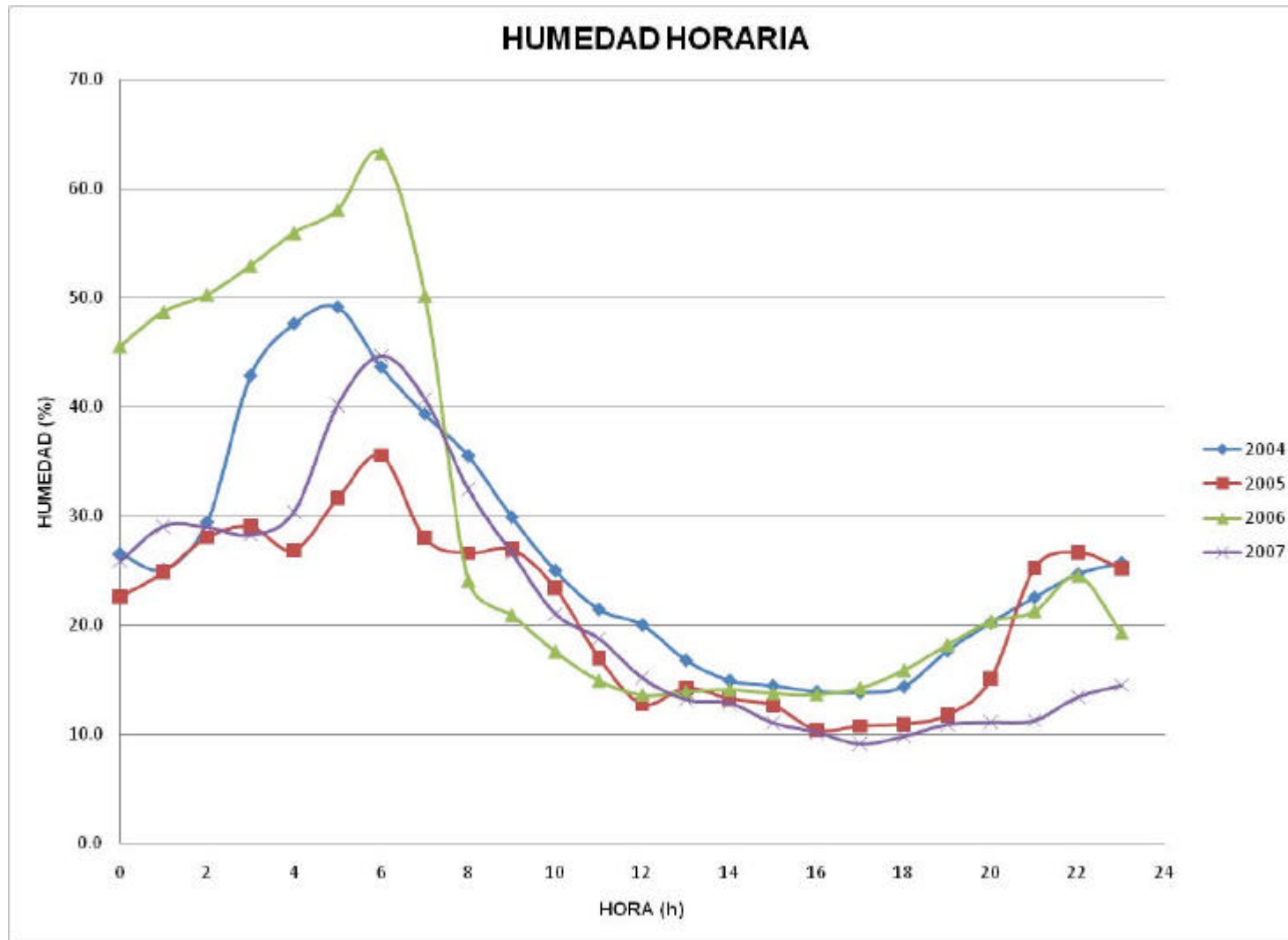


Figura 2.1: Humedad relativa horaria.

En la Figura 2.2 se muestra el comportamiento de la humedad relativa horaria promedio diaria para el día 11 de julio de los años 2004, 2005, 2006 y 2007. De esta manera el comportamiento de la humedad horaria se vuelve más estable para el tratamiento estadístico, por eso es necesario contar con la mayor cantidad de información histórica de la humedad relativa horaria.

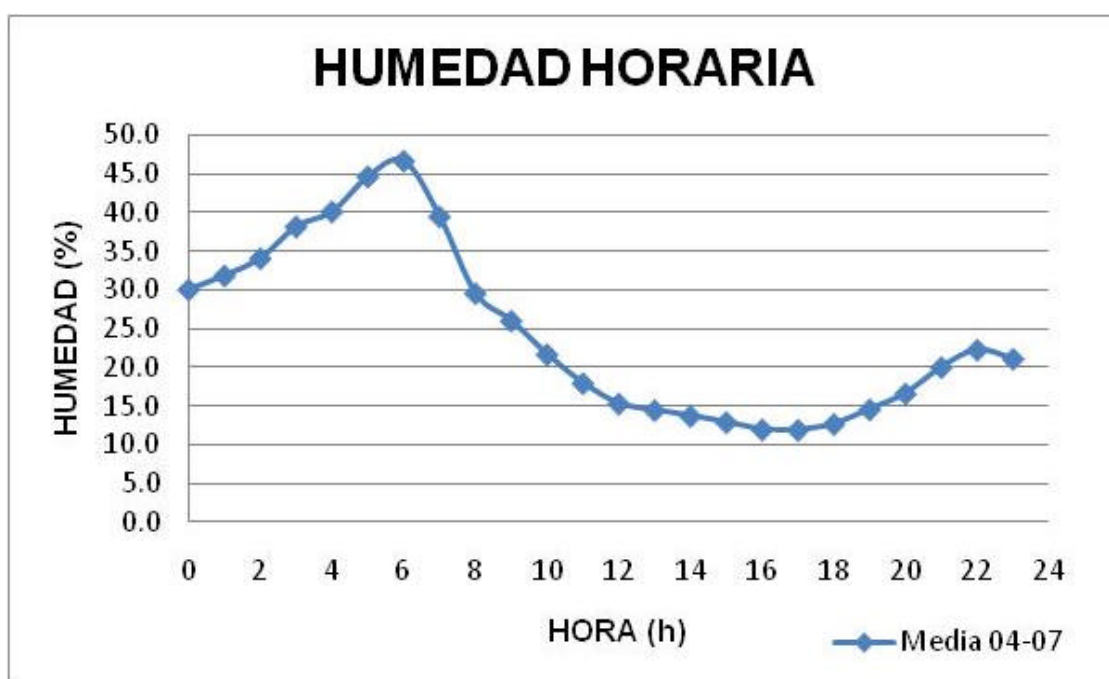


Figura 2.2: Humedad relativa horaria promedio diaria.

El modelo matemático obtenido es el resultado de un análisis estadístico de los datos históricos de humedad relativa disponibles como se detalla, en la Sección 2.3. La función periódica de Fourier obtenida para la humedad relativa se debe expresar en humedad específica promedio horaria mensual para Mexicali y así utilizarla en el cálculo de ganancia horaria de calor por infiltración y/o ventilación

cuando se está realizando un estudio térmico para diferentes construcciones en la ciudad debido a que anteriormente se utiliza la humedad específica promedio horario mensual para el periodo de verano.

2.3 ANÁLISIS HISTÓRICO DE HUMEDAD RELATIVA

Para efectuar el tratamiento estadístico de los registros de humedad y así obtener un modelo de ajuste de los mismos se utilizó el siguiente procedimiento:

a) Tabular la humedad relativa horaria para cada día de un mes de cada año.

Los datos de humedad relativa horaria tabulados correspondieron a los meses de mayo a octubre de los años 2004, 2005, 2006 y 2007 para Mexicali. Este arreglo se hace para tener un mejor manejo de la información y además se graficó el comportamiento horario de la humedad relativa de cada día para tener una mejor visión del comportamiento de la humedad relativa cuando se está haciendo el tratamiento estadístico, que busca obtener una función de ajuste del comportamiento horario de la humedad relativa.

En la Tabla A.1 del Apéndice A se muestra una tabulación para el mes de julio del año 2007 que consiste en una hoja de Excel donde la columna principal representa los días del mes, mientras el renglón

principal representa la hora del día y se llena con la humedad relativa que corresponde a cada hora de un día determinado.

b) Cálculo de la humedad relativa promedio horaria para cada día de un mes (Ver Figura 2.3).

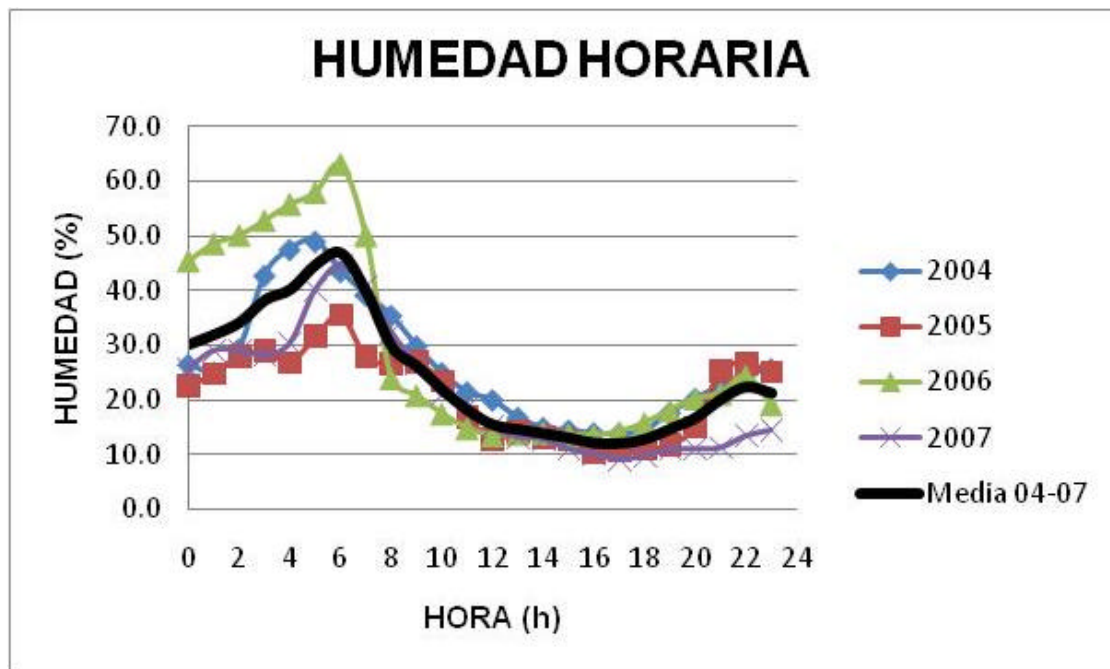


Figura 2.3: Humedad relativa promedio horaria para cada día de un mes.

Una vez tabulada la humedad relativa horaria para cada día de un mes de cada año, se calcula la humedad relativa promedio horaria de cada día del mes de los años históricos que se tienen, que consiste en sumar la humedad relativa de un día y una hora determinada de los años históricos y se divide entre el total de años históricos, estos resultados se colocan en una tabla nueva.

Esto se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$\overline{HR}_{j,k} = \frac{\sum_{i=1}^N HR_{i,j,k}}{N} \quad \begin{matrix} j = M \\ k = L \end{matrix} \quad (2.6)$$

Donde:

$\overline{HR}_{j,k}$ = Humedad relativa promedio horaria cada día un mes.

$HR_{i,j,k}$ = Humedad relativa

N = Número de años históricos con que se cuenta para el estudio

M = Día del mes

L = Hora del día

La Tabla A.2 del Apéndice A muestra la $\overline{HR}_{j,k}$ para el mes de julio, esta metodología se tiene que seguir para cada mes.

c) A la humedad relativa promedio horaria para cada día de un mes al igual que la temperatura se puede representar como una función periódica con respecto a las 24 horas del día. Que corresponden a las Ecuaciones. (2.7) a (2.12).

Como se puede apreciar en la Figura 2.4, que corresponde al día 24 de julio para la ciudad de Mexicali, B.C. México.

Dicho procedimiento y función se describen a continuación:

$$T(t) = \langle T \rangle + C \cos\left(\frac{2\pi}{24} t\right) + D \sin\left(\frac{2\pi}{24} t\right) \quad t = 1, 2, 3, \dots, 24 \quad (2.7)$$

Donde:

φ_t Humedad adimensional

$\langle l \rangle, C, D$ Coeficientes de ajuste

$H_{\max}$ Humedad máxima

$H_{\min}$ Humedad mínima

- Seleccionar los días bases: Estos días son aquellos que describen o caracterizan el comportamiento de la humedad horaria para los diferentes meses de verano para la ciudad que se quiere determinar los coeficientes de Fourier.

- Humedad horaria: Se coloca la humedad horaria para cada día seleccionado, se determina la humedad máxima y humedad mínima para cada día. Utilizando la Ecuación. 2.8 se calcula φ_t para cada hora del los días que se están trabajando.

$$\varphi_t = \frac{H_{\max} - H_t}{H_{\max} - H_{\min}} \quad (2.8)$$

- Calculo $\bar{l}_t$: Esto se hace empleando la Ecuación. 2.9, que consiste en sumar todos los valores φ_t calculado para cada día y dividirlo entre la cantidad de días que se están trabajando. Esto se hace para las 24 horas del día.

$$\bar{l}_t = \frac{\sum_{n=1}^{24} \sum_{t=1}^N \varphi_{t,n}}{N} \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \text{ y } t = 1, 2, 3, \dots, 24 \quad (2.9)$$

- **Calcula:** Consiste en sumar todas φ_t y dividirlo entre las 24 horas del día, que sería la media de los valores de φ_t .

$$\langle l \rangle = \frac{\sum_{t=1}^{24} \varphi_t}{24} \quad (2.10)$$

- **Determinación de los coeficientes C y D:** Esto se hace empleando la Ecuaciones. 2.11 y 2.12, respectivamente.

$$C = \frac{2}{24} \sum_{t=1}^{24} \varphi_t \langle l \rangle \cos \left(\frac{2\pi t}{24} \right) \quad (2.11)$$

$$D = \frac{2}{24} \sum_{t=1}^{24} \varphi_t \langle l \rangle \sin \left(\frac{2\pi t}{24} \right) \quad (2.12)$$

Posteriormente este procedimiento es aplicado a las ciudades que se incluirán en el simulador. Obteniéndose los valores mostrados en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Coeficientes de ajuste de la función periódica de Fourier
humedad horaria.

Código	Gas	$\langle l \rangle$	C	D
1	Mexicali, BC, México	0.573125	-0.117115	-0.4403
2	La Paz, BCS, México	0.476521	-0.358088	-0.297987
3	Mazatlán, SIN, México	0.490653	-0.310223	-0.269062
4	Guanajuato, GTO, México	0.461179	-0.235214	-0.372135
5	Guadalajara, JAL, México	0.452306	-0.273503	-0.36056
6	Queretaro, QTO, México	0.482799	-0.173114	-0.400434

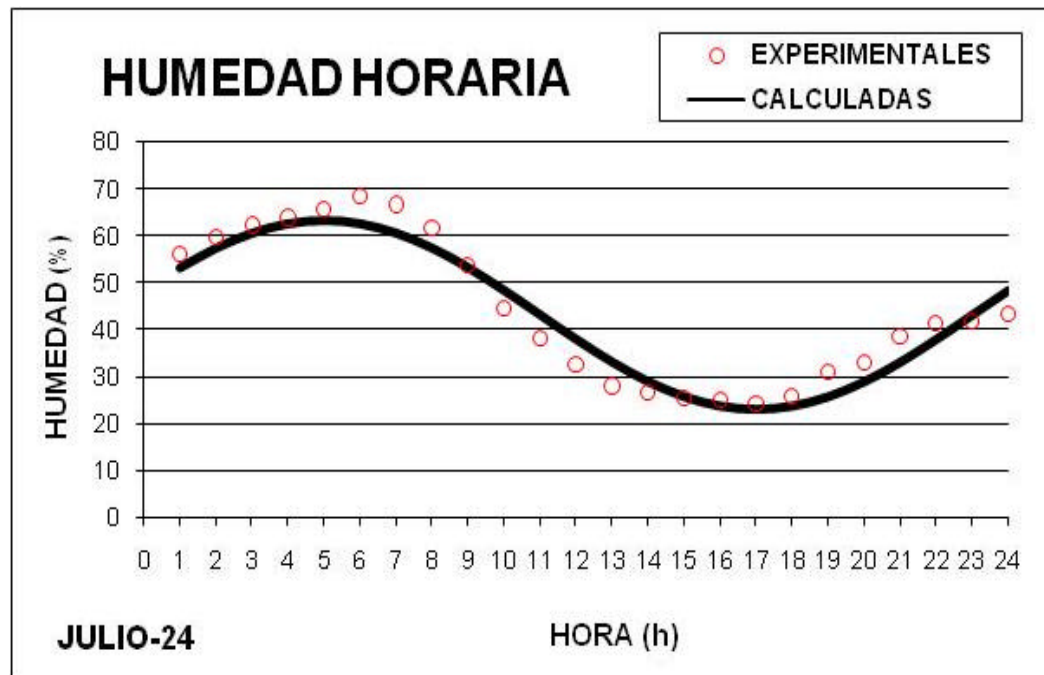


Figura 2.4. Humedad horaria para el 24 de julio Mexicali, B.C. México.

2.4 METODOLOGÍA DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

La Sociedad Americana de Ingeniería para Aire Acondicionado, Calefacción y Refrigeración (ASHRAE) establece cuatro metodologías para el cálculo de ganancia de calor para una construcción:

- Método de función de transferencia (TMF), el método de cálculo de cargas por temperatura diferencial.
- Factores de carga de enfriamiento (CLTD/CLF).
- Método de valores de temperatura diferencial total equivalente y tiempo promedio (TETD/TA).
- Método CLTD/CLF utilizado para el cálculo en residencias.

Estos métodos por su complejidad en los cálculos se requieren aplicar las herramientas computacionales para utilizar estos métodos.

ASHRAE cuenta con una amplia base de datos para los cálculos de funciones de transferencia por conducción y factores de ponderación que se usan para la estimación de las ganancias de calor horaria hacia un espacio acondicionado.

En el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, en el Área de Sistemas Energéticos se adaptó el método de funciones de transferencia para las condiciones y requerimientos regionales utilizando los sistemas computacionales, datos climatológicos y parámetros técnicos y económicos. Los resultados han sido validados con mediciones y monitoreo de campo, además de un estudio histórico de consumo, demanda y facturación eléctrica utilizando la tarifa de la región, a través de diversos proyectos y trabajos desde 1993 al 2008. Los detalles de dicha metodología pueden consultarse en el texto de McQuinston y Colaboradores. (2002).

2.5 RESISTENCIA TÉRMICA

La resistencia térmica R de un material se define como la capacidad para evitar que un flujo de calor atraviese dicho material. Si el valor de la resistencia térmica de un material es alto significa que tiene una mayor capacidad para evitar que un flujo de calor pase por él

mediante el mecanismo de conducción, en tanto que un valor bajo de resistencia térmica, significa una mayor facilidad de conducir el calor.

Por lo antes mencionado, un material aislante es aquel que opone una mayor resistencia a conducir el calor. Los mejores aislantes son aquellos que tienen una elevada resistencia térmica. La Ecuación 2.13 se aplica para calcular la velocidad de transferencia de calor por conducción, con esta ecuación se puede apreciar mejor cómo afecta la resistencia térmica a la transferencia de calor.

$$q = \frac{1}{R} A \Delta T \quad (2.13)$$

Donde:

q = Velocidad de transferencia de calor, $\frac{Btu}{h}$

R = Resistencia térmica, $\frac{hft^2 \text{ } ^\circ F}{Btu}$

A = Área de la superficie, ft^2

ΔT = Diferencia de temperatura, $^\circ F$

Si en la Ecuación 2.13 se sustituye un valor elevado de resistencia térmica, q será pequeño y viceversa, es decir, la velocidad de transferencia de calor q es inversamente proporcional a la resistencia térmica.

Cuando se realiza una evaluación técnica es importante conocer los materiales que constituyen la envolvente de la construcción para así

determinar sus propiedades. ASHRAE reporta una tabla de propiedades de los materiales más comunes de construcción. La Tabla 2.4 muestra las propiedades de los materiales más comunes en muros y techos así como la nomenclatura que los identifica.

Tabla 2.4: Propiedades de algunos materiales usados en muros y techos.

Código	Descripción	Espesor	k	ρ	C_p	R	Masa / Área
		ft	$\frac{\text{Btu}}{\text{hft} \cdot ^\circ\text{F}}$	$\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$	$\frac{\text{Btu}}{\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}}$	$\frac{^\circ\text{Fft}^2 \cdot \text{h}}{\text{Btu}}$	$\frac{\text{lb}}{\text{ft}^2}$
A0	Resistencia superficie exterior	0	0	0	0	0.33	0
A2	Ladrillo cara 4 pulg	0.333	0.77	125	0.22	0.43	41.7
A3	Recubrimiento de acero	0.005	26	480	0.1	0	2.4
A4	Pedacera ½ pulg	0.042	0.11	70	0.4	0.38	2.2
A6	Acabados	0.042	0.24	78	0.26	0.17	3.3
B1	Resistencia al aire libre	0	0	0	0	0.91	0
B2	Aislamiento 1 pulg	0.083	0.03	2	0.2	3.33	0.2
B3	Aislamiento 2 pulg	0.167	0.03	2	0.2	6.67	0.3
B4	Aislamiento 3 pulg	0.25	0.03	2	0.2	10	0.5
B7	Madera 1 pulg	0.083	0.07	37	0.6	10	3.1
B8	Madera 2 ½ pulg	0.208	0.07	37	0.6	2.98	7.7
B9	Madera 4 pulg	0.333	0.07	37	0.6	4.76	12.3
B10	Madera 2 pulg	0.167	0.07	37	0.6	2.39	6.2
C1	Loseta de arcilla de 4 pulg	0.333	0.33	70	0.2	1.01	23.3
C2	Block concreto ligero 4 pulg	0.333	0.22	38	0.2	1.51	12.7
C3	Block concreto pesado 4 pulg	0.333	0.47	61	0.2	0.71	20.3
C4	Ladrillo común de 4 pulg	0.333	0.42	120	0.2	0.79	40
C5	Concreto pesado 4 pulg	0.333	1	140	0.2	0.33	46.7
C6	Loseta de arcilla 8 pulg	0.667	0.33	70	0.2	2	46.7
C8	Block concreto pesado 8 pulg	0.667	0.6	61	0.2	1.11	40.7
C9	Ladrillo común 8 pulg	0.667	0.42	120	0.2	1.59	80
C10	Concreto pesado 8 pulg	0.667	1	140	0.2	0.67	93.4
C11	Concreto pesado 12 pulg	1	1	140	0.2	1	140
C13	Concreto pesado 6 pulg	0.5	1	140	0.2	0.5	70
C18	Block conc. Pesado 8 pulg	0.667	0.34	53	0.2	1.96	35.4
C19	Block conc. Ligero 12 pulg	1	0.08	19	0.2	12.5	19
C20	Block conc. Pesado 12 pulg	1	0.39	56	0.2	2.56	56
E0	Resistencia superficie interior	0	0	0	0	0.69	0
E1	Emplaste ¾ pulg	0.063	0.42	100	0.2	0.15	6.3
E4	Cielo	0	0	0	0	1	0
E5	Loseta acústica	0.063	0.04	30	0.2	1.79	1.9

(ASHRAE, Cooling and Heating Calculation Manual, 1992)

Donde:

k ? Conductividad térmica

ρ ? Densidad

C_p ? Calor específico

R ? Resistencia térmica

En el análisis técnico de una construcción se debe considerar los materiales aislantes con mayor resistencia térmica y que estén disponibles en el mercado para que la evaluación de alternativas produzca resultados y propuestas factibles técnica y económicamente.

Como se muestra en la Figura 2.5

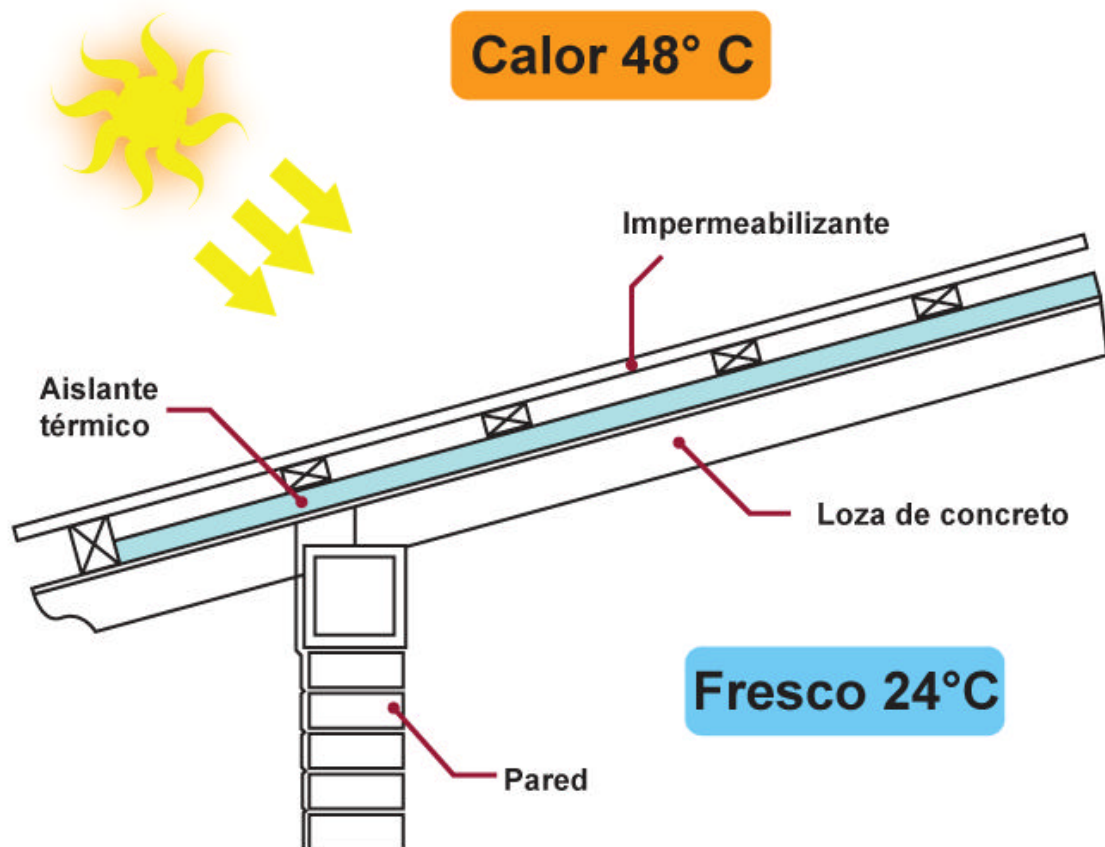


Figura 2.5. Resistencia térmica de aislante.

<http://www.fide.org.mx/residencial/img/aislante.png>

2.6 COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA

La absorción de energía en muros y techos de una construcción está basada en los tres mecanismos de transferencia del calor, que son la conducción, convección y radiación.

- **Conducción:** Es el mecanismo de intercambio de energía interna de una parte del muro o techo a otra debido al intercambio de energía cinética de las moléculas por comunicación directa, por diferencia de temperatura exterior y temperatura interior en los muros y techos de una construcción (Ver Figura 2.6.).

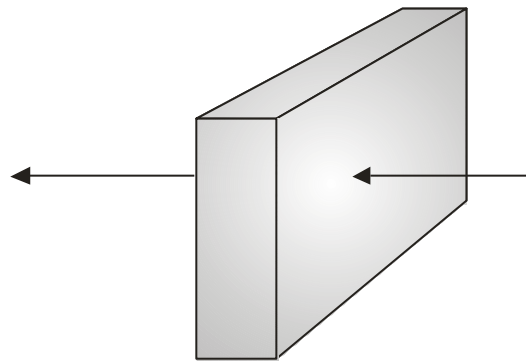


Figura 2.6. Transferencia de calor por conducción.

- **Convección:** Es el mecanismo de transferencia de calor que se debe a un fluido que está en contacto con el muro o techo (Ver Figura 2.7.).

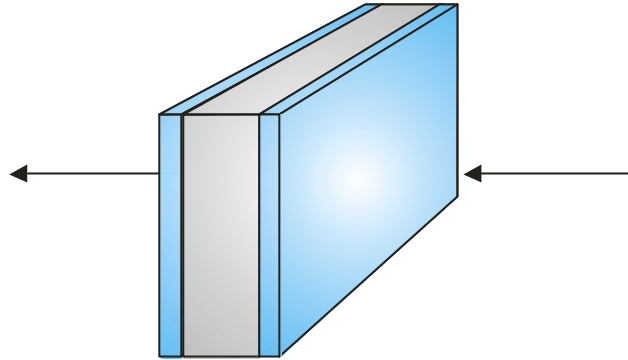


Figura 2.7. Transferencia de calor por Convección.

- Radiación: Es el mecanismo de transferencia de calor que se debe a la radiación electromagnética emitida por el sol cuando incide en el muro o techo (Ver Figura 2.8.).

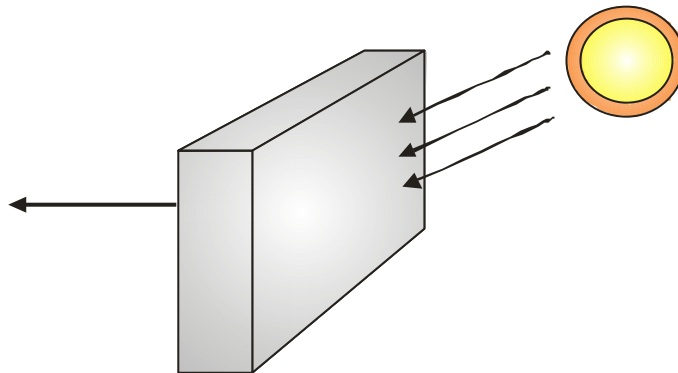


Figura 2.8. Transferencia de calor por radiación.

