

Tema A4 Termofluidos: Energía en Edificaciones

“Validación del método CLTD para evaluar cargas térmicas de enfriamiento en México”

*M. Gijón-Rivera^{*a}, C.I. Rivera-Solorio^b, E.C. Vallejo-Coral^c*

^aEscuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey, Vía Atlixcáyotl 2301, Reserva Territorial Atlixcáyotl, Puebla, Puebla, C.P. 72453, México.

^bEscuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey, Eugenio Garza Sada 2501 Sur, Monterrey, Nuevo León, C.P. 64849, México.

^cInstituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER), Iñaquito N35-37 y Juan Pablo Sanz, Quito, Ecuador.

*M. Gijón-Rivera: miguel.gijon@itesm.mx

RESUMEN

Se presenta el desarrollo teórico y la validación del método de los factores CLTD para un edificio ubicado en la Ciudad de Monterrey, Nuevo León. El estudio se desarrolla para condiciones de clima cálido-seco, las cuales son representativas de una alta demanda de energía para enfriamiento en edificaciones. La metodología de solución se basa en la técnica de la diferencia de temperatura para cargas de enfriamiento (CLTD) para evaluar el calor absorbido a través de elementos opacos expuestos al sol (muros y techos). El método considera la naturaleza transitoria del fenómeno de transferencia de calor y la inercia térmica de los elementos constructivos. La solución teórica se basa en la técnica de la transformada compleja de Fourier (CFFT). Los resultados obtenidos permiten conocer el impacto del uso de parámetros locales para la estimación de cargas térmicas sobre la capacidad requerida en los sistemas de climatización en México.

Palabras Clave: Cargas térmicas de enfriamiento, Edificaciones, Energía, Método CLTD.

ABSTRACT

A theoretical development and the validation of the CLTD method for a building located in Monterrey City is presented. The study is conducted for warm-dry climate conditions, which are representative of a high cooling energy demand in buildings. The methodology of the solution was based on the cooling load temperature difference (CLTD) technique to assess the heat absorbed through opaque elements exposed to the sunlight (walls and roofs). The method considers transient conduction heat transfer phenomenon and thermal inertia of building elements. The theoretical solution is based on the complex finite Fourier transform (CFFT) approach. The obtained results permits to know the impact of using local parameters to estimate cooling thermal loads and global capacity required for air conditioning systems in Mexico.

Keywords: CLTD method, Energy, Buildings, Cooling thermal loads.

1. Introducción

La cantidad de energía requerida por edificaciones residenciales y comerciales ha incrementado a un ritmo mayor en la última década y representa un rubro importante en el consumo de energía eléctrica a nivel mundial. Debido a esto, en los últimos años se han realizado múltiples esfuerzos para disminuir su consumo aplicando nuevas tecnologías acopladas a las edificaciones y así compensar el crecimiento del sector de los edificios [1]. Diversas soluciones en etapas de diseño de las edificaciones y restauraciones de edificios existentes incluyen el uso de sistemas de acondicionamiento de espacios más eficientes, mejoras en los sistemas de iluminación, producción de energía eléctrica para climatización y/o calentamiento de

agua, uso de tecnologías pasivas en los elementos de la envolvente, la integración de sistemas activos para la optimización térmica de espacios interiores, entre otras.

Globalmente, el 40% de la energía total consumida por una edificación corresponde a los sistemas de calentamiento, ventilación y aire acondicionado – HVAC- [2]. En México, la cantidad de energía eléctrica requerida por el sector de las edificaciones incrementó en aproximadamente un 50% en el año 2013 respecto a la demanda de energía requerida en 1990. Este consumo tiene un comportamiento estacional (54% del consumo total de energía eléctrica en el 2015 se presentó en los meses de verano), lo que significa que la demanda de energía está directamente relacionada con la temperatura ambiental [3]. Este comportamiento se debe a que en climas cálidos se tiene el mayor porcentaje de viviendas que cuentan con

equipos de aire acondicionado en el país: 75% de las viviendas cuentan con sistemas aire acondicionado en clima cálido-seco extremo, 32% en clima cálido-seco y 20% en clima cálido semi-húmedo. Además, aproximadamente el 50% del territorio nacional presenta condiciones de clima cálido. Como resultado de esta alta demanda de energía para enfriamiento, el sector residencial utilizó el 25% de la energía eléctrica total consumida por los sistemas de aire acondicionado en el año 2005 [4]. Por esta razón, es importante el desarrollo de herramientas que permitan diseñar sistemas de aire acondicionado eficientes en etapas tempranas que incluyan el cálculo de cargas térmicas y el adecuado dimensionamiento de sistemas de aire acondicionado basado en condiciones críticas de funcionamiento (cargas pico) y/o cargas anuales [3].

