

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY**

**CAMPUS MONTERREY**

**ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS**



**DETERMINACIÓN DE CLTD PARA CARGAS DE ENFRIAMIENTO DE  
EDIFICACIONES UBICADAS EN CIUDADES DE CLIMA CÁLIDO EN MÉXICO**

**TESIS PRESENTADA POR**

**EVELYN CATALINA VALLEJO CORAL**

**SOMETIDA A LA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS**

**COMO UN REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE**

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**CON ESPECIALIDAD**

**EN INGENIERÍA ENERGÉTICA**

**MONTERREY, N.L.**

**MAYO DE 2017**

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS

DETERMINACIÓN DE CLTD PARA CARGAS DE ENFRIAMIENTO DE  
EDIFICACIONES UBICADAS EN CIUDADES DE CLIMA CÁLIDO EN MÉXICO

TESIS PRESENTADA POR

EVELYN CATALINA VALLEJO CORAL

SOMETIDA A LA

ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS

COMO UN REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

MAESTRA EN CIENCIAS

CON ESPECIALIDAD

EN INGENIERÍA ENERGÉTICA

MONTERREY, N.L.

MAYO DE 2017

## INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

## CAMPUS MONTERREY

## ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS

Los miembros del comité aquí citados certificamos que hemos leído la tesis presentada por Evelyn Catalina Vallejo Coral y consideramos que es adecuada en alcance y calidad como un requisito parcial para obtener el grado de Maestra en Ciencias con especialidad en Ingeniería Energética.

---

Dr. Carlos Iván Rivera Solorio  
Tecnológico de Monterrey  
Asesor principal

---

Dr. Miguel Ángel Gijón Rivera  
Tecnológico de Monterrey  
Co-asesor

---

Dr. José Luis López Salinas  
Tecnológico de Monterrey  
Miembro del comité

---

Dr. Rubén Morales Menéndez  
Director Nacional de Posgrado  
Escuela de Ingeniería y Ciencias

Monterrey, N.L., 16 de mayo de 2017

### **Aclaración de autoría**

Yo, Evelyn Catalina Vallejo Coral, declaro que esta tesis titulada: Determinación de CLTD para cargas de enfriamiento de edificaciones ubicadas en ciudades de clima cálido en México y el trabajo que se presenta en ella es de mi autoría. Adicionalmente, confirmo que:

- Realice este trabajo en su totalidad durante mis estudios en el programa de maestría.
- He dado crédito a cualquier parte de esta tesis que haya sido previamente sometida para obtener un grado académico o cualquier otro tipo de titulación en esta o cualquier otra universidad.
- He dado crédito a cualquier trabajo previamente publicado que se haya consultado en esta tesis.
- He citado el trabajo consultado de otros autores, y la fuente de donde los obtuve.
- He dado crédito a todas las fuentes de ayuda utilizadas.
- He dado crédito a las contribuciones de mis coautores, cuando los resultados corresponden a un trabajo colaborativo.
- Esta tesis es enteramente mía, con excepción de las citas indicadas.

---

Evelyn Catalina Vallejo Coral

Monterrey, N.L., 16 de mayo de 2017

## **Dedicatoria**

A Dios, sin ti nada sería posible y eres el dueño de todos los frutos de mi esfuerzo.

A Hugo, por ser mi compañero de vida y hacerme parte de tu sueño.

A Patricio, Caty y Paty por su amor incondicional.

A Imeldita, por darme un espacio en su corazón.

## Agradecimientos

A Dios por bendecirme con la oportunidad de cumplir nuestros sueños.

Al Espíritu Santo por ser mi guía, mi compañero. Eres la fuente de mi inspiración.

A la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT -Ecuador) por la beca otorgada para cubrir colegiatura, manutención y otros rubros necesarios para realizar mis estudios en el extranjero.

A Tati, por su confianza y apoyo en este proyecto de vida.

A Hugo, gracias por tu paciencia, tu dedicación y tu apoyo incondicional.

A Dr. Carlos Rivera por su amistad y acertada guía durante mis estudios y desarrollado del presente proyecto.

A Dr. Miguel Ángel Gijón por su colaboración y guía en el presente proyecto.

Al Servicio Meteorológico Nacional, por haber facilitado los datos meteorológicos para la realización de este estudio.

# DETERMINACIÓN DE CLTD PARA CARGAS DE ENFRIAMIENTO DE EDIFICACIONES UBICADAS EN CIUDADES DE CLIMA CÁLIDO EN MÉXICO

Presentada por:

EVELYN CATALINA VALLEJO CORAL

## Resumen

En México, el mayor consumo de energía eléctrica se presenta en las épocas de verano debido al uso de sistemas de acondicionamiento de aire. Debido a esto, el mayor porcentaje de viviendas que cuentan con equipos de aire acondicionado se encuentra en las zonas climáticas con mayores temperaturas ambientales. La estimación, más precisa, de las cargas de enfriamiento para el dimensionamiento de equipos representa un área de oportunidad para disminuir el consumo de energía eléctrica debido a que, aproximadamente, la mitad del territorio mexicano se encuentra en zonas climáticas en las cuales, más del 30% de las viviendas cuentan con sistemas o equipos de aire acondicionado.

El método CLTD/SCL/CLF es un procedimiento de un solo paso para la estimación de cargas térmicas de enfriamiento a causa de calor ganado a través de paredes expuestas al sol y a través de techos. El método considera la naturaleza transitoria del fenómeno de transferencia de calor y la inercia térmica de los elementos. El objetivo principal del este proyecto fue determinar los valores CLTD para techos planos y paredes a partir de la temperatura en la superficie interna, la cual se obtuvo mediante la solución del modelo matemático que considera la transferencia de calor en estado transitorio a través de los elementos de la envolvente.

Un algoritmo computacional fue desarrollado para obtener la solución de modelo matemático, que representa el fenómeno analizado, mediante la técnica de la transformada finita compleja de Fourier (CFFT). Para validar la temperatura interna calculada con el algoritmo se obtuvieron datos experimentales acerca del comportamiento térmico de una pared de bloque orientada hacia el oeste y un techo de concreto que forman parte de un espacio climatizado en la Casa Solar, ubicada en el campus del ITESM en Monterrey.

Los valores de CLTD, para una edificación en Turquía, reportados por Adil & Yumrutas (2015), se consideraron como caso de referencia para comparar con los resultados obtenidos mediante el algoritmo considerando los parámetros térmicos de referencia. Los factores CLTD del techo presentaron correspondencia cualitativa y cuantitativa a los valores reportados y para la pared se observó únicamente correspondencia cualitativa debido a que, existe incertidumbre en varios datos de entrada. Para conocer las ventajas acerca de la aplicación de CLTD determinados en base a condiciones térmicas locales, se aplicó los factores de corrección establecidos por ASHRAE para Monterrey en dos casos de estudio (pared N°3 y techo N°13, codificación ASHRAE). Se observó que, los CLTD calculados mediante el algoritmo desarrollado son menores a los definidos por ASHRAE para Monterrey.

Se seleccionaron tres materiales resistentes para paredes (ladrillo, bloque de concreto y bloque de ladrillo) y tres materiales para techos (concreto, bovedilla de poliestireno expandido y poliestireno extruido) en base a los cuales se establecieron 6 casos de estudio para determinar los factores CLTD en Monterrey, Veracruz y Mexicali. Se observó que, el bloque de adobe es el material aislante más recomendado para la construcción de paredes y que la vigueta con bovedilla de poliestireno expandido es la mejor configuración de techo para disminuir el calor transferido hacia el interior, en comparación a los techos de vigueta con bovedilla de concreto o losa maciza de concreto. Finalmente se concluyó que, la utilización factores CLTD que no consideran las condiciones locales pueden sobredimensionar la carga de enfriamiento requerida en un sistema de acondicionamiento de aire.

## Contenido

Resumen.....	VI
Índice de figuras.....	IX
Índice de tablas .....	XI
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema .....	4
1.2. Objetivos .....	5
1.3. Justificación.....	5
1.4. Metodología.....	6
1.5. Organización de la Tesis.....	6
<b>2. MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>7</b>
2.1. Marco Teórico .....	7
2.1.1. Carga de refrigeración .....	7
2.1.2. Materiales de construcción y sus propiedades térmicas.....	9
2.1.3. Radiación solar en superficie inclinadas.....	11
2.1.4. Determinación de velocidad del viento en edificaciones.....	14
2.1.5. Método CLTD/SCL/CLF .....	15
2.2. Revisión de literatura.....	16
<b>3. MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO.....</b>	<b>20</b>
3.1. Definición del problema .....	20
3.2. Parámetros térmicos .....	22
3.2.1. Coeficientes combinados de transferencia de calor de superficie.....	22
3.2.2. Coeficiente de transferencia de calor por convección.....	22
3.2.3. Coeficiente global de transferencia de calor .....	24
3.2.4. Estimación de la diferencia de temperatura de enfriamiento (CLTD) .....	24
3.3. Metodología para resolver el problema .....	25
<b>4. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN TEÓRICA .....</b>	<b>26</b>
4.1. Método matemático aplicado.....	26
4.1.1. Serie de Fourier.....	26
4.1.2. Técnica de la transformada finita de Fourier (CFFT) .....	27
4.2. Descripción del algoritmo .....	30
4.2.1. Datos de entrada y parámetros adimensionales .....	30
4.2.2. Determinación temperatura superficial y CLTD.....	33
4.2.3. Determinación de la radiación incidente.....	34
<b>5. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN EXPERIMENTAL.....</b>	<b>36</b>
5.1. Descripción del lugar.....	36
5.2. Instrumentación .....	37
5.2.1. Medición de la temperatura superficial.....	37
5.2.2. Medición de la temperatura del aire.....	40
5.2.3. Adquisición de datos.....	41
5.3. Datos recopilados .....	41
<b>6. COMPARACIÓN DEL RESULTADOS ANALÍTICOS Y EXPERIMENTALES .....</b>	<b>47</b>
6.1. Datos obtenidos experimentalmente.....	47
6.2. Información de entrada al modelo .....	48
6.2.1. Datos geográficos .....	48
6.2.2. Datos climatológicos.....	48
6.2.3. Propiedades térmicas de los elementos.....	49



6.2.4. Cálculo del coeficiente combinado de transferencia de calor para superficies exteriores ( $h_o$ ).....	49
6.2.5. Cálculo del coeficiente combinado de transferencia de calor para superficies interiores ( $h_i$ ).....	51
6.3. Resultados obtenidos: Radiación incidente sobre la pared .....	52
6.4. Temperatura de la superficie interna de la pared obtenida bajo diferentes condiciones térmicas .....	52
6.4.1. Análisis de sensibilidad respecto a la temperatura del aire interior ( $T_i$ ).....	53
6.4.2. Análisis de sensibilidad respecto al coeficiente combinado de transferencia de calor de la superficie interna ( $h_i$ ) .....	53
6.4.3. Análisis de sensibilidad respecto al coeficiente combinado de transferencia de calor de la superficie exterior ( $h_o$ ) .....	54
6.4.4. Análisis de sensibilidad respecto a la absorptancia solar de la superficie externa ( $\alpha_s$ ) .....	55
6.5. Comparación de las temperaturas analítica y experimental de la pared .....	56
6.6. Temperatura de la superficie interna del techo obtenida bajo diferentes condiciones térmicas .....	56
6.6.1. Análisis de sensibilidad respecto a la temperatura del aire interno ( $T_i$ ).....	57
6.6.2. Análisis de sensibilidad respecto al coeficiente combinado de transferencia de calor de la superficie interna ( $h_i$ ) .....	57
6.6.3. Análisis de sensibilidad respecto al coeficiente combinado de transferencia de calor de la superficie externa ( $h_o$ ) .....	58
6.6.4. Análisis de sensibilidad respecto a la absorptancia solar de la superficie externa ( $\alpha_s$ ) .....	59
6.6.5. Análisis de sensibilidad respecto a la capacidad calorífica del concreto .....	60
6.6.6. Análisis de sensibilidad respecto a la conductividad térmica del concreto.....	61
6.7. Comparación de las temperaturas analíticas y experimentales del techo.....	61
7. DETERMINACIÓN DE FACTORES CLTD.....	63
7.1. Factores CLTD para Gaziantep, Turquía.....	63
7.1.1. Datos climatológicos y parámetros de entrada.....	63
7.1.2. Resultados obtenidos de la temperatura de la superficie interna del techo .....	64
7.1.3. Resultados obtenidos de la temperatura de la superficie interna la pared.....	65
7.2. Comparación de factores CLTD generados con valores reportados por ASHRAE.....	67
7.2.1. Parámetros de entrada.....	68
7.2.2. Resultados obtenidos de CLTD en el techo .....	69
7.2.3. Resultados obtenidos de CLTD en la pared.....	70
7.3. Factores CLTD determinados para México.....	72
7.3.1. Selección de ciudades, materiales y configuración de elementos de la envolvente .....	72
7.3.2. Condiciones climáticas y parámetros de entrada.....	73
7.3.3. Resultados obtenidos de CLTD en el techo .....	74
7.3.4. Resultados obtenidos de CLTD en la pared.....	76
8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	81
8.1. Conclusiones.....	81
8.2. Trabajos futuros.....	83
Apéndice A. Nomenclatura.....	84
Apéndice B. CLTD determinados para diferentes tipos de techo y pared en Mexicali .....	86
Referencias.....	89
Curriculum Vitae .....	91