La absorción de energía a través de techo y muros de la envolvente de una construcción está controlada esencialmente por el mecanismo de conducción.

El MFT hace un arreglo de tal manera que la absorción de energía de la construcción quede en función de la conducción, en la Sección 2.12 se explica detalladamente el arreglo por el MFT.

La absorción de energía a través de techo y muros de la envolvente de una construcción está controlada esencialmente por el mecanismo de conducción.

$$q = UA\Delta T \quad (2.14)$$

Donde:

q ? Velocidad de transferencia de calor, $\frac{Btu}{h}$

U ? Coeficiente de transferencia, $\frac{Btu}{hft^2\text{ }^{\circ}F}$

A ? Área de la superficie, ft^2

ΔT ? Diferencia de temperatura, $^{\circ}F$

El coeficiente de transferencia de calor se define por la siguiente expresión:

$$U = \frac{1}{R} \quad (2.15)$$

Por lo que existe una relación entre resistencia térmica R y el coeficiente de transferencia U . Para un material que tiene un valor elevado de R da como resultado un valor bajo de U que significa que es un material que no permite la conducción de calor a través de él.

2.7 PARÁMETROS SOLARES

Una superficie es calentada en el transcurso del día debido a la radiación solar que incide sobre dicha superficie (Figura 2.9), este calentamiento ocasiona una ganancia de calor hacia el interior de una envolvente. La intensidad de radiación es la cantidad de energía que incide por unidad de superficie. La energía es absorbida por muros, techos, puertas y ventanas.

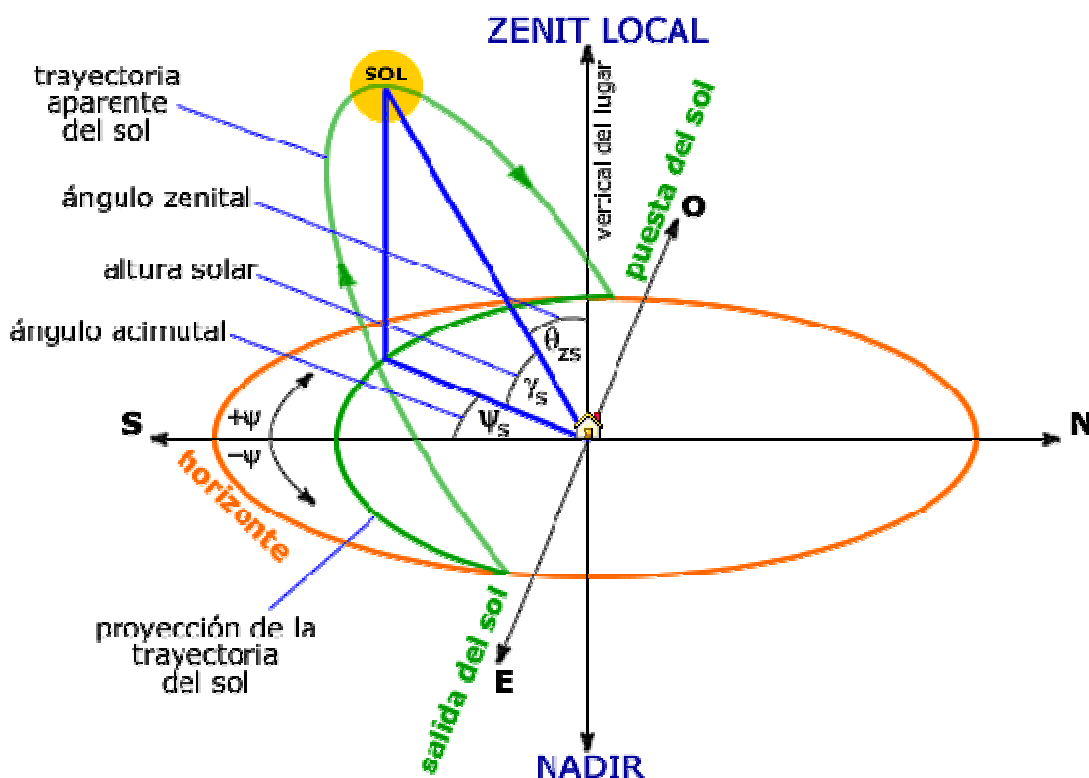


Figura 2.9. Transferencia de calor por conducción.

<http://img70.imageshack.us/img70/4287/posisolad2.gif>

La intensidad solar normal directa sobre la superficie terrestre para un día claro es:

$$I_{DN} = A_e \left(\frac{B}{\sin \theta} \right) \quad (2.16)$$

Donde:

A, B ? Parámetros solares, que se muestran en la Tabla 2.5

I_{DN} ? Intensidad de radiación solar normal directa $\frac{Btu}{hft^2}$

La radiación directa I_D sobre la superficie se obtiene de multiplicar la radiación normal directa I_{ND} por el coseno del ángulo incidente θ .

$$I_D = I_{DN} \cos \theta \quad (2.17)$$

Donde:

$\cos \theta \geq 0$, para un ángulo θ menor que cero, la radiación directa $I_D = 0$.

Para superficies verticales, por ejemplo muros, y para superficies horizontales, por ejemplo techos, la cantidad de radiación difusa incidente se determina por la siguiente expresión:

$$Y = 0.55 + 0.473 \cos \theta + 0.31 \cos^2 \theta \quad (2.18)$$

Donde:

$\cos \theta \geq 0.2$, de otro modo, $Y = 0.45$.

La intensidad de radiación difusa es representada por

$$I_d = I_{ds} + I_{dg} \quad (2.19)$$

Donde:

I_d ? Intensidad de radiación difusa, $\frac{Btu}{hft^2}$

I_{ds} ? Radiación difusa incidente sobre la superficie proveniente del

cielo, $\frac{Btu}{hft^2}$

I_{dg} ? Radiación difusa incidente sobre la superficie reflejada por la

tierra, $\frac{Btu}{hft^2}$

Para superficies verticales:

$$I_{ds} = CI_{DN} \quad (2.20)$$

$$I_{dg} = I_{DN} C \sin \theta_g \quad (2.21)$$

Donde:

C ? Parámetro solar

θ_g ? Reflectancia de la tierra, usualmente $\theta_g = 0.2$

Para superficies no verticales:

$$I_{ds} = CI_{DN} \frac{1 + \cos \theta}{2} \quad (2.22)$$

$$I_{dg} = I_{DN} C \sin \theta_g \frac{1 + \cos \theta}{2} \quad (2.23)$$

La intensidad de radiación total incidente sobre la superficie es:

$$I_t = I_D + I_d \quad (2.24)$$

Los términos θ, θ_g de las expresiones anteriores provienen del ángulo solar, la posición solar es dependiente del tiempo solar:

$$\text{Tiempo solar} = \text{Tiempo estándar} + 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (2.25)$$

Donde:

L_{st} ? Meridiano estándar para la zona en grados.

L_{loc} ? Longitud del lugar

E ? Parámetro para la ecuación del tiempo

En horario de invierno:

Tiempo estándar = Tiempo de horario de verano – 1 (2.26)

El ángulo horario es:

$$H ? \frac{\text{Minutos desde la hora local del medio día}}{\frac{4 \text{ min}}{\text{Grados de longitud}}} \quad (2.27)$$

La altitud solar ? es el ángulo del sol sobre la horizontal y está determinada por:

$$\sin ? = \cos L \cos ? \cos ? + \sin L \sin ? \quad (2.28)$$

Donde:

L ? Latitud, en grados

$?$? Declinación, en grados. Tabla 2.5

$?$? Altitud solar, en grados

El azimuth solar ? es el ángulo en el plano horizontal entre el sur real y la posición del sol, los ángulos del este al sur son negativos, y los ángulos del oeste al sur son positivos:

$$\cos ? = \frac{\sin ? \sin L + \sin ?}{\cos ? \cos L} \quad (2.29)$$

Donde:

γ Azimutal solar, en grados

La superficie-solar azimutal γ es el ángulo entre la proyección de los rayos solares en un plano horizontal y la proyección de la normal a la superficie en el plano horizontal, los ángulos del este al sur son negativos, y los ángulos del oeste al sur son positivos.

$$\cos \gamma = \frac{\cos \delta \sin \alpha}{\sin \delta} \quad (2.30)$$

Donde:

α Superficie azimutal, en grados

δ Superficie-solar azimutal, en grados

El ángulo incidente θ es el ángulo entre los rayos solares y la superficie solar;

$$\cos \theta = \cos \delta \cos \alpha \sin \gamma + \sin \delta \cos \gamma \quad (2.31)$$

Donde:

α Superficie inclinada

$\gamma = 0$ Para superficie horizontal

$\gamma = 90$ Para superficie vertical

Tabla 2.5 Parámetros solares.

ECUACIÓN DE TIEMPO		DECLINACIÓN	A	B	C
Mes	min	Grados	$\frac{Btu}{hft^2}$	Adimensional	Adimensional
Enero	-11.2	-20	381.2	0.141	0.103
Febrero	-13.9	-10.8	376.4	0.142	0.104
Marzo	-7.5	0	369.1	0.149	0.109
Abril	1.1	11.6	358.3	0.164	0.12
Mayo	3.3	20	350.7	0.177	0.13
Junio	-1.4	23.45	346.3	0.185	0.137
Julio	-6.2	20.6	346.6	0.186	0.138
Agosto	-2.4	12.3	351	0.182	0.134
Septiembre	7.5	0	360.2	0.165	0.121
Octubre	15.4	-10.5	369.7	0.152	0.111
Noviembre	13.8	-19.8	377.3	0.142	0.106
Diciembre	1.6	-23.45	381.8	0.141	0.103

(ASHRAE, Cooling and Heating Calculation Manual 1992)

2.8 TEMPERATURA HORARIA

La temperatura de una determinada región se puede representar con una función periódica con respecto a las 24 horas del día. En el Área de Energía del Instituto de Ingeniería de la UABC con un estudio histórico de temperatura de la región se desarrolló un modelo matemático basado en una función periódica de Fourier que describe el comportamiento de la temperatura horaria para cualquier día del año. Dicha procedimiento y función se describen a continuación:

$$T_t = \langle m \rangle + A \cos\left(\frac{2\pi}{24} t\right) + B \sin\left(\frac{2\pi}{24} t\right) \quad t = 1, 2, 3, \dots, 24 \quad (2.32)$$

Donde:

T_t Temperatura adimensional

$\langle m \rangle, A, B$ Coeficientes de ajuste

$T_{\max}$? Temperatura máxima

$T_{\min}$? Temperatura mínima

- Seleccionar los días bases: Estos días son aquellos que describen o caracterizan el comportamiento de la temperatura horaria para los diferentes meses de verano para la ciudad que se quiere determinar los coeficientes de Fourier.

- Temperatura horaria: Se coloca la temperatura horaria para cada día seleccionado, se determina la temperatura máxima y temperatura mínima para cada día. Utilizando la Ecuación. 2.33 se calcula T_t para cada hora de los días que se están trabajando.

$$T_t = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{24} \cdot t + T_{\min} \quad (2.33)$$

- Calculo m_t : Esto se hace empleando la Ecuación. 2.34, que consiste en sumar todos los valores T_t calculado para cada día y dividirlo entre la cantidad de días que se están trabajando. Esto se hace para las 24 horas del día.

$$m_t = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} T_{t,n}}{N \cdot 24} \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \text{ y } t = 1, 2, 3, \dots, 24 \quad (2.34)$$

- Calcula: Consiste en sumar todas m_t y dividirlo entre las 24 horas del día, que sería la media de los valores de m_t .

$$\langle m \rangle = \frac{\int_0^{24} m(t) dt}{24} \quad (2.35)$$

● Determinación de los coeficientes A y B : Esto se hace empleando la Ecuaciones. 2.35 y 2.36, respectivamente.

$$A = \frac{2}{24} \int_0^{24} m(t) \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right) dt \quad (2.36)$$

$$B = \frac{2}{24} \int_0^{24} m(t) \sin\left(\frac{2\pi t}{24}\right) dt \quad (2.37)$$

Este procedimiento se aplica a cada ciudad a estudiar para la simulación. Obteniéndose los valores mostrados en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Coeficientes de ajuste de la función periódica de Fourier temperatura horaria.

Código	Gas	$\langle m \rangle$	A	B
1	Mexicali, BC, México	0.491625	0.200187	0.424042
2	La Paz, BCS, México	0.541707	0.342245	0.324545
3	Mazatlán, SIN, México	0.492639	0.333189	0.292483
4	Guanajuato, GTO, México	0.567752	0.241427	0.38722
5	Guadalajara, JAL, México	0.556745	0.234757	0.392309
6	Queretaro, QTO, México	0.564477	0.264559	0.366793

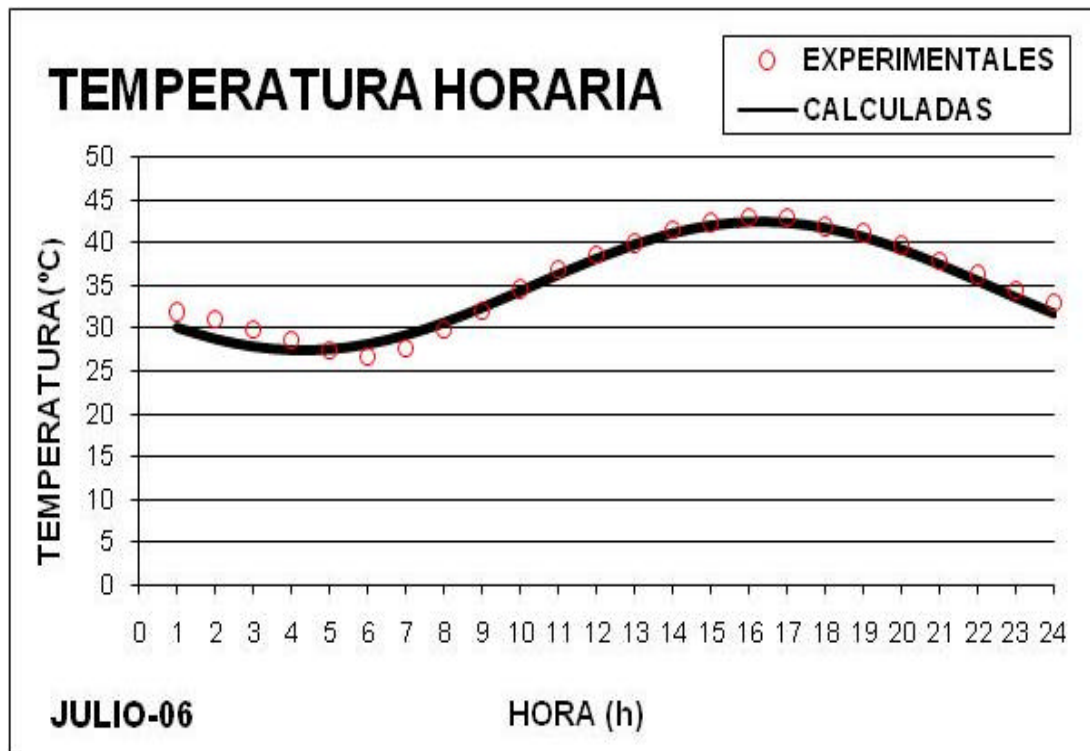


Figura 2.10. Temperatura horaria para el 06 de julio Mexicali, B.C.

México.

2.9 HORAS – GRADO

Es un criterio que se utiliza para correlacionar un grupo de días base en el verano para obtener una función que permita caracterizar el comportamiento energético de una construcción en cuanto a consumo, demanda y facturación (Figura 2.11).

Las horas-grado están representadas por la siguiente ecuación:

$$HG = \int_{T_{ref}}^{T_{ext}} \int_0^{24} T dt dT \quad (2.38)$$

Resolviendo la doble integral se obtiene:

$$HG = 24 \left(T_{max} - T^0 \right) \left(0.53412 T_{max} - T_{min} \right) \quad (2.39)$$

Donde:

HG ? Horas-grado, $h^{\circ}F$

$T_{\max}$? Temperatura máxima del día, $^{\circ}F$

$T_{\min}$? Temperatura mínima del día, $^{\circ}F$

T^0 ? Temperatura de referencia, $^{\circ}F$

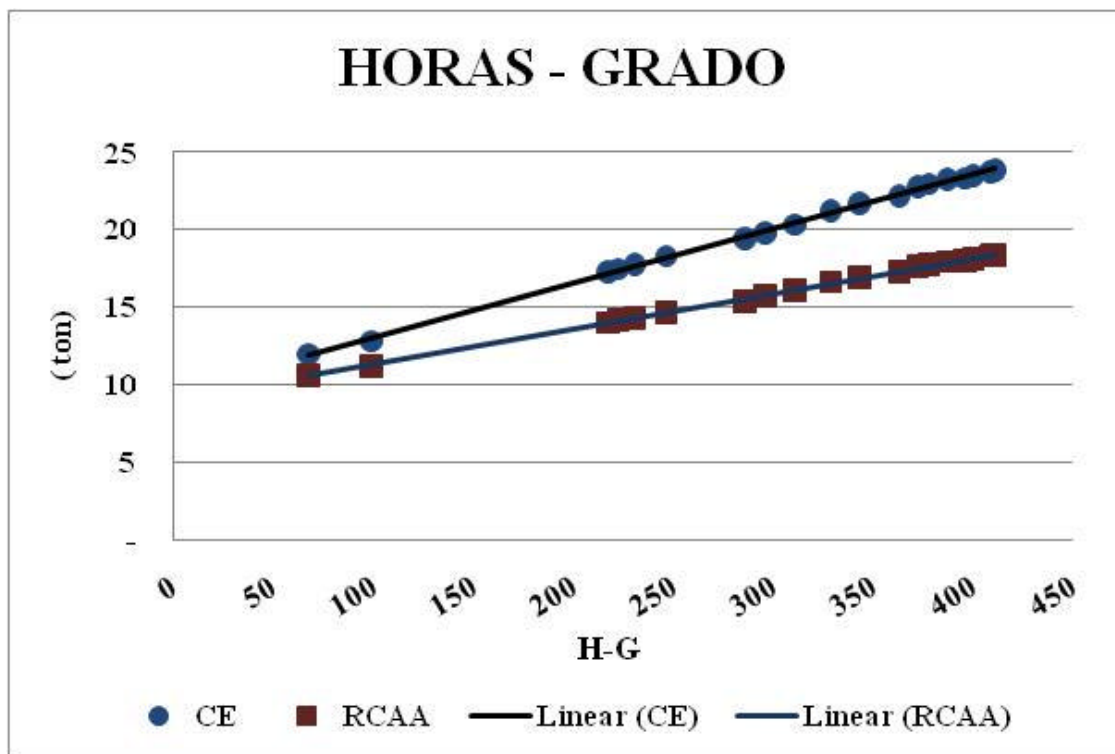


Figura 2.11. Horas-grado, carga de enfriamiento y retiro de calor.

Cuando se emplea el modelo matemático de horas-grado se pueden obtener tres posibles resultados:

- Horas-grado positivas: Indican requerimiento de enfriamiento.
- Horas-grado cero: Indican condiciones de confort, es decir, no es necesario climatizar el espacio.
- Horas-grados negativas: Indican requerimiento de calefacción.

La Figura 2.12 muestra la representación esquemática de las horas-grado para los tres criterios antes descritos.

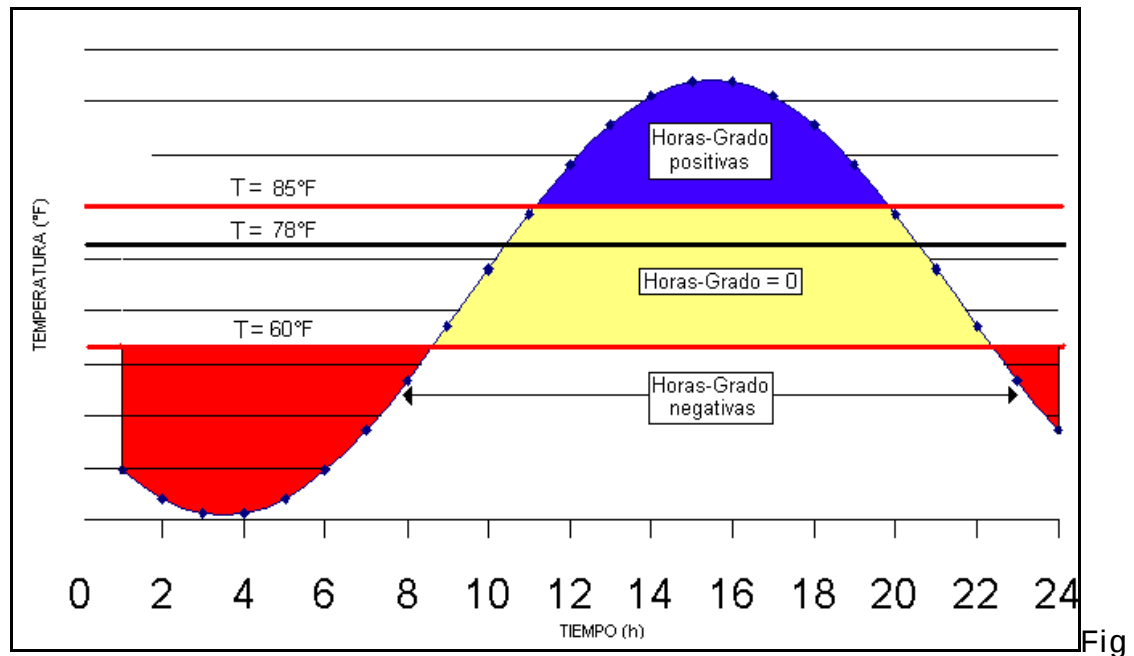


Figura 2.12: Horas-grado para un día del año.

2.10 TEMPERATURA AIRE-SOL

La ganancia de calor por absorción de radiación solar en una superficie se puede calcular por la siguiente expresión.

$$\frac{q}{A} = I_t \cdot h_0 \cdot t_0 \cdot t_s \cdot R \quad (2.40)$$

Donde:

h_0 Absortancia por la superficie de la envolvente a la radiación solar.

I_t Radiación solar total que incide en la superficie de la envolvente

$$\frac{Btu}{hft^2}$$

h_0 ? Coeficiente de transferencia de calor convectivo y de longitud de

onda larga en la superficie externa de la envolvente $\frac{Btu}{hft^2 ^\circ F}$.

t_0 ? Temperatura del aire exterior $^\circ F$.

t_s ? Temperatura de la superficie de la envolvente $^\circ F$.

ϵ ? Emitancia de la superficie de la envolvente

R ? Diferencia entre la radiación de onda larga que incide sobre la superficie de la envolvente proveniente de la bóveda celeste y del entorno, y la radiación emitida por un cuerpo negro a la temperatura del aire exterior $\frac{Btu}{hft^2}$.

La temperatura aire-sol, t_e , se define como la temperatura que tendría el aire exterior para provocar el mismo efecto convectivo de flujo de calor hacia la superficie externa de la envolvente de una construcción en ausencia de luz solar e intercambio de calor por radiación de onda larga.

El flujo de calor convectivo se determina mediante la siguiente ecuación.

$$\frac{q}{A} = h_0(t_e - t_s) \quad (2.41)$$

Igualando la Ecuación 2.40 en la Ecuación 2.41 y despejando para t_e , se obtiene la ecuación para determinar la temperatura aire-sol.

$$t_e \approx t_0 \approx \frac{I_t}{h_0} \approx \frac{R}{h_0} \quad (2.42)$$

2.11 COEFICIENTES DEL ESPACIO

Ventanas y puertas

Los factores de ganancia de calor solar (SHGF) son las ganancias horarias de calor solar que ocurren en un momento dado y para una orientación específica a través de un pie cuadrado de vidrio de doble resistencia (DSA).

El método de funciones de transferencia (MFT) calcula por separado la ganancia de calor solar transmitida y absorbida, por tanto, este método tiene entonces factores de ganancia de calor solar transmitido (TSHGF) y factores de ganancia de calor solar absorbido (ASHGF).

Las expresiones para el cálculo de ASHGF y TSHGF para ventanas están en función de los coeficientes para vidrio de doble resistencia, mostrados en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Coeficientes para vidrio de doble resistencia.

i	a_j	t_j
0	0.01154	-0.00885
1	0.77674	2.71235
2	-3.94657	-0.52062
3	8.57881	-7.07329
4	-8.38135	9.75995
5	3.01188	-3.89922

(ASHRAE, Cooling and Heating Calculation Manual 1992).

La transmisividad de la radiación solar directa que incide en un ángulo θ se determina mediante la siguiente expresión:

$$\tau_D = \sum_{j=0}^5 \tau_j \cos^j \theta \quad (2.43)$$

Donde:

τ_j = Coeficiente de transmisión para el vidrio.

τ_D = Transmitancia del vidrio doble resistencia a la radiación directa.

Mientras que la transmisividad de la radiación difusa se determina con la ecuación:

$$\tau_d = \sum_{j=0}^5 \tau_j \eta_j^2 \quad (2.44)$$

Donde:

τ_d = Transmitancia del vidrio de doble resistencia a la radiación difusa.

El factor de ganancia de calor solar transmitido es calculado con la expresión:

$$TSHGF = I_D \tau_D \cos \theta + 2 I_d \tau_d \frac{\tau_j}{\eta_j^2} \quad (2.45)$$

$$TSHGF = I_D \tau_D + 2 I_d \tau_d \quad (2.46)$$

La absorptividad de la radiación solar directa incidente a un ángulo θ está determinada por la expresión:

$$\alpha_D = \sum_{j=0}^5 a_j \cos^j \theta \quad (2.47)$$

Donde:

a_j = Coeficiente de absorción para el vidrio

α_D = Absortancia del vidrio de doble resistencia a la radiación directa

Mientras que la absorptividad de la radiación solar difusa se determina por la expresión:

$$\tau_d = 2 \prod_{j=0}^5 \frac{a_j}{\tau_j} \quad (2.48)$$

Donde:

τ_d = Absortancia del vidrio doble resistencia a la radiación solar difusa

El factor de ganancia de calor solar absorbido es calculado con la expresión:

$$ASHGF = I_D \prod_{j=0}^5 a_j \cos \theta_j + 2 I_d \prod_{j=0}^5 \frac{a_j}{\tau_j} \quad (2.49)$$

$$ASHGF = I_D \tau_D + 2 I_d \tau_d \quad (2.50)$$

La ganancia de calor solar transmitido se calcula por:

$$TSHG = \tau TSHGF \eta_{SC} \eta_A \quad (2.51)$$

Donde:

SC = Coeficiente de sombreado

A = Área expuesta

La ganancia de calor solar absorbido está dado por:

$$ASHG = \tau ASHGF \eta_{SC} \eta_A \eta_{N_i} \quad (2.52)$$

Donde:

N_i = Fracción de la ganancia de calor solar absorbido que se transfiere hacia el interior.

La fracción depende de la magnitud relativa de los coeficientes de transferencia de calor internos y externos. La siguiente expresión es un cálculo aproximado.

$$N_i \approx \frac{h_i}{h_i + h_o} \quad (2.53)$$

Para las expresiones anteriores se encuentran reportadas en la literatura especializada los coeficientes de sombreado τ_{SC} para condiciones de convección natural en el interior de la ventana y una velocidad de 7.5 millas por hora para la superficie exterior de la ventana. Con estas condiciones se reporta los siguientes valores de

$h_i \approx 1.46 \frac{\text{Btu}}{\text{hft}^2 \text{F}}$ y $h_o \approx 4.0 \frac{\text{Btu}}{\text{hft}^2 \text{F}}$, sustituyendo en la Ecuación 2.53 se obtiene $N_i \approx 0.267$. La ganancia de calor solar instantánea es determinada por:

$$SHG \approx TSHG \approx ASHG \quad (2.54)$$

Personas

La ganancia de calor debida a las personas que se encuentran en el interior del espacio está dividida en dos componentes:

- Calor sensible
- Calor latente

Las dos componentes anteriores varían de acuerdo al nivel de actividad de las personas, generalmente, se considera que el calor latente de una persona aumenta dependiendo del nivel de actividad.

Existen tablas donde se puede encontrar la ganancia de calor de personas adultas y niños, hombres y mujeres. Las tablas reportan desde una persona sentada en un teatro, hasta un atleta en un gimnasio.

Las siguientes expresiones se emplean para determinar la ganancia de calor debida a personas:

$$q_l \approx NF_u q'_l \quad (2.55)$$

$$q_s \approx NF_u q'_s \quad (2.56)$$

Donde:

$$q_l \approx \text{Ganancia de calor latente, } \frac{Btu}{h}$$

$$q_s \approx \text{Ganancia de calor sensible, } \frac{Btu}{h}$$

$N \approx$ Número máximo de personas que se espera que ocupen el espacio

$F_u \approx$ Factor de uso

$q'_l \approx$ Ganancia de calor por persona debida a calor latente, reportada en

tablas, $\frac{Btu}{h \approx Persona}$

$q'_s \approx$ Ganancia de calor por persona debida a calor sensible, reportada

en tablas, $\frac{Btu}{h \approx Persona}$

Iluminación

La rapidez de ganancia de calor para un elemento emisor de luz en cualquier momento dado puede ser diferente al potencial suministrado al sistema de iluminación.

El espacio interior de la envolvente tiene como fuente principal de ganancia de calor a los elementos emisores de luz, pero además, cuenta con una contribución significativa de ganancia de calor que es generado por componentes asociados a estos elementos. Para estimar la rapidez de ganancia de calor instantáneas se emplea la siguiente expresión:

$$q = 3.41WF_uF_s \quad (2.57)$$

Donde:

W ? Potencial total instalada en Watts.