En años recientes, diversos estudios sobre métodos analíticos y numéricos para obtener cargas térmicas de enfriamiento en edificaciones han sido reportados en la literatura. En particular, el enfoque en el método de los factores CLTD y sus algoritmos de cálculo han sido reportados para condiciones particulares y materiales de construcción específicos de algunas regiones. Uno de los primeros estudios es el de Yumrutas et al. [5]; los autores desarrollaron una metodología analítica para resolver el modelo matemático que representa el fenómeno transitorio de transferencia de calor por conducción a través de paredes y techos planos conformados por varias capas. La metodología desarrollada utiliza la técnica de la transformada compleja finita de Fourier (CFFT). Los resultados muestran como la técnica CFFT permite resolver el problema de interés de forma rápida sin un alto costo computacional. Más adelante, Kaska et al. [6], desarrollaron un estudio mediante el cual compararon los resultados obtenidos teórica y experimentalmente acerca de la variación en estado transitorio de la temperatura de techos planos y paredes multicapas en la ciudad de Gaziantep, Turquía. El modelo teórico calcula la temperatura en cada capa de una pared o techo plano mediante al análisis del fenómeno de transferencia de calor en estado transitorio aplicando la técnica CFFT. Los resultados teóricos muestran una buena concordancia con los resultados experimentales. Yumrutas et al. [7], utilizaron la técnica CFFT para desarrollar una metodología que permite determinar los valores de TETD para paredes y techos multicapas. En la investigación se analizaron 3 tipos de configuraciones de techo y tres tipos de configuraciones de paredes para determinar los efectos de los parámetros termo-físicos de los materiales sobre los valores de TETD. Bansal et al. [8], desarrollaron una metodología para el cálculo de los factores CLTD de paredes y techos utilizando la ecuación fundamental de balance de energía y resolviendo la ecuación de calor por conducción en estado transitorio mediante la aplicación del método convencional de diferencias finitas para paredes y techos típicos en edificaciones construidas en Kolkata – India. Como parámetro de verificación se calcularon los CLTD para condiciones estándares establecidas por ASHRAE [9] y se observó que los valores

calculados son cercanos a los valores presentados por ASHRAE. Adil et al. [10], determinaron los valores de CLTD para el cálculo de cargas de enfriamiento de espacios acondicionados en condiciones climáticas locales y con paredes y techos construidos de acuerdo a los materiales y configuraciones típicas de cada región. Los valores obtenidos de los factores CLTD se compararon con los reportados por el ASHRAE, sin diferencias significativa para las configuraciones de techos y paredes seleccionadas. Rodríguez et al. [11], realizaron un estudio para evaluar las técnicas utilizadas por Sociedad de Arquitectos Navales e Ingenieros Marinos (SNAME) en el dimensionamiento de sistemas de aire acondicionado en buques en Colombia. En el estudio utilizan el método CLTD/CLF para calcular la carga de enfriamiento requerida para alcanzar las condiciones de confort en un buque determinado. Para el análisis utilizaron factores de CLTD corregidos debido a que, las condiciones climáticas y geográficas de la ubicación, donde opera el buque, son diferentes a las condiciones estándar de los valores de CLTD reportados por ASHRAE. Con base en los resultados obtenidos se estableció que la metodología utilizada por SNAME sobredimensiona el sistema de aire acondicionado del buque en un 15.65%. Suziyana et al. [12], realizaron el análisis de la carga térmica de enfriamiento de un laboratorio de computación y un espacio dividido en tres zonas para reuniones estudiantiles y seminarios. Utilizaron el método CLTD/SCL/CLF desarrollado por ASHRAE [9]. Debido a que las condiciones climáticas son diferentes a las condiciones estándar definidos por ASHRAE utilizaron factores de corrección para determinar los valores aplicables de los factores CLTD. Los resultados muestran que el sistema de climatización instalado en las zonas estudiadas estaba sobredimensionado en un 23.7% para laboratorio de computación y en un 25.8% para los espacios adicionales. Esto genera un sobre-enfriamiento del espacio acondicionado y un uso no eficiente de la energía eléctrica.

De la revisión de la literatura se concluye que no existen valores calculados de CLTD para las ciudades de México que consideren las condiciones climatológicas locales y configuraciones de techos y paredes típicas de la región. La aplicación del método de factores CLTD se restringe al uso de los factores de corrección propuestos por ASHRAE. Además, se observan las ventajas del método CLTD en costo computacional, exactitud y repetitividad.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio es determinar y validar los factores CLTD específicos para una configuración de pared y techo en la Ciudad de Monterrey (clima cálido-seco) mediante la aplicación de metodologías de cálculo basadas en la técnica de la transformada finita compleja de Fourier.

2. Modelo Físico y Matemático

En la Fig. 1 se muestra el modelo físico del elemento opaco

multicapa: muro o techo plano en una representación bidimensional. La transferencia de calor a través de paredes y techo se considera en una sola dimensión; en la dirección vertical para techos y en dirección horizontal para paredes. Se considera la transferencia de calor unidimensional en la dirección del espesor de cada elemento bajo la premisa de que sus dimensiones en las direcciones restantes son considerablemente más grandes en comparación con el espesor [8].