## Índice de figuras

<i>Figura 1.1 Consumo de energía en el sector de edificaciones a nivel global [1].</i>	1
<i>Figura 1.2 Consumo de energía en el sector de edificaciones en México [1].</i>	1
<i>Figura 1.3 Consumo bruto mensual del Sistema Eléctrico Nacional durante el año 2015 [2].</i>	2
<i>Figura 1.4 Porcentaje de viviendas con equipos de aire acondicionado por zona climática [4].</i>	2
<i>Figura 1.5 Distribución municipal de zonas climáticas en México [4].</i>	3
<i>Figura 1.6. Cifras estimadas de evolución del consumo de electricidad por usos finales en el sector residencial [5].</i>	3
<i>Figura 2.1. Temperatura exterior medida en Monterrey – México, 23 de agosto 2016.</i>	8
<i>Figura 2.2. Porcentaje de viviendas con materiales resistentes en paredes- INEGI [18].</i>	11
<i>Figura 2.3. Porcentaje de viviendas con materiales resistentes en techos - INEGI [18].</i>	11
<i>Figura 2.4 Latitud, ángulo de hora y declinación de la Tierra [7].</i>	12
<i>Figura 2.5 Ángulos formados entre la radiación solar incidente y la superficie expuesta [7].</i>	13
<i>Figura 3.1 Modelo físico de una pared o un techo plano.</i>	21
<i>Figura 4.1. Diagrama de flujo del algoritmo desarrollado para el análisis en techos planos de N capas.</i>	31
<i>Figura 4.2. Diagrama de flujo del algoritmo desarrollado para en análisis en paredes de N capas.</i>	32
<i>Figura 4.3. Diagrama de flujo de la subrutina- radiación incidente sobre una pared.</i>	34
<i>Figura 5.1. Cuarto de monitoreo- Casa Solar ITESM, campus MTY.</i>	36
<i>Figura 5.2. Esquema de la pared y el techo plano del cuarto de monitoreo.</i>	37
<i>Figura 5.3. Esquema de los puntos de medición de temperatura en la pared y techo.</i>	38
<i>Figura 5.4. Puntos de medición de la superficie externa del techo</i>	39
<i>Figura 5.5 Puntos de medición de la superficie interna del techo.</i>	39
<i>Figura 5.6. Puntos de medición de la superficie externa de la pared.</i>	40
<i>Figura 5.7. Puntos de medición de la superficie interna de la pared.</i>	40
<i>Figura 5.8. Ubicación de los sensores de aire interno del cuarto de monitoreo.</i>	41
<i>Figura 5.9. Datos climatológicos obtenidos de la estación meteorológica de la casa solar.</i>	42
<i>Figura 5.10. Temperatura de los tres puntos de monitoreo de la superficie interna de la pared.</i>	43
<i>Figura 5.11. Temperatura de los tres puntos de monitoreo de la superficie externa de la pared.</i>	43
<i>Figura 5.12. Temperatura de los dos puntos de monitoreo de la superficie interna del techo.</i>	44
<i>Figura 5.13. Temperatura de los dos puntos de monitoreo de la superficie externa del techo.</i>	44
<i>Figura 5.14. Temperatura del aire interno del cuarto monitoreado.</i>	45
<i>Figura 5.15. Variación de temperatura superficial interna y externa de la pared.</i>	45
<i>Figura 5.16. Variación de temperatura superficial interna y externa del techo.</i>	46
<i>Figura 6.1. Datos promediados obtenidos experimentalmente en la pared y el aire interno.</i>	47
<i>Figura 6.2. Datos promediados obtenidos experimentalmente en el techo.</i>	47
<i>Figura 6.3. Datos promedio de la temperatura ambiente y radiación solar tomados en sitio – Monterrey, 24 agosto 2016.</i>	48

<i>Figura 6.4. Datos medidos acerca de la velocidad del viento en sitio – 24 de agosto 2016.</i> .....	49
<i>Figura 6.5. Coeficiente combinado de transferencia de calor en la superficie externa.</i> .....	50
<i>Figura 6.6. Coeficiente combinado de transferencia de calor para superficies internas.</i> .....	51
<i>Figura 6.7. Radiación solar incidente medida (I. horizontal) y calculada (I. Pared) para el 24 de agosto 2016.</i> .....	52
<i>Figura 6.8. Sensibilidad de la temperatura interna de la pared respecto a <math>T_i</math>.</i> .....	53
<i>Figura 6.9. Sensibilidad de temperatura de la superficie interna de la pared respecto a <math>h_i</math>.</i> .....	54
<i>Figura 6.10. Sensibilidad de temperatura de la superficie interna de la pared respecto a <math>h_o</math>.</i> .....	54
<i>Figura 6.11. Sensibilidad de temperatura de la superficie interna de la pared respecto a la absorptancia.</i> .....	55
<i>Figura 6.12. Comparación de la temperatura de la superficie interna de la pared.</i> .....	56
<i>Figura 6.13. Sensibilidad de la temperatura interna de la pared respecto a <math>T_i</math>.</i> .....	57
<i>Figura 6.14. Sensibilidad de temperatura de la superficie interna del techo respecto a <math>h_i</math>.</i> .....	58
<i>Figura 6.15. Sensibilidad de temperatura de la superficie interna del techo respecto a <math>h_o</math>.</i> .....	58
<i>Figura 6.16. Sensibilidad de temperatura de la superficie interna del techo respecto a la absorptancia solar.</i> .....	59
<i>Figura 6.17. Sensibilidad de temperatura de la superficie interna del techo respecto capacidad calorífica del concreto.</i> .....	60
<i>Figura 6.18. Sensibilidad de temperatura de la superficie interna del techo respecto a la conductividad térmica del concreto.</i> .....	61
<i>Figura 6.19. Comparación de la temperatura de la superficie interna del techo.</i> .....	62
<i>Figura 7.1. Temperatura ambiental y radiación incidente en superficies en época de verano, Gaziantep [13].</i> .....	63
<i>Figura 7.2. Temperatura superficial obtenida para un techo de 12 cm de concreto.</i> .....	64
<i>Figura 7.3. Valores de CLTD obtenidos para un techo de 12 cm de concreto.</i> .....	65
<i>Figura 7.4. Temperatura superficial obtenida para una pared de 20 cm de ladrillo – Gaziantep.</i> .....	66
<i>Figura 7.5. Valores de CLTD obtenidos para una pared de 20 cm de ladrillo – Gaziantep.</i> .....	66
<i>Figura 7.6. Materiales de Techo #13 y pared #3 [33].</i> .....	67
<i>Figura 7.7. Valores de CLTD obtenidos para el techo N°13 vs CLTD reportados por ASHRAE.</i> .....	69
<i>Figura 7.8. Radiación incidente sobre la pared orientada hacia: Norte, Sur, Este y Oeste en Monterrey.</i> .....	70
<i>Figura 7.9. Valores de CLTD obtenidos para la pared N°3 con orientación Norte y Sur vs CLTD reportados por ASHRAE.</i> .....	71
<i>Figura 7.10. Valores de CLTD obtenidos para la pared N°3 con orientación Este y Oeste vs CLTD reportados por ASHRAE.</i> .....	72
<i>Figura 7.11. Configuraciones seleccionadas de techos con bovedilla de EPS [34] y bovedilla de concreto.</i> .....	73
<i>Figura 7.12. Datos climatológicos de Veracruz [35] y Monterrey.</i> .....	73
<i>Figura 7.13. Comparación de Valores de CLTD para techos de edificaciones en: a) Monterrey y b) Veracruz.</i> .....	75
<i>Figura 7.14. Cargas de enfriamiento por unidad de área de techos en edificaciones: a) Monterrey y b) Veracruz.</i> .....	76
<i>Figura 7.15. Radiación incidente sobre paredes orientadas hacia: Norte, Sur, Este y Oeste en Veracruz.</i> .....	77
<i>Figura 7.16. CLTD obtenidos para diferentes tipos de pares orientadas hacia: a) Oeste y b) Norte en Veracruz.</i> .....	78
<i>Figura 7.17. CLTD obtenidos para diferentes tipos de pares orientadas hacia: a) Oeste y b) Norte en Monterrey.</i> .....	79
<i>Figura 7.18. Comparación de CLTD de paredes de bloque de concreto y adobe en Monterrey y Veracruz.</i> .....	80
<i>Figura 7.19 Cargas de enfriamiento por unidad de área de una pared orientada hacia el oeste</i> .....	80

## Índice de tablas

<i>Tabla 2.1. Conductividad térmica de materiales de construcción típicos [5].</i>	9
<i>Tabla 2.2. Calores específicos y densidad de diferentes materiales [5].</i>	10
<i>Tabla 2.3. Absorptancia solar de superficies comunes en edificaciones [17].</i>	10
<i>Tabla 2.4. Reflectancia de superficies externas comunes [7].</i>	13
<i>Tabla 2.5. Parámetros de la capa límite atmosférica [12].</i>	14
<i>Tabla 6.1. Parámetros geográficos de la ubicación del cuarto de monitoreo.</i>	48
<i>Tabla 6.2. Propiedades termo-físicas de los elementos monitoreados experimentalmente.</i>	49
<i>Tabla 6.3. Propiedades del concreto [12].</i>	60
<i>Tabla 7.1. Propiedades termo-físicas de los materiales [13].</i>	64
<i>Tabla 7.2. CLTD para el techo N°13 y la pared N°3 reportados por ASHRAE [33].</i>	67
<i>Tabla 7.3. Valores de CLTD corregidos para Monterrey.</i>	68
<i>Tabla 7.4. Propiedades termo-físicas, código y número de elemento definido por ASHRAE [6].</i>	68
<i>Tabla 7.5. Propiedades de los materiales típicamente utilizados en México.</i>	74
<i>Tabla 7.6. Parámetros geográficos de Veracruz.</i>	74
<i>Tabla 7.7. CLTD calculados para techos en Monterrey y Veracruz.</i>	75
<i>Tabla 7.8 CLTD calculados para tres tipos de paredes en Veracruz.</i>	77
<i>Tabla 7.9. CLTD calculados para tres tipos de paredes en Veracruz.</i>	78

## 1. INTRODUCCIÓN

La cantidad de energía requerida por las edificaciones (residenciales o de servicios) a nivel mundial ha incrementado en mayor proporción desde 1999 y presenta una tendencia en aumento como se observa en la Figura 1.1. La electricidad es la principal forma de energía requerida en las edificaciones y a pesar de las mejoras que realizadas para disminuir su consumo, estas no han sido suficiente para compensar el crecimiento del sector de edificios[2].

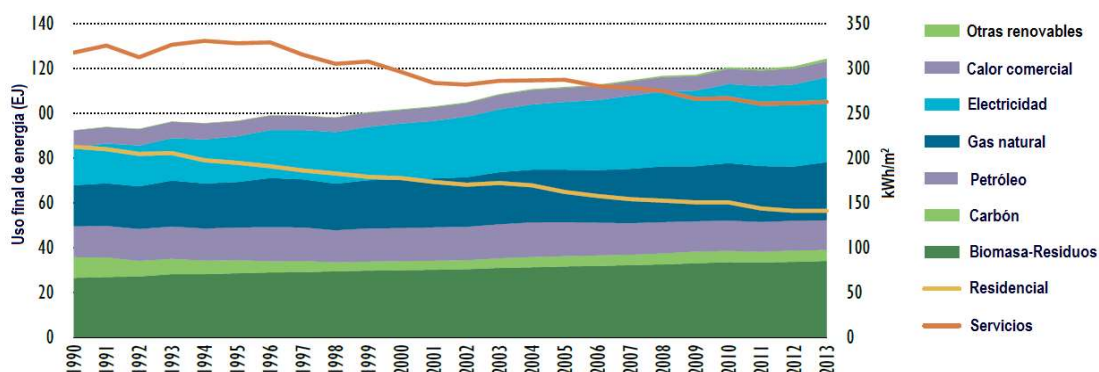


Figura 1.1 Consumo de energía en el sector de edificaciones a nivel global [2].

En México, la cantidad de energía eléctrica requerida por el sector de edificaciones incrementó, aproximadamente, 50% en el año 2013 respecto a la demanda de energía en 1990 a pesar de que, el consumo de energía por área en el sector residencial disminuyó como se observa en la Figura 1.2. La demanda de energía en edificaciones presenta una tendencia al incremento por lo que es necesario reconocer áreas de oportunidad que permitan disminuir esta tendencia.

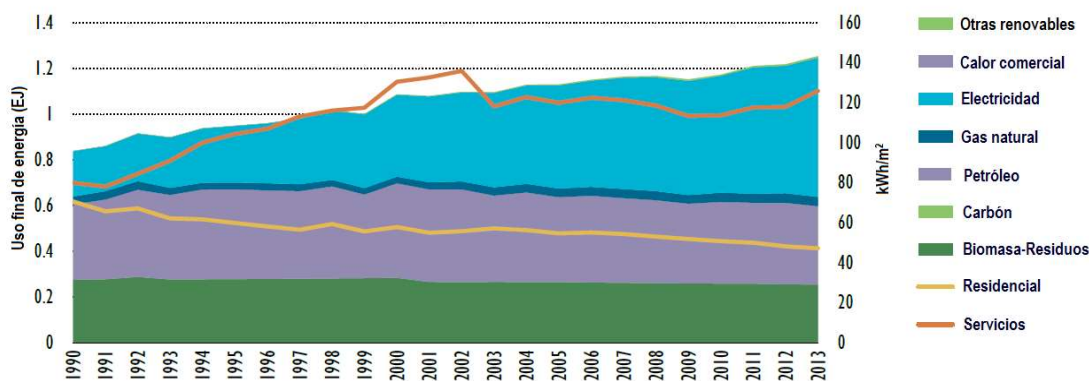


Figura 1.2 Consumo de energía en el sector de edificaciones en México [2].

El consumo de energía eléctrica en México tiene comportamiento estacional, esto significa que la demanda de energía está directamente relacionada con la temperatura ambiental. Es por esta razón que el 54% del consumo total de energía eléctrica en el 2015 se presentó en los meses de verano de la región, es decir desde abril a septiembre como se observa en la Figura 1.3 [3].

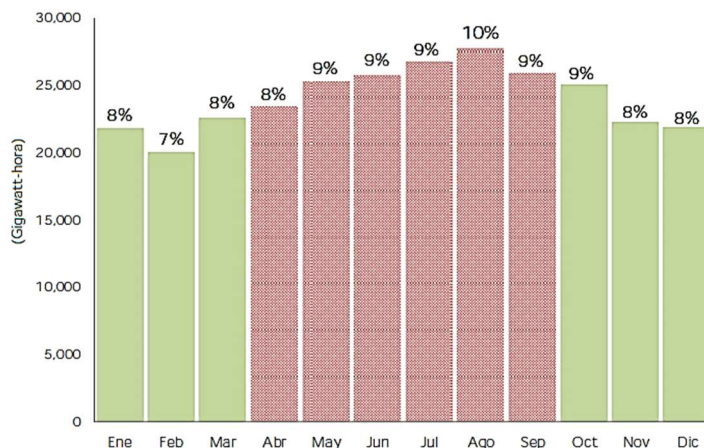


Figura 1.3 Consumo bruto mensual del Sistema Eléctrico Nacional durante el año 2015[3].