F_u ? Factor de uso, relación de Watts utilizados a los Watts instalados.

F_s ? Factor de tolerancia para componentes asociados.

Para lámparas fluorescentes el factor de tolerancia por balastro es del orden de los 2.19.

Se considera que para sistemas fluorescentes la ganancia de calor es de 59% radiante y el 41% convectivo, en tanto que los sistemas incandescentes es el 80% radiantes y el 20% convectivo, en la ganancia de calor.

Equipos

Para determinar la contribución a la ganancia de calor debida a equipos operados por un motor eléctrico la literatura especializada de ASHRAE hace las siguientes clasificaciones:

- Si el equipo y el motor están en el interior del espacio, la ganancia de calor está representada por la siguiente expresión.

$$q_m = 2545 \frac{HP}{E_m} F_l F_u \quad (2.58)$$

- Si el equipo o motor están en el exterior del espacio.

- Equipo en el exterior del espacio.

$$q_m = 2545 \frac{HP}{E_m} F_l F_u \quad (2.59)$$

- Motor en el exterior del espacio.

$$q_m = 2545 HP F_l F_u \quad (2.60)$$

Donde:

q_m ? Calor equivalente de operación del equipo, $\frac{Btu}{h}$

HP ? Potencia en la flecha del motor

E_m ? Eficiencia del motor, es una fracción decimal menor a 1

F_l ? Factor de carga del motor

F_u ? Factor de uso del motor

Además existen otros equipos que contribuyen a la ganancia de calor como los utilizados en la preparación de alimentos, equipo de hospitales, laboratorio, equipos de oficina, están reportados en tablas

los calores sensibles y latentes en función de las características del equipo.

2.12 GANANCIA DE CALOR

La envolvente de una construcción en el transcurso del día recibe energía principalmente proveniente de la radiación solar, la cual, una parte es absorbida por su superficie. Esto incrementa la temperatura de dicha envolvente repercutiendo en el comportamiento del espacio interior. A este fenómeno se conoce como ganancia de calor.

Una definición más formal de la ganancia de calor es la siguiente: Es la energía absorbida por la envolvente de una construcción, así como la de determinadas cargas internas durante el transcurso del día. La energía absorbida es liberada posteriormente al aire interior convirtiéndose así en carga de enfriamiento. Este fenómeno hace necesario el uso de los sistemas de climatización para retirar la energía absorbida por el edificio.

La energía que provoca la ganancia de calor proviene de:

- Radiación solar a través de los muros, techos, puertas, tragaluces y vidrios. La radiación solar puede ser directa o difusa.
- ✱ La radiación directa es el tipo de radiación que incide sobre la envolvente de una construcción, una vez atravesó la atmósfera y alcanzó la superficie terrestre.

✱ La radiación difusa es el tipo de radiación que irradia la atmósfera al haber sido absorbida a su paso a través de ella y que incide sobre la envolvente de la construcción.

● Iluminación.

● Personas.

● Equipos (electrodomésticos, comerciales e industriales).

● infiltración.

Para hacer una evaluación técnico en una vivienda es necesario conocer el comportamiento térmico de la misma, esto se logra calculando las ganancias instantáneas de calor con el Método de Funciones de Transferencia (MFT). El MFT describe el comportamiento térmico dentro de un muro, techo, separación, azotea o piso, conociendo valores previos de comportamiento térmico y valores anteriores de temperatura dentro y fuera de la envolvente de una construcción. Por ello es fundamental conocer perfectamente las dimensiones y materiales de construcción de muros, techos, separaciones, azoteas o pisos. ASHRAE (1992) cuenta con bases de datos y/o tablas de propiedades reportadas para los materiales más comúnmente utilizados.

El MFT además hace un arreglo combinando coeficientes convectivos y coeficientes radiantes para superficies en el interior y en el exterior. Por lo tanto, los coeficientes de funciones de transferencia conductivos

son manejados para la temperatura aire-sol en el exterior y para la temperatura de pared en el interior. Estos coeficientes de funciones de transferencia conductivos se usan en el cálculo de la ganancia de calor dentro y fuera del envolvente de la construcción. ASHRAE cuenta con métodos y programas de cómputo que calculan estos coeficientes y/o tablas de coeficientes de los materiales de construcción más comunes. Las Tablas 2.8 y 2.9 muestran los coeficientes de funciones de transferencia conductivos para muros y techos.

Tabla 2.8 Coeficientes de funciones de transferencia conductivos de muro.

COEFICIENTES DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA CONDUCCIÓN		
Muro: Tipo 3	Resistencia térmica: 1.603	
<i>n</i>	<i>bn</i>	<i>dn</i>
0	4.106600E-03	1.000000E+00
1	3.230460E-02	-7.696300E-01
2	1.474380E-02	4.014260E-02
3	4.655040E-04	-4.197010E-04
4	2.893710E-07	2.728380E-10
5	6.227410E-14	-1.299670E-22
6	-4.362310E-16	2.066470E-37
<i>cn</i>	5.162080E-02	
<i>Ua</i>	<i>Uw</i>	
0.623830318	1.911220E-01	

Tabla 2.9 Coeficientes de funciones de transferencia conductivos de techo.

COEFICIENTES DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA CONDUCCIÓN		
Muro: Tipo 3	Resistencia térmica: 5.0492	
<i>n</i>	<i>bn</i>	<i>dn</i>
0	6.134400E-03	1.000000E+00
1	3.982870E-02	-7.561450E-01
2	1.375390E-02	1.438670E-02
3	2.485070E-04	-6.000280E-05
4	9.088660E-08	7.145660E-11
5	2.525690E-14	-7.372240E-22
6	-3.949790E-16	0.000000E+00
cn	5.996560E-02	
Ua	Uw	
0.198049007	2.322610E-01	

La ecuación utilizada para el cálculo de ganancia de calor por el MFT es:

$$q_{e,n} = A \left[b_n t_{e,n} + d_n \frac{q_{e,n}}{A} + t_{rc} + c_n \right] \quad (2.61)$$

Donde:

$q_{e,n}$ Ganancia de calor de muro, techo, separación, etc., $\frac{Btu}{h}$ en un

tiempo t_n

A Área de muro o techo, ft^2

t_n Tiempo, h

t_n Intervalo de tiempo, h

n Índice de la sumatoria (hasta el último coeficiente $n=0$)

$t_{e,n}$ Temperatura aire-sol en el tiempo t_n , $^{\circ}F$

t_{rc} Temperatura interior constante, $^{\circ}F$

b_n, c_n, d_n : Coeficientes de Funciones de Transferencia por Conducción.

La ecuación se puede resolver usando un método iterativo debido a que es implícita en la variable dependiente $q_{e,n}$. Se debe asignar un valor inicial para $q_{e,n}$ y se itera hasta que se logra la convergencia para un periodo de 24 horas. El resultado de $q_{e,n}$ de la convergencia es la ganancia de calor instantánea de muro o techo para cada hora del día.

2.13 GANANCIA DE CALOR POR INFILTRACIÓN

En la Sección 2.12 se definieron los factores que provocan la ganancia de calor total de la envolvente de una construcción entre ellos están las debidas a la infiltración y la ventilación llamada por la bibliografía especializada como ganancia de calor por infiltración y ventilación. Esta es una de las ganancias más difíciles de cuantificar a la hora de realizar la simulación térmica debido a que esta es muy subjetiva ya que no es posible estimar la cantidad exacta de aire infiltrado a la envolvente de una construcción. A continuación se muestran las ecuaciones que se utilizan en el cálculo de la ganancia de calor por infiltración, la razón de que sean dos ecuaciones es que la infiltración aporta tanto calor latente como calor sensible.

$$q_l = 4840 \cdot \dot{V}_e \cdot (t_e - t_i) \quad (2.62)$$

Donde:

q_l = Calor latente debido a la infiltración $\frac{Btu}{h}$.

ρ_e = Humedad específica exterior de la envolvente de una construcción $\frac{lb_v}{lb_a}$.

ρ_i = Humedad específica interior de la envolvente de una construcción $\frac{lb_v}{lb_a}$.

cfm = Flujo volumétrico de aire que entra a la envolvente de la construcción $\frac{ft^3}{min}$.

$$q_s \approx 1.1 \rho_e \rho_i T_i cfm \quad (2.63)$$

Donde:

q_l = Calor latente debido a la infiltración $\frac{Btu}{h}$.

T_e = Temperatura exterior de la envolvente de una construcción $^{\circ}F$.

T_i = Temperatura interior de la envolvente de una construcción $^{\circ}F$.

cfm = Flujo volumétrico de aire que entra a la envolvente de la construcción $\frac{ft^3}{min}$.

El flujo de aire es debido a la diferencia de presiones existente entre el exterior y el interior de la envolvente de una construcción, todo esto motivado por la velocidad del aire en el exterior y además por la

diferencia de densidades que hay entre el aire interior y exterior de la envolvente de una construcción.

2.14 CARGA DE ENFRIAMIENTO

En las secciones 2.12 y 2.13 se definió la ganancia de calor de la envolvente, como la energía de la radiación solar que es absorbida por dicha envolvente, además a esa energía se le incluye la aportación del alumbrado, personas y equipos que se encuentran dentro de la envolvente. Esta energía se libera al aire de la envolvente convirtiéndose en lo que se denomina carga o potencia de enfriamiento. La ganancia de calor se encuentra desfasada en el tiempo con respecto a la carga de enfriamiento debido a la inercia térmica de la envolvente. Los sistemas de climatización retiran la carga de enfriamiento y no la ganancia de calor.

La potencia de enfriamiento (o carga de enfriamiento) Q_p se define como la cantidad neta de energía que se tiene que retirar del aire del espacio interior de una construcción para mantener una temperatura constante se calcula por medio de la ecuación

$$Q_p = v_0 q_p + v_1 q_{p,1} + v_2 q_{p,2} + w_1 Q_{p,1} + w_2 Q_{p,2} \quad (2.64)$$

Donde:

Q_p = Carga de enfriamiento para la hora τ del día.

τ = Intervalo de tiempo. (Usualmente se utiliza 1 hora)

q_p = Ganancia de calor en la hora τ .

v_0, v_1, v_2, w_1, w_2 Son los coeficientes de ponderación de zona.

Esta ecuación tiene un coeficiente para cada una de las características: conducción, solar, iluminación y personas. La Tabla 2.10 muestra un ejemplo de los valores utilizados en la evaluación técnica para una construcción.

Tabla 2.10 Coeficientes de ponderación de zona.

	CONDUCCIÓN	SOLAR	ILUMINACIÓN	PERSONAL
v_0	0.746378	0.427892	0.7625	0.743639
v_1	-0.855214	-0.426402	-0.8307	-0.805102
v_2	0.177946	0.0722102	0.15957	0.152833
w_1	-1.24007	-1.1926	-1.15317	-1.15317
w_2	0.30918	0.2663	0.24454	0.24454

La Ecuación 2.63 se resuelve por un método iterativo para cada coeficiente de ponderación de zona, dando como resultado la carga de enfriamiento de cada hora del día.

2.15 RETIRO DE CALOR

El retiro de calor es la rapidez con la que el sistema de climatización extrae la energía, en forma de calor, a la envolvente de una construcción. El sistema de climatización es el que define el perfil de temperatura y humedad del espacio interior de la envolvente ya que estas condiciones dependen de las características propias de dicho sistema.

La rapidez de retiro de calor depende de la capacidad del sistema de climatización, esto es, si la carga de enfriamiento es mayor que la

capacidad del sistema de climatización, dicho sistema extrae sólo el valor equivalente a su capacidad y el resto permanece inalterado como energía interna del aire interior.

La rapidez de retiro de calor se representa por la siguiente ecuación lineal:

$$ER_t = W_t (T_{r,t} - T_{s,t}) \quad (2.65)$$

Donde:

ER_t = Rapidez de extracción de calor en el tiempo

$T_{r,t}$ = Temperatura del aire interior de la envolvente en el tiempo

W, S = Parámetros característicos de desempeño del sistema de climatización

$$S = \frac{ER_{\max} - ER_{\min}}{t_{tr}} \quad (2.66)$$

Donde:

$ER_{\max}$ = Capacidad máxima de extracción de calor en el intervalo de control

$ER_{\min}$ = Capacidad mínimo de extracción de calor en el intervalo de control

t_{tr} = Intervalo de control de temperatura del sistema de climatización

$$W_t = \frac{(ER_{\max} - ER_{\min})}{2} (T_{r,t}^* - T_{s,t}) \quad (2.67)$$

$T_{r,t}^*$ = Temperatura de control del termostato en el tiempo

La rapidez de extracción de calor se determina empleando los coeficientes de las funciones de transferencia del aire de la envolvente de la siguiente forma:

$$\sum_{i=0}^1 p_i \cdot E_{R,i} + Q + \sum_{i=0}^2 g_i \cdot t_{rc} + t_{r,i} \quad (2.68)$$

Donde:

g_i y p_i : Coeficientes de función de transferencia del aire de la envolvente

Q : Carga de enfriamiento calculada para la envolvente en el tiempo t_{rc} considerando que la temperatura de la envolvente es constante para t_{rc} .

Tabla 2.11 Coeficientes normalizados de función de transferencia del aire de la envolvente.

CONSTRUCCIÓN DE LA ENVOLVENTE	g_0^*	g_1^*	g_2^*	p_0	p_1
	$\frac{Btu}{hft^2F}$	$\frac{Btu}{hft^2F}$	$\frac{Btu}{hft^2F}$	Adimensional	Adimensional
Ligera	1.68	-1.73	0.05	1	-0.82
Mediana	1.61	-1.81	0.08	1	-0.87
Pesada	1.85	-1.95	0.1	1	-0.93

(ASHRAE, Cooling and Heating Calculation Manual 1992)

Construcción ligera: Son muros de materiales ligeros, pisos de concreto de 2 pulgadas, aproximadamente 30 libras de material por pie cuadrado de área de piso.

Construcción mediana: Son muros de 4 pulgadas, pisos de concreto de 4 pulgadas, aproximadamente 70 libras de material de construcción por pie cuadrado de área de piso.

Construcción pesada: Son muros de 6 pulgadas, pisos de concreto de 6 pulgadas, aproximadamente 130 libras de material de construcción por pie cuadrado de área de piso.

Los coeficientes de función de transferencia del espacio interior se desnormalizan con las siguientes expresiones.

$$g_{0,\tau} = g_0^* A \tau p_0 U A \tau 1.1 V_\tau \tau VI_\tau \tau \quad (2.69)$$

$$g_{1,\tau} = g_1^* A \tau p_1 U A \tau 1.1 V_{\tau,\tau} \tau VI_{\tau,\tau} \tau \quad (2.70)$$

$$g_{2,\tau} = g_2^* A \quad (2.71)$$

Donde:

A ? Área del piso de la envolvente, ft^2

U ? Coeficientes globales de transferencia de calor de la envolvente,

$$\frac{Btu}{hft^2 \text{ } ^\circ F}$$

V ? Ventilación introducida a la envolvente, cfm , $\frac{ft^3}{min}$

VI ? Velocidad de la infiltración, cfm , $\frac{ft^3}{min}$

τ ? Tiempo, h

$\tau \tau \tau \tau$ Horas previas

Resolviendo simultáneamente la ecuación 2.65 y ecuación 2.68 se obtienen las siguientes ecuaciones para calcular la rapidez de intercambio de calor.

$$ER_i = \frac{W_i g_0 + I_i S}{S + g_0} \quad (2.72)$$

Donde:

$$I_i = t_{rc} \sum_{i=0}^2 g_{i,i} + \sum_{i=1}^2 g_{i,i} t_{r,i} + \sum_{i=0}^1 p_i Q_{r,i} + \sum_{i=1}^1 p_i ER_{i,i} \quad (2.73)$$

La temperatura del aire interior de la envolvente en el tiempo t se puede calcular mediante la siguiente expresión.

$$t_{r,i} = \frac{I_i + ER_i}{g_{0,i}} \quad (2.74)$$

Para calcular la rapidez de extracción de calor se utiliza la Ecuación 2.72, la cual requiere de conocer valores previos de ER_i y $t_{r,i}$, estos valores pueden suponer para iniciar el método iterativo de resolución.

2.16 CONSUMO, DEMANDA Y FACTURACIÓN ELÉCTRICA

Para realizar la evaluación técnica de una vivienda se tienen que elegir los días que representen el verano en la ciudad. Puesto que la metodología aplicada sólo reporta parámetros solares para los días 21 de cada mes del año como se muestra en la Tabla 2.12. Los días que mejor representan el clima en una ciudad se conocen como días base, ver la Tabla 2.13, por ejemplo, los parámetros solares del día 21 de

julio describen el comportamiento del clima del día 07 de julio al 04 de agosto.

Tabla 2.12 Parámetros solares

	ECUACIÓN DE TIEMPO	DECLINACIÓN	A	B	C
Mes	min	grados	$\frac{Btu}{hft^2}$	Adimensional	Adimensional
Enero	-11.2	-20	381.2	0.141	0.103
Febrero	-13.9	-10.8	376.4	0.142	0.104
Marzo	-7.5	0	369.1	0.149	0.109
Abril	1.1	11.6	358.3	0.164	0.12
Mayo	3.3	20	350.7	0.177	0.13
Junio	-1.4	23.45	346.3	0.185	0.137
Julio	-6.2	20.6	346.6	0.186	0.138
Agosto	-2.4	12.3	351	0.182	0.134
Septiembre	7.5	0	360.2	0.165	0.121
Octubre	15.4	-10.5	369.7	0.152	0.111
Noviembre	13.8	-19.8	377.3	0.142	0.106
Diciembre	1.6	-23.45	381.8	0.141	0.103

ASHRAE, Cooling and Heating Calculation Manual 1992)

Tabla 2.13 Los días base para Mexicali son los siguientes

JUNIO	AGOSTO
1	1
4	4
7	7
10	10
14	14
17	17
21	21
24	24
28	28
30	31

Teniendo caracterizado el clima de verano, se determina la carga de enfriamiento y el retiro de calor para los días base correlacionándose estos con las horas-grado de cada día base. El ajuste a una línea recta es el que mejor correlaciona la carga de enfriamiento y el retiro de calor en función de las horas-grado como lo muestra la Figura 2.11, esta correlación se usa para determinar la carga de enfriamiento y retiro de calor para todo el verano con respecto a las horas-grado.

$$Y_i = a_{0i} + a_{1i}HG \quad (2.75)$$

Donde:

Y_i : Variable independiente (consumo o demanda)

a_{0i}, a_{1i} : Coeficientes de ajuste (consumo o demanda)

HG : Horas-grado

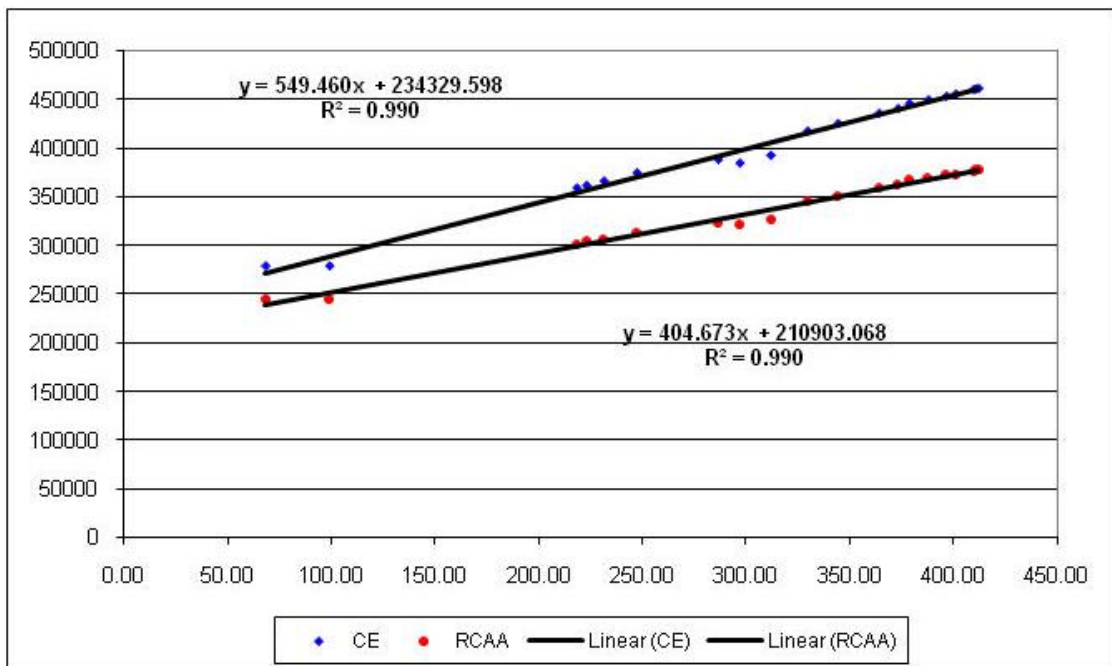


Figura 2.11 Correlación de HG vs carga de enfriamiento y retiro de calor.

Habiendo correlacionado la carga de enfriamiento y la rapidez de retiro de calor para los días de verano se calcula el consumo mensual mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Consumo} = \frac{12}{\text{SEER}} \text{ER}_r + \text{CF} \quad (2.76)$$

Donde:

Consumo ? Consumo eléctrico, kWh

ER_r ? Retiro de calor, ton

SEER ? Rendimiento estacional energético del equipo de climatización

CF ? Consumo fijo, kWh

Y por último se aplica la tarifa eléctrica de comisión federal de electricidad CFE, que tiene establecida a la región para calcular la facturación.

PROYECTO DE DISEÑO



http://cadwerks.us/yahoo_site_admin/assets/images/Page_6.2983436.jpg

3. SIMULACIÓN

La simulación se define como el modelado de sistemas reales, a partir de relaciones matemáticas y lógicas, para describir y comprender dichos sistemas. La simulación térmica de viviendas es una herramienta de análisis que incorpora las siguientes variables (Figura 3.1):

- Forma y orientación de la construcción.
- Material de construcción.
- Condiciones climáticas interiores y exteriores.
- Ganancias de calor exteriores.
- Ganancias de calor interiores.
- Inercia térmica de la construcción.
- Carga de enfriamiento.
- Consumo.
- Facturación.

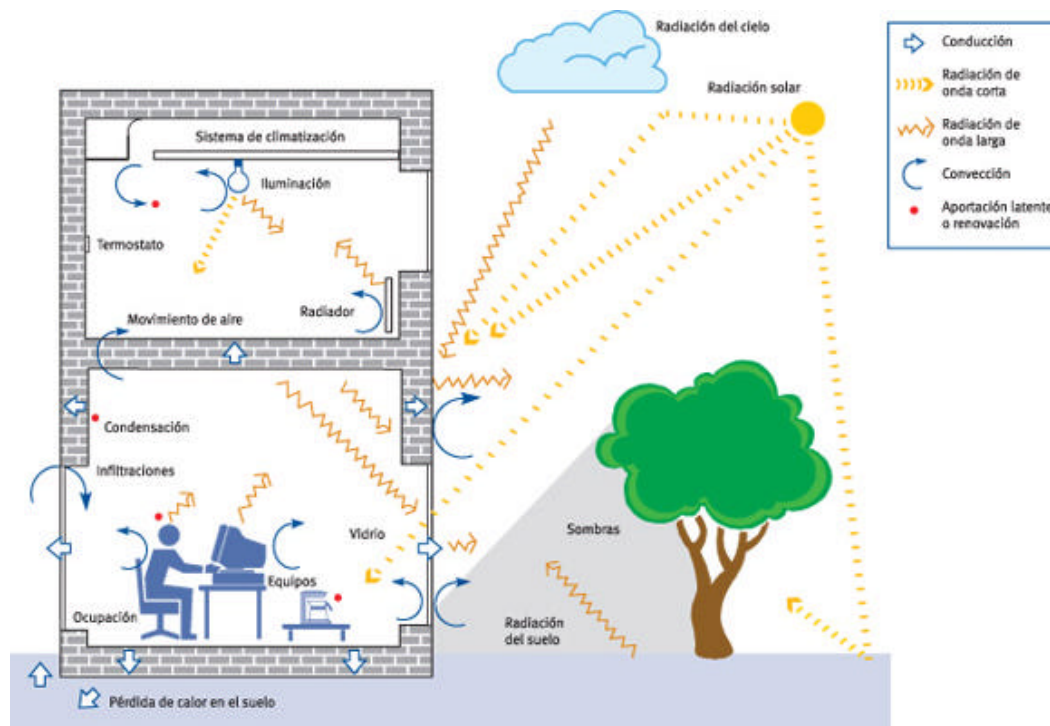


Fig. 2. Representación grafica de simulación térmica de viviendas
(<http://www.grupojg.com/www/simulacion.asp>)

Para evaluar el comportamiento térmico de la vivienda.

Un simulador térmico es una herramienta de cómputo que utiliza un modelo matemático (metodología) para realizar una evaluación térmica y de facturación para una construcción. Por lo tanto al entender el comportamiento térmico de la vivienda se pueden modificar las variables de entrada para obtener un ahorro de energía durante el periodo de verano.

Actualmente existen diferentes simuladores térmicos comerciales y educativos que se están utilizando a nivel público y privado en simulación de viviendas. Por mencionar algunos encontramos los siguientes:

DOE-2: Fue desarrollado por James J. Hirsch y Asociados, en colaboración con el Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), con un apoyo financiero por el United States Department of Energy (USDOE) y organizaciones industriales.

El DOE-2 es ampliamente utilizado y aceptado para el análisis de energético que puede predecir el uso de la energía y el costo para los diferentes tipos de edificios. El DOE-2 utiliza una descripción del diseño del edificio, construcción, los horarios de funcionamiento, los sistemas de aire acondicionado (iluminación, climatización, etc.) y tasas de servicios públicos proporcionados por el usuario, junto con los datos meteorológicos, a la hora de realizar una simulación térmica de la construcción y estimar facturación. El DOE-2 es un programa que requiere que el usuario cuente con una experiencia en la simulación térmica para utilizar de manera eficiente del programa, mientras que para los investigadores y expertos ofrece una gran flexibilidad en el uso del DOE-2.

ANTESOL: Es una herramienta para el análisis térmico de vivienda y de edificios, con cualquier inclinación y composición constructiva, mediante un modelo de simulación por diferencias finitas que considera rigurosamente las condiciones ambientales exteriores e interiores, especialmente el soleamiento y la irradiación infrarroja. Los

resultados obtenidos son las temperaturas y flujos de calor generados durante el día.

El programa de simulación se ha desarrollado para la aplicaciones técnicas dirigida a arquitectos e ingenieros, para el cálculo de las cargas térmicas de viviendas y edificios en climas cálidos, también ofrece la opción de realizar modificaciones para optimizar el diseño bioclimático de viviendas y edificios.

CCTE_CL v2.0: Es un programa para el Cálculo para la Certificación de Comportamiento Térmico para Edificios de Chile, se realiza en el marco del proyecto “Sistema de Certificación Térmica de Edificaciones; desarrollo de la Herramienta de Certificación del Comportamiento Térmico de Edificios de Chile (CCTE_ CL v2)”, utilizado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

Para la realización se contó con la colaboración del Departamento de Ingeniería Energética de la Asociación para la Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía (AICIA) de la Universidad de Sevilla, España. Por parte de Chile participó la Escuela de Arquitectura, de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

El CCTE_ CL v2, es un programa que el Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile pone a disposición de los profesionales, técnicos y participantes en general del mercado inmobiliario nacional, especialmente a los arquitectos e ingenieros proyectistas de viviendas,

con el propósito de incorporar una herramienta informática moderna, que permite conocer con gran precisión la demanda de energía para el acondicionamiento térmico del edificio en cuestión, constituyendo ello la base de su comportamiento térmico global, pasando a ser una forma más de cumplir con las exigencias de la Reglamentación Térmica para Viviendas implementada por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

El programa permite realizar los cálculos de demanda entregando resultados mes a mes y anuales. El programa amigable, simple y efectivo sobre la base de condiciones de confort térmico interior predeterminadas, comparando además dicha demanda con la que tendría el mismo edificio, en condiciones tales que sus elementos de la envolvente poseerán los máximos de transmitancia térmica exigidos para la zona térmica donde esté ubicado. El programa ha incorporado los datos climáticos para un gran número de ciudades de Chile, creando 107 zonas climáticas a lo largo del país, permitiendo así conocer de manera precisa los requerimientos energéticos.

TRNSYS: Es un programa de simulación de energía cuyo sistema de enfoque modular lo convierte en uno de las más flexibles herramientas disponibles. TRNSYS (Transient System Simulation Program) que en español significa Programa de simulación de sistemas transitorios incluye una interfaz gráfica, una metodología de simulación, y una

biblioteca de componentes que van desde la construcción de diversos modelos estándar para equipos de climatización a las energías renovables y tecnologías emergentes. TRNSYS también incluye un método para crear nuevos componentes que no existen en el paquete estándar. Este paquete de simulación se ha utilizado durante más de 30 años para el análisis y dimensionamiento de equipos de aire acondicionados, análisis multizona de flujo de aire, simulación de energía eléctrica, diseño solar, la eficiencia térmico en construcciones, el análisis de sistemas de control, etc.

LIDER-CALENER: Es una herramienta de computo propuesta por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y por el Ministerio de Vivienda de España, que permite verificar la demanda de energía de los edificios así como la eficiencia energética de los mismos.

LIDER-CALENER es un solo paquete de cómputo que está dividido en dos, LIDER está diseñado para diseñar edificaciones y CALENER está diseñado para el cálculo de demanda y eficiencia energética en viviendas y edificios.

DESIGNBUILDER: Es un programa de computo ingles utilizado para el análisis térmico, lumínico, evaluar los niveles de confort alcanzados, las emisiones de CO₂ y energético de viviendas y edificios. DesignBuilder se ha diseñado como una herramienta de alto

desempeño para la práctica profesional del diseño, la consultoría y la certificación energética.