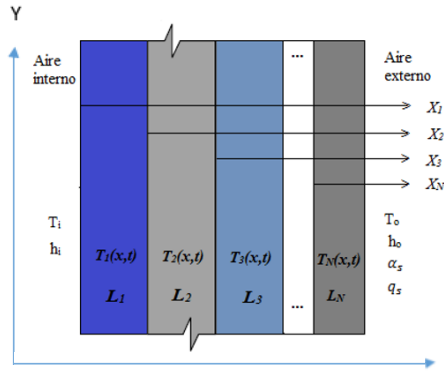


Figura 1 – Modelo Físico de una pared o un techo plano.

La tabla 1 muestra las propiedades termo-físicas de los materiales de construcción considerados en este estudio.

Tabla 1 – Propiedades termo-físicas de los materiales de construcción.

Bloque de Concreto Macizo	Concreto	Revestido
$\kappa = 0.81$	$\kappa = 1.73$	$\kappa = 0.7$
[W/m °C]	[W/m °C]	[W/m °C]
$Cp = 837$	$Cp = 840$	$Cp = 840$
[J/Kg K]	[J/Kg K]	[J/Kg K]
$\rho = 977$	$\rho = 2242$	$\rho = 2778$
[Kg/m ³]	[Kg/m ³]	[Kg/m ³]
-	$\alpha=0.8^*$	$\alpha=0.2$
	$\alpha=0.5$	

*Nota: La superficie exterior del techo monitoreado está pintada de color oscuro.

2.1. Modelo Matemático

La ecuación que gobierna la transferencia de calor en estado transitorio a través de un medio opaco con una o varias capas de diferentes materiales en coordenadas cartesianas se muestra a continuación:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

- El modelo matemático del fenómeno de transferencia de calor se basa en las siguientes consideraciones:
- No hay generación de calor interna en ninguna de las capas del elemento.
- Homogeneidad de cada capa, es decir que, sus propiedades se mantienen constantes en toda su extensión.
- Existe buen contacto entre capas, razón por la cual se considera despreciable la resistencia térmica entre estas.
- Las superficies de los alrededores se encuentran a la misma temperatura del aire exterior.
- La superficie interior del elemento presenta la misma temperatura que el aire interior.
- La temperatura interior se mantiene constante.
- Los coeficientes combinados de transferencia de calor, tanto internos como externos se mantienen constantes.

Con la aplicación de estas consideraciones, la ecuación gobernante, las condiciones iniciales y de frontera se presentan a continuación:

$$\frac{\partial^2 T_n}{\partial x_n^2} = \frac{1}{\alpha_n} \frac{\partial T_n}{\partial t} \quad (2)$$

$$T|_{x,t=0} = T_i|_{x,t=0} \quad (3)$$

$$h_i(T_i - T_1) = -k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x_1} \Big|_{x_1=0} \quad (4)$$

$$-k_{n-1} \frac{\partial T_{n-1}}{\partial x_{n-1}} \Big|_{x_{n-1}=L_{n-1}} = -k_n \frac{\partial T_n}{\partial x_n} \Big|_{x_n=0} \quad (2 \leq n \leq N) \quad (5)$$

$$T_{n-1}|_{x_{n-1}=L_{n-1}} = T_n|_{x_n=0} \quad (2 \leq n \leq N) \quad (6)$$

$$-k_N \frac{\partial T_N}{\partial x_N} \Big|_{x_N=L_N} = h_o[T_N - T_o(t)] - \alpha_s q_s(t) \quad (7)$$

2.2. Parámetros Térmicos

Los techos y paredes son superficies expuestas al aire de los alrededores, por lo cual existe una diferencia de temperatura y un intercambio de energía por convección y radiación [16]. Al asumir que la temperatura de los alrededores (T_{air}) es igual a la temperatura del aire (T_o), es posible definir el coeficiente combinado de transferencia de calor de acuerdo a la relación siguiente:

$$h_{comb} = h_{conv} + h_{rad} \quad (8)$$

El número de Nusselt es un número adimensional a partir del cual se determina el coeficiente de transferencia de calor convectivo, ec. (9), donde L_c es la longitud característica de la superficie analizada y k_f la conductividad térmica del fluido:

$$Nu = \frac{h_{conv} * L_c}{k_f} \quad (9)$$

Por otro lado, el coeficiente de transferencia de calor por radiación se define como sigue:

$$h_{rad} = \sigma * \epsilon * (T_s^2 + T_{surr}^2) * (T_s + T_{surr}) \quad (10)$$

Para determinar la transferencia de calor transmitida a través de cada elemento (una o varias capas) de la envolvente se define el coeficiente global de transferencia de calor U:

$$U = \left(\frac{1}{h_i} + \sum_{n=1}^N \frac{L_n}{k_n} + \frac{1}{h_o} \right)^{-1} \quad (11)$$