En la actualidad las edificaciones utilizan gran parte de la energía requerida a nivel mundial. El 40% de la energía total consumida por una edificación corresponde al sistema de calentamiento, ventilación y aire acondicionado (HVAC) [4]. De acuerdo a la Secretaría de Energía (SENER) la causa principal por la cual existe un incremento del consumo de energía eléctrica en los meses de verano es a causa del uso de sistemas de acondicionamiento de aire debido a las altas temperaturas ambientales[3]. Es por esta razón que el mayor porcentaje de viviendas que cuentan con equipos de aire acondicionado se encuentra en las zonas climáticas cálidas como se observa en la Figura 1.4.

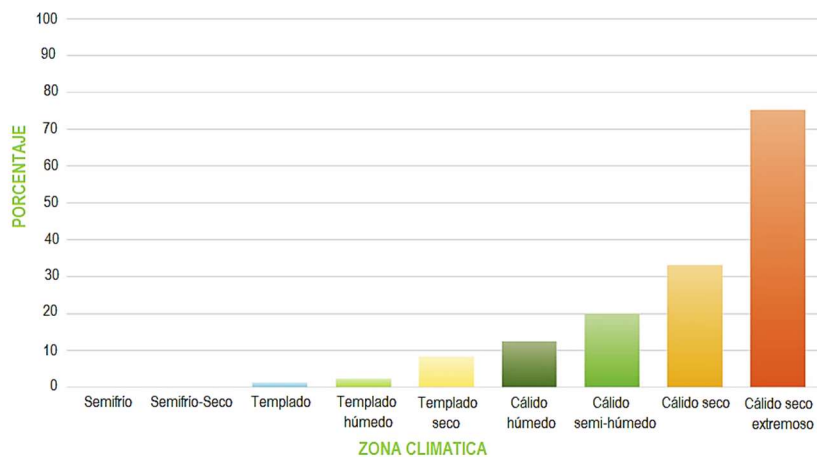


Figura 1.4 Porcentaje de viviendas con equipos de aire acondicionado por zona climática [5].

En México, aproximadamente el 50% del territorio presenta clima cálido y de los municipios con clima cálido, más del 60% corresponde a clima cálido seco como se observa en la Figura 1.5. Estos porcentajes indican que gran parte del territorio mexicano utiliza sistemas de climatización, lo cual implica un alto consumo de energía a nivel nacional para el acondicionamiento de espacios.

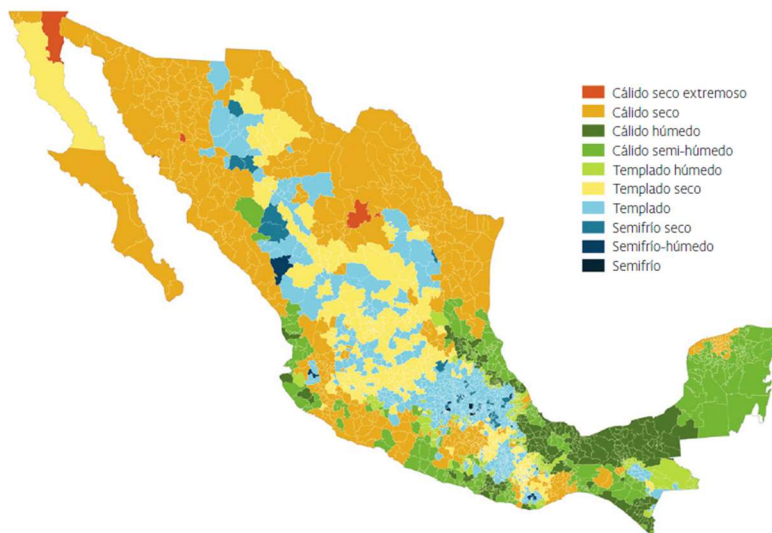


Figura 1.5 Distribución municipal de zonas climáticas en México [5].

En el sector residencial mexicano la cantidad de energía eléctrica utilizada por los sistemas de aire acondicionado representó, aproximadamente, el 25% de la energía total consumida en el 2005 y este porcentaje está en aumento de acuerdo proyecciones realizadas por el programa ambiental de las naciones unidas (SBCI – UNEP) como se observa en la Figura 1.6.

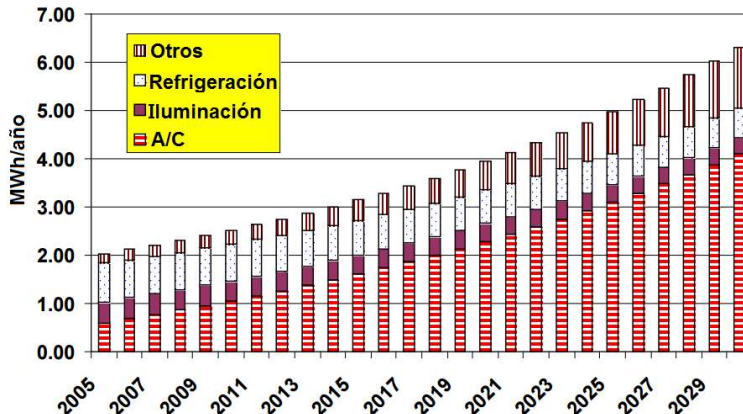


Figura 1.6. Cifras estimadas de evolución del consumo de electricidad por usos finales en el sector residencial [6].

Todos los datos indican que la climatización de espacios representa un gran consumo de energía en las épocas de verano. Es por esta razón que un área de oportunidad para disminuir el consumo energía eléctrica en edificaciones es el desarrollo de herramientas que permitan diseñar sistemas de aire acondicionado eficientes desde etapas tempranas de su conceptualización, como el dimensionamiento, y a su vez ser capaces de predecir el comportamiento térmico de los materiales de la edificación bajo condiciones de operación reales.

El dimensionamiento de los sistemas de aire acondicionado está directamente relacionado con los métodos o programas computacionales utilizados para este fin, es por

esta razón que su precisión es de vital importancia para establecer capacidades adecuadas que consideren los requerimientos reales del sistema disminuyendo la probabilidad de un dimensionamiento inadecuado y en consecuencia incrementando el uso de energía y costos de operación y mantenimiento, poniendo en riesgo el confort de los ocupantes durante condiciones climáticas críticas. Es decir, un cálculo adecuado de la carga de enfriamiento da como resultado valores apropiados para un buen desempeño [7].

El método CLTD (Cooling Load Temperature Difference) permite determinar la cantidad de calor ganado a través de los elementos opacos de la envolvente. Los valores existentes de CLTD para estructuras han sido desarrollados por la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado, ASHRAE por sus siglas en inglés. Estos valores fueron calculados para la radiación solar del 21 de julio en zonas geográficas ubicadas a 40°N, temperatura ambiental promedio de 29.4°C, rango diario de temperatura de 11.7°C y coeficientes de transferencia de calor por convección típicos de la zona [8].

Para determinar los valores de CLTD de edificaciones en México se resolverá el modelo matemático que representa el fenómeno de transferencia de calor en estado transitorio en paredes externas y techos, aplicando metodologías anteriormente utilizadas, considerando las condiciones climatológicas de las ciudades de interés (Monterrey y Veracruz) y tomando en cuenta los materiales y configuraciones de paredes y techos típicamente utilizados. De acuerdo al INEGI, los materiales comúnmente utilizados en la construcción de paredes y techos en las viviendas mexicanas son: ladrillo, bloque de concreto, losa de concreto y vigueta -bovedilla [9]

## **1.1. Planteamiento del problema**

Para reducir la cantidad de energía que consume un sistema de climatización y mejorar su rendimiento, es necesario realizar un diseño adecuado, que incluya el cálculo de cargas térmicas y dimensionamiento del sistema basado en las condiciones críticas de funcionamiento (cargas críticas) y/o cargas anuales [4].

En el cálculo de cargas de enfriamiento, la cantidad de calor ganado a través de una pared o techo plano desde el exterior hacia la zona acondicionada es de gran importancia, debido a que a través de estos elementos se tiene la mayor ganancia de calor de una edificación [10].

La cantidad de calor ganado a través de paredes y techos puede ser determinado mediante el método CLTD para elementos de la envolvente que cumplan con las características y configuraciones de los valores de CLTD tabulados por ASHRAE. Si el tipo de construcción no está considerada dentro de los valores tabulados se pueden realizar cálculos aproximados solo si existen tipos de construcciones similares [11], tomando en cuenta los factores de corrección propuestos para ubicaciones geográficas diferentes.

Actualmente, no existen valores calculados de CLTD para las ciudades de México que consideren las condiciones climatológicas locales, y tampoco para configuraciones de techos y paredes típicamente utilizadas. La aplicación de este método para edificaciones en México se realiza mediante parámetros de corrección propuestos por ASHRAE.



## 1.2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es determinar y validar los valores de CLTD específicos para paredes y techos planos en México mediante la aplicación de metodologías de cálculo basadas en la técnica de la transformada finita compleja de Fourier.

Los objetivos particulares a cumplir en este trabajo de investigación son los siguientes:

- Desarrollar un algoritmo computacional para modelar el flujo de calor transitorio a través de paredes y techos planos utilizando la técnica de la transformada finita compleja de Fourier
- Obtener datos experimentales acerca del comportamiento térmico de un techo plano y una pared de una edificación ubicada en Monterrey.
- Validar el algoritmo computacional desarrollado mediante los datos experimentales obtenidos.
- Recopilar y analizar información acerca de: condiciones meteorológicas de las ciudades de interés, propiedades termo-físicas de los materiales comúnmente utilizados en México para la construcción de edificaciones, etc.
- Calcular CLTD para techos planos y paredes de materiales y configuraciones comunes en México.

## 1.3. Justificación

La importancia del método CLTD radica en que es un método simplificado que no requiere programas computacionales y que considera la naturaleza transitoria del intercambio de calor a través de paredes y techos.

Al considerar las condiciones reales a las cuales se encuentran sometidos los elementos analizados permite estimar de forma eficiente y rápida las cargas de enfriamiento requeridas para el adecuado dimensionamiento de sistemas de aire acondicionado

En México, las edificaciones están sometidas a condiciones climáticas distintas a las zonas geográficas en latitud  $40^{\circ}\text{N}$  y, las configuraciones y materiales utilizados en la envolvente difieren respecto a las consideradas por ASHRAE. Es por esta razón que la aplicación del método CLTD para edificaciones en México se realiza con factores de corrección, que no consideran las condiciones propias de cada zona y no son aplicables para techos y paredes de diferentes materiales y configuraciones.

Al validar un método que permita calcular los valores de CLTD, se cuenta con una metodología que permite evaluar el impacto térmico de los materiales utilizados y posibles configuraciones que constituyen la envolvente de una edificación localizada en cualquier parte del mundo.

Para la validación de la metodología utilizada se obtienen datos experimentales de la temperatura superficial interna de un techo plano y una pared orientada hacia el oeste que forman parte de un cuarto de monitoreo seleccionado. Los datos recopilados servirán como fuente de información importante para futuras investigaciones bajo la misma línea de enfoque.

## **1.4. Metodología**

La metodología utilizada inició con la revisión de literatura para conocer acerca de las investigaciones y publicaciones realizadas que están directamente relacionadas con el tema de estudio del presente proyecto.

Para determinar los valores de CLTD de edificaciones en México se desarrolló un algoritmo computacional en Matlab basado en la técnica compleja de Fourier, que simula el flujo de calor transitorio a través de paredes y techos planos en función de la temperatura ambiental y la radiación solar de los climas más representativos de México (cálido seco extremos, cálido seco y cálido semi-húmedo).

De forma paralela a la creación de algoritmo computacional, se llevó a cabo la parte experimental que permitió obtener información acerca del comportamiento térmico de una pared y un techo plano de una edificación ubicada en la ciudad de Monterrey. Esto se realizó mediante la instalación de sensores y un sistema de recopilación de datos en el sitio monitoreado.

Los resultados experimentales obtenidos y los resultados calculados fueron analizados para validar las metodologías utilizadas en cada uno de los procesos.

## **1.5. Organización de la Tesis**

El presente documento contiene ocho capítulos para la descripción adecuado del trabajo realizado.

El capítulo uno contiene el marco introductorio acerca del panorama global de una problemática definida.

En el capítulo dos se presenta la revisión de literatura y un resumen de la teoría requerida para el desarrollo de la tesis

En el capítulo tres se define matemáticamente la problemática que se requiere resolver y se presenta de forma resumida la metodología a utilizarse.

El capítulo cuatro presenta información detallada del algoritmo computacional desarrollado y las bases matemáticas utilizadas

En el capítulo cinco se presenta información acerca del diseño del experimento desarrollado y los datos obtenidos a partir del mismo.

En el capítulo seis se realiza una comparación acerca de los datos obtenidos experimentalmente y los resultados obtenidos analíticamente mediante el algoritmo desarrollado.

En el capítulo siete se analiza los resultados obtenidos acerca de los factores CLTD para dos casos de referencia y se presentan los factores CLTD calculados para techos y paredes que no han sido reportados en la literatura.

En el capítulo ocho se presentan las conclusiones del proyecto y los trabajos futuros.

## 2. MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DE LITERATURA

En esta sección se presenta el marco teórico que constituye la base para el desarrollo de la investigación. Adicionalmente, se incluye un resumen de las publicaciones más relevantes para el proyecto que fueron analizadas durante la revisión de literatura y finalmente se presenta una descripción de la organización del documento.

### 2.1. Marco Teórico

Los sistemas de aire acondicionado se diseñan en función de la carga de refrigeración, la cual depende de las condiciones internas del espacio refrigerado y de las condiciones climatológicas [8]. El cálculo de la carga de refrigeración consiste en un conteo riguroso de la cantidad de calor producido por todas las fuentes de energía térmica como: personas, equipamiento, iluminación, ventilación y energía solar transmitida a través de la envolvente del edificio. En las edificaciones, la mayor parte del calor ganado es a través de paredes opacas externas y techos [10].