Debido a que los expertos en la materia lo consideran una herramienta fácil de usar y que cuenta con un amplio rango de prestaciones que ofrece, Es utilizado por diversas instituciones educativas, lo cual demuestra el interés creciente de la comunidad académica respecto a los temas relacionados con la arquitectura bioclimática y la sustentabilidad. Entre las instituciones que han adquirido el programa se encuentran las siguientes:

- Universidad de Colima
- Universidad Nacional Autónoma de México
- Universidad de Sonora
- Universidad Autónoma de Yucatán
- Universidad Autónoma de Coahuila
- Universidad Autónoma de Baja California
- Universidad de Chile

Ya que fue realizado para facilitar los complejos procesos de cálculo y simulación, DesignBuilder te permite proyectar edificios con mayores niveles de confort y menores consumos energéticos, contribuyendo de manera significativa a la práctica de la arquitectura sustentable.

ECOTECT: Es un completa herramienta de computo de Autodesk para el diseño viviendas y edificios bioclimáticos. Permite a los diseñadores

trabajar fácilmente en 3D y aplicar todas las herramientas necesarias para el uso eficiente de la energía y la sustentabilidad para el futuro. ECOTECT ofrece una amplia gama de modelos, visualización y análisis de características para arquitectura, la sostenibilidad, la creación de viviendas y edificios bioclimáticos de alta eficiencia energética, el diseño ambiental y la ciencia arquitectónica.

Los simuladores antes mencionados su complejidad radica en la gran cantidad de datos que hay que ingresar y en el dibujo en 3D de las viviendas y edificios a los cuales se le aplicara la simulación térmica. En general todos los simuladores son muy buenos y obtienen resultados próximos a los reales, en los rangos de simulación para los cuales fueron diseñados, pero cuando nuestra vivienda y edificio es un caso que no está dentro de dichos rangos, se tiene que hacer adaptaciones y ciertas consideraciones para poder obtener una simulación que de cómo resultado una buena predicción a la realidad.

Es por esto que se decidió realizar un simulador de viviendas que este diseñado para las ciudades de climas cálidos a nivel nacional, basada en el Método de funciones de Transferencia reportado por la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE), Horas-Grado, función periódica de Fourier que describe el comportamiento de la temperatura horaria y la

humedad relativa horaria, así como la facturación utilizando la tarifa que CFE aplica para la ciudad.

Las mejoras de esta simulación consisten en que incorpora modificaciones a la metodología de cálculo de ganancias de calor de la construcción, ya que se utiliza una función periódica de Fourier que describe el comportamiento de la temperatura horaria. Así como en la ganancia de calor por infiltración se utilizaba un humedad relativa horaria promedio mensual o un polinomio de orden 6 para el cálculo de la humedad relativa horaria, ahora para este simulador se hizo un estudio histórico de la humedad relativa para las diferentes ciudades para obtener una función periódica de Fourier que describe el comportamiento de la humedad relativa horaria.

Mientras que para el cálculo de carga de enfriamiento y retiro de calor los simuladores lo calculan día con día para hacer al final un reporte mensual, este simulador utiliza una correlación para el cálculo de carga de enfriamiento y retiro de calor, introduciendo un nuevo concepto llamado Horas-Grado que nos proporciona la herramienta para describir el mes simulación teniendo algunos días bases representativos para el mes.

Además en este simulador no es necesario realizar la construcción en 3D, solo es necesario ingresar las dimensiones de la construcción.

3.1 SECUENCIA DE SIMULACIÓN

La Figura 3.2 muestra la secuencia de simulación para la evaluación técnica de la envolvente de una construcción. La secuencia de simulación es una adaptación del método de funciones de transferencia utilizando el concepto de horas-grado para la región de climas cálidos.

El diagrama general de flujo computacional para el simulador térmico fue elaborado basándose en esta secuencia de simulación, sólo que el diagrama general de flujo computacional se divide en otros subdiagramas de flujo llamados módulos que pueden usarse en cualquier parte del código. Con esto se logra que la escritura de código sea más compacta y más eficiente la simulación.

Los módulos están ligados unos a otros por lo que se debe tener cuidado cuando se quiere utilizar uno de ellos, si no se respetan esas ligas el compilador de Visual Basic 2008 despliega un aviso de error en dicha compilación.

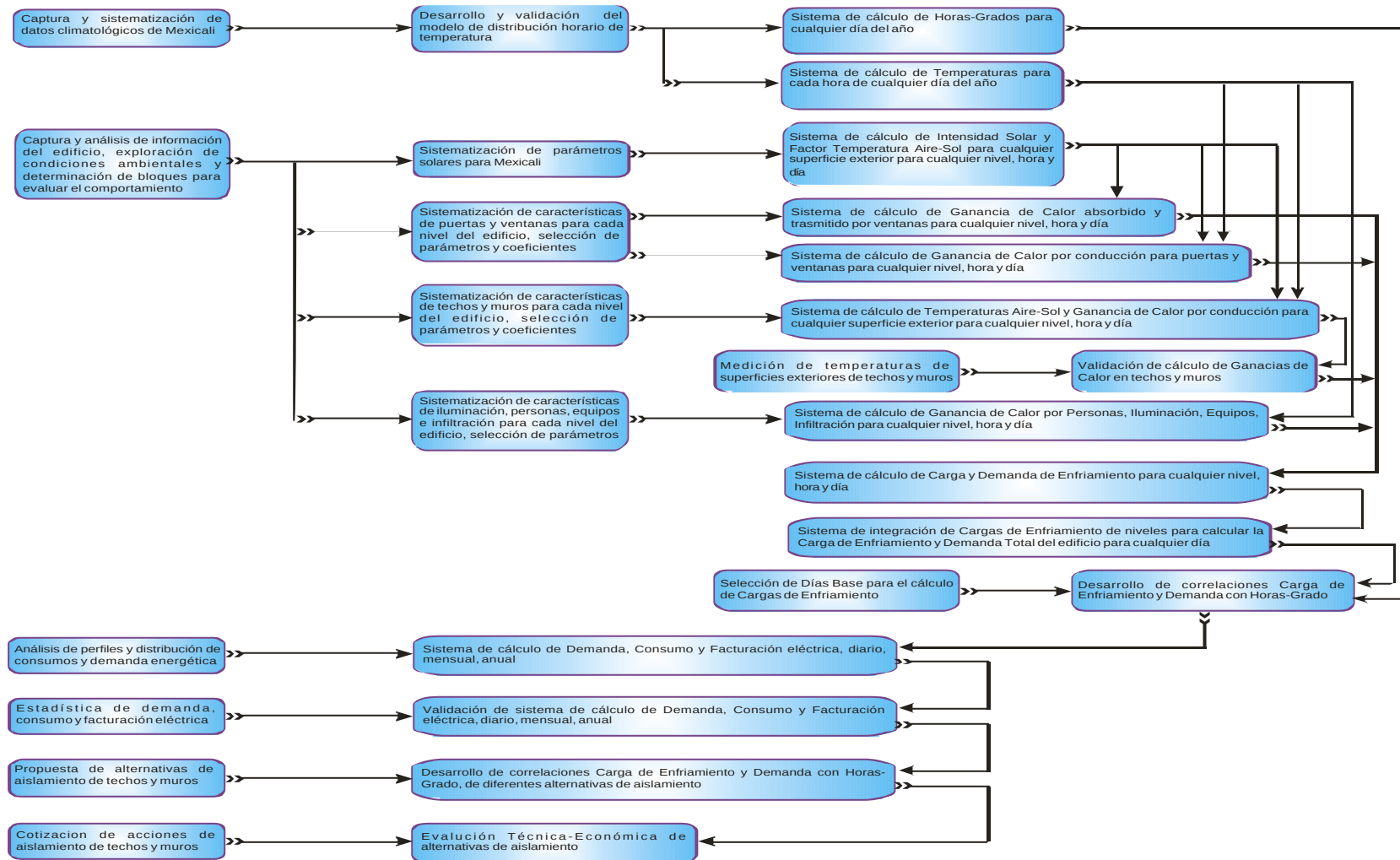


Figura 3.2: Diagrama de secuencia de simulación (Pérez, 1996).

Es importante mencionar que para la evaluación técnica en la construcción no es necesario aplicar los puntos de validación de la metodología que aparecen en la secuencia de simulación de la Figura 3.2 debido a que su validación ya fue realizada. La Figura 3.3 muestra los puntos en color amarillo que se aplican en la evaluación técnica de la envolvente de una construcción. Siendo consistente con lo mencionado anteriormente, el diagrama general de flujo computacional no incluye la etapa de validación de la metodología.

La metodología de simulación ha sido validada a través del trabajo desarrollado por el Área de Sistemas Energéticos del Instituto de Ingeniería de la UABC y probando su aplicación a diferentes casos del sector público, industrial y doméstico. Entre otros casos se encuentran:

- Grupo Melo (Campbell, 2005)
- Armour (Campbell; y colaboradores, 2004)
- Proyecto de normas de construcción (Pérez y colaboradores, 2003)
- CFE (Pérez y colaboradores, 1996)
- TELNOR (Campbell; y Pérez, 1995)

En el Apéndice B se muestra un caso de simulación de una vivienda en Mexicali B. C. y los resultados se discutirán en el Capítulo 4, lo importante de mencionar este caso ya fue analizado por el Área de Sistemas Energéticos de la UABC y fue ingresado al simulador en Visual Basic 2008,

para realizar la validación, obtención de resultado y conclusiones, utilizando un modelo matemático basado en una función periódica de Fourier que describe el comportamiento de la humedad horaria para cualquier día del año.

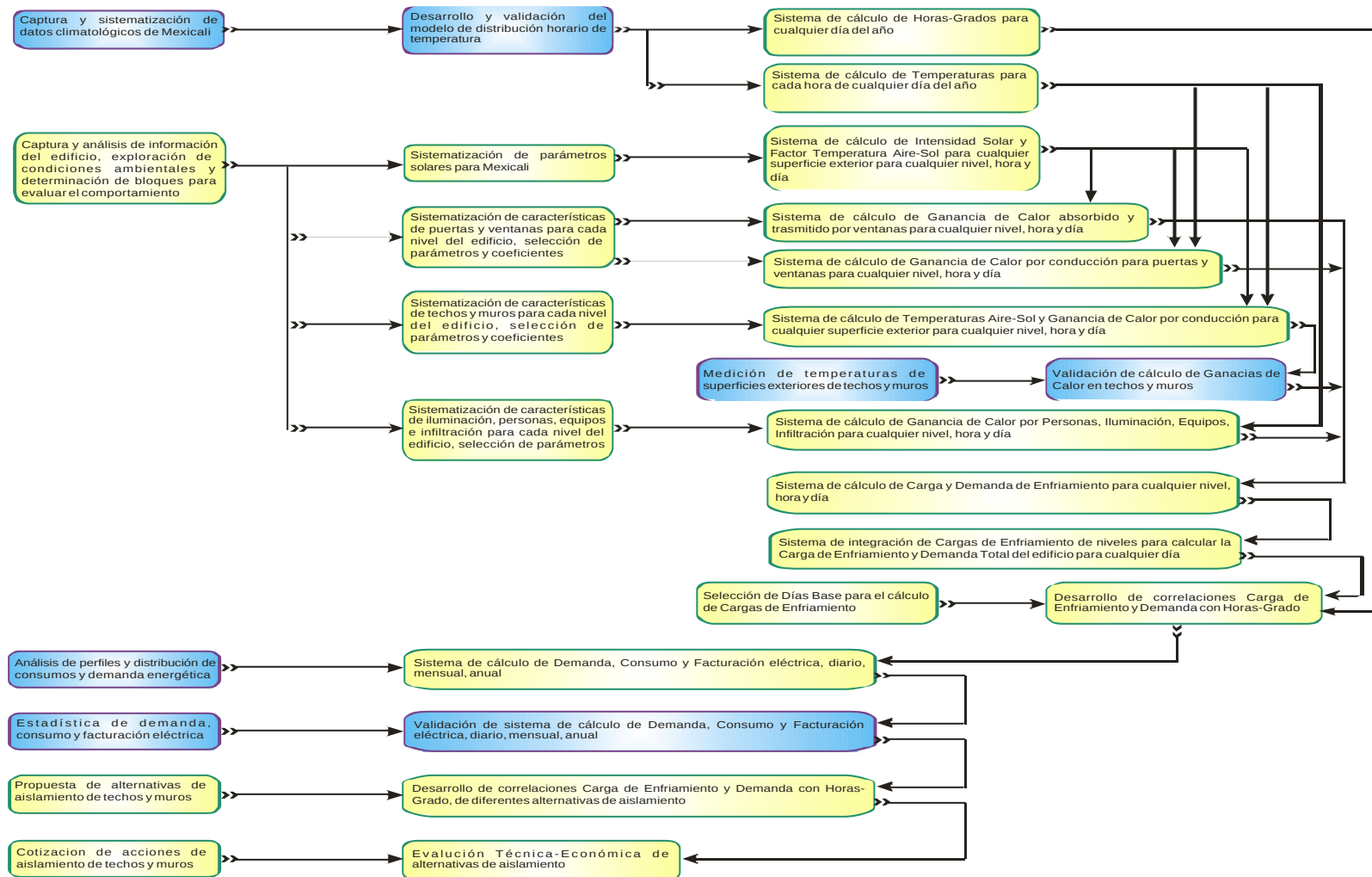


Figura 3.3: Diagrama de secuencia de simulación de una evaluación técnica de una casa habitación (Pérez, 1996)

3.2 SIMULADOR TÉRMICO

El simulador térmico (Figura 3.4) fue realizado en lenguaje Basic 2008, que permite ofrecer un ambiente amigable al usuario, así como disponer de una amplia gama de funciones matemáticas y la programación modular que se utilizan en la programación de la metodología para la simulación térmica de construcciones.

El simulador está dividido en tres etapas:

- Captura de información de la construcción
- Cálculo por módulos
- Despliegue de resultados

Se decidió hacerlo de esta forma para facilitar su manejo y tener una codificación estructurada para Visual Basic 2008, logrando una compilación del código depurada y fácil de detectar errores de programación.

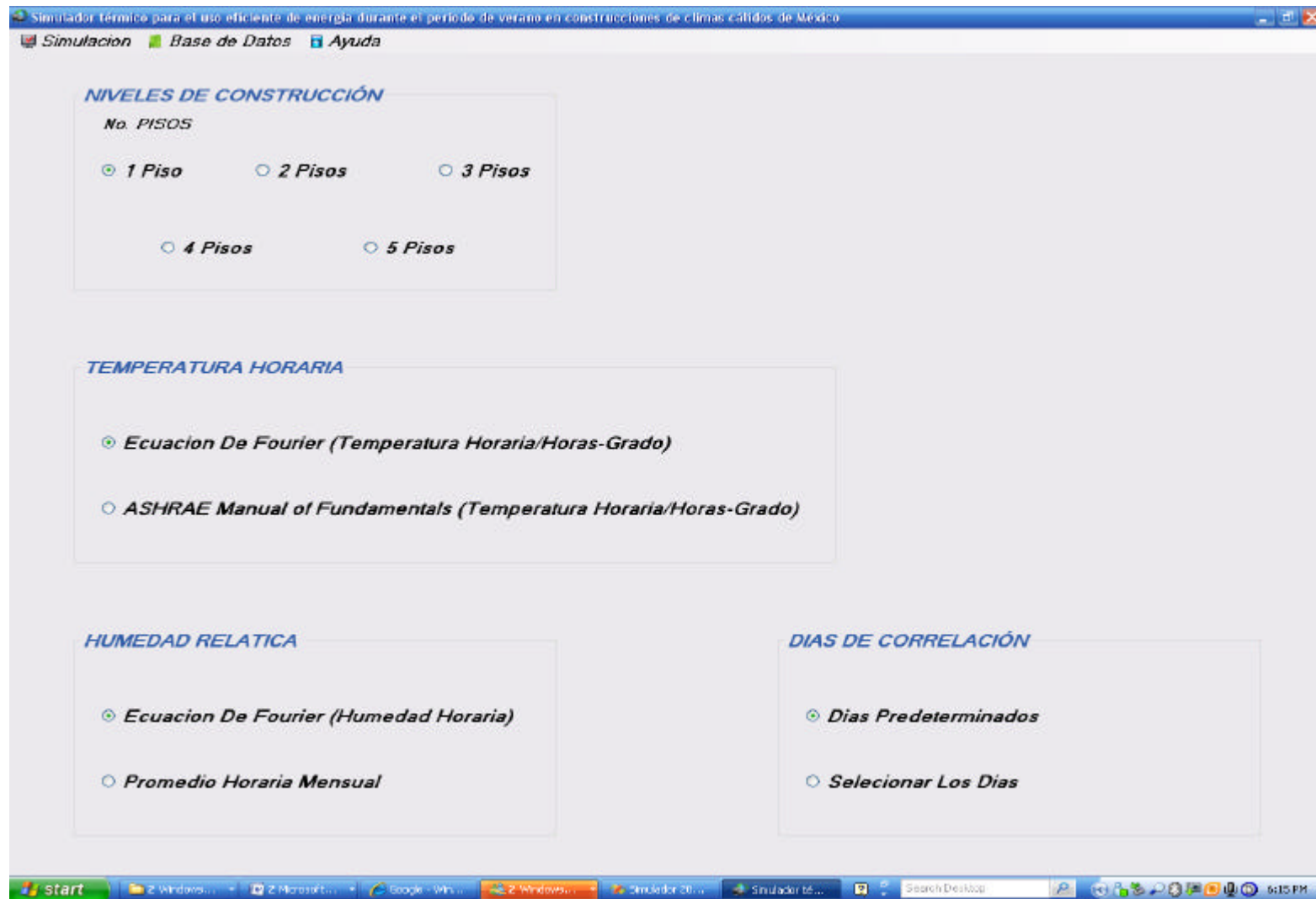


Figura 3.4: Pantalla principal del simulador térmico

Captura de información

Esta etapa de la simulación consiste en ingresar todos los datos generales de la construcción al simulador térmico, a continuación se presentan desglosados los datos que se ingresan y su respectiva imagen de la pantalla del simulador:

- Periodo de simulación: Se selecciona la ciudad y el periodo de tiempo para la simulación térmica de la construcción.

- ✿ Un día del año (Fig. 3.5).

- Ciudad
- Mes
- Día

- ✿ Un mes del periodo de verano (Fig. 3.6).

- Ciudad

- ✿ Todo el periodo de verano (Fig. 3.7).

- Ciudad.

SIMULAR UN DIA

CIUDAD

Ciudad	Latitud	Longitud	Lst
Mexicali, BC, México	32.667	-115.483	120
La Paz, BCS, México	24.16	-110.41	105
Mazatlán, SIN, México	23.15	-106.26	105
Guanajuato, GTO, México	21	-101.25	105
Guadalajara, JAL, México	20.66	-103.38	105

CIUDAD: CF_m: HR_m:
 LATITUD: CF_A: HFLA:
 LONGITUD: CF_B: HFLB:
 Lst:

DATOS SOLARES

Mes	ET	DEC	A	B	C
Enero	1.6	-23.45	381.8	0.141	0.103
Febrero	-11.2	-20	381.2	0.141	0.103
Marzo	-13.9	-10.8	376.4	0.142	0.104
Abril	-7.5	0	369.1	0.149	0.109
Mayo	1.1	11.6	358.3	0.164	0.12

MES: A:
 ET: B:
 DEC: C:

DATOS CLIMATOLOGICOS

Ciudad	Mes	Dia	TMa
Queretaro, QTO, México	Mayo	Mayo 1	73.94
Queretaro, QTO, México	Mayo	Mayo 2	87.39
Queretaro, QTO, México	Mayo	Mayo 3	87.71
Queretaro, QTO, México	Mayo	Mayo 4	87.08
Queretaro, QTO, México	Mayo	Mayo 5	83.72
Queretaro, QTO, México	Mayo	Mayo 6	85.68
Queretaro, QTO, México	Mayo	Mayo 7	87.62
Queretaro, QTO, México	Mayo	Mayo 8	85.68
Queretaro, QTO, México	Mayo	Mayo 9	85.23

CIUDAD: TEMPERATURA MAXIMA:
 MES: TEMPERATURA MINIMA:
 DIA: HUMEDAD RELATIVA MAXIMA:
 HUMEDAD RELATIVA MINIMA:

CALCULAR

Figura 3.5: Pantalla para la simulación térmica de un día del año

Simular_2

CIUDAD

Ciudad	Latitud	Longitud
Mexicali, BC, México	32.667	-115.483
La Paz, BCS, México	24.16	-110.41
Mazatlán, SIN, México	23.15	-106.26

CIUDAD: Mexicali, BC, México

LATITUD: 32.667 CF_m: 0.491625 HR_m: 0.573125

LONGITUD: -115.483 CF_A: 0.200187 HR_A: -0.117115

Lat: 120 CF_B: 0.424042 HR_B: -0.4403

DATOS SOLARES

Mes	ET	DEC	A	B	C
Enero	-11.2	-20	381.2	0.141	0.103
Febrero	-13.9	-10.8	376.4	0.142	0.104
Marzo	-7.5	0	369.1	0.149	0.109

MES: Enero A: 381.2

ET: -11.2 B: 0.141

DEC: -20 C: 0.103

DATOS CLIMATOLOGICOS

Ciudad	Mes	Dia	TMax
Queretaro, QTO, México	Mayo	Mayo 1	73.94
Queretaro, QTO, México	Mayo	Mayo 2	87.395
Queretaro, QTO, México	Mayo	Mayo 3	87.71
Queretaro, QTO, México	Mayo	Mayo 4	87.08

MES A SIMULAR

Ciudad	Mes
Mexicali, BC, México	Mayo

Mexicali, BC, México Mayo

DATOS PARA EL AJUSTE

CIUDAD: Queretaro, QTO, México MES: Enero

LATITUD: 32.667 CF_m: 0.491625 HR_m: 0.573125

LONGITUD: -115.483 CF_A: 0.200187 HR_A: -0.117115

Lat: 120 CF_B: 0.424042 HR_B: -0.4403

DIA	ET	DEC	A	B	C	TEMP. MAX	TEMP. MIN.
Mayo 1	-11.2	-20	381.2	0.141	0.103	73.94	54.95

HR. MAX: 66 HR. MIN.: 29

DIAS BASES

Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5
Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9	Dia 10
Dia 11	Dia 12	Dia 13	Dia 14	Dia 15
Dia 16	Dia 17	Dia 18	Dia 19	Dia 20
Dia 21	Dia 22	Dia 23	Dia 24	Dia 25
Dia 26	Dia 27	Dia 28	Dia 29	

CIUDAD: Queretaro, QTO, México

MES: Mayo

DIA: Mayo 1

TEMPERATURA MAX: 73.94 HUMEDAD R. MAX: 66

TEMPERATURA MIN.: 54.95 HUMEDAD R. MIN.: 29

CALCULAR

Figura 3.6: Pantalla para la simulación térmica de un mes del periodo de verano

Simular_3

CIUDAD

Ciudad	Latitud	Longitud
Mexicali, BC, México	32.667	-115.483
La Paz, BCS, México	24.16	-110.41
Mazatlán, SIN, México	23.15	-106.26

CIUDAD: Mexicali, BC, México

LATITUD: 32.667 CF_m: 0.491625 HR_m: 0.573125
 LONGITUD: -115.483 CF_A: 0.200187 HR_A: -0.117115
 Lat: 120 CF_B: 0.424042 HR_B: -0.4403

DATOS SOLARES

Mes	ET	DEC	A	B	C
Enero	-11.2	-20	381.2	0.141	0.103
Febrero	-13.9	-10.8	376.4	0.142	0.104
Marzo	-7.5	0	369.1	0.149	0.109

MES: Enero A: 381.2
 ET: -11.2 B: 0.141
 DEC: -20 C: 0.103

DATOS CLIMATOLOGICOS

Ciudad	Mes	Día	TMax
Queretaro, QTO, México	Mayo	Mayo 1	73.94
Queretaro, QTO, México	Mayo	Mayo 2	87.395
Queretaro, QTO, México	Mayo	Mayo 3	87.71
Queretaro, QTO, México	Mayo	Mayo 4	87.08

CIUDAD A SIMULAR: Mexicali, BC, México

DATOS PARA EL AJUSTE

CIUDAD: Queretaro, QTO, México MES: Enero

LATITUD: 32.667 CF_m: 0.491625 HR_m: 0.573125
 LONGITUD: -115.483 CF_A: 0.200187 HR_A: -0.117115
 Lat: 120 CF_B: 0.424042 HR_B: -0.4403

DIA: ET: DEC: A: B: C: TEMP. MAX: TEMP. MIN.
 -11.2 -20 381.2 0.141 0.103 73.94 54.95
 HR. MAX: HR. MIN.
 66 29

DIAS BASES

Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
Día 11	Día 12	Día 13	Día 14	Día 15
Día 16	Día 17	Día 18	Día 19	Día 20
Día 21	Día 22	Día 23	Día 24	Día 25
Día 26	Día 27	Día 28	Día 29	Día 30

CIUDAD: Queretaro, QTO, México
 MES: Mayo
 DIA: Mayo 1

TEMPERATURA MAX: 73.94 HUMEDAD R. MAX: 66
 TEMPERATURA MIN: 54.95 HUMEDAD R. MIN: 29

CALCULAR

Figura 3.7: Pantalla para la simulación térmica del periodo de verano

- Dimensiones y propiedades de la envolvente: Se ingresan los materiales constructivos y las dimensiones de la construcción, así como los tipos y dimensiones de puertas y ventanas.

- ✿ Muros.

- Tipo de muro.
- Área de muro: Norte, Sur, Este y Oeste.
- Resistencia térmica.
- Temperatura de piso.
- Área de planta.

- ✿ Techos.

- Tipo de techo.
- Área de techo.
- Resistencia térmica.

- ✿ Puertas y ventanas.

- Tipo de ventana: Norte, Sur, Este y Oeste.
- Área de ventana: Norte, Sur, Este y Oeste.
- Tipo de Puerta: Norte, Sur, Este y Oeste.
- Área de Puerta: Norte, Sur, Este y Oeste.