Los valores de CLTD consideran el tiempo que el calor ganado por radiación toma para convertirse en carga de enfriamiento a causa de la capacidad de almacenamiento térmico del elemento y el tiempo de retraso en la transferencia de calor por conducción ganada a través de los elementos opacos de la envolvente [9].

$$Q = U * A * CLTD_t \quad (12)$$

Se define el calor ganado por convección o carga de enfriamiento sin retraso [13]:

$$Q = h_i A (T_s(t) - T_i) \quad (13)$$

Y se combina con la ec. (12) previamente definida para obtener el factor CLTD como una función de la temperatura de la superficie interna del elemento analizado:

$$CLTD = \frac{h_i}{U} (T_s(t) - T_i) \quad (14)$$

3. Solución Teórica

El modelo matemático presentado en la sección anterior es resuelto mediante la aplicación de la técnica de la transformada compleja finita de Fourier, siguiendo la metodología reportada por Yumrutas et al. [5]. El algoritmo de solución para determinar la temperatura de la superficie interior del elemento bajo análisis se puede observar gráficamente en la Fig. 2 y detallar a continuación:

1. Considerando un comportamiento periódico de 24 horas, se define la condición de periodicidad en función del número de capas y del periodo de tiempo.
2. Se adimensionaliza el modelo matemático primitivo.
3. Se procede a la solución del modelo matemático adimensional con el uso de la técnica de la transformada compleja finita de Fourier por etapas.
4. Primero, se obtienen las temperaturas horarias exteriores en función de la temperatura ambiente.

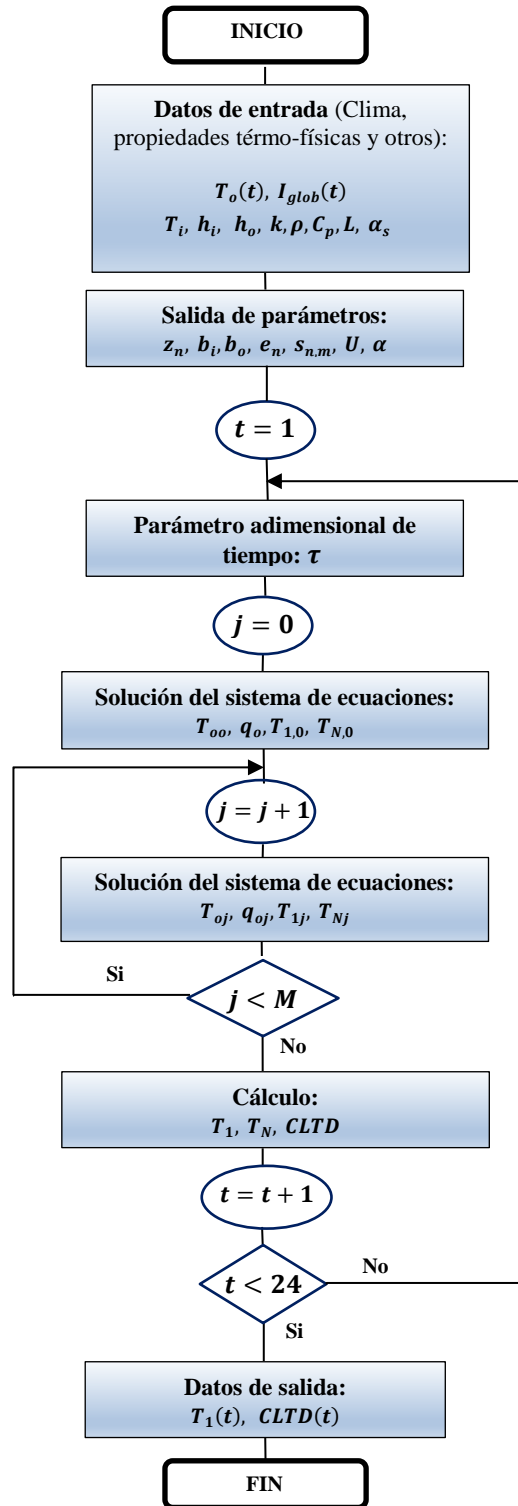


Figura 2 – Diagrama de flujo del método de solución teórica.

5. Posteriormente, se determinan los coeficientes complejos de Fourier que son función de la radiación solar incidente en un periodo p de 24 horas.

6. Finalmente, se determinan los coeficientes complejos de Fourier en cada capa del elemento de la envolvente en función del número de j términos de la serie hasta el número máximo de términos M y el número n de capas del muro o techo opacos.

4. Desarrollo Experimental

Se realizan mediciones experimentales para obtener las temperaturas de la superficie externa e interna en una pared y un techo plano localizado en la Ciudad de Monterrey: clima cálido-seco. Las mediciones de temperatura permiten determinar los valores de los factores CLTD de forma directa.

4.1. Caso de Estudio

El desarrollo experimental se implementa en un cuarto de monitoreo ubicado en la Ciudad de Monterrey, con un área interna de 7.2 m² construido con paredes de bloque de concreto macizo de 10 cm de espesor y un techo plano de 15.2 cm de espesor y 1 cm de revestido (enlucido) acabado en color blanco al exterior (Fig. 3).