En esta sección del documento se presentan de forma resumida los conceptos que se consideran necesarios para analizar la carga de enfriamiento de una edificación, características del calor ganado a través elementos opacos de la envolvente y métodos para su determinación.

#### 2.1.1. Carga de refrigeración

Los sistemas de climatización se dimensionan a partir de la cantidad de calor que se requiere remover del espacio acondicionado para garantizar condiciones de confort a los ocupantes. El calor removido está directamente relacionado con el calor ganado en la edificación a causa de fuentes externas como la radiación solar y temperatura del aire exterior, y fuentes internas como personas, iluminación, equipos, etc.

Para la determinación de las cargas de refrigeración se debe tomar en cuenta los diferentes flujos de calor existentes en el sistema, los cuales varían en el tiempo:

- Calor ganado: es la tasa de calor que ingresa al espacio analizado y/o que es generado en el espacio de manera instantánea [7].
- Carga de refrigeración: es la tasa a la cual el equipo de refrigeración debe extraer el calor del espacio acondicionado para mantener constante la temperatura y la humedad [8].
- Tasa de extracción de calor: es la tasa real a la cual el equipo de aire acondicionado extrae el calor durante su operación [8].

#### Calor total ganado

El calor total ganado está compuesto por el calor latente que corresponde a la cantidad de energía absorbida o rechazada durante un proceso de cambio de fase [12] y por el calor sensible que corresponde a la energía térmica que incrementa la temperatura de la materia en cualquiera de sus estados.

Los elementos de una edificación que influyen en la cantidad de calor ganado son los siguientes [13]:

- Componentes externos: paredes, techos, ventanas, claraboyas, puertas, particiones, etc.

Componentes internos: iluminación, personas, electrodomésticos y equipamiento.

- Infiltración: fugas de aire y migración de humedad
- Componentes del sistema de aire acondicionado: aire exterior utilizado para ventilación, fugas de aire en ductos y calor ganado a través de estos, recalentamiento, energía para ventilación y bombeo, y recuperación de energía.

### **Calor ganado a través de superficies exteriores**

El calor ganado a través de superficies exteriores representa la mayor parte de la carga de refrigeración en la mayoría de las edificaciones [1]. La transferencia de calor hacia el interior de la edificación se produce debido al incremento de temperatura de los elementos exteriores a causa de la radiación solar incidente y la diferencia de temperaturas con el aire exterior. Es decir, los mecanismos de ganancia de calor a través de estos elementos es la convección y la radiación [8].

La cantidad de calor ganado por los elementos exteriores no se trasfiere de manera instantánea hacia el espacio interior. Esto se debe a que la energía térmica inicialmente es absorbida y almacenada por los elementos hasta alcanzar una temperatura mayor al espacio interior, momento en el que parte de la energía térmica almacenada es transferida por convección y radiación al espacio acondicionado debido a su inercia térmica [7].

El proceso de transferencia de calor en elementos de la envolvente puede considerarse en estado estable cuando, la temperatura externa y la temperatura interna de los elementos se mantienen aproximadamente constante en un largo periodo de tiempo. Debido a que la temperatura exterior de una pared o techo presentan variaciones a lo largo del día a causa de las fluctuaciones de la temperatura exterior y de la radiación solar recibida, la transferencia de calor a través de estos varía en función del tiempo es decir que, la transferencia de calor es de naturaleza transitoria [14].

La inercia térmica de una pared o un techo está principalmente representada por el tiempo de retraso y el factor de decremento, los cuales caracterizan el flujo de calor que es transmitido desde el elemento hacia sus alrededores.

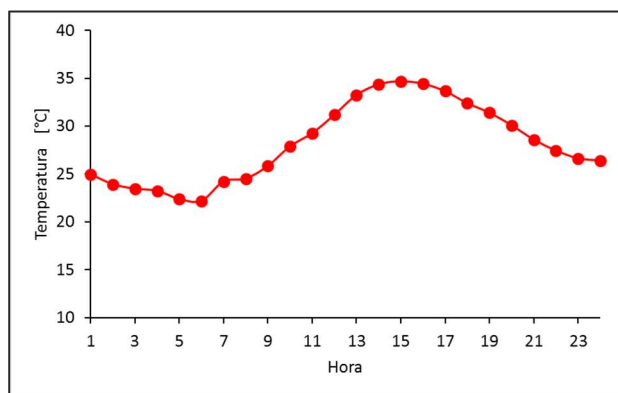


Figura 2.1. Temperatura exterior medida en Monterrey – México, 23 de agosto 2016.

La temperatura exterior no se mantiene constante, como se observa en la Figura 2.1, y esto produce un proceso de propagación de calor a causa de una onda de calor periódica la cual requiere un tiempo, conocido como tiempo de retraso, para propagarse a través de una pared desde su superficie externa hasta su superficie interna [15]. La amplitud de la onda es

función de la cantidad de radiación solar y convección entre la superficie externa de la pared y el aire exterior.

El retraso en la propagación de la onda y la disminución de su amplitud es causado por la inercia térmica del elemento la cual depende del tipo de material, su configuración, el espesor y la resistencia que presente al paso de la onda.

### 2.1.2. Materiales de construcción y sus propiedades térmicas

**Conductividad térmica ( $k$ )**, es la capacidad que tiene un material para conducir energía térmica en forma de calor [16] y representa la tasa de calor en estado estable a través de una unidad de espesor del material que se genera por una diferencia de temperatura. Presenta las unidades  $W/(m \cdot ^\circ C)$  o  $Btu/(h \cdot ft \cdot ^\circ F)$  [13].

Respecto a la conductividad térmica de los materiales de construcción, generalmente, es una propiedad que se asume como constante debido a que, en el rango de temperatura que estos presentan, no existe una variación considerable por lo que esta aproximación es válida [8]. En la Tabla 2.1 se presentan la conductividad de algunos materiales típicos de construcción y aislante. Se observa que los materiales aislantes presentan conductividad térmica considerablemente menor a los demás materiales.

Material de construcción	Conductividad térmica [W/m·K]
Asfalto	0.74-0.76
Cemento, ceniza	0.76
Vidrio, ventana	0.78
Concreto	1.73
Mármol	2.08-2.94
Balsa (madera)	0.055
Pino blanco	0.112
Roble	0.166
Fibra de vidrio	0.036
Poliestireno expandido	0.029

Tabla 2.1. Conductividad térmica de materiales de construcción típicos [5].

**Densidad ( $\rho$ )**, es una propiedad de los materiales que no depende de su masa y representa el grado de compactación de un material, mientras más compacto es mayor densidad presenta. Se expresa en  $kg/m^3$  o  $lb/ft^3$  [16].

**Capacidad calorífica específica ( $C_p$ )**, es la capacidad que tienen un material para almacenar energía térmica por unidad de masa y se expresa en  $J/(kg \cdot K)$  o  $Btu/(lb \cdot ^\circ F)$  [16].

En la Tabla 2.2 se presenta el calor específico y la densidad de varios materiales de construcción.

Material de construcción	Calor específico [kJ/kg·°C]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
Asfalto	0.92	2110
Ladrillo	0.8	1970
Concreto (Piedra)	0.653	2310
Mármol	0.88	2590
Roble	2.4	750
Asbesto (aislante)	0.8	580
Madera, ceniza	0.8	640

Tabla 2.2. Calores específicos y densidad de diferentes materiales [5].

**Absorptancia solar ( $\alpha_s$ )** es la fracción de la radiación solar incidente que una superficie absorbe. En la Tabla 2.3 se presenta los valores de absorptancia solar para diferentes tipos de superficies.

Material de la superficie	Absorptancia Solar
Superficies blancas: pintura, papel, revestido, plástico.	0.1-0.3
Superficies claras: pintura, papel, plásticos, textiles, concreto, madera, arena, ladrillos, piedra y césped seco	0.25-0.5
Colores oscuros: Pinturas, ladrillo, azulejo, hierro oxidado, tierra.	0.4-0.8
Asfalto negro, alquitrán, azulejos, carbón, caucho y agua	0.85-0.95

Tabla 2.3. Absorptancia solar de superficies comunes en edificaciones [17].

### **Difusividad térmica**

La difusividad térmica es una propiedad de los materiales que está directamente relacionada con la transferencia de calor en estado transitorio y representa la velocidad con la cual, el calor es difundido a través de un material. Se define mediante la ecuación 2.1 y sus unidades son m<sup>2</sup>/s o ft<sup>2</sup>/s.

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad 2.1$$

La relación densidad y calor específico, conocida como capacidad calorífica ( $\rho \cdot C_p$ ), representa la capacidad que tienen un material para almacenar energía por unidad de volumen. Por esta razón, un valor pequeño de difusividad térmica indica que la cantidad de calor que recibe un material es, en su mayor parte absorbido, en relación a la cantidad de calor que será transmitido[16].

De acuerdo al Instituto de Estadísticas y Geografía en México, a partir de 1980, más del 50% de las viviendas se construyen con paredes de materiales resistentes, como tabique, ladrillo, bloque de concreto, piedra de cantera, cemento o concreto. En el año 2010 el 86.3% de las viviendas presentan paredes construidas de materiales resistentes como se observa en la Figura 2.2.

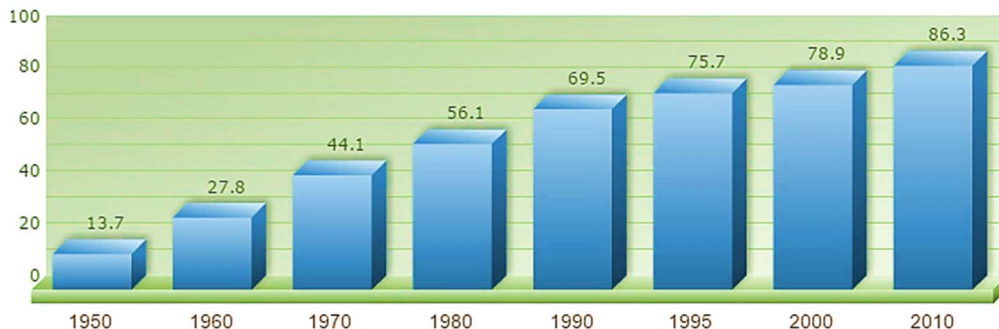


Figura 2.2. Porcentaje de viviendas con materiales resistentes en paredes- INEGI [18].

A partir de 1990, INEGI reportó que, más del 50% de las viviendas están construidas con techos de materiales resistentes (losa de concreto, tabique o ladrillo, viguetas con bovedillas y terrado con vigería) y en 2010 el porcentaje de viviendas incremento al 71.6% como se observa en la Figura 2.3.

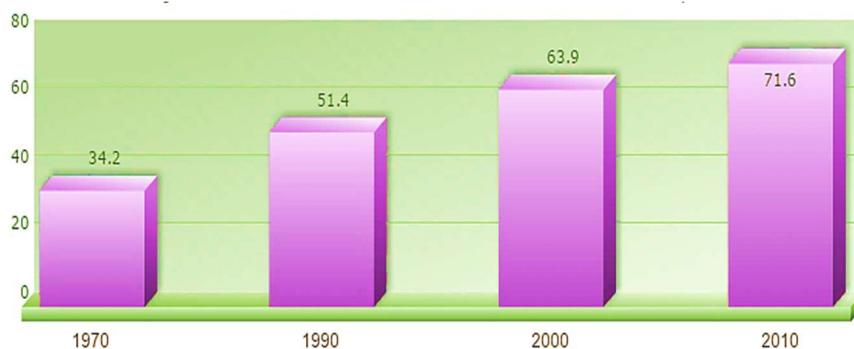


Figura 2.3. Porcentaje de viviendas con materiales resistentes en techos - INEGI [18].

### 2.1.3. Radiación solar en superficie inclinadas

Esta sección es desarrollada en base a la información contenida en las referencias[8] y [19].

La radiación total que incide sobre una superficie inclinada puede ser determinada a partir de la radiación total que recibe una superficie horizontal en el mismo instante y lugar de interés.

Para esto, es necesario determinar la ubicación del sol respecto a la localización geográfica del elemento de interés.