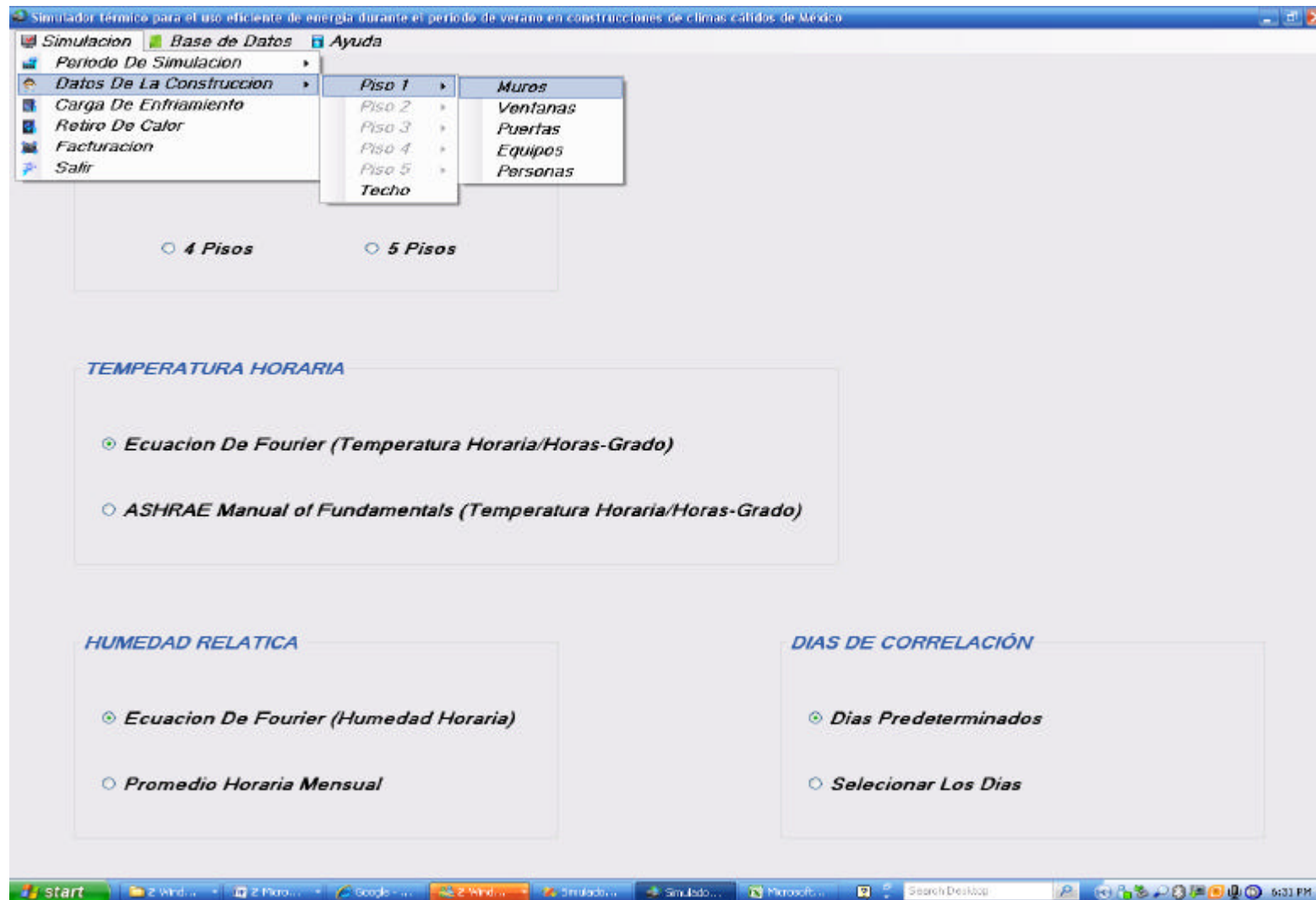


Figura 3.8: Pantalla de datos generales del inmueble

Muros

NORTE SUR ESTE OESTE PROPIEDADES DE MURO

TIPO DE MURO 1

Uw 0.065581001 dn(0) 1

bn(0) 0.00767943 dn(1) -0.240716994

bn(1) 0.034977999 dn(2) 0.00187838

bn(2) 0.00719107 dn(3) -5.14877E-07

bn(3) 5.57585E-05 dn(4) 2.58385E-12

bn(4) 9.40181E-09 dn(5) -3.91515E-20

bn(5) 1.33535E-14 dn(6) 8.50859E-33

bn(6) 1.51831E-16 cn 0.049904268

ÁREA DE MURO

RESISTENCIA TÉRMICA

TEMPERATURA DE PLANTA

ÁREA DE PLANTA

TÍPO 1

Código	Descripción	k $\frac{Btu}{ft^2 F}$	ρ $\frac{lb}{ft^3}$	C_p $\frac{Btu}{lb^2 F}$	R $\frac{F ft^2 h}{Btu}$	Masa/Área $\frac{lb}{ft^2}$
To	Resistencia superficie interior	0	0	0	0.69	0
A3	Recubrimiento de acero	26	480	0.1	0	2.4
B1	Resistencia al aire libre	0	0	0	0.91	0
B13	Aislamiento 4 pulg	0.025	5.7	0.2	13.3	1.9
A3	Recubrimiento de acero	26	480	0.1	0	2.4
Ao	Resistencia superficie exterior	0	0	0	0.33	0

Donde:
 k = Conductividad térmica
 ρ = Densidad
 C_p = Calor específico
 R = Resistencia térmica

TIPO	Uw	bn(0)	bn(1)	bn(2)	bn(3)	bn(4)	bn(5)
1	0.065581001	0.00767943	0.034977999	0.00719107	5.57585E-05	9.40181E-09	1.33535E-14
2	0.055385999	0.000156181	0.00545436	0.00960777	0.00215466	5.16639E-05	4.77362E-08
3	0.191121995	0.0041066	0.0323046	0.0147438	0.000465504	2.89371E-07	6.22741E-10
4	0.046874002	1.06628E-05	0.00107899	0.00384048	0.00187106	0.000134272	8.77082E-08
5	0.128915995	8.03264E-05	0.00443532	0.010182	0.00296009	0.000104529	2.31398E-08
6	0.198883995	0.00050539	0.00938069	0.0105722	0.00127297	8.83436E-06	6.05708E-08
7	0.121877998	0.00098849	0.00836109	0.00361414	6.93126E-05	1.00336E-08	1.89416E-08

ACEPTAR

ARCHIVO

Figura 3.9: Pantalla de datos generales de los muros

TECHO PROPIEDADES DE TECHO

TIPO DE TECHO **1**

Uw **0.080251001** dn(0) **1**

bn(0) **0.00487032** dn(1) **-0.354508996**

bn(1) **0.034738** dn(2) **0.022870301**

bn(2) **0.0136517** dn(3) **-4.89085E-05**

bn(3) **0.000358234** dn(4) **3.09188E-10**

bn(4) **2.33386E-07** dn(5) **-1.37542E-17**

bn(5) **7.76594E-13** dn(6) **3.2374E-29**

bn(6) **-1.98748E-16** cn **0.05361649**

ÁREA DE TECHO

RESISTENCIA TÉRMICA

TIPO 1						
Código	Descripción	k $\frac{\text{Btu}}{\text{h}^{\circ}\text{F}}$	ρ $\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$	C_p $\frac{\text{Btu}}{\text{lb}^{\circ}\text{F}}$	R $\frac{\text{h}^{\circ}\text{F}\cdot\text{ft}^2}{\text{Btu}}$	Masa/Área $\frac{\text{lb}}{\text{ft}^2}$
To	Resistencia superficie interior	0	0	0	0.69	0
A3	Recubrimiento de acero	26	480	0.1	0	2.4
B25	Aislamiento 3 pulg	0.025	5.7	0.2	11	16
E3	Colchoneta y membrana 3/8 pulg	0.11	70	0.4	0.29	2.2
E2	Pedacera o piedra 1/2 pulg	0.83	55	0.4	0.05	2.3
Lo	Resistencia superficie exterior	0	0	0	0.33	0

Donde:
 k = Conductividad térmica
 ρ = Densidad
 C_p = Calor específico
 R = Resistencia térmica

TIPO	Uw	bn(0)	bn(1)	bn(2)	bn(3)	bn(4)	bn(5)	bn(6)
1	0.080251001	0.00487032	0.034738	0.0136517	0.000358234	2.33386E-07	7.76594E-13	-1.98748E-16
2	0.055454001	0.000555836	0.0120221	0.0128173	0.00143302	1.2926E-05	4.51855E-09	2.05E-17
3	0.232261002	0.0061344	0.038828699	0.0137539	0.00248507	9.08866E-08	2.52569E-14	-3.94E-17
4	0.042814001	2.84383E-06	0.000653065	0.00338666	0.002397	0.000288789	4.85666E-06	7.42E-17
5	0.054946002	5.5526E-05	0.00255548	0.00477454	0.00100087	2.11545E-05	2.8998E-08	9.46E-17
6	0.371224999	0.00290118	0.031434	0.0211381	0.00120117	1.79879E-06	3.01347E-12	3.85E-17
7	0.138145	0.000591188	0.00867405	0.00687707	0.000374854	3.85081E-07	9.62969E-12	-3.45E-17

ACEPTAR

Figura 3.10: Pantalla de datos generales del techo

Puertas

NORTE **SUR** **ESTE** **OESTE**

3 of 8

TIPO DE PUERTA

U

ÁREA DE PUERTA

TIPO	Up
Ninguna	0
1	0.57
2	0.33
3	0.37
4	0.47
5	0.3
6	0.32
7	0.39
*	

TIPO 2		
Código	Descripción	$\frac{U}{Btu}$ $\frac{1}{ft^2 \cdot ^\circ F}$
1	Wood doors	
2	1-3/8 Panel door with 7/16-in panels	
3	Wood storm door	
4		
5		
6		
7		
TOTAL		0.33

PISO 1

ACEPTAR

Figura 3.11: Pantalla de datos generales de puertas

Ventanas

NORTE SUR ESTE OESTE

TIPO VENTANA 1

U 1.11

ÁREA DE VENTANA

TIPO	Up
0	0
1	1.11
2	1.31
3	1.23
4	1.09
5	1.11
6	0.9
7	0.98
8	1.03
9	1.26
10	1.16
11	1.02
13	1.03

TIPO 1		
Código	Descripción	U Btu /ft ² ·F
1	Single glass	
2	Glass only	
3	Center of glass	
4		
5		
6		
7		
TOTAL		1.11

PISO 1

ACEPTAR

Figura 3.12: Pantalla de datos generales de ventanas

- Personas: Se utiliza el nivel de ocupación, la actividad de las personas y el factor de ocupación durante el día.
 - ✿ Nivel de actividad de las personas.
 - ✿ Personas por hora.
- Equipos: Se seleccionan todos los equipos internos que contribuyen a la ganancia de calor y su respectivo factor de uso durante el día.
 - ✿ Tipo de equipo.
 - ✿ Factor de uso.
 - ✿ Cantidad de equipo por hora.
- Datos de carga de enfriamiento por piso: Se utiliza uno de los parámetros de piso reportado por ASHRAE para el Método de las Funciones de Transferencia (MFT).
 - Piso planta baja.
 - Piso intermedio.
 - Piso superior.
- Datos de retiro de calor por piso Se indica el tipo de construcción reportado por ASHRAE para el Método de las Funciones de Transferencia (MFT), así como la extracción de calor y la ventilación.
 - ✿ Rapidez máxima de extracción de calor.
 - ✿ Rapidez mínima de extracción de calor.

- ✿ Variación del punto de control de temperaturas.

- ✿ Rapidez de flujo de aire de ventilación.

- ✿ Rapidez de flujo de aire de infiltración.

- ✿ Tipo de construcción.

- Ligera.

- Mediana.

- Pesada.

- Datos de facturación: Se especifica el rendimiento energético de equipo de aire acondicionado a utilizar y el tipo de tarifa para la región de clima cálido.

- ✿ Rendimiento energético del equipo de aire acondicionado.

- ✿ Tipo de tarifa.

PERSONAS

PISO 1

NIVEL DE ACTIVIDAD DE LAS PERSONAS

Trabajo ligero de oficina

CALOR

Calor latente: 200 Btu/h

Calor sensible: 250 Btu/h

PERSONAS POR HORA

HORA	No. PERSONAS	HORA	No. PERSONAS
1	0	13	0
2	0	14	0
3	0	15	0
4	0	16	0
5	0	17	0
6	0	18	0
7	0	19	0
8	0	20	0
9	0	21	0
10	0	22	0
11	0	23	0
12	0	24	0

ACEPTAR

Figura 3.13: Pantalla de datos generales de las personas

Equipos

VENTILADOR REFRIGERADOR TELEVISIÓN RADIO PLANCHA LAVADORA MICRO-ONDAS CAFETERA ESTUFA ILUMINACIÓN EQUIPO 1 EQUIPO 2 EQUIPO 3

PISO 1

FACTOR DE USO

1

CALOR

Calor latente: 0 Btu/h
 Calor sensible: 242 Btu/h

EQUIPO POR HORA

HORA	No. EQUIPO	HORA	No. EQUIPO
1		13	
2		14	
3		15	
4		16	
5		17	
6		18	
7		19	
8		20	
9		21	
10		22	
11		23	
12		24	

PISO 1

ACEPTAR

Figura 3.14: Pantalla de datos generales de los equipos

Factores de piso para la carga de enfriamiento

PISO 1 PISO 2 PISO 3 PISO 4 PISO 5

FACTOR DE PISO 1

CODIGO PBAJA

V0_S 0.51355 V0_P 0.71376

V1_S -0.54853 V1_P -0.77057

V2_S 0.10957 V2_P 0.13125

W1_S -1.22374 W1_P -1.17485

W2_S 0.29633 W2_P 0.25288

V0_C 0.72116

V1_C -0.84974

V2_C 0.19174

W1_C -1.28291

W2_C 0.34607

V0_I 0.75493

V1_I -0.84685

V2_I 0.17889

W1_I -1.21594

W2_I 0.30311

TIPO	CODIGO	V0_S	V1_S	V2_S	W1_S	W2_S	V0_C	V1_C	V2_C	W1_C	W2_C
1	PBAJA	0.51355	-0.54853	0.10957	-1.22374	0.29633	0.72116	-0.84974	0.19174	-1.28291	0.34607
2	PALTA	0.78651	-0.6424	0.11573	-0.93478	0.19462	0.64714	-0.77057	0.13125	-1.17485	0.25288
3	P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TIPO 1: PISO UNICO

Código	Descripción	Valor
zg	Geometría de zona	(100 ft x 20 ft) rectangular
zh	Altura de zona	8 ft
is	Nivel de sombreado Interior	100%
fn	Tipo de amueblado	Amueblado
ec	Construcción de muro exterior	Muro tipo 39
gl	Porcentaje de Vidrio	10%
fc	Cobertura de piso	Tile vinyl

ACEPTAR

Figura 3.15: Pantalla de datos generales para la carga de enfriamiento

Retiro de calor de pisos

PISO 1 PISO 2 PISO 3 PISO 4 PISO 5

TIPO 1

CONSTRUCCIÓN

Construcción ligera

g0 1.68 p0 1

g1 -1.73 p1 -0.82

g2 0.05

RAPIDEZ MÁXIMA DE EXTRACCIÓN DE CALOR (Btu)

RAPIDEZ MÍNIMA DE EXTRACCIÓN DE CALOR (Btu)

VARIACIÓN DEL SET POINT (F)

RAPIDEZ DE FLUJO DE AIRE DE VENTILACIÓN (cfm)

RAPIDEZ DE FLUJO DE AIRE DE INFILTRACIÓN (cfm)

TIPO	Descripción	g0	g1	g2	p0	p1
1	Construcción ligera	1.68	-1.73	0.05	1	-0.82
2	Construcción mediana	1.81	-1.89	0.08	1	-0.87
3	Construcción pesada	1.85	-1.95	0.1	1	-0.93

TIPO 1						
Código	Descripción	g0	g1	g2	p0	p1
	Construcción ligera	1.68	-1.73	0.05	1.00	-0.82

ACEPTAR

Figura 3.16: Pantalla de datos generales para el retiro de calor

Tarifa

DATOS DE FACTURACIÓN Y TARIFA

RENDIMIENTO ENERGÉTICO DEL EQUIPO

PISO 1 kBtu/h
kW

PISO 2 kBtu/h
kW

PISO 3 kBtu/h
kW

PISO 4 kBtu/h
kW

PISO 5 kBtu/h
kW

TARIFA

TIPO

TARIFA

	TIPO	TARIFA	Basico1-May	Excedente1-May	Basico2-May	IntBajo-May	IntAlto-May	Excedente2-May
1	1F		0.454	0.598	0.454	0.755	1.42	2.255
2	1E		0.454	0.598	0.454	0.755		2.255
3	1D		0.587	0.888	0.587	0.851		2.255

0.454	0.455	0.456	0.457	0.458	0.459
0.598	0.6	0.602	0.604	0.606	0.608
0.454	0.455	0.456	0.457	0.458	0.459
0.755	0.757	0.759	0.761	0.763	0.765
1.42	1.425	1.43	1.435	1.44	1.445
2.255	2.262	2.269	2.275	2.283	2.29

ACEPTAR

Figura 3.17: Pantalla de datos generales para la facturación

Los datos se piden en unidades inglesas, aunque el despliegue de resultados se entrega, ya sea en unidades inglesas (carga de enfriamiento en $\frac{btu}{h}$, retiro de calor en $\frac{btu}{h}$) como en unidades internacionales (carga de enfriamiento en ton , retiro de calo en ton , consumo en kWh). El consumo es desplegado en unidades internacionales debido a que al aplicar la tarifa de la región se requieren dichas unidades.

Cálculo por módulos

En el Capítulo 2 se describió el Método de Funciones de Transferencia, basado en esta metodología se programaron los diferentes módulos del simulador térmico. A continuación se enlistan los once módulos para la simulación térmica de una construcción:

- Temperatura horaria.
- Humedad horaria.
- Temperatura aire-sol.
- Ganancia de calor de la envolvente.
- Ganancia de calor debida a las personas.
- Ganancia de calor debida al equipo.
- Humedad relativa horaria mensual para Mexicali.
- Carga de enfriamiento.
- Retiro de calor.
- Horas-Grado

● Facturación.

Despliegue de resultados

Se hace de dos formas, la primera forma son pantallas del simulador diseñadas especialmente para el despliegue de resultados (Figura 3.18) y la segunda forma es utilizando una interface con Excel 2007 para el despliegue de resultados de la simulación térmica. La interface con Excel 2007 es muy conveniente debido a que permite hacer un reporte tabulado de los resultados para los diferentes pisos y elaborar gráficas que ayudan a una mejor comprensión de los resultados de la simulación.

Resultados3

PISO 1 PISO 2 PISO 3 PISO 4 PISO 5

MAYO

Carga de enfriamiento	274.2301
Retiro de Calor	231.5952
Consumo Mensual	347.6347
Facturación Mensual	164.6856

AGOSTO

Carga de enfriamiento	449.6007
Retiro de Calor	343.584
Consumo Mensual	482.0213
Facturación Mensual	247.0409

JUNIO

Carga de enfriamiento	363.1823
Retiro de Calor	286.5768
Consumo Mensual	411.3636
Facturación Mensual	203.3182

SEPTIEMBRE

Carga de enfriamiento	324.303
Retiro de Calor	261.7491
Consumo Mensual	381.5704
Facturación Mensual	186.8317

JULIO

Carga de enfriamiento	459.3134
Retiro de Calor	349.7864
Consumo Mensual	489.4641
Facturación Mensual	250.8574

OCTUBRE

Carga de enfriamiento	121.9986
Retiro de Calor	107.0554
Consumo Mensual	176.9153
Facturación Mensual	81.2041

Capacidad Suministrada de Refrigeración Ton

Capacidad Requerida de Refrigeración Ton

RECALCULAR

Figura 3.18: Despliegue de resultados





ht

[tp://www.simonjamesdesigner.com/images/Artesian-Waterfront.jpg](http://www.simonjamesdesigner.com/images/Artesian-Waterfront.jpg)

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El Departamento de Sistemas Energéticos de la UABC, cuenta ya con una larga trayectoria de estudios de consumo energético mensual

durante el periodo de verano para diferentes viviendas y edificios de la región. Estos estudios fueron utilizados e ingresados al simulador térmico para obtener resultados y validar dicho simulador. A continuación las Tablas 4.1 y 4.2, así como las Figuras 4.3 y 4.4, muestra los resultados de una vivienda típica de la región de Mexicali, utilizando una humedad relativa promedio mensual, así como el porcentaje de desviación entre los resultados obtenidos por el Departamento de Sistemas Energéticos de la UABC y el simulador térmico.

Tabla 4.1. Resultados de consumo energético de una vivienda.

(Humedad relativa promedio mensual).

SIMULACIÓN				
DEPARTAMENTO UABC		VISUAL BASIC 2008		DESVIACIÓN
MES	Consumo (kWh)	Consumo (kWh)		%
MAY	702.20	711.89		-1.38
JUN	845.71	844.09		0.19
JUL	970.35	1,005.53		-3.63
AGO	989.89	990.13		-0.02
SEP	768.61	782.40		-1.79
OCT	335.27	405.47		-20.94
VERANO	4,612.02	4,739.52		-2.76

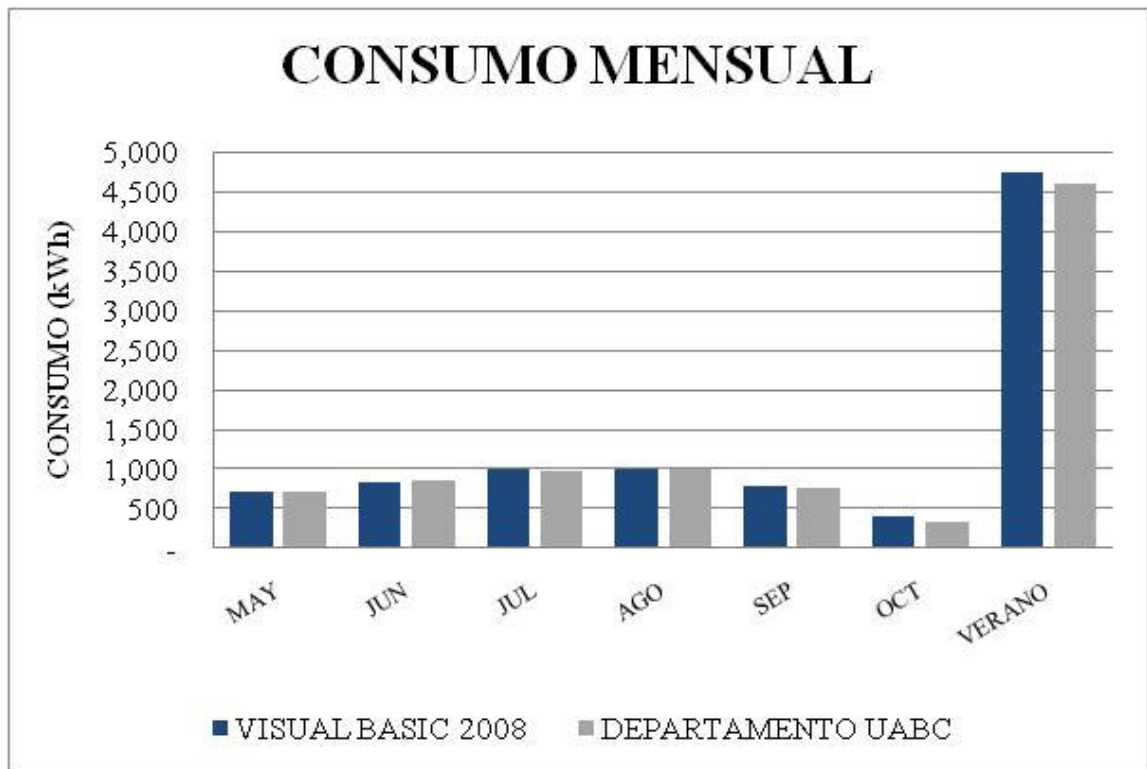


Figura 4.3. Consumo mensual durante el verano. (Humedad relativa como una función periódica de Fourier)

Tabla 4.2. Resultados de Facturación energético de una vivienda. (Humedad relativa promedio mensual).

SIMULACIÓN				
MES	DEPARTAMENTO UABC	VISUAL BASIC 2008		DESVIACIÓN
	Facturación (\$)	Facturación (\$)		%
MAY	392.07	398.10		-1.54
JUN	483.02	482.01		0.21
JUL	562.74	584.76		-3.91
AGO	576.95	577.10		-0.03
SEP	439.53	448.22		-1.98
OCT	167.19	211.56		-26.54
VERANO	2,621.49	2,701.74		-3.06

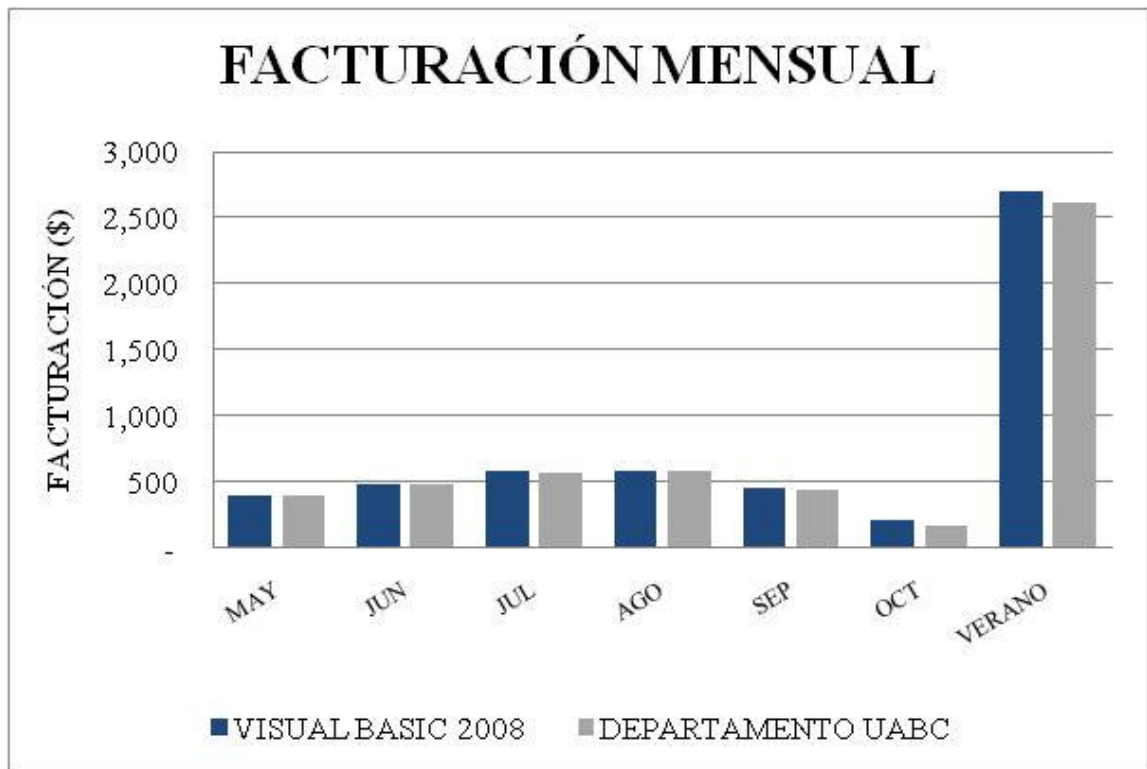


Figura 4.4. Facturación mensual durante el verano. (Humedad relativa promedio mensual)

En las Tablas 4.1 y 4.2 se muestra la similitud en los resultados obtenidos para el consumo y facturación para el periodo de verano, por Departamento de Sistemas Energéticos de la UABC y el simulador en Visual Basic, para la casa habitación. El Departamento de Sistemas Energéticos de la UABC reporta en consumo y facturación 4,612.02 kWh y 2,621.49 pesos respectivamente, mientras que para el simulador térmico es de 4,739.52 kWh y 2,701.74 pesos.

Las Figuras 4.3 y 4.4 representan los datos graficados del consumo y facturación durante el periodo de verano para la casa habitación, estas gráficas muestran que la desviación durante todos los meses de

verano para el consumo y facturación es muy poca, por lo tanto corresponderá también una desviación pequeña para la totalidad del consumo y la facturación para el verano.

Como se observa en las Tablas 4.1 y 4.2 la desviación para el consumo y facturación en el periodo de verano entre ambos resultados es de -2.76 % y -3.06 respectivamente.

Esta desviación es debida al cálculo de la ganancia de calor, ya que en el simulador térmico se utilizan 29 días tipo, para la temperatura horaria en un año promedio de 2004 a 2007 para Mexicali. Mientras que el Departamento de Sistemas Energéticos de la UABC, se emplean 20 días tipo, para la temperatura en un año típico (2001) para Mexicali, ya que ambos cálculos utilizan una humedad relativa promedio mensual.

Por otra parte las Tablas 4.4 y 4.5 es el mismo caso que anteriormente se describe, pero esta vez el simulador térmico en Visual Basic 2008 utiliza la humedad relativa horaria como una función periódica de Fourier en el cálculo de ganancia de calor.

Tabla 4.4. Resultados de Facturación energético de una vivienda.

(Humedad relativa como una función periódica de Fourier).

SIMULACIÓN			
DEPARTAMENTO UABC		VISUAL BASIC 2008	DESVIACIÓN
MES	Consumo (kWh)	Consumo (kWh)	%
MAY	702.20	754.10	-7.39
JUN	845.71	869.51	-2.81
JUL	970.35	1,018.55	-4.97
AGO	989.89	1,004.68	-1.49
SEP	768.61	813.96	-5.90
OCT	335.27	430.34	-28.36
VERANO	4,612.02	4,891.14	-6.05

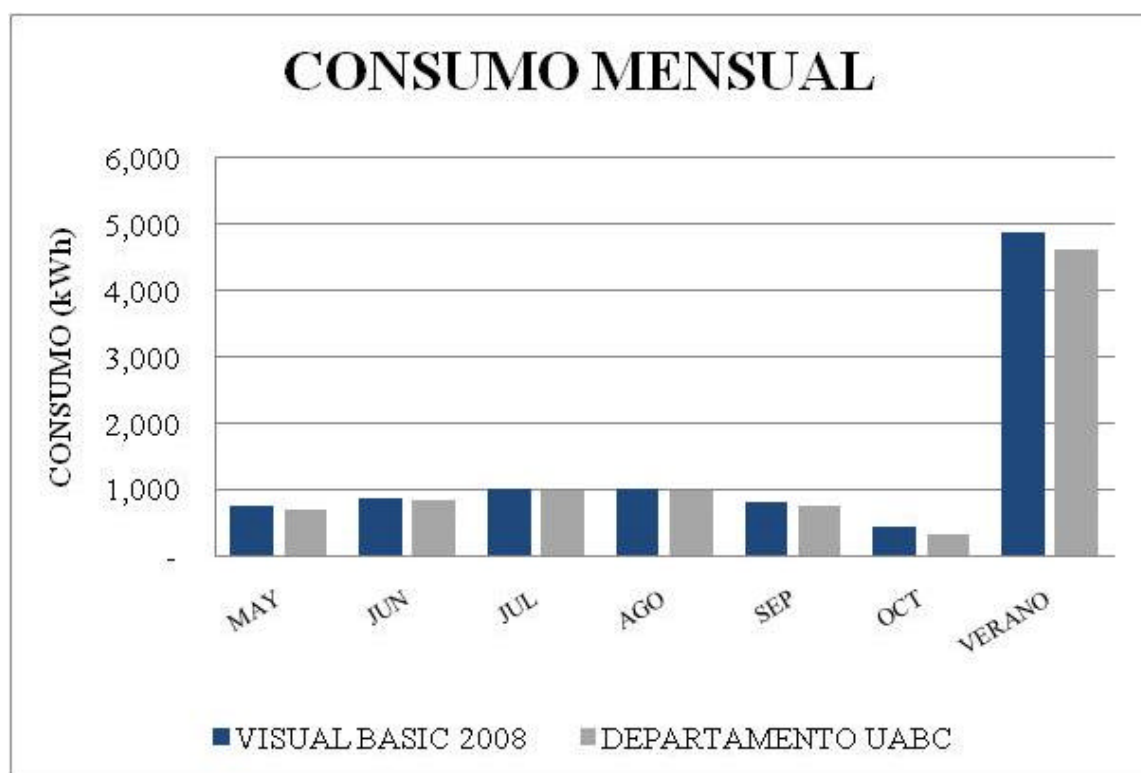


Figura 4.5. Facturación mensual durante el verano. (Humedad relativa como una función periódica de Fourier).

Tabla 4.5. Resultados de Facturación energético de una vivienda.
(Humedad relativa como una función periódica de Fourier).