Figura 3 – Cuarto de monitoreo – Casa Solar ITESM, Monterrey.

La habitación cuenta con un sistema de aire acondicionado de ventana que mantiene el aire interior a una temperatura promedio de 23°C, condición que se ajusta a los requerimientos de la solución teórica.

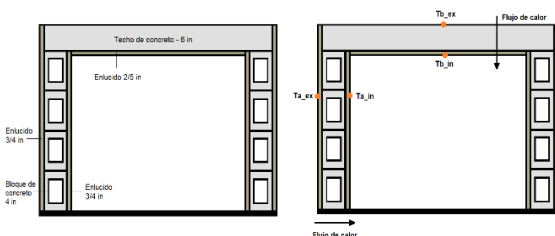


Figura 4 - Esquema del cuarto de monitoreo y los puntos de medición de temperatura en las superficies.

La Fig. 4 muestra en vista de corte los materiales de construcción de los muros y el techo, sus dimensiones y la

posición interior y exterior de los termopares para el monitoreo de la temperatura de las superficies.

4.2. Instrumentación y adquisición de información.

La instrumentación del espacio seleccionado se realizó con base en los lineamientos establecidos por la norma ASTM-C1046-2013 en la cual, se describen las técnicas para la medición in situ del comportamiento térmico en estado estable y transitorio de componentes opacos de la envolvente de una edificación. En general, la medición de la temperatura de las superficies se basa en las siguientes premisas:

- El uso de termopares de junta expuesta tipo K: estos termopares son óptimos para el rango de temperaturas esperadas para las superficies y para el aire interior.
- La medición de la temperatura del aire interior se realiza con sensores pequeños para disminuir el error producido por la temperatura radiante [9].
- Se cuentan con dos puntos de medición ubicados de forma paralela y en la dirección del flujo de calor e inmersos en las superficies (3 mm) para reducir las pérdidas convectivas y la interacción con fuentes radiativas externas.
- Se utiliza pasta conductiva de relleno de los orificios donde se localizan los puntos de contacto.
- La medición de la temperatura del aire interior se realiza en dos puntos y con una protección cilíndrica que permita reducir los errores en la medición.

La adquisición de la información se realiza de forma continua en periodos de 24 horas [14], con un sistema informático que se conforma de los siguientes elementos: (1) tarjeta de adquisición de datos OMEGA, modelo OMB-DAQ-55 con comunicación vía USB, (2) módulo de expansión modelo OMB-PDQ1, (3) PC para el almacenamiento de la información monitoreada. El monitoreo de información se realiza en periodos de tiempo de 3 min [14]. Para cumplir con la normativa y asegurar condiciones de estabilidad térmica, el monitoreo se realiza del 12 al 27 de agosto del 2016, a partir del día 10 se observan tres días térmicamente estables óptimos objetivo de este estudio. Finalmente, el sistema de adquisición de datos presenta una incertidumbre de $\pm 1^\circ\text{C}$ de acuerdo al catálogo del equipo utilizado.

4.3. Mediciones de temperatura en las superficies.

Del periodo de tres días con condiciones meteorológicas ideales para este estudio: cielo despejado y ausencia de precipitaciones; se selecciona el día 24 de agosto del 2016 para el proceder con el análisis de la información. Las Figs. 5 y 6 muestran las mediciones de las superficies internas y externas de la pared y el techo. De los resultados obtenidos

se puede observar como el techo tiene mayor inercia térmica que la pared, con un retraso promedio de 4 horas, por 1 hora que presenta la pared. Por otro lado, la superficie exterior del techo alcanza mayores temperaturas que la superficie exterior de la pared: una diferencia de aproximadamente 20°C. Del mismo modo, los resultados obtenidos muestran un comportamiento cualitativamente periódico que cumple con los requerimientos del método teórico y validan la selección del día de diseño bajo estudio.

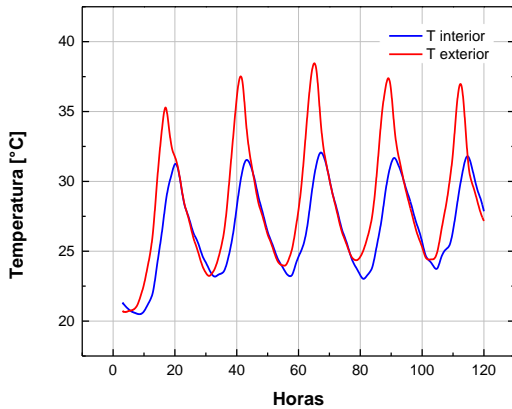


Figura 5 - Temperatura de la superficie interior y exterior: pared.