El tiempo solar, que es diferente al tiempo local, es un concepto utilizado para determinar todas las relaciones respecto a la ubicación de la tierra respecto al sol y se determina mediante la ecuación 2.2, donde las longitudes son consideradas en grados oeste [19].

$$t_{sol} = t_{std} + \frac{(L_{std} - L_{loc})}{15} + \frac{E}{60} \quad 2.2$$

La longitud estándar se determina multiplicando por 15 a la diferencia entre la hora estándar local y la hora del meridiano de Greenwich. El parámetro E corresponde al a ecuación del tiempo y se define mediante la ecuación 2.3.

$$E = 9.87 * \sin 2B - 7.53 * \cos \left( 360^\circ * \frac{n - 81}{364} \right) - 1.5 * \sin \left( 360^\circ * \frac{n - 81}{364} \right) \quad 2.3$$

Debido a que, la Tierra está en constante movimiento alrededor del sol, la ubicación del sol respecto a cualquier punto del planeta se define mediante ángulo cenital ( $\theta_s$ ) y acimutal ( $\phi_s$ ), los cuales dependen de la declinación ( $\delta$ ), ángulo de la hora solar ( $\omega$ ) y de la latitud ( $\lambda$ ) como se indica en la Figura 2.4 y en la ecuación 2.4 y la ecuación 2.5

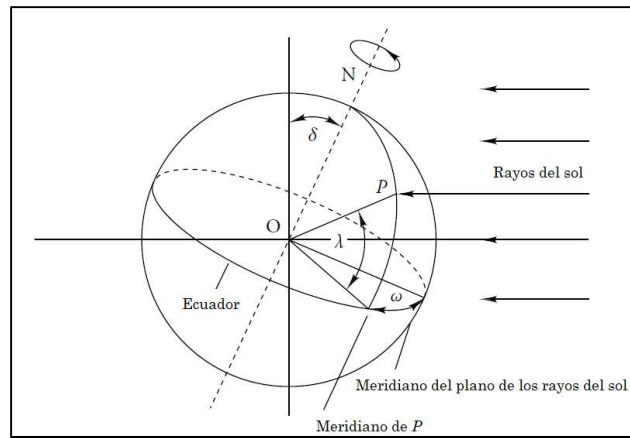


Figura 2.4 Latitud, ángulo de hora y declinación de la Tierra [8].

$$\cos \theta_s = \cos \lambda * \cos \delta * \cos \omega + \sin \lambda * \sin \delta \quad 2.4$$

$$\sin \phi_s = \frac{\cos \delta * \sin \omega}{\sin \theta_s} \quad 2.5$$

La declinación y el ángulo de hora solar son función de la hora, día y ubicación del punto analizado como se demuestra en la ecuación 2.6 y la ecuación 2.7.

$$\sin \delta = -\sin 23.45^\circ * \cos \left( \frac{360^\circ * (d + 10)}{365.25} \right) \quad 2.6$$

$$\omega = \frac{(t_{sol} - 12) * 360^\circ}{24} \quad 2.7$$

Para determinar la dirección en la cual incide la radiación solar directa sobre una superficie inclinada, es necesario determinar el ángulo de incidencia ( $\theta_i$ ) mediante la ecuación 2.8, donde  $\phi_p$  es la orientación de la superficie analizada, siendo Norte =  $0^\circ$  y Oeste =  $90^\circ$ , como se observa en la Figura 2.5.

$$\theta_i = \sin \theta_s * \cos(\phi_s - \phi_p) \quad 2.8$$



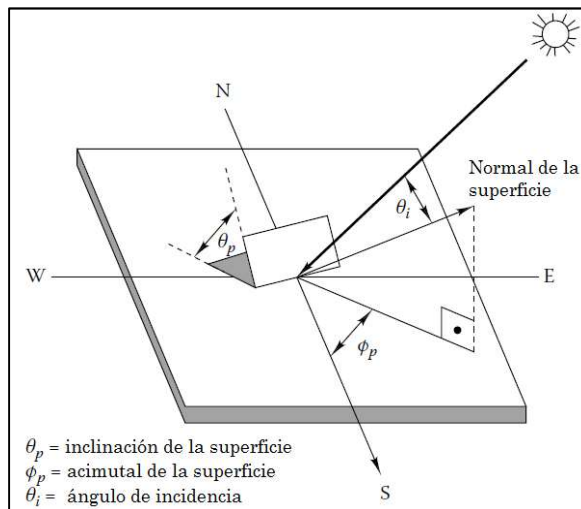


Figura 2.5 Ángulos formados entre la radiación solar incidente y la superficie expuesta [8].

La radiación solar que incide en la superficie de la Tierra está compuesta por la radiación directa, que depende la dirección de incidencia de radiación ( $I_{dir}$ ), y de la radiación difusa, que es independiente de la dirección ( $I_{dif}$ ) [20]. Es por esta razón que la radiación global incidente sobre una superficie inclinada a 90 grados, como la pared, se determina con la ecuación 2.9.

$$I_{par} = I_{dir} * \cos \theta_i + \frac{I_{dif}}{2} + \frac{I_{glob} * \rho_g}{2} \quad 2.9$$

La reflectancia del suelo  $\rho_g$ , depende del tipo de superficie externa que rodea al elemento que se analiza. En la Tabla 2.4 se presenta la reflectancia de superficies exteriores comunes, entre las que se encuentran superficies naturales, artificiales, vegetación y superficies de edificaciones.

Superficie	Reflectancia $\rho_g$
Suelos (arcilla, barro, etc.)	0.14
Agua (reflectancia para grande ángulo de incidencia)	0.07
Cubierta bituminosa y de grava	0.13
Asfalto	0.10
Superficie oscura de edificios: Ladrillo rojo, pintura oscura, etc.	0.27
Superficies claras de edificios: Ladrillo claro, pintura clara, etc.	0.60
Concreto nuevo	0.35
Concreto viejo	0.25
Superficie de roca triturada	0.20
Hojas, muertas	0.30
Bosques en otoño, cultivos de campo maduros, plantas	0.26
Césped seco	0.20
Césped verde	0.26

Tabla 2.4. Reflectancia de superficies externas comunes [8].

Para determinar la radiación directa y difusa es necesario conocer la insolación fuera de la atmosfera, para lo cual se utiliza la ecuación 2.10.

$$I_0 = \left(1 + 0.033 * \cos\left(\frac{360 * d}{365.25}\right)\right) * 1373 \quad 2.10$$

La radiación difusa se determina tomando en cuenta la siguiente relación basada en el parámetro  $k_T$ , el cual se determina mediante la ecuación 2.11.

$$\frac{I_{dif}}{I_{glob}} = \begin{cases} 1.0 - 0.09k_T & \text{para } 0 \leq k_T \leq 0.22 \\ 0.95511 - 0.1604k_T + 4.388k_T^2 - 16.638k_T^4 & \text{para } 0.22 \leq k_T \leq 0.8 \\ 0.165 & \text{para } k_T > 0.80 \end{cases}$$

$$k_T = \frac{I_{glob}}{I_0 \cos \theta_s} \quad 2.11$$

La radiación global está compuesta por la directa y la radiación difusa. Por esta razón la radiación directa se obtiene mediante la resta de la radiación total menos la difusa.

#### 2.1.4. Determinación de velocidad del viento en edificaciones.

En forma general, la información disponible acerca de la velocidad del viento en una edificación es aquella que se obtiene de las estaciones meteorológicas cercanas. Los anemómetros son instalados a una altura aproximada de 10 m. Cuando la altura del edificio difiere de la altura del punto de medición de la estación meteorológica es necesario determinar la velocidad del viento real o aproximada cerca en el sitio de interés. Para esto se utiliza la relación expresada en la ecuación 2.12, la cual permite determinar la velocidad del viento ininterrumpido que se aproxima a una edificación en su terreno local ( $V_H$ ) a la altura de la edificación requerida ( $H$ ), a partir de la velocidad reportada por la estación meteorológica ( $V_{met}$ ) y la altura del anemómetro ( $H_{met}$ ) [13].

$$V_H = V_{met} * \left(\frac{d_{met}}{H_{met}}\right)^{a_{met}} * \left(\frac{H}{d}\right)^a \quad 2.12$$

Categoría del terreno	Descripción	Exponente (a)	Espesor de la capa en (d)
1	Los grandes centros urbanos, en los que, al menos el 50% de los edificios son superiores a 25 m, sobre una distancia de al menos 0,8 km o 10 veces la altura de la estructura contra el viento, lo que sea mayor.	0.33	460
2	Áreas urbanas y suburbanas, áreas boscosas u otros terrenos con numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas que tengan el tamaño de viviendas unifamiliares o mayores, a una distancia de al menos 460 m o 10 veces la altura de la estructura a favor del viento, lo que sea mayor.	0.22	370
3	Terreno abierto con obstrucciones dispersas con alturas generalmente inferiores a 9 m, incluido el terreno plano abierto típico de los alrededores de la estación meteorológica.	0.14	270
4	Áreas planas y sin obstrucciones expuestas al viento que fluye sobre el agua durante al menos 1,6 km, sobre una distancia de 460 m o 10 veces la altura de la estructura hacia el interior, lo que sea mayor.	0.10	210

Tabla 2.5. Parámetros de la capa límite atmosférica [13].

Los factores  $a$  y  $d$  son parámetros característicos de la capa límite atmosférica de acuerdo a la ubicación de la edificación y de la estación meteorológica ( $a_{\text{met}}$  y  $d_{\text{met}}$ ). Estos parámetros dependen de las características de la zona en la que se encuentran como se indica en la Tabla 2.5.

### 2.1.5. Método CLTD/SCL/CLF

La determinación de las cargas de enfriamiento permite seleccionar la capacidad del sistema de aire acondicionado requerido. Los métodos principales para el cálculo de cargas de refrigeración generalmente se caracterizan por: 1) estimación simple de la carga de enfriamiento en función del área de construcción basada en índices establecidos para edificaciones ubicadas en zonas climáticas comunes, 2) determinación de la carga máxima para un día o una hora crítica del año determinada en base a información estadística acerca de las condiciones climatológicas y al máximo calor ganado a causa de fuentes internas y 3) determinación de la carga de enfriamiento anual en base a parámetros de funcionamiento de la edificación más precisos y con información típica anual de la zona de interés, para lo cual se requiere la utilización de plataformas profesionales diseñadas para este fin [4].

Los métodos que se basan en las condiciones más críticas de la operación del sistema permiten conocer o estimar de forma sencilla, sin necesidad de programas computacionales avanzados, la capacidad requerida en el sistema de aire acondicionado. El método CLTD/SCL/CLF es un procedimiento manual que permite aproximar la carga de enfriamiento correspondiente a: calor ganado conducción a través de paredes, ventanas y techos (carga de enfriamiento externa), calor ganado por radiación solar a través materiales de ubicados en ventanas (fenestración) y calor ganado por fuentes de calor interna[7].

Este método utiliza los factores CLTD que permiten determinar la carga de enfriamiento a causa del calor ganado a través de paredes, techos y vidrios expuestas al sol, los factores CLF (cooling load factor) que permiten determinar la carga solar a través de ventanas y la carga térmica a causa de fuentes de calor internas y los factores SCL (solar cooling load) que permiten determinar, de forma más precisa, la carga solar a través del vidrio[7].

Los tres factores, anteriormente mencionados, consideran el tiempo de retraso para transferir el calor por conducción a través de las superficies opacas de la envolvente y el tiempo de retraso para convertir el calor ganado por radiación en carga de enfriamiento a causa del almacenamiento térmico [7].

Los factores CLTD para superficies exteriores (paredes y techos) al ser multiplicados por el coeficiente global de transferencia de calor y el área correspondiente permiten determinar la carga de enfriamiento generada a causa del calor ganado a través del elemento analizado. La expresión que permite dicho cálculo se presenta en la ecuación 2.13.

$$Q = U * A * CLTD_t \quad 2.13$$

Los valores de CLTD fueron determinados en función de la temperatura Sol-Aire, la cual es función de la temperatura ambiental y la radiación solar específicas de cada ubicación geográfica. Las condiciones estándar utilizadas por ASHRAE para determinar los

valores de CLTD reportados son las siguientes:

- Superficie exterior obscura (absorptancia solar alta)
- Temperatura del aire interior ( $T_i$ ): 25.5 °C (78°F)
- Temperatura exterior máxima ( $T_o$ ): 35°C (95°F)
- Temperatura media exterior ( $T_{om}$ ): 29.4 °C (85°F)
- Rango de temperatura diario: 11.7 °C (21°F)
- Coeficiente convectivo de transferencia de calor de la superficie exterior: 17 W/m<sup>2</sup>·°C (3 Btu/h·ft<sup>2</sup>·°F)
- Coeficiente convectivo de transferencia de calor de la superficie interna: 8.3 W/m<sup>2</sup>·°C (1.46 Btu/h·ft<sup>2</sup>·°F)
- Radiación solar típica en un día despejado en la latitud 40°N el 21 de julio.

ASHRAE publicó valores de CLTD para 10 tipos de techo plano considerando la presencia o ausencia de techo falso, 15 tipos de paredes en los que se encuentran 41 tipos de configuraciones considerando 8 orientaciones principales. Los CLTD fueron reportados en forma horaria para un periodo continuo de 24 horas. Cuando las características de diseño internas y ambientales son diferentes a las condiciones estándar, los valores de CLTD reportados pueden ser modificados mediante la ecuación 2.14 donde todos los parámetros están en °C y  $T_{om}$  se evalúa mediante la ecuación 2.15. Estas ecuaciones de corrección mantienen la restricción de que, la temperatura interna permanece constante.

$$CLTD_{corr} = CLTD + (25.55\text{ °C} - T_i) + (T_{om} - 29.44\text{ °C}) \quad 2.14$$

$$T_{om} = T_o - \frac{\text{Rango diario}}{2} \quad 2.15$$

Si las superficies externas presentan colores diferentes al considerado en las condiciones estándar o existe ventilación del espacio de aire encima del cielo raso ASHRAE no recomienda correcciones. Los valores de CLTD han sido reportados para diferentes latitudes y se requieren interpolaciones entre latitudes para que los valores utilizados se encuentren en un rango aceptable[8].

## 2.2. Revisión de literatura

Para determinar la carga de enfriamiento requerida por una edificación es necesario, en primera instancia, conocer la cantidad de calor que gana la edificación a través la envolvente. Considerando que el proceso de transferencia de calor se lleva a cabo en estado transitorio existen métodos exactos y métodos que utilizan soluciones numéricas para resolver el modelo matemático que representa en fenómeno. Debido a que la solución exacta corresponde a la solución realística que es difícil obtener, ASHRAE ha desarrollado métodos para la estimación de cargas de enfriamiento [1]. El método de las funciones de transferencia (TFM) es el más aproximado al concepto de balance de calor, en la primera etapa determina la cantidad de calor ganada y en la segunda establece la conversión del calor ganado en carga de enfriamiento. El método CLTD/SCL/CLF es una simplificación del método TFM y es utilizado para cálculos manuales aproximados. Una simplificación para el balance de calor establecido es posible realizar mediante la aplicación de los valores de la temperatura diferencial equivalente total (TETD/TA) y el método de las series de tiempo radiantes RTS [7],[13].

Debido a que varios de estos métodos fueron desarrollados para edificaciones y condiciones térmicas estándar, varios autores han investigado acerca de métodos matemáticos que permitan aplicar los métodos antes mencionados en edificaciones con características locales.

Yumrutas et al. [21], 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 conocida como Transformada Compleja Finita de Fourier (CFFT), la cual es aplicable debido a que los elementos están sometidos a condiciones de base periódica, en consecuencia, la respuesta varía de igual forma.

Mediante el modelo desarrollado es posible predecir la temperatura de la superficie interna y el flujo de calor del elemento analizado cada hora durante un periodo mínimo de 24 horas. Es por esta razón que requiere como datos de entrada la temperatura ambiente, la radiación solar sobre una superficie horizontal durante el día analizado, coeficiente de transferencia de calor internos y externos, y las propiedades termo-físicas de los materiales de cada una de las capas analizadas.