SIMULACIÓN			
DEPARTAMENTO UABC		VISUAL BASIC 2008	DESVIACIÓN
MES	Facturación (\$)	Facturación (\$)	%
MAY	392.07	424.35	-8.23
JUN	483.02	497.88	-3.08
JUL	562.74	592.92	-5.36
AGO	576.95	586.24	-1.61
SEP	439.53	468.09	-6.50
OCT	167.19	227.27	-35.94
VERANO	2,621.49	2,796.75	-6.69

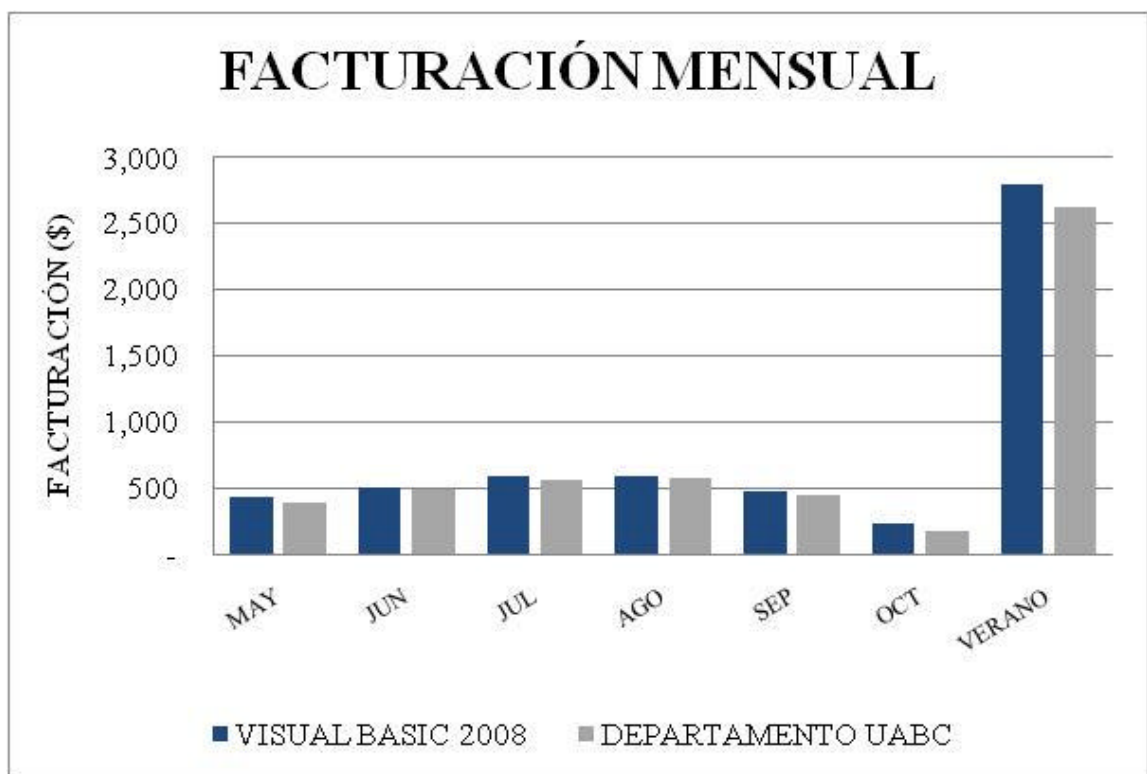


Figura 4.6. Facturación mensual durante el verano. (Humedad relativa como una función periódica de Fourier).

Observando las Tablas 4.4 y 4.5 nuevamente se puede apreciar una similitud en los resultados obtenidos para el consumo y facturación para el periodo de verano, por Área de Sistemas Energéticos de la

UABC y el simulador en Visual Basic 2008, para la casa habitación. Mientras que para el Área de Sistemas Energéticos de la UABC reporta en consumo y facturación 4,612.02 kWh y 2,621.49 pesos respectivamente, El simulador en Visual Basic 2008 reporta 4,891.14 kWh y 2,796.75 pesos. Las Figuras 4.5 y 4.6 representan los datos graficados del consumo y facturación durante el periodo de verano para la vivienda, y aquí nuevamente se puede apreciar que existe muy poca desviación entre uno y otro.

Lo más correcto para realizar el cálculo de ganancia de calor es utilizar la humedad horaria en lugar de una humedad relativa promedio mensual, debido a esto es que existe esta diferencia entre los valores obtenidos por Área de Sistemas Energéticos de la UABC y el simulador térmico en Visual Basic 2008. La desviación para el consumo y facturación en el periodo de verano entre ambos resultados es de - 6.05 % y -6.69 % respectivamente.



[http://michaelpachdesign.com/MPD_Upload/Renders/pool -
birdseye2.jpg](http://michaelpachdesign.com/MPD_Upload/Renders/pool-birdseye2.jpg)

5. CONCLUSIONES

Se desarrollo un modelo matemático basado en una función periódica de Fourier que describe el comportamiento de la humedad horaria para cualquier día del año, a partir de registros histórico de humedad relativa para las diferentes ciudades de México. Dicho modelo se utilizo para el cálculo de ganancia de calor en la simulación térmica de una vivienda típica de la región, para esto se realizo un simulador térmico en lenguaje Visual Basic 2008, basado en el Método de funciones de Transferencia reportado por la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE), Horas-Grado, una función periódica de Fourier que describe el comportamiento de la humedad horaria y la tarifa eléctrica reportada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), el cual es una herramienta amigable para los usuarios no especializas en simulación térmica.

1.- Se desarrollo un simulador térmico en lenguaje Visual Basic 2008 que es más amigable para el usuario no especializado en la metodología de cálculo.

2.- El simulador térmico en lenguaje Visual Basic 2008, está diseñado para evaluar viviendas en Mexicali, La Paz, Mazatlán, Guanajuato, Guadalajara, Querétaro, Los Mochis y Hermosillo. De acuerdo con los resultados mostrados en el Capítulo 4 no existe una desviación

significativa en el consumo y facturación, entre utilizar una humedad relativa promedio mensual y una humedad relativa horaria, por lo tanto se puede concluir que en regiones con climas como Mexicali se puede utilizar la humedad relativa promedio mensual a lo largo de todo el verano y obteniéndose resultados muy confiables.

3.- La diferencia en consumo y facturación entre utilizar una humedad relativa promedio mensual y una humedad relativa horaria es poca debido a que solo se utiliza en el cálculo de ganancia de calor por infiltración y ventilación, la cual corresponde tan solo a una pequeña parte del total de la ganancia de calor en una vivienda (aproximadamente 6 %), como se puede ver en la Figura 1.1.

4.- El simulador térmico desarrollado en el trabajo de tesis incorpora e integra la utilización del concepto de horas-grado para el cálculo de ganancias de calor, carga de enfriamiento, rapidez de retiro de calor, consumo y facturación mensuales en el simulador. Esto permite optimizar tiempo de cálculo, simplifica el análisis y proporciona resultados realistas del comportamiento térmico de una vivienda en función del clima de una región específica y de sus hábitos de uso, con lo que la simulación térmica es mucho más confiable.

5.- El simulador térmico en lenguaje Visual Basic 2008 se puede considerar un simulador muy completo para las ciudades de Mexicali, La Paz, Mazatlán, Guanajuato, Guadalajara, Querétaro, Los Mochis y

Hermosillo, debido a que se realiza una captura de información para la simulación térmica en un tiempo, ya que este se desarrolló en ambiente Windows que facilita el ingreso de información de la vivienda, por contar con una base de datos de los diferentes sistemas constructivos.

6.- El Simulador térmico en lenguaje Visual Basic 2008 puede optimizarse debido a que las ciudades de Mexicali, La Paz, Mazatlán, Guanajuato, Guadalajara, Querétaro, son las ciudades a las cuales se les determinó los coeficientes de ajuste $\langle m \rangle$, A , B , $\langle l \rangle$, C y D de la función periódica de Fourier, para el cálculo de temperatura horaria, Horas-Grado y humedad relativa horaria que se utilizan en la simulación térmica, mientras que para Los Mochis y Hermosillo se utiliza una correlación reportada por la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) para el cálculo de temperatura horaria y se usa una humedad relativa promedio mensual, para la simulación térmica. Una forma de hacer más completo este simulador es calcular estos factores para otras ciudades de México y otros países e incorporarlos a la base de datos del programa, así como utilizar la tarifa eléctrica correspondiente a la ciudad.



<http://djpdesigns.com/CHimages/LorhRT.jpg>

Tabla A.1: Humedad relativa.

2007																								
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Día																								
1	16.0	28.1	32.6	37.9	43.0	43.0	40.3	33.1	32.8	26.8	19.9	14.7	13.7	10.7	11.1	13.7	12.8	11.8	13.7	14.6	18.0	26.1	33.8	47.0
2	56.8	61.9	64.5	70.0	65.0	68.3	73.0	71.0	63.1	48.2	37.6	28.8	20.9	14.8	13.5	12.4	10.9	9.7	12.1	17.0	21.0	23.6	27.4	38.6
3	56.2	67.9	74.0	80.1	84.1	85.0	80.9	76.9	65.7	49.1	32.6	26.2	20.8	15.9	12.8	10.7	9.0	7.6	7.3	12.6	19.6	21.0	22.6	27.7
4	32.3	39.2	48.8	53.9	58.0	60.0	63.5	60.7	45.3	31.7	27.2	16.0	12.9	12.6	11.8	9.9	9.2	9.0	10.3	11.9	15.7	15.9	15.7	18.0
5	22.2	27.7	48.4	54.2	44.8	46.5	40.7	46.7	49.9	44.3	31.8	26.1	22.8	18.6	14.4	11.3	12.3	12.4	12.7	12.0	12.8	20.2	32.3	35.3
6	33.2	36.2	36.1	43.6	53.7	63.7	67.1	64.3	61.6	50.0	37.3	32.8	26.2	23.9	16.2	13.2	16.3	15.0	14.0	14.3	18.0	21.4	32.5	46.4
7	50.7	53.0	49.5	50.3	59.6	61.4	59.9	53.7	45.8	40.9	34.8	30.7	29.1	22.9	21.5	20.6	20.5	20.6	22.7	21.7	24.0	26.4	36.2	48.4
8	53.6	59.3	62.7	66.3	63.4	62.9	63.5	60.4	56.7	48.5	40.1	32.2	27.6	23.0	20.4	22.4	25.1	24.9	25.2	27.1	33.4	41.7	48.4	54.8
9	59.0	62.9	61.7	61.5	63.9	63.6	61.3	56.3	52.8	47.1	36.7	25.1	23.5	22.1	22.6	16.9	16.6	17.7	21.2	28.5	31.3	33.4	41.0	45.1
10	47.9	45.4	48.5	51.6	53.2	54.7	53.3	52.2	48.4	43.9	35.6	30.9	29.2	27.1	22.9	20.9	20.9	21.5	21.3	19.2	17.8	19.6	20.2	21.1
11	25.8	29.0	29.0	28.2	30.4	40.1	44.6	40.7	32.4	26.6	21.0	18.8	15.2	13.2	12.9	11.1	10.2	9.1	9.8	10.9	11.1	11.3	13.4	14.5
12	15.7	13.7	13.8	13.8	17.2	16.2	14.3	12.7	13.8	13.9	11.4	9.0	7.7	7.4	6.5	6.0	6.5	6.9	7.0	9.0	10.9	12.4	11.9	12.2
13	13.0	18.2	39.9	46.5	50.8	62.2	65.4	65.1	65.1	55.3	47.8	31.9	20.8	39.7	41.1	29.0	27.2	27.2	30.3	31.7	34.0	33.3	30.4	43.0
14	51.3	55.3	56.6	62.1	67.9	69.7	68.0	65.2	65.8	57.3	47.8	40.9	32.6	29.6	28.0	26.3	23.1	21.3	27.0	32.3	31.3	28.9	30.9	35.3
15	40.0	44.0	47.8	56.5	61.7	63.8	62.1	58.9	48.3	30.1	21.5	21.0	19.8	18.3	17.1	17.6	17.7	17.2	17.2	18.0	17.5	18.9	20.6	21.5
16	22.8	23.4	23.3	23.9	25.0	27.2	31.1	29.7	23.9	19.4	17.9	14.8	13.2	13.2	12.8	12.5	12.3	12.9	12.5	13.2	14.4	15.8	15.6	19.0
17	19.5	19.1	20.7	20.1	19.8	21.7	25.4	22.5	20.5	18.1	15.6	13.3	12.5	11.9	12.1	11.9	12.1	12.4	13.0	19.1	23.8	22.3	25.8	30.0
18	35.8	44.2	48.5	49.5	54.2	52.5	51.6	53.9	48.4	35.8	23.7	19.9	16.5	13.8	12.5	12.0	11.6	12.0	14.1	18.5	21.3	23.6	26.3	40.7
19	42.3	47.6	59.0	63.0	65.1	69.2	68.4	67.4	61.7	53.7	49.4	42.0	36.1	30.0	23.9	26.9	25.0	24.3	22.7	27.3	33.1	39.9	44.6	52.6
20	58.7	66.3	67.2	67.8	67.6	63.0	67.0	65.9	58.1	49.9	43.0	43.8	38.2	33.9	35.9	39.1	37.4	36.3	32.7	40.6	44.6	49.4	54.2	62.8
21	68.9	72.0	74.4	74.0	72.1	70.7	71.2	68.4	64.6	53.6	42.9	39.3	30.7	29.9	28.1	30.1	25.6	23.1	23.6	23.8	28.0	33.3	39.0	38.1
22	47.7	55.1	60.8	62.9	65.3	62.3	58.9	59.8	60.5	50.0	43.6	40.4	36.3	32.0	30.1	29.3	25.5	26.8	23.4	21.3	25.4	26.6	25.6	26.7
23	30.1	33.5	39.5	46.2	55.2	59.6	60.4	55.5	49.7	36.6	24.8	25.9	27.1	24.1	22.6	23.8	23.1	23.3	24.5	28.5	32.1	35.6	50.5	55.3
24	59.0	60.3	63.6	66.3	67.2	69.2	70.1	67.3	62.9	57.8	52.3	47.3	34.1	30.4	29.8	30.4	30.4	29.9	30.0	30.5	33.9	37.2	41.1	43.9
25	46.1	52.1	54.4	62.6	65.6	64.9	65.5	58.8	55.5	48.8	42.4	35.8	33.8	31.2	30.1	28.8	27.4	25.0	26.4	27.7	31.4	34.2	34.3	32.9
26	38.4	52.4	57.4	66.7	70.6	67.3	63.2	57.9	58.7	51.4	42.0	33.0	34.2	33.7	32.4	32.7	32.3	32.8	32.0	32.7	40.7	48.8	51.5	53.6
27	58.1	63.8	71.5	70.0	69.0	71.2	72.2	69.4	67.3	60.3	49.6	43.8	37.8	30.5	28.8	27.5	27.6	28.1	29.4	33.0	35.2	37.8	39.7	43.7
28	49.2	53.3	55.9	61.1	66.9	68.6	68.7	62.8	53.1	35.8	26.5	20.8	14.6	13.5	13.7	13.1	13.2	15.0	15.9	28.2	34.1	35.7	37.0	44.5
29	51.2	54.9	49.9	46.3	49.4	49.8	50.9	55.8	57.4	50.9	51.4	51.9	45.3	34.8	27.7	22.9	24.6	22.0	24.9	28.4	28.0	25.4	27.3	28.6
30	29.1	30.8	38.2	43.9	49.4	56.3	57.1	56.5	47.3	42.7	33.9	29.9	27.0	24.3	23.0	22.1	20.8	21.7	27.1	28.6	29.8	34.2	39.0	45.4
31	54.2	61.8	59.6	56.2	57.6	61.7	63.4	61.2	61.8	55.6	45.9	42.3	38.2	37.2	36.9	34.4	33.3	33.9	32.4	35.5	40.3	47.8	50.3	58.8

Tabla A.2: Humedad relativa promedio horaria cada día un mes ($\overline{HR}_{j,k}$).

PROMEDIO 2004-2007																								
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Día																								
1	31.3	38.0	43.2	46.3	47.3	53.1	52.5	39.4	34.5	30.8	24.9	21.2	19.1	17.0	17.7	19.1	18.3	17.0	17.1	18.9	22.4	24.9	29.0	34.3
2	44.3	54.1	58.7	64.0	66.9	68.6	68.5	61.4	49.9	39.0	32.3	26.6	20.4	16.7	15.4	14.2	14.0	14.2	16.7	19.6	22.4	25.0	28.5	33.7
3	39.4	43.5	52.2	57.4	59.8	60.7	59.1	55.9	47.3	39.1	28.5	22.5	19.3	18.3	16.5	15.2	14.4	15.4	14.4	16.6	19.4	20.7	22.3	24.8
4	29.0	46.7	56.2	58.2	58.8	57.4	56.9	54.7	48.3	40.7	30.6	22.4	18.6	16.1	15.4	14.0	13.4	13.5	13.5	14.1	17.4	17.9	17.9	19.7
5	23.9	32.1	45.8	51.7	48.6	49.6	47.5	47.3	43.7	36.1	27.9	23.1	19.8	17.1	15.0	13.5	14.4	14.4	14.5	14.6	16.0	19.6	25.6	27.5
6	28.8	32.4	38.7	43.6	48.1	51.4	51.1	50.1	46.1	36.7	27.6	22.4	19.2	18.4	15.1	13.9	14.9	15.6	15.2	15.5	16.9	19.3	23.9	28.2
7	30.9	37.4	40.3	42.8	48.9	53.0	48.3	46.7	44.9	39.3	30.6	23.5	21.4	18.2	16.6	15.6	15.6	15.9	16.1	15.8	17.2	20.1	24.2	29.2
8	33.0	40.0	42.0	45.9	47.8	49.4	49.1	48.5	44.0	37.2	29.3	24.1	21.0	17.8	16.2	16.1	16.3	15.7	15.3	16.3	19.3	22.4	27.6	34.3
9	38.1	38.6	38.2	38.3	42.3	42.8	42.0	38.5	35.4	32.6	27.1	20.9	19.8	18.3	16.6	14.0	13.9	14.0	15.4	18.2	20.1	22.5	25.7	28.3
10	30.2	30.8	30.9	33.0	37.0	40.4	41.9	40.6	37.9	31.5	25.5	21.7	20.3	20.2	18.8	17.6	17.2	16.8	17.6	18.7	20.2	23.7	24.2	25.4
11	30.1	31.9	34.2	38.3	40.2	44.7	46.7	39.5	29.6	26.1	21.7	18.0	15.4	14.5	13.8	13.0	12.0	12.0	12.7	14.6	16.7	20.1	22.3	21.2
12	24.0	31.1	38.1	41.0	39.9	45.2	47.6	42.6	36.5	29.8	21.6	18.2	15.6	16.3	15.8	13.6	13.4	13.3	14.3	16.3	18.0	20.5	21.3	23.5
13	23.6	30.6	37.0	41.8	45.4	52.8	56.0	51.7	46.1	40.0	35.3	28.9	24.2	28.6	27.8	22.4	20.4	21.0	24.6	27.3	31.8	34.8	36.2	40.1
14	42.9	50.7	54.9	58.0	63.8	64.4	63.7	61.0	58.6	52.0	47.3	40.8	33.7	29.8	27.4	25.2	23.3	22.5	24.1	26.1	29.9	33.6	37.1	41.2
15	44.6	48.9	56.8	66.9	67.5	65.0	66.4	62.4	55.6	44.8	37.1	32.7	28.8	27.0	23.6	21.3	22.9	21.7	21.1	24.1	25.2	27.6	35.8	36.6
16	37.0	37.0	38.1	41.2	42.5	50.7	53.4	49.3	42.4	34.9	28.2	23.8	20.4	19.5	18.6	17.6	16.4	17.3	18.4	19.8	20.8	22.8	23.7	26.0
17	28.8	34.7	37.6	39.4	38.5	36.8	36.0	36.7	36.2	29.5	27.0	24.4	22.3	20.0	18.8	17.6	17.6	18.0	19.1	22.0	24.0	25.1	27.7	27.2
18	29.2	36.1	49.4	52.8	57.3	59.7	60.5	56.8	47.8	36.2	28.0	23.6	21.3	18.1	18.3	18.2	18.8	18.2	20.1	23.2	26.2	29.7	32.2	38.5
19	41.9	47.4	52.6	55.4	57.7	62.6	59.6	57.7	46.8	37.3	33.9	29.4	26.4	24.1	22.2	22.4	21.9	23.1	23.8	27.0	30.3	31.7	32.7	36.3
20	41.3	49.5	52.6	51.6	51.8	53.1	54.2	51.8	46.5	38.3	30.7	27.6	24.0	23.9	24.3	24.2	22.9	22.7	23.3	28.5	31.8	34.5	38.2	41.8
21	42.3	44.8	47.6	48.9	54.1	54.5	53.1	52.5	46.6	38.3	30.4	26.0	21.9	19.7	18.4	18.0	17.7	18.6	19.7	20.1	22.3	24.6	28.2	29.2
22	32.8	37.2	40.4	44.8	50.6	52.2	52.5	48.8	44.1	35.3	30.3	25.3	20.9	20.0	20.3	20.9	22.2	24.3	25.7	28.6	31.3	36.6	43.2	49.7
23	52.5	54.5	56.7	59.4	62.6	65.8	68.6	64.9	59.8	49.4	35.2	30.6	27.8	24.6	23.2	24.0	23.6	24.6	27.5	31.9	37.0	42.2	50.4	53.6
24	56.2	59.8	62.4	64.0	65.8	68.5	66.7	61.8	53.8	44.5	38.1	32.6	28.2	26.7	25.6	25.0	24.4	25.8	31.2	33.0	38.6	41.5	41.9	43.6
25	44.9	49.9	53.8	56.9	59.7	61.9	62.5	58.1	54.2	46.2	40.1	34.8	30.7	29.5	27.9	27.0	26.5	26.0	28.5	32.4	36.5	37.8	41.3	44.1
26	50.1	58.7	63.6	68.6	68.8	67.1	63.9	60.5	56.6	47.3	40.3	34.4	32.2	31.3	32.5	31.0	30.8	31.3	32.8	36.6	41.2	43.4	45.4	47.5
27	50.9	54.9	61.6	68.0	70.6	70.4	71.3	65.8	58.8	46.5	38.6	31.0	27.1	24.8	22.9	22.6	23.1	24.1	25.4	28.1	30.7	33.4	35.1	38.2
28	40.9	45.1	50.2	54.8	58.4	59.5	63.1	57.5	48.5	35.9	28.0	24.1	20.6	19.1	19.3	18.7	20.4	21.1	22.1	27.1	29.7	32.1	37.8	42.1
29	46.3	49.1	54.1	58.3	60.0	59.9	61.8	63.9	62.8	51.2	45.2	40.5	35.6	31.6	27.4	26.0	27.3	25.9	27.0	29.4	32.3	35.2	37.7	42.3
30	45.2	46.9	52.4	57.2	60.9	64.9	63.2	60.0	53.7	46.7	39.7	34.1	29.5	25.4	23.9	22.9	23.3	23.3	25.1	28.1	33.1	35.5	38.9	43.3
31	48.4	52.1	54.7	57.1	59.3	59.9	58.1	57.7	53.1	42.7	37.1	33.3	29.8	28.6	26.8	25.4	25.2	26.0	27.9	31.6	35.4	38.8	40.7	44.0

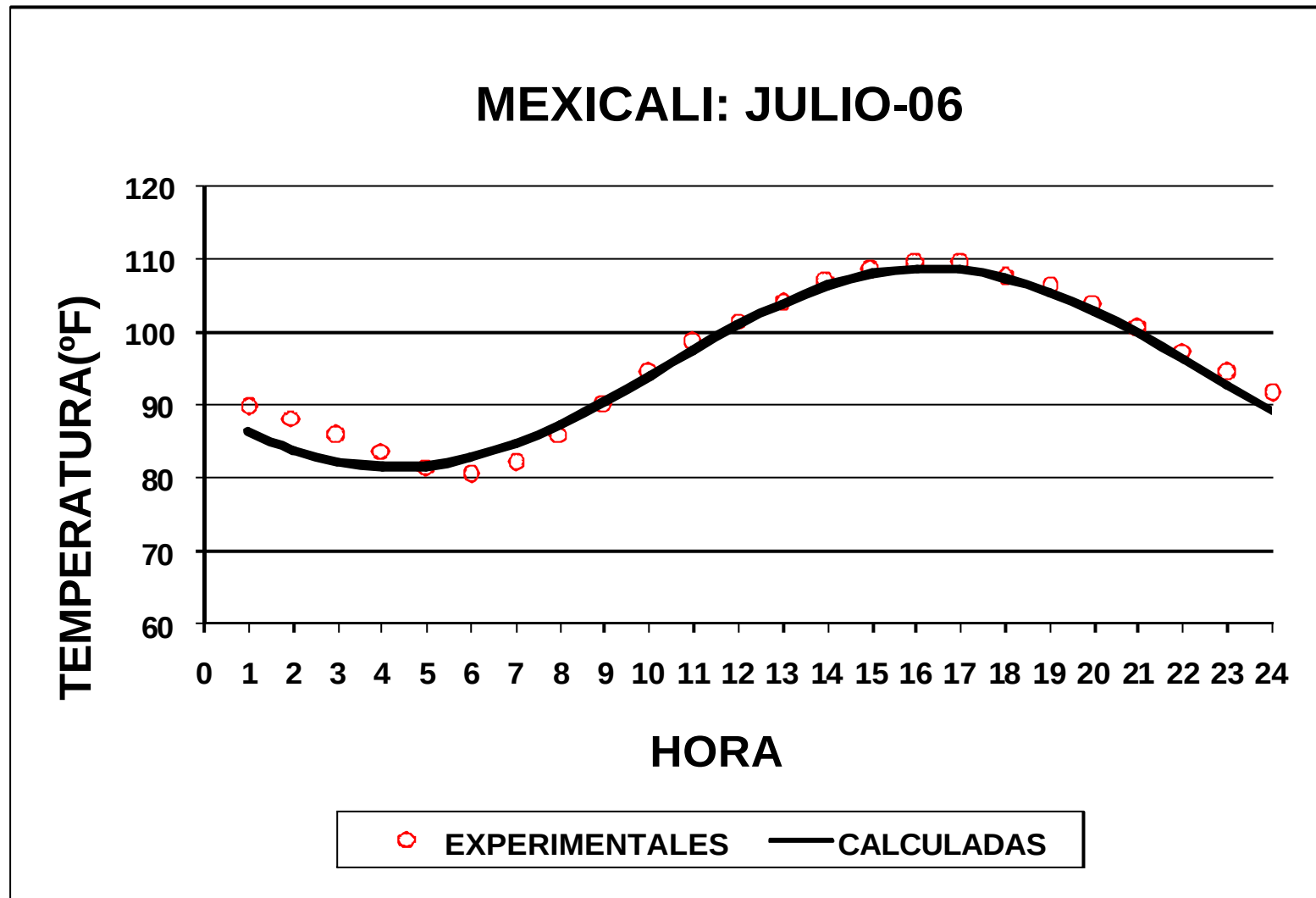


Figura A.1: Función periódica de Fourier para temperatura horaria de Mexicali.

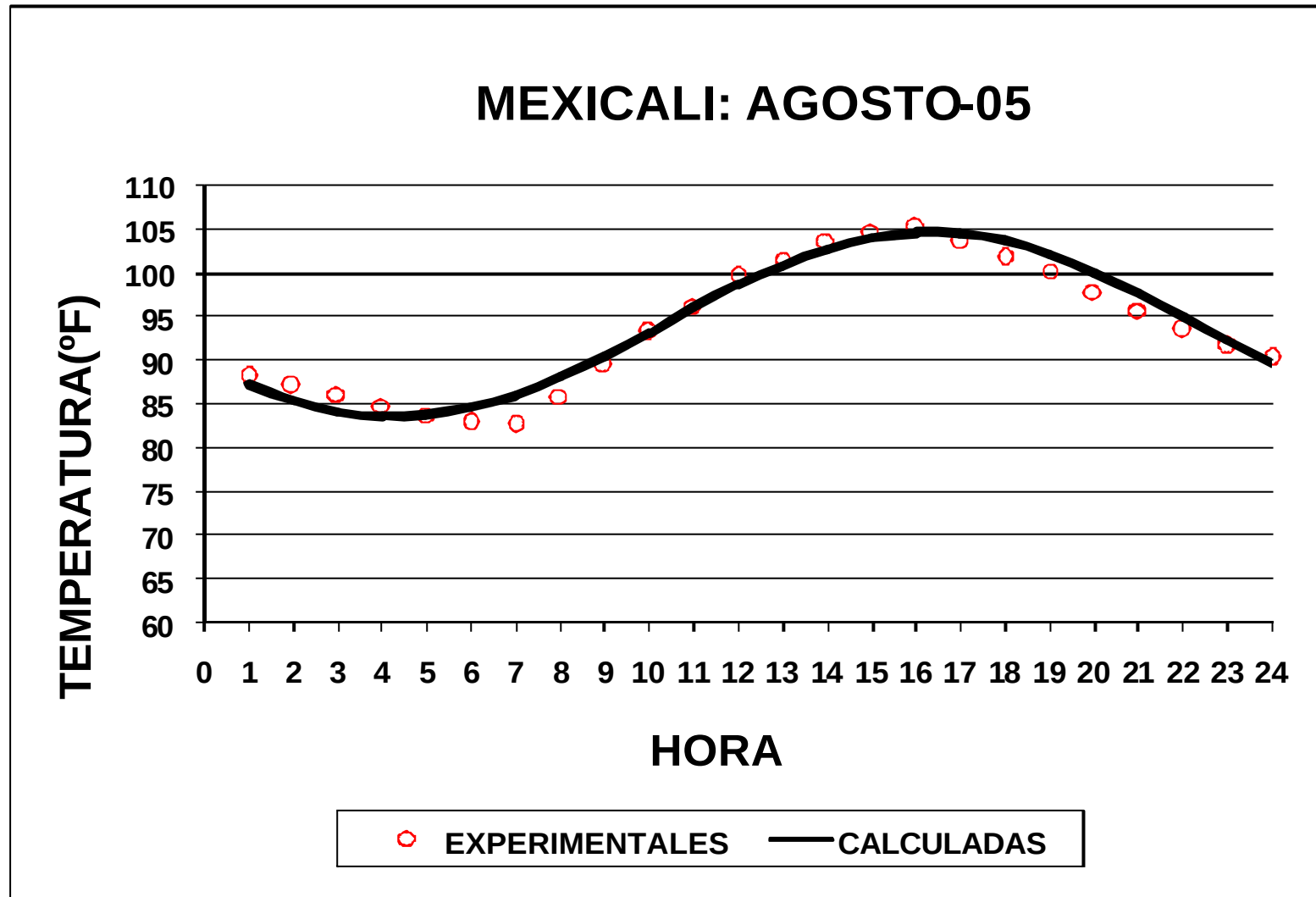


Figura A.2: Función periódica de Fourier para temperatura horaria de Mexicali.