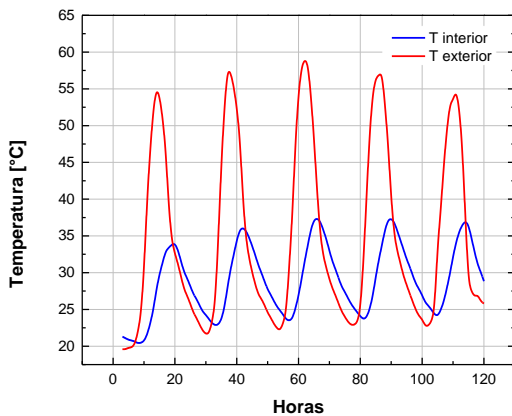


Figura 6 - Temperatura de la superficie interior y exterior: techo.

5. Resultados

En esta sección se muestra los resultados obtenidos en el presente estudio a partir de tres diferentes apartados. En primer lugar, se reporta la información de entrada requerida por el modelo, posteriormente la comparación entre los resultados del modelo teórico y los valores medidos de la temperatura de las superficies de la envolvente, y finalmente los resultados obtenidos con el modelo implementado de los factores CLTD para condiciones de clima cálido-seco en México.

5.1. Datos de entrada

El modelo requiere información de entrada como la ubicación geográfica del edificio, las condiciones climatológicas (temperatura ambiente, radiación solar y velocidad del viento), propiedades termo-físicas de los materiales y los coeficientes de transferencia de calor. La ubicación y parámetros geográficos necesarios para el cálculo de la posición solar horaria y la radiación incidente sobre todas las superficies de la envolvente se reportan en la Tabla 2.

Tabla 2 – Parámetros geográficos del cuarto de monitoreo.

Día del año	236
Longitud estándar	90°
Longitud local	100.3°
Latitud	25.7°
Angulo acimutal de la pared	90°
Reflectancia del suelo	0.25

Los datos del clima para el día de diseño son medidos cada 10 min y sus promedios horarios se muestran en las Figs. 7 y 8. La figura 7 muestra la radiación solar incidente medida sobre una superficie horizontal, así como la incidencia solar calculada para las paredes (norte, sur, este y oeste) [15].

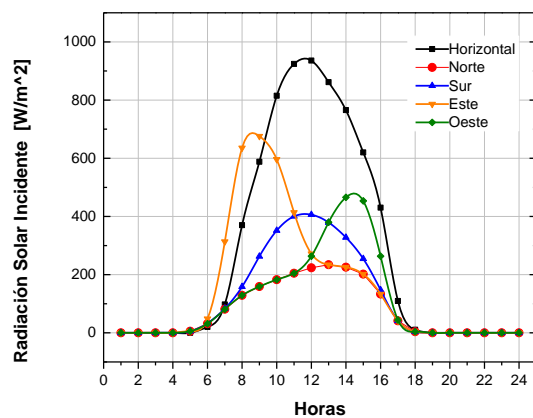


Figura 7 – Radiación solar incidente sobre la envolvente en Monterrey para el día de diseño.

Los resultados comparativos hacen uso de la superficie oeste que es la orientación de la pared instrumentada. Adicionalmente, se reportan los CLTD para todas las orientaciones al final de este apartado en la Ciudad de Monterrey. La máxima incidencia solar sobre una superficie horizontal se presenta a las 13:00h con un valor de 936 W/m², mientras la pared norte presenta los menores niveles de radiación con un máximo de 234 W/m² a la misma hora del día. La Fig. 8 presenta las temperaturas del aire exterior y la magnitud de la velocidad del viento en el día de diseño seleccionado. Se pueden observar temperaturas máximas de

alrededor de 35°C entre las 13:00 y las 16:00h. Por otro lado, la velocidad del viento muestra máximos de 6.6 m/s a las 18:00h y un claro incremento de la velocidad en el periodo diurno, donde la radiación solar tiene importancia y las temperaturas son más altas.

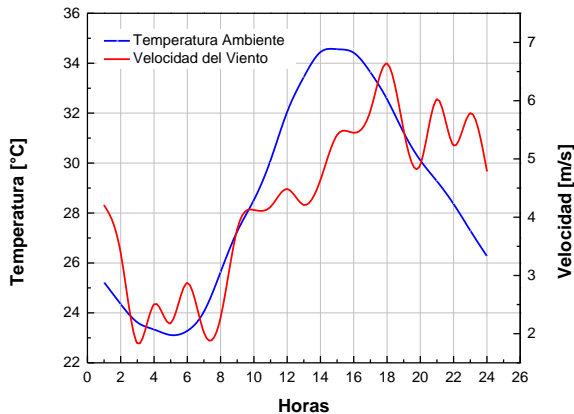


Figura 8 – Temperatura del aire exterior y velocidad del viento en Monterrey para el día de diseño.

Las propiedades termo-físicas de los materiales de construcción se reportan en la Tabla 1. Después de realizar diversos análisis de sensibilidad del coeficiente de transferencia de calor combinado interior y exterior, se determinan valores óptimos de 4.5 W/m² K y 22.7 W/m² K, como parámetros adecuados para la obtención de resultados independientes de este parámetro y acordes al tipo de material utilizado y las condiciones ambientales.