De acuerdo a los resultados obtenidos se observó que la técnica CFFT permite resolver el problema de interés de forma rápida sin un alto costo computacional como otros códigos de simulación de edificaciones.

Kaska et al. [22], 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 consiste en el cálculo de la temperatura en cada capa de una pared o techo plano mediante el análisis del fenómeno de transferencia de calor en estado transitorio aplicando la técnica CFFT [6]. Debido a que el fenómeno analizado depende de las condiciones climáticas locales, la modelación se realizó considerando los datos monitoreados de temperatura ambiental y radiación solar.

La parte experimental se llevó a cabo en dos cuartos que se encuentran climatizados y localizados en Gaziantep, Turquía. La particularidad de estos espacios acondicionados es que las paredes son de diferentes materiales típicamente utilizados para la construcción en la zona. Para la medición de temperatura utilizan termopares tipo K y fueron instaladas en cada punto de interés durante la construcción de los cuartos. Las temperaturas fueron monitoreadas cada minuto por periodos de 24 horas para posteriormente conocer su variación en intervalos de una hora. En base a los valores obtenidos experimentalmente se observó que el modelo utilizado para predecir las temperaturas de los elementos monitoreados presenta pequeñas diferencias, las cuales pueden ser debido a que, las propiedades termo-físicas de los materiales consideradas no fueron determinadas experimentalmente.

La mayor ganancia de calor se evidenció a través de la pared de briqueta a diferencia de la pared de hormigón celular que presentó la menor ganancia de calor. Esto demostró que la conductividad térmica y el calor específico del material cumple un rol muy importante en la transferencia de calor en elementos de la envolvente de una edificación.

Yumrutas et al. [23], en su investigación utilizaron la técnica CFFT para desarrollar una metodología que permite determinar los valores de TETD para paredes y techos multicapas. La metodología utilizada consiste en, determinar el tiempo de retraso (entre la

ocurrencia de la temperatura máxima de la superficie externa e interna del elemento) y el factor de decremento que establece diferencia, en magnitud, entre las temperaturas máximas que alcanza la superficie externa y la temperatura interna. En la investigación 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.

Los resultados obtenidos acerca del tiempo de retraso y el factor de decremento, fueron cercanos a los valores referenciales por lo que, la metodología fue validada. Adicionalmente, se determinó que los valores de TETD son mayores para colores oscuros de la superficie externa y altos valores de radiación solar y la temperatura ambiental. Los elementos con mayor resistencia térmica presentaron alto tiempo de retraso y un factor de decremento bajo.

Bansal et al. [10], mediante su investigación en el 2008 desarrollaron una metodología para el cálculo de CLTDs 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 considerando las condiciones climáticas locales. El modelo presentado permite calcular los valores de CLTD en intervalos de una hora durante el día del año deseado, en edificaciones construidas en cualquier parte del mundo. Para lo cual, es necesaria información climática apropiada de la región analizada

Como parámetro de verificación se calcularon CLTDs para condiciones estándares establecidas por ASHRAE y se observó que los valores calculados son cercanos a los valores presentados por ASHRAE y en consecuencia el modelo fue validado para el cálculo de la carga de enfriamiento a causa del calor ganado a través de paredes y techos diferentes a los presentados por ASHRAE.

Los valores obtenidos de CLTD para techos de edificaciones ubicadas en Kolkata están acorde con los establecidos por ASHRAE aplicado los factores de corrección propuestos, mientras que los factores CLTD para paredes presentaron una pequeña pero considerable diferencia con los tabulados. Por esta razón, la utilización de valores de CLTD para distintos tipos de paredes dados por ASHRAE no son precisos para condiciones diferentes a la estándar.

Adil et al. [1], realizaron una investigación a través de la cual determinaron los valores de CLTD utilizados en el método de cálculo de cargas de enfriamiento para espacios acondicionados de edificaciones construidas en cualquier ubicación geográfica, bajo condiciones climáticas propias de la zona y con paredes y techos construidos de acuerdo a los materiales y configuraciones típicas de cada región. Los valores de CLTD fueron determinados mediante un balance de energía, que establece que el flujo de calor a través de la pared o techo desde el exterior es igual al flujo de calor desde superficie interna del elemento analizado hacia el espacio acondicionado. Considerando las condiciones de frontera, el modelo matemático establecido es resuelto aplicando la técnica CFFT para obtener la distribución de temperatura cada hora durante el día de diseño.

La validación del procedimiento desarrollado se realiza calculando valores de CLTD para pared tipo 3, y techos tipo 2 y 13 con características y en ubicaciones referenciales en ASHRAE. De esta manera se conoce la exactitud de los resultados obtenidos teniendo como información referencia la información tabulada por ASHRAE. Una vez validado el procedimiento, se calculan los valores de CLTD para edificaciones construidas en Gaziantep – Turquía en base a datos climatológicos recopilados y considerando los

materiales y configuraciones comunes en la construcción de paredes y techos planos en la región. Mediante los resultados obtenidos se determinó que la metodología utilizada es válida para el cálculo de CLTD en elementos exteriores de edificaciones.

La investigación realizada aporta una metodología a través de la cual se puede obtener los valores de CLTD para cualquier tipo de material de paredes y techos planos en cualquier parte del mundo, es decir valores de CLTD precisos que consideran las condiciones reales del flujo de calor transitorio en un edificio ubicado en cualquier región, aumentando así la precisión del cálculo de cargas térmicas para el enfriamiento del aire en espacios acondicionados.

Rodríguez et al. [24], 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. En base a los resultados obtenidos se estableció que la metodología utilizada por SNAME sobredimensiono el sistema de aire acondicionado del buque en un 15.65%.

Suziyana et al. [25], 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. La edificación se encuentra ubicada en Malasia (latitud 4°N) y las condiciones climáticas consideradas corresponde al 21 de julio, temperatura interna 22.2°C y temperatura ambiental promedio 33°C. 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 CLTD. Determinaron 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 uso no eficiente de la energía eléctrica.

En base a la revisión de literatura se determinó que, el método CLTD/SCL/CLF es utilizado en varias aplicaciones y presenta ventajas frente a las metodologías utilizadas por los diseñadores de sistemas de climatización. También, se observó que los valores de CLTD utilizados en condiciones diferentes al estándar se determinan utilizando factores de corrección, ya que no se dispone de información para condiciones específicas. Es por esta razón que se consideró importante el estudio de la técnica CFFT para la determinación de factores CLTD en México.

### 3. MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO

La transferencia de calor a través de elementos opacos de la envolvente de una edificación presenta condiciones específicas que deben cumplirse para llevarse a cabo. Estas condiciones se representan matemáticamente mediante ecuaciones que caracterizan el fenómeno y para resolverlo es necesario establecer un modelo matemático que permita su análisis. Esta sección presenta dicho modelo y la metodología que se sigue para cumplir con este fin.

#### 3.1. Definición del problema

El presente proyecto se enfoca en el fenómeno de transferencia de calor en estado transitorio a través de techos planos y paredes que forman parte de la envolvente de una edificación. Los techos y las paredes analizados pueden estar conformados por una o varias capas de materiales diferentes.

La distribución de temperatura a través de un medio sólido puede ser obtenida a partir de un análisis de transferencia de calor por conducción considerando las condiciones térmicas y físicas en sus fronteras. La ecuación 3.1 es la expresión general de difusión de calor en coordenadas cartesianas.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad 3.1$$

Al considerar constante la conductividad térmica la ecuación 3.1 puede ser simplificada de la forma expresada en la ecuación 3.2

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad 3.2$$

Un elemento de la envolvente de una edificación está sometido a los cambios de la temperatura exterior (ambiente) y a la radiación solar, por esta razón el proceso de transferencia de calor a través de techos planos y paredes de un espacio acondicionado es altamente transitorio.

La transferencia de calor a través de paredes y techo ha sido considerada en una sola dimensión en la dirección vertical para techos y en dirección horizontal para paredes, dirección que corresponde al espesor de cada elemento debido a que sus dimensiones en las demás direcciones son considerablemente grandes en comparación al espesor[10]. En la Figura 3.1 se presenta un esquema de un techo plano o pared multicapa.

El modelo matemático del fenómeno de transferencia de calor analizado se basa en los siguientes supuestos:

- 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 interna se mantiene constante.
- Los coeficientes combinados de transferencia tanto internos como externos se mantienen constantes.

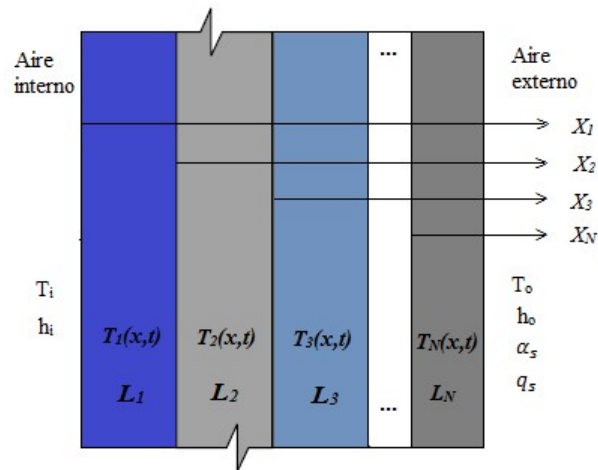


Figura 3.1 Modelo físico de una pared o un techo plano.

Bajo los supuestos listados anteriormente, la ecuación que gobierna el fenómeno que se desea analizar y las condiciones de frontera respectivas se presentan a continuación:

$$\frac{\partial^2 T_n}{\partial x_n^2} = \frac{1}{\alpha_n} \frac{\partial T_n}{\partial t} \quad 3.3$$

$$T|_{x,t=0} = T_i|_{x,t=0} \quad 3.4$$

$$h_i(T_i - T_1) = -k_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x_1} \right|_{x_1=0} \quad 3.5$$

$$-k_{n-1} \left. \frac{\partial T_{n-1}}{\partial x_{n-1}} \right|_{x_{n-1}=L_{n-1}} = -k_n \left. \frac{\partial T_n}{\partial x_n} \right|_{x_n=0} \quad \text{para } 2 \leq n \leq N \quad 3.6$$

$$T_{n-1}|_{x_{n-1}=L_{n-1}} = T_n|_{x_n=0} \quad \text{para } 2 \leq n \leq N \quad 3.7$$

$$-k_N \left. \frac{\partial T_N}{\partial x_N} \right|_{x_N=L_N} = h_o [T_N - T_o(t)] - \alpha_s q_s(t) \quad 3.8$$

El fenómeno a analizarse se define completamente con la ecuación 3.3 que corresponde a la ecuación gobernante. La ecuación 3.5 corresponde a la condición de frontera en la superficie interior del elemento de la envolvente, la ecuación 3.6 y la ecuación 3.7 corresponde condiciones térmicas a cumplirse en las zonas de contacto entre las capas, cuando son elementos conformados por varias capas y la ecuación 3.8 representa la

condición de frontera que debe cumplirse en la superficie que se encuentra expuesta a las condiciones ambientales.

Al resolver el sistema de ecuaciones establecidas se obtienen como resultado la temperatura de la pared o techo analizado en cualquier punto, es decir, es posible conocer la temperatura superficial tanto externa como interna, así como la temperatura interna entre capas.

Es importante mencionar que los supuestos detallados anteriormente y la definición de las ecuaciones que describen el fenómeno analizado fueron determinadas por Yumrutas et al. [21] en su trabajo mediante el cual desarrolló un método que permite resolver el problema de transferencia de calor descrito en esta sección.

## 3.2. Parámetros térmicos

### 3.2.1. Coeficientes combinados de transferencia de calor de superficie

Los techos y paredes son superficies expuestas al aire de su alrededor, razón por la cual, al existir una diferencia de temperatura presentan un intercambio de energía que involucra radiación y convección de forma simultánea [16].

Los coeficientes combinados de transferencia de calor superficial, también conocidos como coeficientes de transferencia de calor aparentes, indican la cantidad de calor transferido por convección y radiación (por unidad de tiempo y de área) entre una superficie interna o externa con el medio que los rodea, a causa de una diferencia de temperatura. Al asumir que la temperatura de los alrededores ( $T_{surr}$ ) es igual a la temperatura del aire ( $T_{\infty}$ ), es posible definir el coeficiente combinado de transferencia de calor de acuerdo a la ecuación 3.9. Siendo  $h_{conv}$  el coeficiente de transferencia de calor por convección y  $h_{rad}$  el coeficiente de transferencia de calor por radiación que considera únicamente la radiación de onda larga[13].

$$h_{comb} = h_{conv} + h_{rad} \quad 3.9$$

El coeficiente de transferencia de calor por radiación se define de acuerdo a la ecuación 3.10.

$$h_{rad} = \sigma * \varepsilon * (T_s^2 + T_{surr}^2) * (T_s + T_{surr}) \quad 3.10$$

Los coeficientes combinados de transferencia de calor interno y externo para superficies no metálicas presentan valores de 5 a 8.33 W/m<sup>2</sup>·K y 16.67 a 33.33 W/m<sup>2</sup>·K respectivamente [13].

### 3.2.2. Coeficiente de transferencia de calor por convección

Para determinar el coeficiente combinado de transferencia de calor se requiere conocer el coeficiente de transferencia de calor por convección, el cual depende del tipo de convección presente (natural, forzada o mixta) y de la velocidad del fluido.

El número de Nusselt es un número adimensional a partir del cual, se determina el coeficiente de transferencia por convección de acuerdo a la ecuación 3.11, donde  $L_c$  es la longitud característica de la superficie analizada y  $k_f$  la conductividad térmica del fluido

$$Nu = \frac{h_{conv} * L_c}{k_f} \quad 3.11$$

Los números adimensionales adicionales para determinar Nu son: Reynolds (Re), Prandtl(Pr), Grashof (Gr) y Rayleigh (Ra) y se calculan mediante las ecuaciones 3.12, 3.13, 3.14 y 3.15 respectivamente.

$$Re = \frac{V * L_c * \rho}{\mu} \quad 3.12$$

$$Pr = \frac{C_p * \mu}{k_f} \quad 3.13$$

$$Gr = \frac{g * \beta * \rho^2 * |\Delta T| * L_c^3}{\mu^2} \quad 3.14$$

$$Ra = Gr * Pr \quad 3.15$$

Donde,  $V$  corresponde a la velocidad del fluido,  $L_c$  es la longitud característica,  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre la superficie el aire,  $g$  es la gravedad y  $\beta$  es el coeficiente de expansión volumétrica es función de la temperatura del aire. Todas las propiedades deben ser evaluadas en función de la temperatura de película, que es la temperatura promedio entre la superficie y el aire[13].