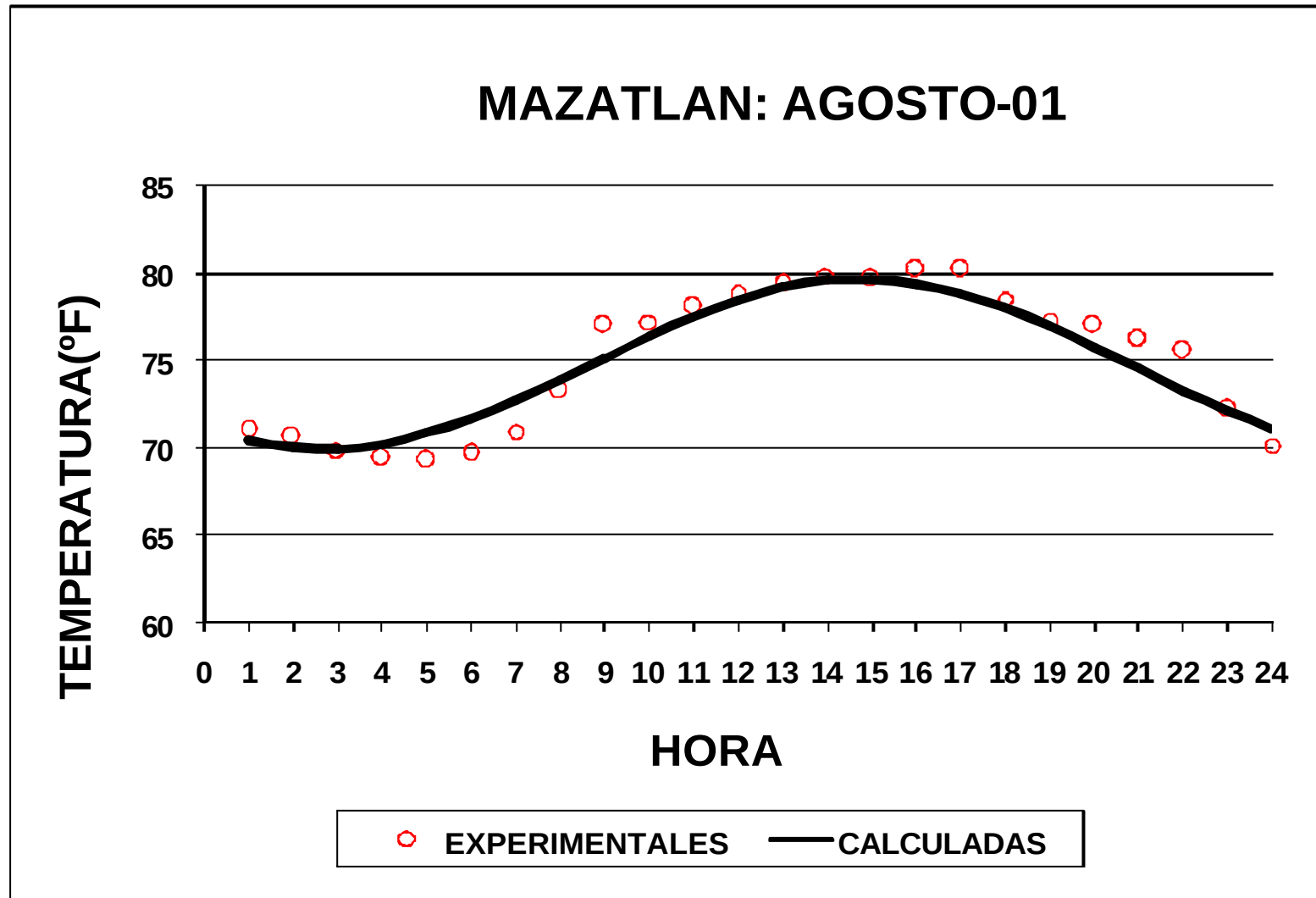


Figura A.3: Función periódica de Fourier para temperatura horaria de Mazatlán.

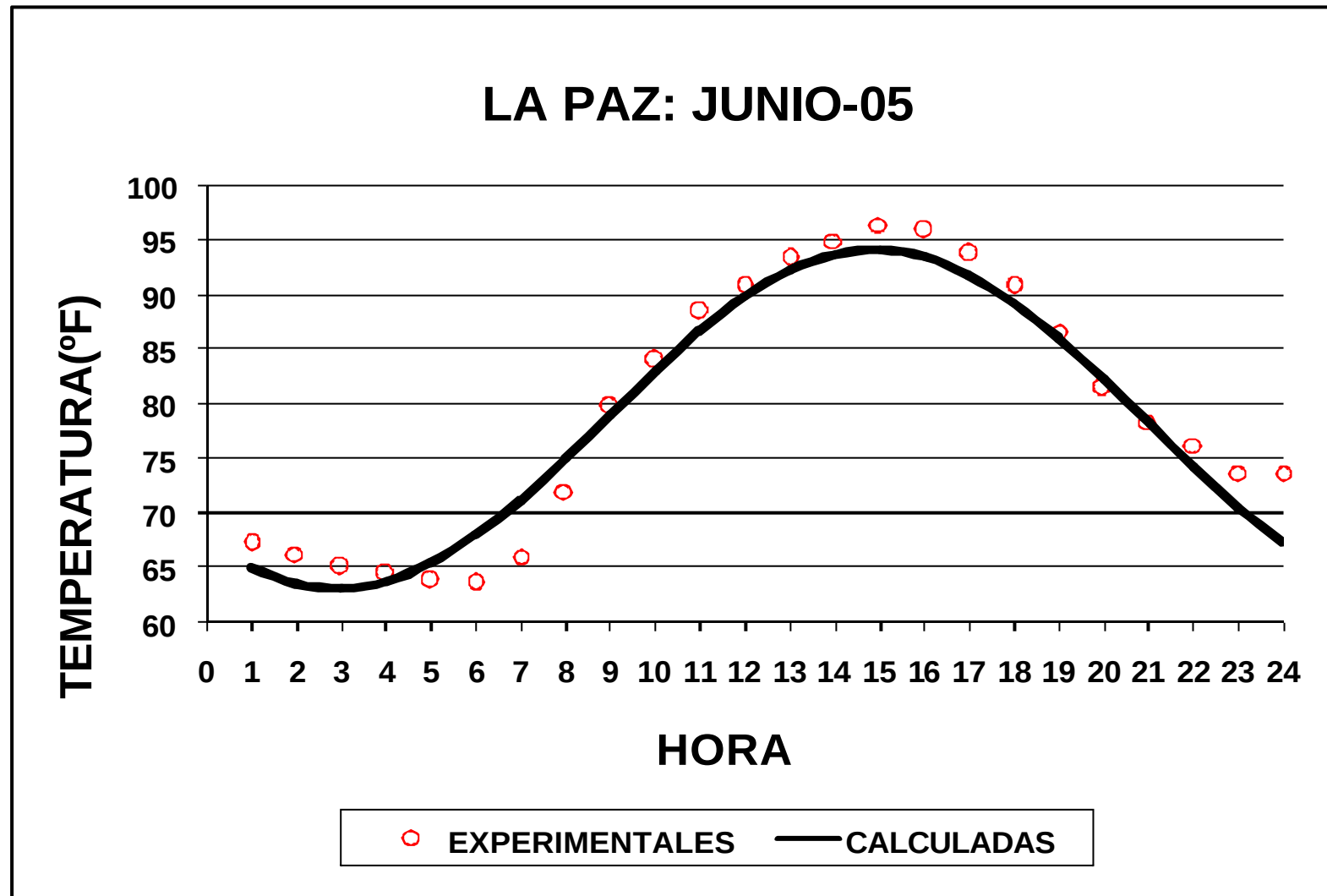


Figura A.4: Función periódica de Fourier para temperatura horaria de La Paz.

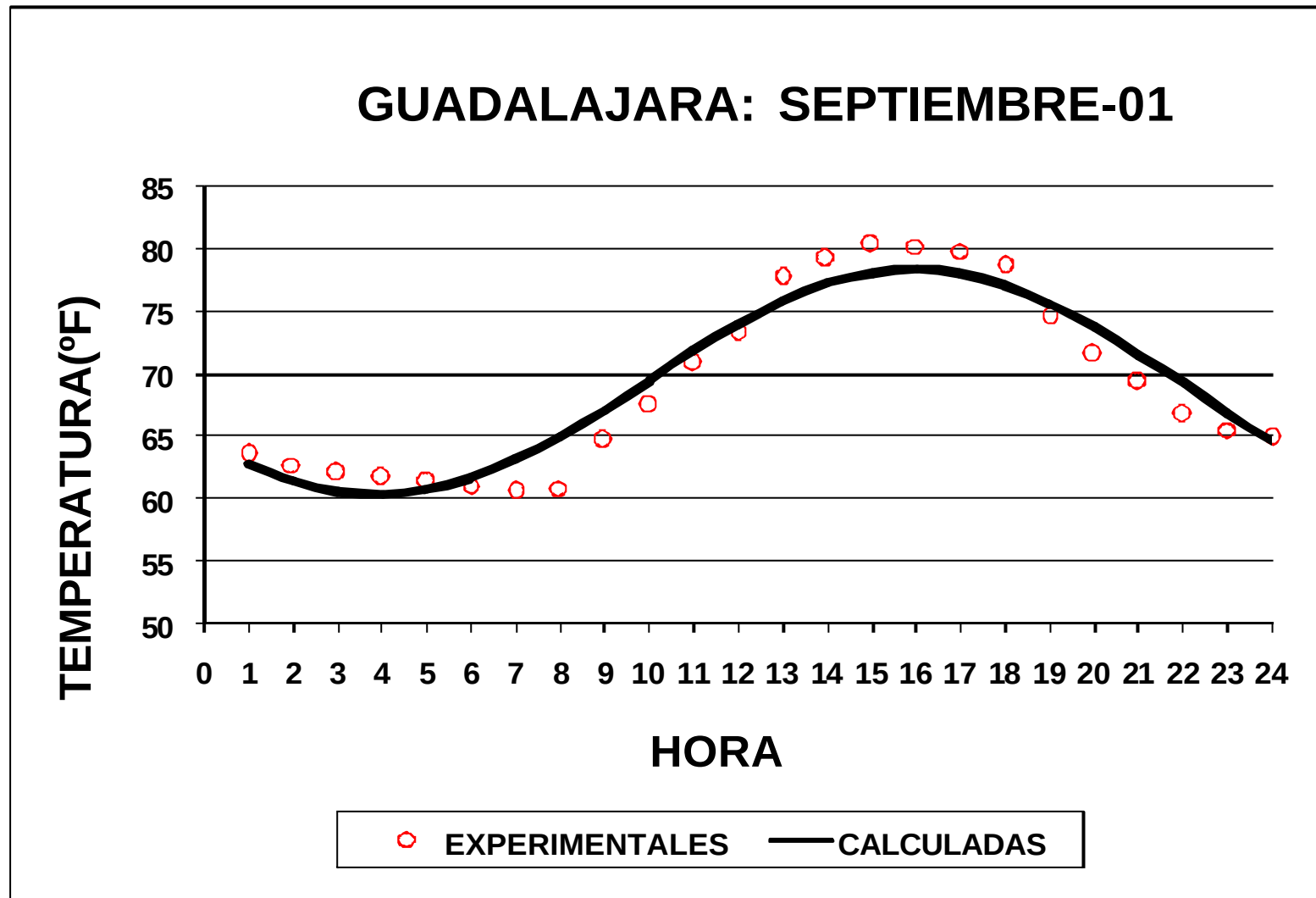


Figura A.5: Función periódica de Fourier para temperatura horaria de Guadalajara.

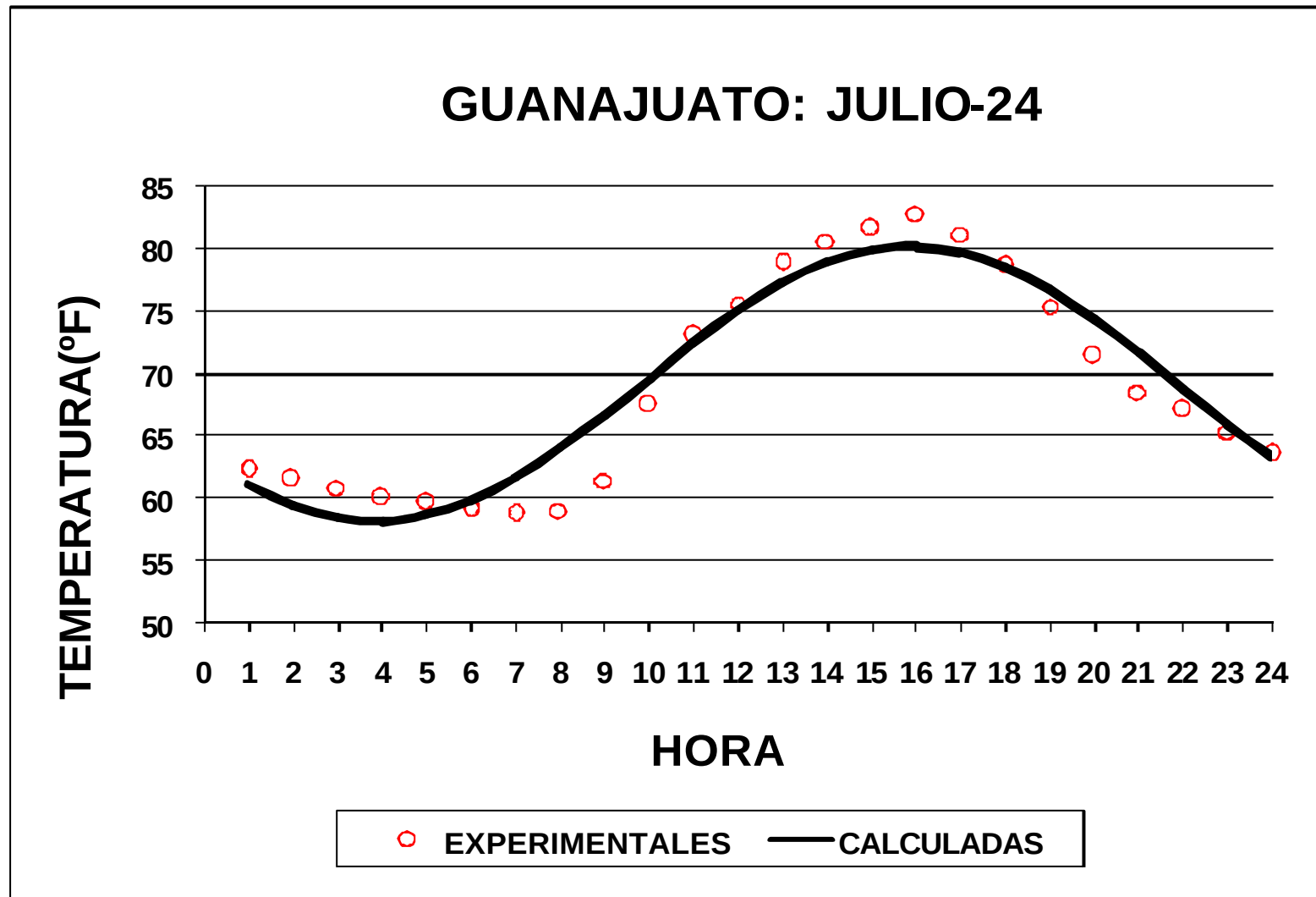


Figura A.6: Función periódica de Fourier para temperatura horaria de Guanajuato.

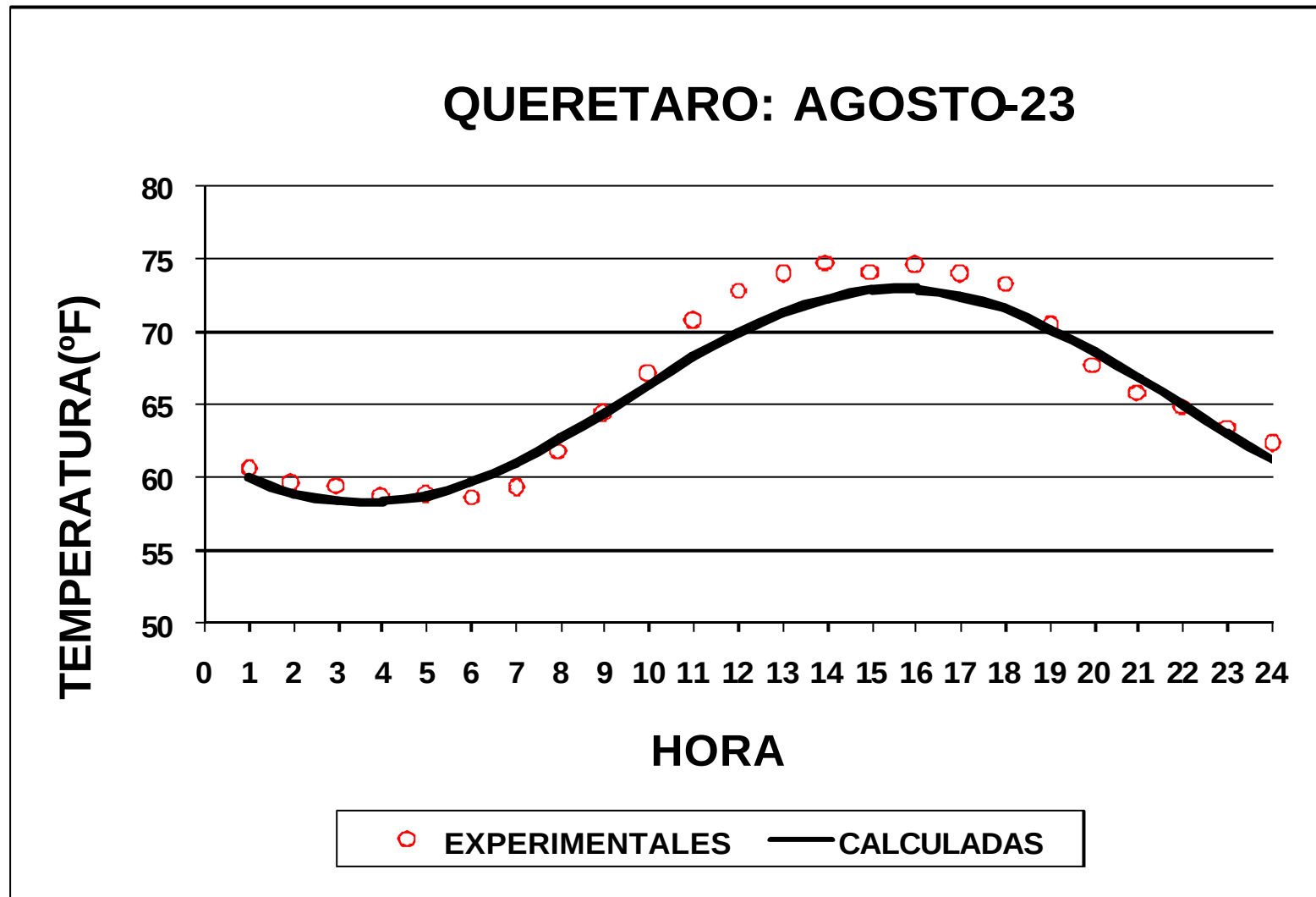


Figura A.7: Función periódica de Fourier para temperatura horaria de Querétaro.

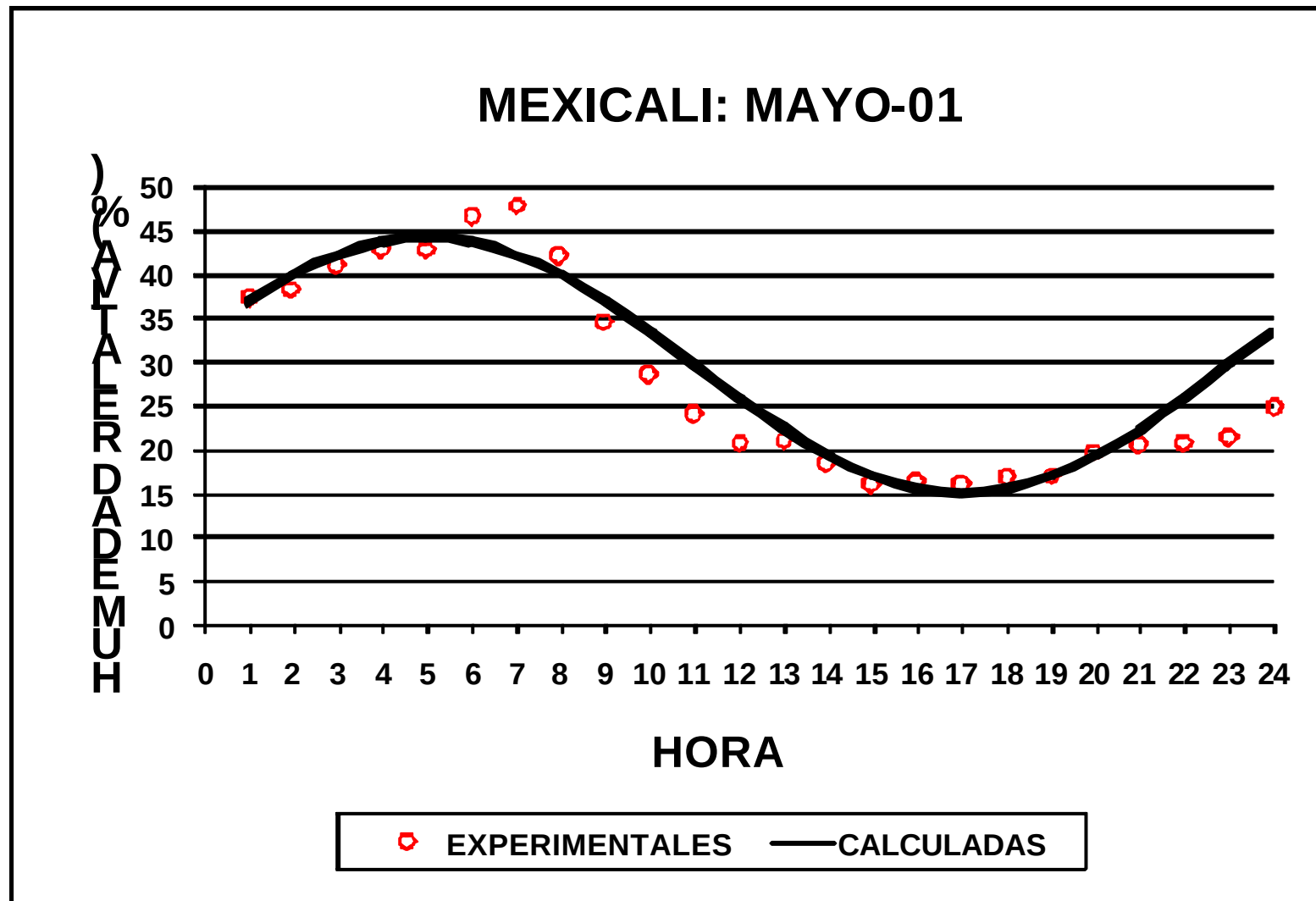
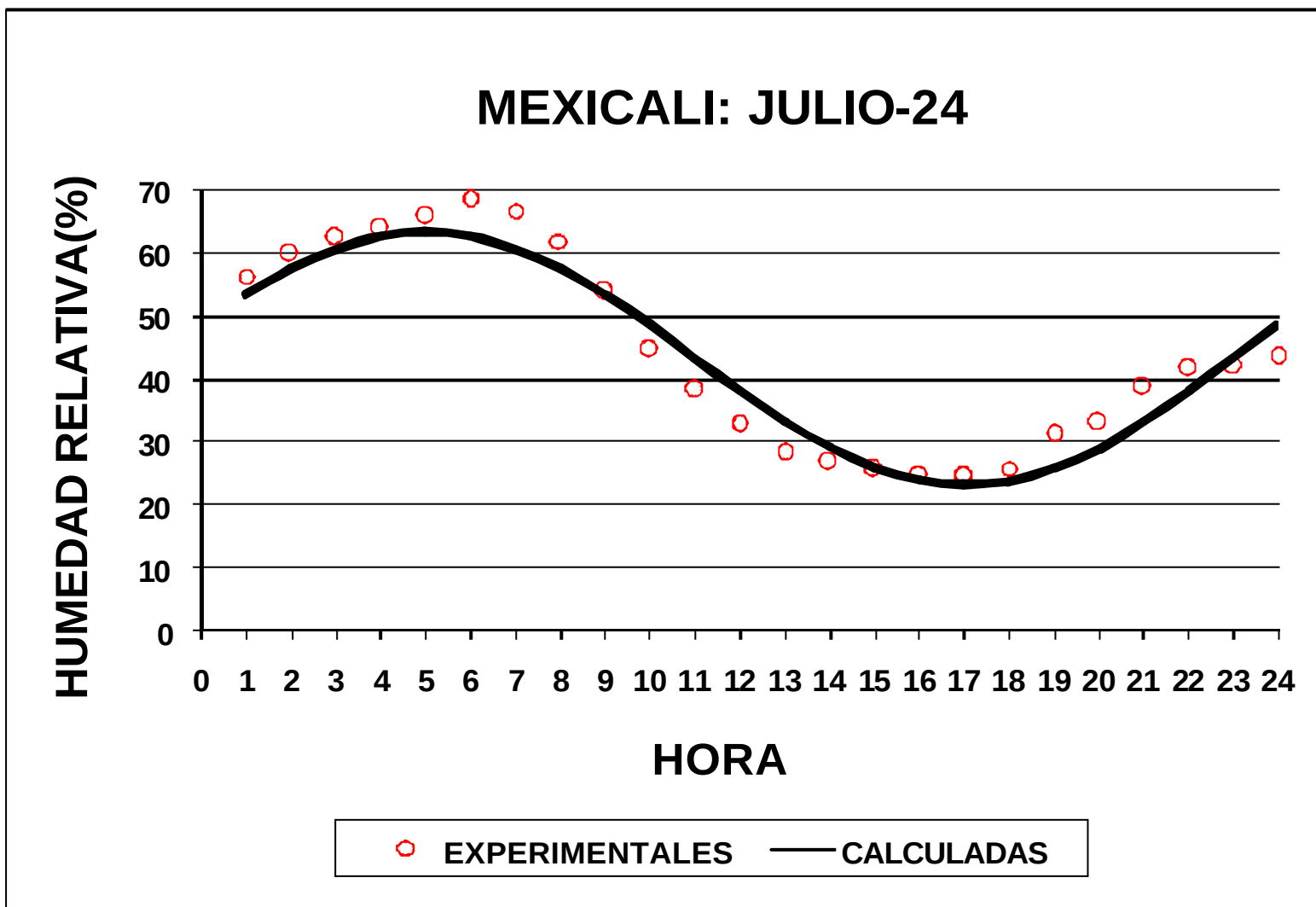


Figura A.8: Función periódica de Fourier para Humedad horaria de Mexicali.



Figura

A.9: Función periódica de Fourier para Humedad horaria de Mexicali.

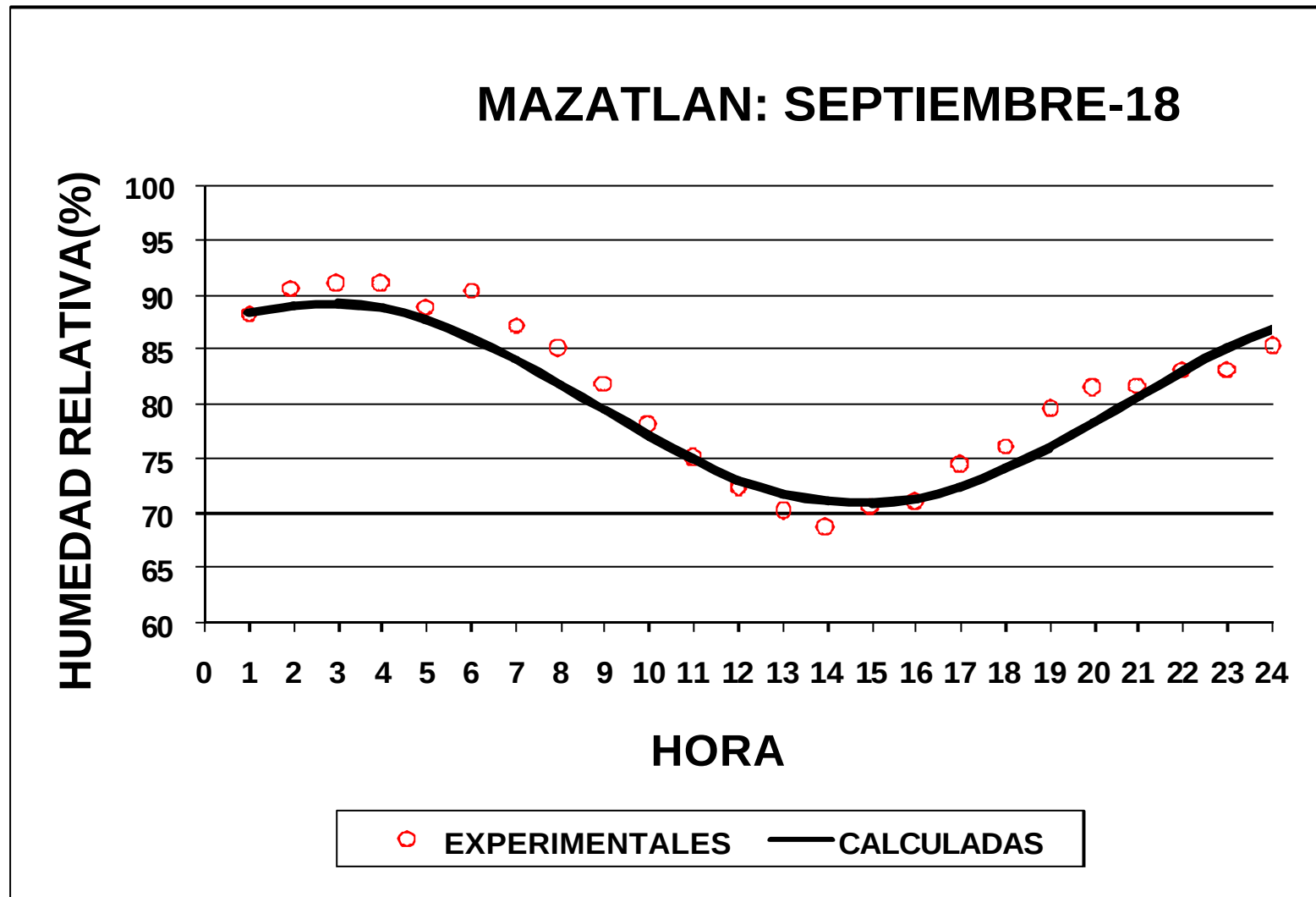


Figura A.10: Función periódica de Fourier para Humedad horaria de Mazatlán.