5.2. Comparación de resultados analíticos y experimentales

Los resultados comparativos de las superficies interiores de la pared y el techo para ambas soluciones (analítica y experimental) se presentan en las Figs. 9 y 10. La temperatura de la superficie interna obtenida por el modelo de solución teórica presenta una diferencia máxima de 1.62°C a las 23:00h y una hora de desplazamiento para los valores máximos en referencia al valor medido experimentalmente de 31.5°C medido a las 20:00h (Fig. 9). Los resultados en el techo (Fig. 10) muestran mayores diferencias entre soluciones con respecto a los resultados de la pared. La temperatura de la superficie interna obtenida analíticamente presenta las mayores diferencias en las primeras horas del día con un máximo de 3.2°C a las 10:00h e igualmente una hora de desplazamiento para los valores máximos entre ambas soluciones.

En ambos casos, tanto para la pared como para el techo, se espera que las diferencias entre ambas soluciones se minimicen al obtener los valores de las propiedades de los materiales de construcción de forma experimental y con las adecuadas ponderaciones de la mezcla de concreto. Otra fuente de incertidumbre es la temporalidad de los

parámetros térmicos como el coeficiente de transferencia de calor que el modelo teórico mantiene constante para todo el periodo de análisis. Finalmente, las posibles diferencias entre ambas soluciones también se espera puedan disminuirse si se eliminan las fuentes de sombreado en las zonas aledañas a la zona de medición (sobre todo para el caso del techo) y con una medición de los parámetros meteorológicos in situ (actualmente la estación climática se encuentra a una distancia de al aproximadamente 10 m y con una diferencia en la altura de al menos 5 m.

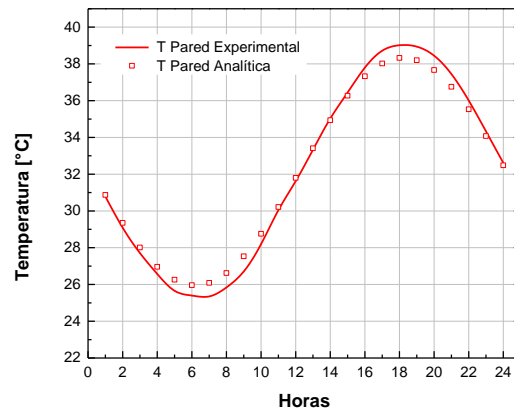


Figura 9 – Comparación de la temperatura de la superficie interior de la pared: Medida vs Calculada.

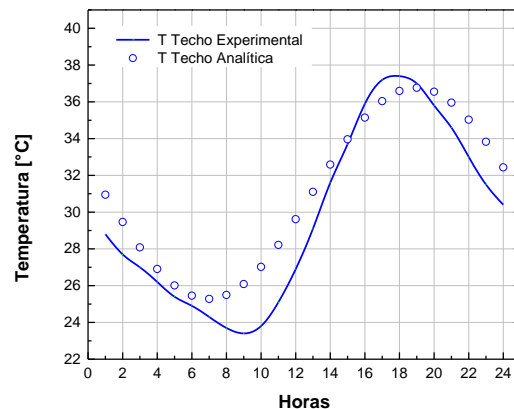


Figura 10 – Comparación de la temperatura de la superficie interior del techo: Medida vs Calculada.

5.3. Determinación de los factores CLTD en Monterrey

En la Tabla 3 se presentan los factores CLTD calculados para un tipo de techo y un tipo de pared en sus cuatro diferentes orientaciones para la Ciudad de Monterrey. El techo de concreto y la pared de bloque de concreto están conformados por diferentes capas homogéneas que se detallaron en la sección 4.1. En general, los valores de CLTD más altos se presentan para el techo y para todas las

superficies en los horarios con mayor incidencia de la radiación solar.

Tabla 3 – Factores CLTD [°C] para techo y paredes en Monterrey.

	Techo	Pared Norte	Pared Este	Pared Sur	Pared Oeste
U	2.98	2.275	2.275	2.275	2.275
[W/m ²]					
1	5.2	0.9	-1.6	-0.4	3.1
2	4.0	-0.1	-1.3	-1.1	2.0
3	3.0	-0.8	-0.8	-1.7	0.9
4	2.3	-1.4	-0.1	-1.9	-0.2
5	1.7	-1.7	0.8	-1.9	-1.0
6	1.5	-1.8	1.8	-1.6	-1.6
7	1.6	-1.6	2.9	-1.0	-2.0
8	2.0	-1.2	4.0	-0.2	-2.1
9	2.7	-0.5	4.9	0.8	-1.9
10	3.6	0.3	5.7	1.9	-1.3
11	4.7	1.3	6.3	3.0	-0.6
12	5.9	2.3	6.6	4.1	0.4
13	7.1	3.3	6.7	5.0	1.4
14	8.3	4.2	6.4	5.8	2.6
15	9.3	5.0	5.9	6.3	3.7
16	10.0	5.5	5.2	6.6	4.7
17	10.6	5.9	4.3	6.5	5.6
18	10.8	5.9	3.3	6.2	6.2
19	10.7	5.7	2.2	5.6	6.6
20	10.3	5.3	1.1	4.8	6.6
21	9.6	4.6	0.2	3.9	6.4
22	8.7	3.8	-0.6	2.8	5.9
23	7.6	2.9	-1.2	1.7	5.1
24	6.4	1.8	-1.5	0.6	4.2

*Nota: Tiempo solar [h].