El número de Nusselt promedio para una placa vertical sometida a convección natural se determina mediante la relación empírica establecida en la ecuación 3.16, considerando la altura de la placa como longitud característica y para una placa horizontal se determina mediante la relación presentada en la ecuación 3.17, considerando la longitud característica como la relación entre el área y el perímetro [26].

$$Nu = \left[ \left( \frac{2}{\ln \left( 1 + \frac{2}{C_{lam} * Ra_L^{0.25}} \right)} \right)^6 + \left( \frac{C_{turb} * Ra_L^{\frac{1}{3}}}{1 + 1.4 \times 10^9 \frac{Pr}{Ra_L}} \right)^6 \right]^{1/6} \quad 3.16$$

$$C_{lam} = \frac{0.671}{\left[ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{4/9}} \quad y \quad C_{turb} = \frac{0.13 Pr^{0.22}}{[1 + 0.61 Pr^{0.81}]^{0.42}}$$

$$Nu = \left[ \left( \frac{1.4}{\ln \left( 1 + \frac{1.4}{0.835 C_{lam} * Ra_{Lc}^{0.25}} \right)} \right)^{10} + \left( C_{turb} Ra_{Lc}^{\frac{1}{3}} \right)^{10} \right]^{1/10} \quad 3.17$$

$$C_{lam} = \frac{0.671}{\left[ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{4/9}} \quad y \quad C_{turb} = 0.14 \frac{1 + 0.0107 Pr}{1 + 0.01 Pr}$$

Cuando existe convección forzada en una placa plana y el fluido es laminar se utiliza la ecuación 3.18 para determinar el número de Nusselt promedio ( $Nu$ ) en la superficie y si el flujo es turbulento se utiliza la ecuación 3.19[16].

$$Nu = 0.664 * Re^{1/2} * Pr^{1/3} \quad 3.18$$

$$Nu = 0.037 * Re^{4/5} * Pr^{1/3} \quad 3.19$$

La convección natural se presenta en fluidos que están sometidos a fuerzas gravitacionales y debe ser considerada cuando  $Gr/Re^2$  se encuentra entre 0.1 y 10 [16].

### 3.2.3. Coeficiente global de transferencia de calor

Debido a que las paredes y techos de una edificación son construidos con diversas configuraciones y distintos tipos de materiales es necesario conocer la resistencia térmica de todas las capas homogéneas, la resistencia térmica de las capas superficiales de los dos lados de la construcción (interna y externa) y la resistencia térmica de los espacios de aire de la construcción para determinar su transmitancia o coeficiente global de transferencia de calor [13]. Se define como la inversa de la resistencia térmica total y se determina mediante la ecuación 3.20.

$$U = \left( \frac{1}{h_i} + \sum_{n=1}^N \frac{L_n}{k_n} + \frac{1}{h_o} \right)^{-1} \quad 3.20$$

El coeficiente global de transferencia de calor  $U$  permite determinar la cantidad de calor neta que es transmitida a través de cada elemento de la envolvente mediante la multiplicación del coeficiente por el área y por la diferencia de temperatura entre su temperatura interior y su temperatura exterior [8].

### 3.2.4. Estimación de la diferencia de temperatura de enfriamiento (CLTD)

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 por conducción del calor ganado a través de los elementos opacos de la envolvente[7].

La carga de refrigeración por conducción, en estado estable a través de la envolvente, se determina mediante la ecuación 3.21 [8].

$$Q = U * A * (T_o - T_i) \quad 3.21$$

Debido a que, la temperatura del aire tanto interna como externa no permanecen constantes, la transferencia de calor a través de la envolvente es de naturaleza transitoria, por lo que, la ecuación 3.21 debe ser modificada mediante la utilización de CLTD como se presentó en la ecuación 2.13.

Considerando que, únicamente el calor ganado por convección, que puede ser determinado mediante la ecuación 3.22, es considerado como carga de enfriamiento sin retraso[8] y esta su vez es determinada por la ecuación 2.13 se determina que, los factores CLTD pueden expresarse como función de la distribución de temperatura superficial interna ( $T_s$ ) del elemento analizado como se presenta en la ecuación 3.23[1].

$$Q = h_i A (T_s(t) - T_i) \quad 3.22$$

$$CLTD = \frac{h_i}{U} (T_s(t) - T_i) \quad 3.23$$

### 3.3. Metodología para resolver el problema

El modelo matemático conformado por la ecuación gobernante, condiciones iniciales y condiciones de frontera presentado en la sección anterior, es resuelto mediante la aplicación de la técnica de la transformada compleja finita de Fourier. Para esto se desarrolló un algoritmo computacional que permite determinar la temperatura de la superficie interna del elemento analizado considerando las características térmicas y físicas del elemento en estudio y las condiciones climatológicas locales, como radiación solar y temperatura.

Para determinar la validez de los datos calculados por el algoritmo, se desarrolló una parte experimental basada en la norma ASTM (C1046:2013), la cual establece las técnicas que deben ser empleadas en la implementación de termopares para mediciones en sitio que permitan determinar el comportamiento térmico en estado transitorio de elementos opacos de la envoltura de una edificación[27] y en la norma ISO (9869-1:2014)[28], la cual define las características de operación del sistema de adquisición de datos para mediciones en sitio de la resistencia térmica y transmitancia térmica de componentes de edificaciones. A partir de dichas normas se realizó el diseño de experimento para monitorear la temperatura superficial interna y externa de una pared y un techo plano que forman parte de un cuarto de monitoreo ubicado en la zona sur de la ciudad de Monterrey, en el campus del Tecnológico de Monterrey.

Una vez validados los datos obtenidos de la temperatura de la superficie interna del elemento de la envolvente, se calcula los valores de CLTD para los componentes analizados y para componentes con diferentes condiciones climatológicas locales.

## 4. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN TEÓRICA

En este capítulo se presenta, en forma detallada, el método matemático utilizado para resolver el modelo matemático descrito en el capítulo anterior y el algoritmo computacional desarrollado.

### 4.1. Método matemático aplicado

#### 4.1.1. Serie de Fourier

Las series de Fourier son una descomposición de una señal periódica en términos de una señal básica, como lo son las funciones trigonométricas de senos y cosenos, cuyas frecuencias son múltiplos de la señal original [29]. Si  $u(t)$  es una función periódica con un periodo  $T$ , su serie de Fourier se presenta en la ecuación 4.1.

$$u(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{j=1}^{\infty} \left( a_j \cos 2\pi \frac{j}{T} t + b_j \sin 2\pi \frac{j}{T} t \right) \quad 4.1$$

La ecuación de Euler establece que  $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$  por lo que las señales básicas de las funciones trigonométrica seno y coseno se puede definir de acuerdo a la ecuación 4.2 y la ecuación 4.3 respectivamente.

$$\sin \theta = \frac{e^{i\theta} - e^{-i\theta}}{2i} \quad 4.2$$

$$\cos \theta = \frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2} \quad 4.3$$

Para facilitar el análisis algebraico se utiliza  $e^{i\theta}$  en vez de  $\cos \theta$  y  $\sin \theta$ , por lo que la serie compleja de Fourier se define como la ecuación 4.4, donde  $F$  corresponde a la frecuencia que es igual al inverso del periodo ( $1/T$ ).

$$u(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} U_j e^{i2\pi j F t} \quad 4.4$$

Si los coeficientes complejos de Fourier son obtenidos y  $u(t)$  es un valor real, los coeficientes de Fourier se determinan mediante la ecuación 4.5 y la ecuación 4.6.

$$a_j = 2\Re(U_j) \quad [\Re(U_j) \text{ parte real de } U_j] \quad 4.5$$

$$b_j = -2\Im(U_j) \quad [\Im(U_j) \text{ parte imaginaria de } U_j] \quad 4.6$$

Información más detallada acerca de estos conceptos se puede obtener en la referencia [30] a partir de la cual se desarrolló esta sección.

#### 4.1.2. Técnica de la transformada finita de Fourier (CFFT)

La información presentada en esta sección se basa en los conceptos detallados en el trabajo publicado por Yumrutas ,2005 [21].

La CFFT aplicada al modelo matemático que estudia el fenómeno en estado transitorio (explicado en la sección 3.1) considera que el comportamiento térmico de los elementos de la envolvente es el mismo cada veinticuatro horas. Es por esta razón que esta técnica utiliza una condición de periodicidad representada por la ecuación 4.7.

$$T_n(x_n, t) = T_n(x_n, t + p) \quad 4.7$$

Donde  $n$  es el índice que determina la capa del elemento analizado y  $p$  es el período de tiempo en horas, que para el caso analizado corresponde a 24 horas.

El modelo matemático presentado en la sección 3.1 es transformado a un modelo adimensional mediante la utilización de las siguientes variables adimensionales:

$$z_n = \frac{x_n}{L_n} \quad 4.8$$

$$b_i = \frac{h_i L_1}{k_1} \quad 4.9$$

$$b_o = \frac{h_o L_N}{k_N} \quad 4.10$$

$$s_{n,m} = \frac{k_n L_m}{k_m L_n} \quad 4.11$$

$$e_n = \frac{h_o L_N}{k_N} \quad 4.12$$

$$q(t) = \frac{\alpha_s L_N q_s(t)}{k_N} \quad 4.13$$

$$\tau = \frac{t}{p} \quad 4.14$$

Aplicando las variables adimensionales, la ecuación gobernante de transferencia de calor toma la forma de la ecuación 4.15 y las condiciones de frontera toman la forma de las ecuaciones siguientes:

$$\frac{\partial^2 T_n}{\partial z_n^2} = e_n \frac{\partial T_n}{\partial t} \quad 4.15$$

$$b_i(T_i - T_1) = -\frac{\partial T_1}{\partial z_1} \Big|_{z_1=0} \quad 4.16$$

$$-s_{n-1,n} \frac{\partial T_{n-1}}{\partial z_{n-1}} \Big|_{z_{n-1}=1} = \frac{\partial T_n}{\partial z_n} \Big|_{z_n=0} \quad \text{para } 2 \leq n \leq N \quad 4.17$$

$$T_{n-1} \Big|_{z_{n-1}=1} = T_n \Big|_{z_n=0} \quad \text{para } 2 \leq n \leq N \quad 4.18$$

$$-\left. \frac{\partial T_N}{\partial z_N} \right|_{z_N=1} = b_o [T_N - T_o(\tau)] - q(\tau) \quad 4.19$$

La condición de periodicidad para el modelo adimensional es  $T_n(z_n, t) = T_n(z_n, \tau + 1)$  y al aplicarlo en la ecuación diferencial 4.15 es posible resolverla mediante la aplicación de CFFT como se describe en las siguientes ecuaciones:

$$T_n(z_n, \tau) = \sum_{j=-M}^M T_{nj} e^{i2\pi j\tau} \quad 4.20$$

$$T_{nj}(z_n) = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} T_n(z_n, \tau) e^{-i2\pi j\tau} d\tau \quad \text{para } j \neq 0 \quad 4.21$$

$$T_{no}(z_n) = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} T_n(z_n, \tau) d\tau \quad \text{para } j = 0 \quad 4.22$$

Si la serie de Fourier compleja se aplica en el modelo adimensional y se supone que la temperatura interior del aire es constante, el modelo matemático se rige por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial^2 T_{nj}}{\partial z_n^2} - ie_n 2\pi j T_{nj} = 0 \quad 4.23$$

$$b_i (T_i - T_{1j}) = -\frac{\partial T_{1j}}{\partial z_1} \quad \text{at } z_1 = 0 \quad 4.24$$

$$s_{n-1,n} \frac{\partial T_{(n-1)j}}{\partial z_{n-1}} (z_{n-1} = 1) = \frac{\partial T_{nj}}{\partial z_n} (z_n = 0) \quad \text{to } 2 \leq n \leq N \quad 4.25$$

$$T_{(n-1)j} (z_{n-1} = 1) = T_{nj} (z_n = 0) \quad \text{to } 2 \leq n \leq N \quad 4.26$$

$$-\left. \frac{\partial T_{Nj}}{\partial z_N} \right|_{z_N=1} = b_o [T_{Nj} - T_{oj}] - q_j \quad \text{at } z_N = 1 \quad 4.27$$

La solución general al modelo matemático modificado desarrollada por Yumrutas et al. [21], considerando las condiciones de frontera, está formada por tres partes.

La primera parte se refiere a de la temperatura del aire exterior que se puede expresar para un período de 24 horas como se muestra en las ecuaciones 4.28 y 4.29.

$$T_{oo} = \frac{1}{24} \sum_{m=1}^{24} t_m \quad 4.28$$

$$T_{oj} = \frac{1}{-i2\pi j} \sum_{m=1}^{24} t_m [e^{-i2\pi j(m-13)/24} - e^{-i2\pi j(m-12)/24}] \quad \text{para } j \neq 0 \quad 4.29$$



Donde  $t_m$  es la temperatura horaria promedio del aire exterior en C que corresponde a un dato requerido para la simulación.

La segunda parte corresponde a los coeficientes complejos de Fourier del flujo de radiación solar determinados para un período de 24 horas y presenta la forma de las siguientes ecuaciones:

$$q_o = \frac{1}{24} \sum_{m=1}^{24} b_m \quad 4.30$$

$$q_j = \frac{1}{-i2\pi j} \sum_{m=1}^{24} b_m [e^{-i2\pi j(m-13)/24} - e^{-i2\pi j(m-12)/24}] \quad \text{para } j \neq 0 \quad 4.31$$

$$b_m = \frac{\alpha_2 L q_m}{k} \quad \text{para } 1 \leq m \leq 24 \quad 4.32$$

Donde  $q_m$  es el flujo de radiación solar sobre la superficie externa en W/m<sup>2</sup> para cada hora durante el periodo analizado. Este corresponde a un dato que se determina en función de la ubicación real de la edificación.