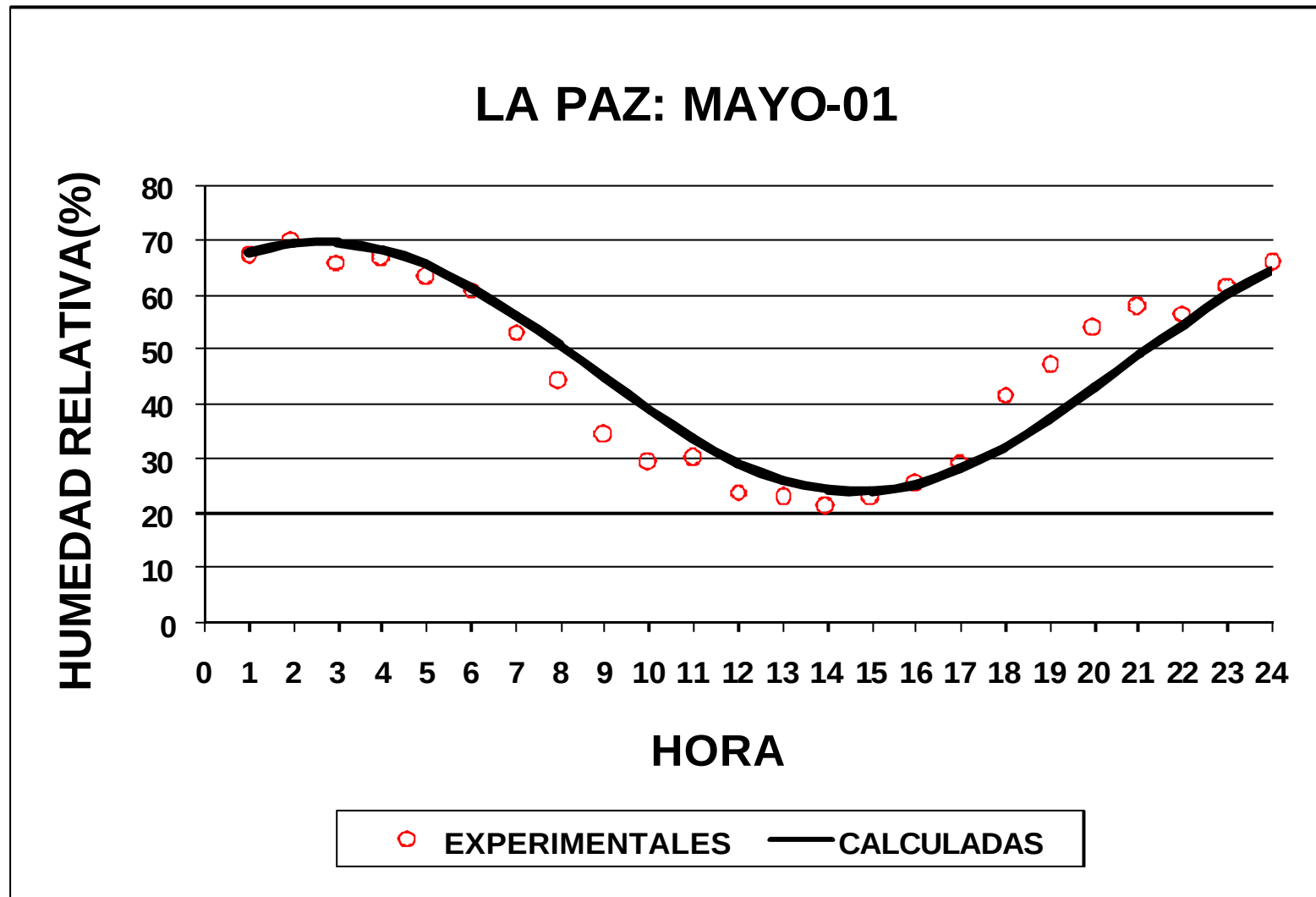


Figura A.11: Función periódica de Fourier para Humedad horaria de La Paz.

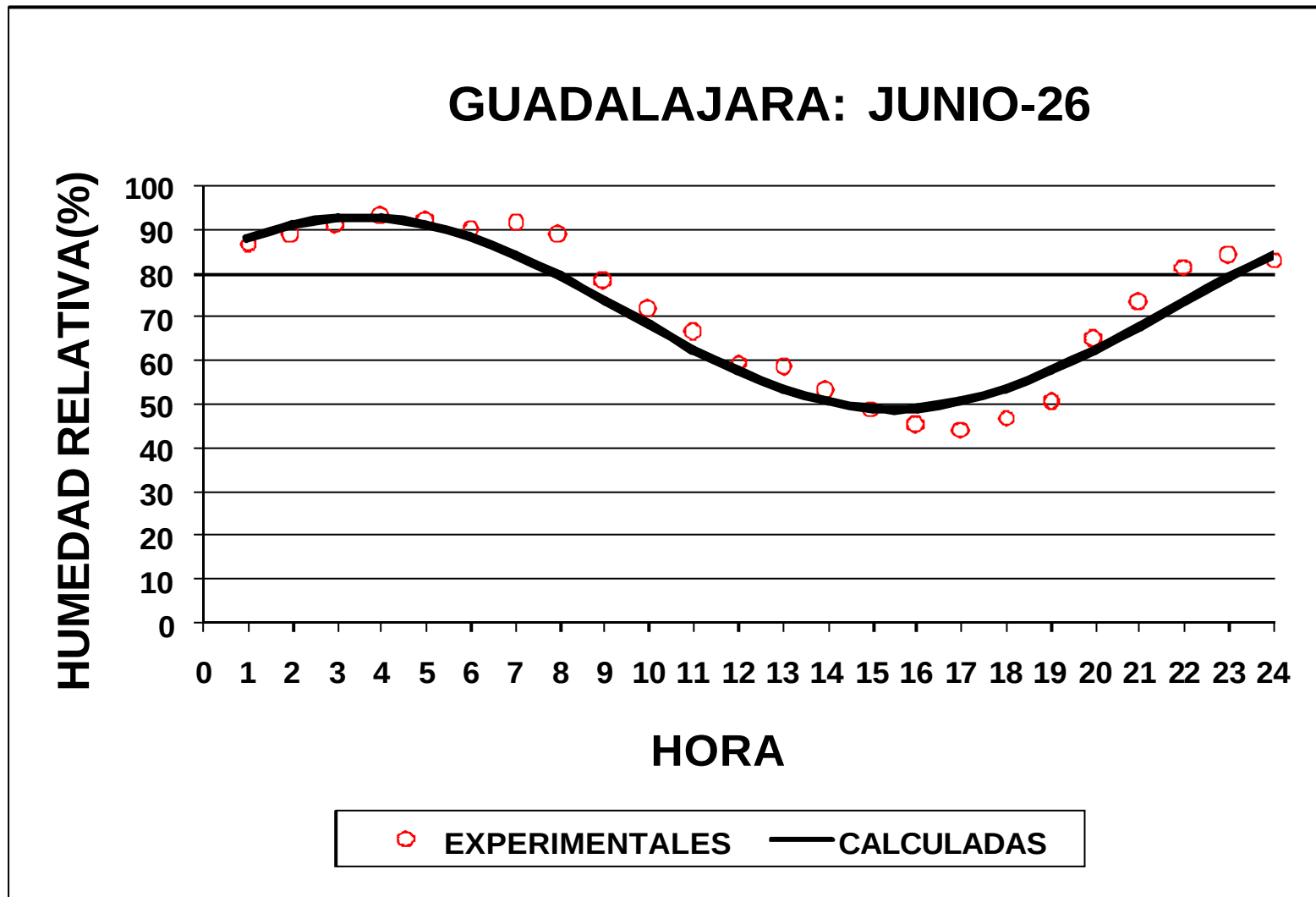


Figura A.12: Función periódica de Fourier para Humedad horaria de Guadalajara.

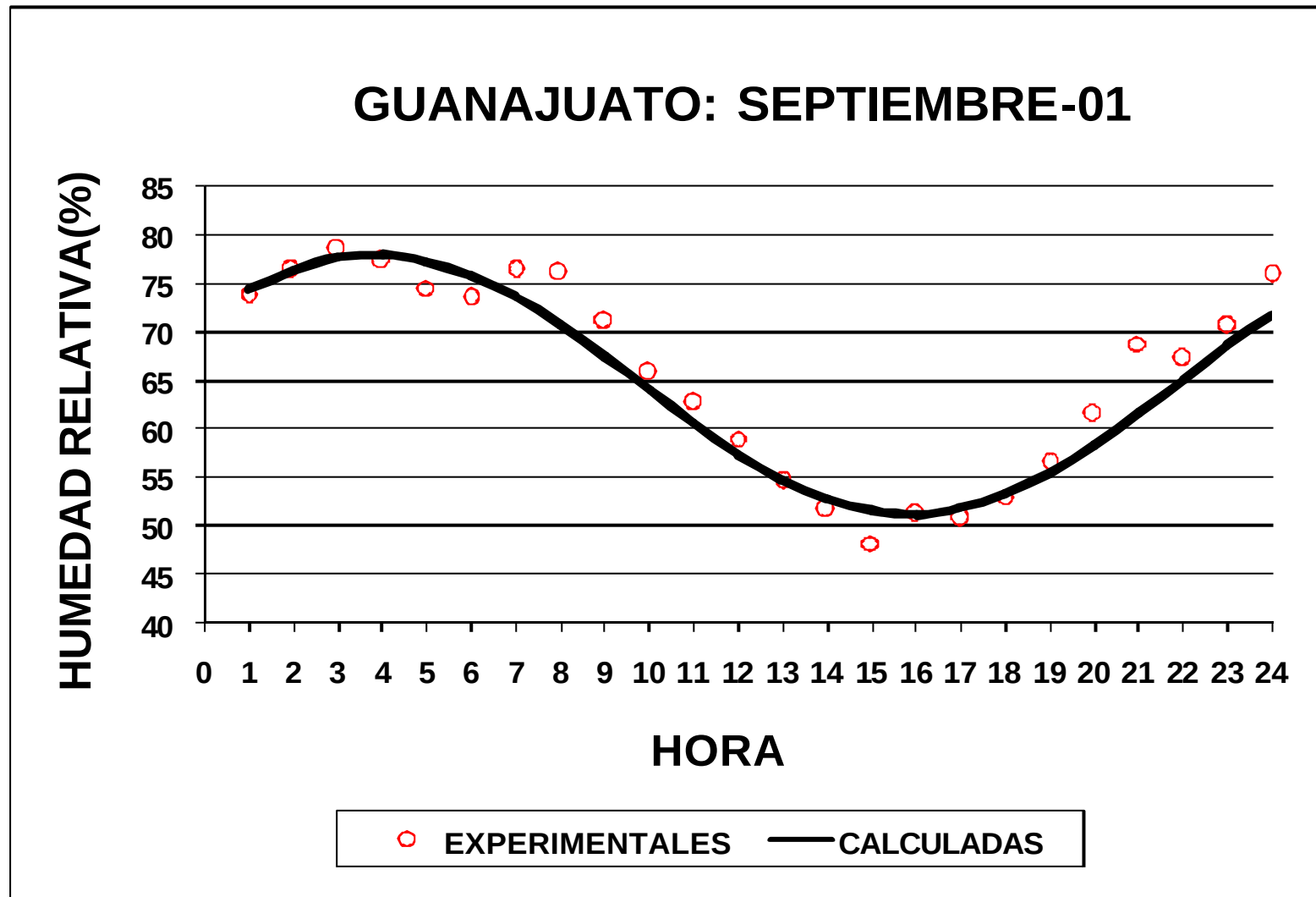


Figura A.13: Función periódica de Fourier para Humedad horaria de Guanajuato.

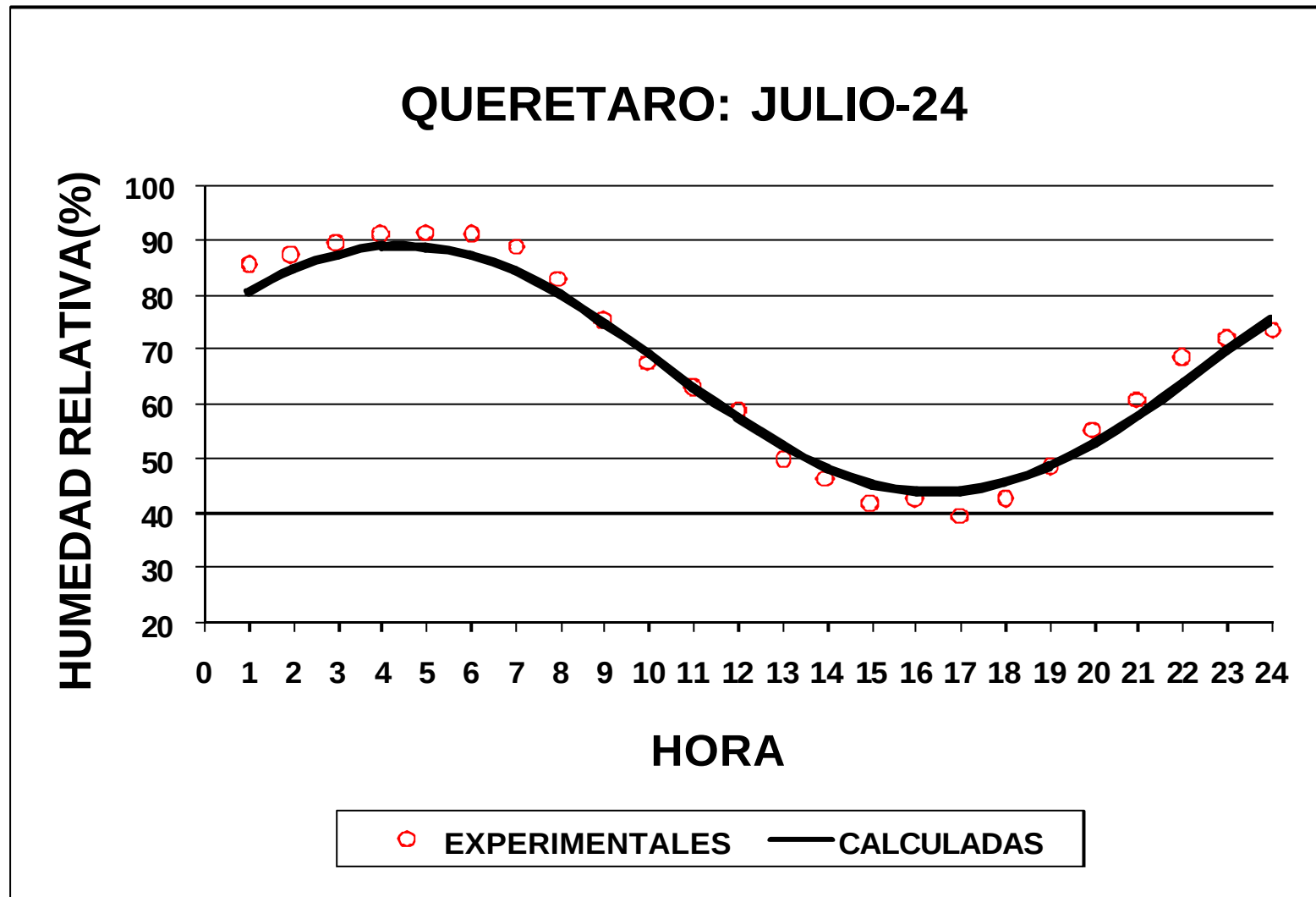


Figura A.13: Función periódica de Fourier para Humedad horaria de Querétaro.

Architectural rendering



<http://house-renderings.archiform3d.com/3d-gallery/06-elysium-185/3d-renderings/01-elysium-185-house-rendering.jpg>

El caso práctico consiste en una casa habitación de dos pisos de muro de concreto y techo de vigueta y bovedilla la cual tiene las siguientes especificaciones:

PLANTA BAJA

Temperatura de planta = $78^{\circ}F$

Tarifa aplicada: 1F.

MURO	Área Total (ft ²)
NORTE	92.84176448
SUR	93.45714496
ESTE	166.79715776
OESTE	200.10624000

MATERIAL DE MUROS		
	Código	Resistencia térmica °F ft ² h/btu
Resistencia externa	A0	0.330
Emplaste 3/8 Mortero Stucco	E1	0.080
4 in heavyweight concrete	C5	0.333
Acabado interior	A6	0.170
Resistencia interna	E0	0.690
Resistencia total		1.603

COEFICIENTES DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA CONDUCCIÓN		
Muro: Tipo 3	Resistencia térmica: 1.603	
<i>n</i>	<i>bn</i>	<i>dn</i>
0	4.106600E-03	1.000000E+00
1	3.230460E-02	-7.696300E-01
2	1.474380E-02	4.014260E-02
3	4.655040E-04	-4.197010E-04
4	2.893710E-07	2.728380E-10
5	6.227410E-14	-1.299670E-22
6	-4.362310E-16	2.066470E-37
<i>cn</i>	5.162080E-02	
<i>Ua</i>	<i>Uw</i>	
0.623830318	1.911220E-01	

GANANCIA DE CALOR EN VENTANAS POR CONDUCCIÓN				
ORIENTACION	NORTE	SUR	ESTE	OESTE
VENTANA TIPO	METAL	METAL	METAL	
COEFICIENTE	1.11	1.11	1.11	
ÁREA	22.70345152	5.08979904	15.23497024	

GANANCIA DE CALOR EN PUERTAS POR CONDUCCIÓN				
ORIENTACION	NORTE	SUR	ESTE	OESTE
PUERTA TIPO		METAL	METAL	
COEFICIENTE		0.4	0.4	
ÁREA		16.998272	18.074112	

GANANCIA DE CALOR DEBIDA A EQUIPOS					
EQUIPO	CANTIDAD	CALOR SENSIBLE <i>Btu</i> <i>h</i>	CALOR LATENTE <i>Btu</i> <i>h</i>	FACTOR DE USO	HORAS DE USO
VENTILADOR	2	242	0	1	1 AM - 7 AM y 22 PM - 24 PM
REFRIGERADOR	1	401	0	1	1 AM - 24 PM
TELEVISIÓN	1	386	0	1	19 PM - 21 PM
RADIO	1	130	0	1	7 AM - 8 AM
PLANCHA	1	244	0	0.29	7 AM
LAVADORA	1	98	0	0.29	
MICRO-ONDAS	1	154	0	0.5	7 AM
CAFETERA	1	478	239	0.5	7 AM, 12 PM y 19 PM
ESTUFA	0	0	0	0	

GANANCIA DE CALOR DEBIDA A PERSONAS				
EQUIPO	CANTIDAD	CALOR SENSIBLE $\frac{Btu}{h}$	CALOR LATENTE $\frac{Btu}{h}$	HORAS DE OCUPACIÓN
PERSONAS	3	250	200	4 AM - 8 AM y 17 PM - 21 PM

GANANCIA DEBIDA A ILUMINACIÓN		
LAMPARA	CANTIDAD	CAPACIDAD (watt)
INCANDESCENTE		
FLUORESCENTE	5	24

CÁLCULO DE LA CARGA DE ENFRIAMIENTO FACTORES DE PISO				
	Conducción	Solar	Iluminación	Personas
V_0	0.721155861	0.513550189	0.754926351	0.713756314
V_1	-0.849735507	-0.548530202	-0.846646811	-0.770574002
V_2	0.191739648	0.10957004	0.178890466	0.131247707
W_1	-1.282909989	-1.223739982	-1.215939999	-1.178449988
W_2	0.346069992	0.298330009	0.303110003	0.252880007

CÁLCULO DE LA RETIRO DE CALOR		
Rapidez máxima de extracción de calor	18000	$\frac{Btu}{h}$
Rapidez mínima de extracción de calor	0	$\frac{Btu}{h}$
Variación del set point	5	$^{\circ}F$
Rapidez de flujo de aire de ventilación	0	cfm
Rapidez de flujo de aire de infiltración	15	cfm

CONSTRUCCIÓN DE LA ENVOLVENTE	g_0 $\frac{Btu}{hft^2 F}$	g_1 $\frac{Btu}{hft^2 F}$	g_2 $\frac{Btu}{hft^2 F}$	p_0 Adimensional	p_1 Adimensional
Mediana	1.61	-1.81	0.08	1	-0.87

PLANTA ALTA

Temperatura de planta = 78 °F

Tarifa aplicada: 1F.

MURO	Área Total (ft ²)
NORTE	97.83473792
SUR	111.80021696
ESTE	184.87126976
OESTE	200.10624000
TECHO	361.28052000

MATERIAL DE MUROS		
	Código	Resistencia térmica °F ft ² h/btu
Resistencia externa	A0	0.330
Emplaste 3/8 Mortero Stucco	E1	0.080
4 in heavyweight concrete	C5	0.333
Acabado interior	A6	0.170
Resistencia interna	E0	0.690
Resistencia total		1.603

COEFICIENTES DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA CONDUCCIÓN		
Muro: Tipo 3	Resistencia térmica: 1.603	
<i>n</i>	<i>bn</i>	<i>dn</i>
0	4.106600E-03	1.000000E+00
1	3.230460E-02	-7.696300E-01
2	1.474380E-02	4.014260E-02
3	4.655040E-04	-4.197010E-04
4	2.893710E-07	2.728380E-10
5	6.227410E-14	-1.299670E-22
6	-4.362310E-16	2.066470E-37
<i>cn</i>	5.162080E-02	
<i>Ua</i>	<i>Uw</i>	
0.623830318	1.911220E-01	

COEFICIENTES DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA CONDUCCIÓN		
Techo: Tipo 3	Resistencia térmica: 5.0492	
<i>n</i>	<i>bn</i>	<i>dn</i>
0	6.134400E-03	1.000000E+00
1	3.982870E-02	-7.561450E-01
2	1.375390E-02	1.438670E-02
3	2.485070E-04	-6.000280E-05
4	9.088660E-08	7.145660E-11
5	2.525690E-14	-7.372240E-22
6	-3.949790E-16	0.000000E+00
<i>cn</i>	5.996560E-02	
<i>Ua</i>	<i>Uw</i>	
0.198049007	2.322610E-01	

GANANCIA DE CALOR EN VENTANAS POR CONDUCCIÓN				
ORIENTACION	NORTE	SUR	ESTE	OESTE
VENTANA TIPO	METAL	METAL	METAL	
COEFICIENTE	1.11	1.11	1.11	
ÁREA	17.71047808	3.74499904	15.23497024	

GANANCIA DE CALOR DEBIDA A EQUIPOS					
EQUIPO	CANTIDAD	CALOR SENSIBLE $\frac{Btu}{h}$	CALOR LATENTE $\frac{Btu}{h}$	FACTOR DE USO	HORAS DE USO
VENTILADOR	2	242	0	1	1 AM - 7 AM y 22 PM - 24 PM
REFRIGERADOR		401	0	1	
TELEVISIÓN	2	386	0	1	19 PM - 21 PM
RADIO	2	130	0	1	7 AM - 8 AM
PLANCHA		244	0	0.29	
LAVADORA		98	0	0.29	
MICRO-ONDAS		154	0	0.5	
CAFETERA		478	239	0.5	
ESTUFA					

GANANCIA DE CALOR DEBIDA A PERSONAS				
EQUIPO	CANTIDAD	CALOR SENSIBLE $\frac{Btu}{h}$	CALOR LATENTE $\frac{Btu}{h}$	HORAS DE OCUPACIÓN
PERSONAS	3	250	200	1 AM - 8 AM y 17 PM - 24 PM

GANANCIA DEBIDA A ILUMINACIÓN		
LAMPARA	CANTIDAD	CAPACIDAD (watt)
INCANDESCENTE		
FLUORESCENTE	4	24

CÁLCULO DE LA CARGA DE ENFRIAMIENTO				
FACTORES DE PISO				
	Conducción	Solar	Iluminación	Personas
V_0	0.786509752	0.647139663	0.774118872	0.722956886
V_1	-0.642395311	-0.664889618	-0.83530405	-0.774450949
V_2	0.115725556	0.150419911	0.188195136	0.17888409
W_1	-0.934780002	-1.206500053	-1.164790034	-1.187559962
W_2	0.194619998	0.339170009	0.291799992	0.314949989

CÁLCULO DE LA RETIRO DE CALOR		
Rapidez máxima de extracción de calor	24000	$\frac{Btu}{h}$
Rapidez mínima de extracción de calor	0	$\frac{Btu}{h}$
Variación del set point	5	$^{\circ}F$
Rapidez de flujo de aire de ventilación	0	cfm
Rapidez de flujo de aire de infiltración	15	cfm

CONSTRUCCIÓN DE LA ENVOLVENTE	g_0^* $\frac{Btu}{hft^2F}$	g_1^* $\frac{Btu}{hft^2F}$	g_2^* $\frac{Btu}{hft^2F}$	p_0 Adimensional	p_1 Adimensional
Mediana	1.61	-1.81	0.08	1	-0.87



[http://www2.fincas.com/Obra_Nueva/Categoria_2/Mora/resource/casa
_desing_1024.jpg](http://www2.fincas.com/Obra_Nueva/Categoria_2/Mora/resource/casa_desing_1024.jpg)

- [1] IDEA, *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la energía*, España 2009.
<http://www.idae.es>
- [2] *Departamento de Energía de Estados Unidos*.
<http://www.energy.gov>
- [3] Plan de Acción 2008 – 2012: *Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España*.
- [4] Guía CONAFOVI *Uso eficiente de la energía en la vivienda*, 2006.
- [5] Software de Certificación de Comportamiento Térmico para Edificios en Chile, CCTE V2.0, *Fundamentos Técnicos, Manual de Usuario*, 2008.
- [6] *Código Técnico de la Edificación España*.
<http://www.codigotecnico.org/index.php?id=516>
- [7] *Comisión Federal de Electricidad*.
<http://www.cfe.gob.mx/es/>
- [8] Simulación Térmica Dinámica: *Designbuilder Software*.
<http://sol-arg.com/index.php/designbuilder>
http://www.designbuilder.co.uk/index.php?option=com_content&task=view&id=7&Itemid=13
- [9] CNA, *Comisión Nacional del Agua, Servicio Meteorológico Nacional*.
<http://smn.cna.gob.mx>
- [10] *Comisión Federal de Electricidad*.
<http://www.cfe.gob.mx/es/>
- [11] Michael Halvorson, *Microsoft Visual Basic 2008 Step by Step*, 2008.
- [12] ANTESOL “*Comportamiento Térmico de Cerramientos Soleados*”, España 2006.
- [13] Guillermo Som, Unai Zorrilla, Jorge Serrano, *Curso de Visual Basic 2005*.
- [14] Pérez T. C., Campbell R. H. E., *Identificación y definición del impacto social y económico de la problemática del servicio eléctrico y*

sus alternativas de solución. Reporte Técnico. Consejo de Desarrollo Económico de Mexicali, 2003.

[15] Luis Miguel Blanco, *Programación en Visual Basic .NET*, Grupo Eidos, España, 2002.

[16] Maureen Trebilcock, Roberto Burdiles, Adelqui Fissore, *La modelación y simulación energéticoambiental como herramienta de rediseño arquitectónico*, Chile 2001.

[17] ASHRAE, *2001 ASHRAE Handbooks Fundamental (SI)*, Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2001.

[18] Pinazo Ojer José Manuel, *Manual de climatización*, Tomo I, Ed. Servicios de publicaciones, México., 1999.

[19] Pinazo Ojer José Manuel, *Manual de climatización*, Tomo II, Ed. Servicios de publicaciones, México., 1999.

[20] Pérez T. C., Campbell R. H. Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, Departamento de Sistemas Energéticos.

[21] Pérez T. C., Campbell R. H., *Notas para el curso de materiales aislantes y reflectivos*, UABC, 1999.

[22] Pérez Tello Carlos, Núñez Cerezo Manuel, Campbell Ramírez Héctor E., Morales Pérez Flora E., Galindo Duarte Moisés., *Acondicionamiento Ambiental en el sector Doméstico de Mexicali*, B. C., *La cadena del frío*, PUE UNAM., 1997.

[23] Campbell R. H. E., Pérez T. C., Velázquez L. N., García M. J., *Modelamiento de temperatura ambiental en Mexicali*, B. C. *Para su utilización en diagnósticos energéticos.*, 1995.

[24] McQuiston F. C., Spitler J. D., *Cooling and heating load calculation manual*, Ed. ASHRAE, Estados Unidos, 1992.