El tener una base de datos de los CLTD basados en climas locales y materiales de construcción típicos de México permiten: (a) observar las cargas térmicas de enfriamiento pico para el cálculo y selección de sistemas de aire acondicionado sin sobredimensionar los equipos, y (b) ahorrar energía, disminuir las emisiones y reducir los costos de la factura eléctrica a causa de sistemas HVAC.

6. Conclusiones

Se presenta el desarrollo teórico y la validación experimental del método de los factores CLTD para un edificio ubicado en la Ciudad de Monterrey. La metodología de solución se basa en la técnica de la diferencia de temperatura para cargas de enfriamiento (CLTD) y la técnica de la transformada compleja de Fourier (CFFT). De los resultados obtenidos se puede observar lo siguiente:

- De acuerdo a los resultados experimentales, se puede concluir que la técnica CFFT tiene aplicabilidad por la condición periódica de las mediciones en la Ciudad de Monterrey.
- Se determinó experimentalmente que el techo de concreto monitoreado presenta una mayor inercia térmica que la pared de bloque de concreto.
- La simplificación de la temperatura interior de la habitación constante (setpoint) se ajusta con el modelo teórico sin diferencias considerables en los resultados.
- De la comparación entre la solución analítica y los datos medidos se encuentra que el techo tiene diferencias máximas de 3.2°C y la pared de 1.62°C.
- Se reportan factores CLTD calculados a partir de condiciones climáticas específicas, ubicación geográfica exacta de la edificación y parámetros térmicos locales.
- Como trabajo en proceso, se están determinando los factores para diversos materiales de construcción en techos y paredes típicos de la región, para otros climas donde la carga de enfriamiento es importante.

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por hacer posible este trabajo. Un agradecimiento especial al Grupo de Enfoque en Energía y Cambio Climático del Tecnológico de Monterrey (ITESM) por la ayuda económica recibida para la conclusión de esta investigación. Así mismo, un agradecimiento especial al Servicio Meteorológico Nacional (SNM) por la información climática proporcionada para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency (IEA), World Energy Statistics and Balances (2015).
- [2] W. Gang, S. Wang, K. Shan, D. Gao, Impacts of cooling load calculation uncertainties on the design optimization of building cooling systems, Energy Build., **94** (2015).
- [3] Dirección General de Generación y Trasmisión de Energía Eléctrica, Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2016-2030, México: (2016).
- [4] CONUEE, Estudio de caracterización del uso de aire acondicionado en vivienda de interés social, Cd. México: (2016).
- [5] R. Yumrutaş, M. Ünsal, M. Kanoğlu, Periodic solution of transient heat flow through multilayer walls and flat roofs by complex finite Fourier transform technique, Build. Environ., **40** (2005) 8.

- [6] Ö. Kaşka, R. Yumrutaş, Comparison of experimental and theoretical results for the transient heat flow through multilayer walls and flat roofs, *Energy*, **33** (2008) 12.
- [7] R. Yumrutaş, Ö. Kaşka, E. Yildirim, Estimation of total equivalent temperature difference values for multilayer walls and flat roofs by using periodic solution, *Build. Environ.*, **42** (2007).
- [8] K. Bansal, S. Chowdhury, M. R. Gopal, Development of CLTD values for buildings located in Kolkata, India, *Appl. Therm. Eng.*, **28** (2008) 10.
- [9] ASHRAE, *ASHRAE Handbook – Fundamentals* (1997).
- [10] O. Adil Zainal, R. Yumrutas, Validation of periodic solution for computing CLTD (cooling load temperature difference) values for building walls and flat roofs, *Energy* **82** (2015).
- [11] C. Rodríguez, B. Sarría, J. Fajardo, R. Lugo, Estudio comparativo del método de cálculo de carga térmica para sistemas de aire acondicionado en buques, *Sh. Sci. Technol.* **2** (2008).
- [12] M. D. Suziyana, S. N. Nina, T. M. Yusof, A. A. S. Basirul, Analysis of heat gain in computer laboratory and excellent centre by using CLTD/CLF/SCL method, *Procedia Eng.* **53** (2013).
- [13] F. Kreider, *Heating and cooling of buildings*, Second. CRC Press (2010).
- [14] ISO 9869-1, *Thermal insulation-Building elements- In situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance* (2014).
- [15] J. Duffie, W. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, New Jersey: John Wiley & Sons (2013).