La tercera parte es acerca de los coeficientes complejos de Fourier para determinar la temperatura de cada capa del elemento de la envolvente, considerando las condiciones de frontera que los caracteriza. La solución general desarrollada para  $T_{nj}$ , con n número de capas tiene un número considerable de incógnitas que deben ser resueltas para cada  $j$ .

Cuando  $j=0$ , el sistema de ecuaciones a ser resuelto para obtener los coeficientes complejos de Fourier está conformado por las siguientes ecuaciones:

$$T_{no} - A_n z_n - B_n = 0 \quad 4.33$$

$$b_i(T_i - B_1) + A_1 = 0 \quad 4.34$$

$$s_{n-1,n} A_{n-1} - A_n = 0 \quad \text{para } 2 \leq n \leq N \quad 4.35$$

$$A_{n-1} + B_{n-1} - B_n = 0 \quad \text{para } 2 \leq n \leq N \quad 4.36$$

$$-A_N - b_o(A_N + B_N - T_{oo}) + q_o = 0 \quad 4.37$$

Cuando  $j \neq 0$  el sistema de ecuaciones a ser resuelto para obtener los coeficientes complejos de Fourier está conformado por las siguientes ecuaciones:

$$T_{nj}(z_n) = C_{nj} \sinh(\gamma_{nj} z_n) + D_{nj} \cosh(\gamma_{nj} z_n) \quad 4.38$$

$$\gamma_{nj} = (1 + i) \sqrt{\pi j e_n} \quad 4.39$$

$$D_{1j}b_i = C_{1j}\gamma_{1j} \quad 4.40$$

$$\text{para } 2 \leq n \leq N$$

$$s_{n-1,2}\{C_{(n-1)j}\gamma_{(n-1)j} \cosh(\gamma_{(n-1)j}) + D_{(n-1)j}\gamma_{(n-1)j} \sinh(\gamma_{(n-1)j})\} = C_{2j}\gamma_{nj} \quad 4.41$$

$$C_{1j} \sinh(\gamma_{1j}) + D_{1j} \cosh(\gamma_{1j}) = D_{2j} \text{ para } 2 \leq n \leq N \quad 4.42$$

$$\text{para } 2 \leq n \leq N$$

$$\begin{aligned} C_{Nj}\gamma_{Nj} \cosh(\gamma_{Nj}) + D_{Nj}\gamma_{Nj} \sinh(\gamma_{Nj}) \\ = q_j - b_o\{C_{Nj} \sinh(\gamma_{Nj}) + D_{Nj}\gamma_{Nj} \cosh(\gamma_{Nj}) - T_{oj}\} \end{aligned} \quad 4.43$$

Es muy importante saber que todo el sistema de ecuaciones debe ser resuelto para cada valor  $j$  y este cambia de acuerdo con los números en términos requeridos de la transformada de la serie de Fourier y el número de capas del techo o pared analizado. Como ejemplo, si el techo analizado está conformado por 3 capas y se utilizan dos coeficientes de la serie de Fourier se requiere resolver 3 sistemas de 9 ecuaciones cada uno en cada hora analizada, considerando que el resultado de la hora 5, por ejemplo, requiere el análisis de las 4 horas anteriores, ya que el proceso de transferencia de calor de los elementos de la envolvente no es estado estable.

## 4.2. Descripción del algoritmo

Se desarrolló un algoritmo de cálculo para determinar los valores de CLTD en un techo plano como se observa en la Figura 4.1 y un algoritmo similar para el cálculo de los valores de CLTD en una pared. La diferencia entre estos radica en que, el análisis de una pared utiliza un procedimiento adicional para determinar la radiación incidente sobre la pared (en función de la orientación, ubicación geográfica y día del año) como se observa en la Figura 4.2.

### 4.2.1. Datos de entrada y parámetros dimensionales

Los algoritmos fueron desarrollados considerando la siguiente información como datos de entrada, en el sistema internacional de unidades:

- Datos climatológicos (radiación solar global y temperatura ambiental) de un día completo (24 horas), promediados cada hora.
- Características termo-físicas de cada capa del elemento analizado (conductividad térmica, calor específico, absorptancia solar, densidad y espesor).
- Parámetros que caracterizan la transferencia de calor por conducción en elemento (temperatura del aire interno, coeficientes combinados de transferencia de calor de la superficie interna y externa que considera radiación y convección).

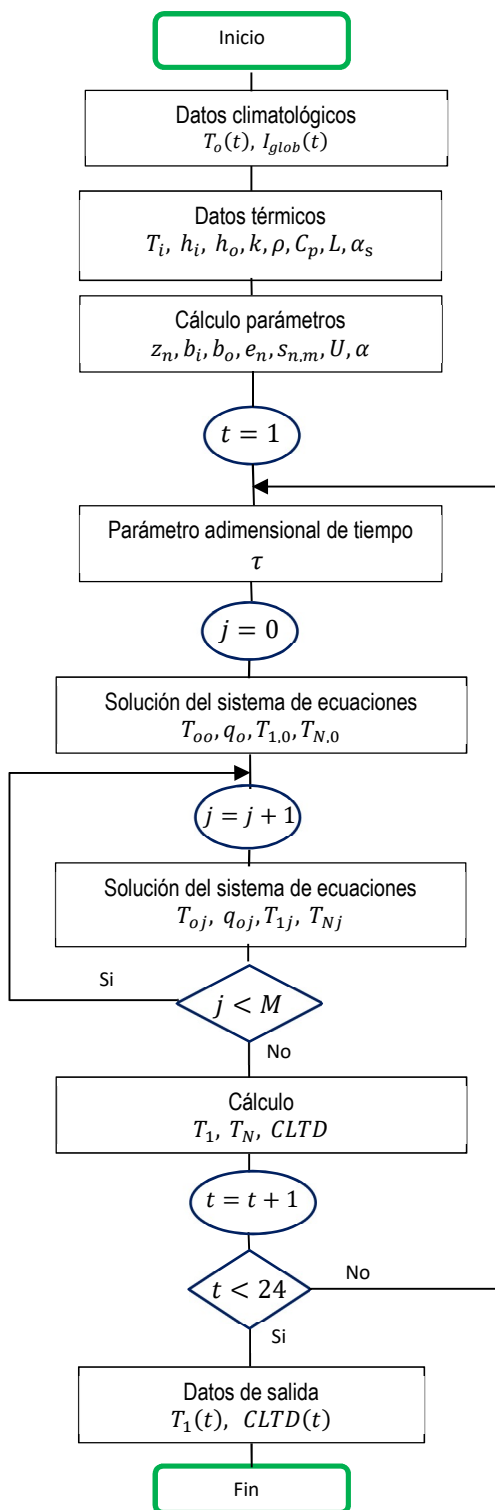


Figura 4.1. Diagrama de flujo del algoritmo desarrollado para el análisis en techos planos de  $N$  capas.

La información detallada anteriormente es requerida para el análisis de los dos tipos de elementos, pared y techo plano. Si el elemento analizado es una pared se requieren los siguientes datos adicionales para el cálculo de la radiación incidente:

- Fecha de los datos climatológicos.
- Latitud y longitud de la ubicación de la edificación.
- Reflectancia del suelo.
- Orientación de la pared, siendo la dirección sur  $0^\circ$  y norte  $180^\circ$ .

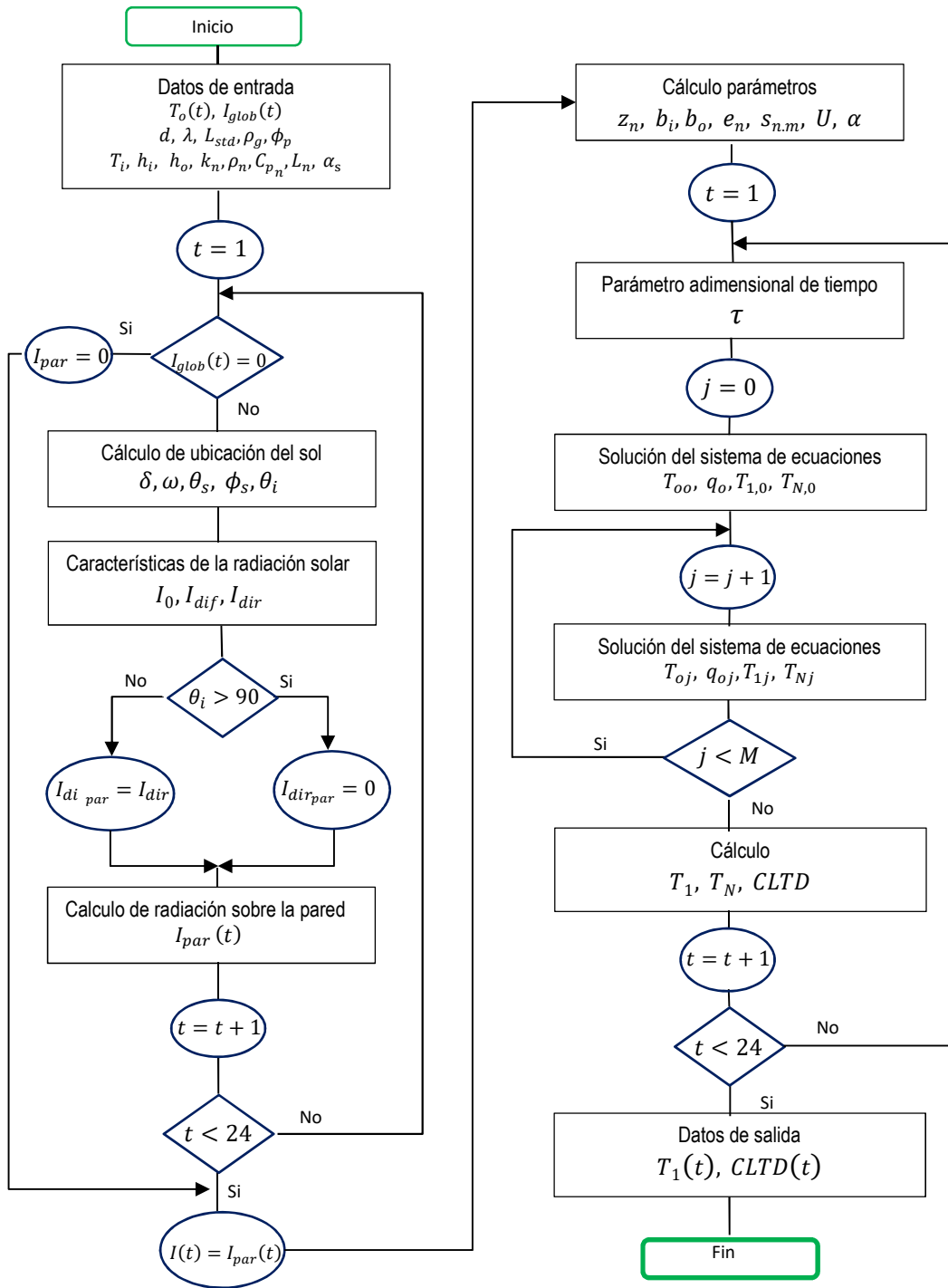


Figura 4.2. Diagrama de flujo del algoritmo desarrollado para en análisis en paredes de  $N$  capas.

En base a los datos mencionados y mediante las ecuaciones presentadas en la sección 4.1 (desde ecuación 4.8 hasta la ecuación 4.12) se determinan los parámetros adimensionales, la difusividad térmica (ecuación 2.1) para todas las capas que conforman el elemento y el coeficiente global de transferencia de calor (ecuación 3.20). Estos parámetros se calculan fuera de la secuencia de programación en la que el tiempo cambia (ver Figura 4.1) debido a que son parámetros constantes. Los coeficientes combinados de transferencia de calor son calculados de manera independiente al algoritmo en base a los conceptos y correlaciones definidas en la sección 3.2.1.

#### 4.2.2. Determinación temperatura superficial y CLTD

La serie compleja de Fourier de la temperatura superficial, descrita en la ecuación 4.20, tiene “j” número de elementos de acuerdo al concepto explicado mediante la ecuación 4.1. Es por esta razón que se desarrolló un lazo de programación en el cual “j” varía desde cero hasta M (número de coeficientes de la serie), definido de acuerdo a la precisión esperada de los resultados obtenidos.

El primer valor asignado a “j” es cero con el cual se determina el primer coeficiente de la serie de Fourier ( $T_{1,0}$ ) mediante una subrutina que permite resolver el sistema de ecuaciones conformado por las ecuaciones 4.33 - 4.37, obteniéndose como resultado un número real. El sistema de ecuaciones requiere como dato el primer coeficiente de la serie de Fourier de la temperatura ambiental ( $T_{oo}$ ) y del flujo de radiación solar incidente ( $q_{oo}$ ), para lo cual, se utiliza las ecuaciones 4.28 y 4.30 respectivamente.

Al terminar con el cálculo del primer coeficiente, se incrementa el valor de “j” en una unidad, se calcula el coeficiente requerido de la temperatura ambiental ( $T_{oj}$ ) y del flujo de radiación solar incidente ( $q_{oj}$ ) mediante las ecuaciones 4.29 y 4.31 respectivamente. Posteriormente, se utiliza una subrutina que permite resolver el sistema de ecuaciones definido por la ecuación 4.38 hasta la ecuación 4.43. Como resultado se obtiene un número complejo ( $T_{1,j}$ ) del cual se obtiene los factores  $a_j$  y  $b_j$  requeridos en la ecuación 4.1.

Cuando “j” alcanza un valor igual a M, se suman todos los coeficientes calculados de la serie de Fourier y se obtiene como resultado la temperatura de la superficie interna requerida. Los valores de CLTD son determinados en función de los datos de entrada establecidos y la temperatura calculada conforme a la ecuación 3.23 que es una ecuación directa donde la temperatura de la superficie interna es el parámetro que requiere un método más complejo para su determinación.

Este procedimiento de cálculo se realiza para cada hora del día, considerando la radiación solar global y la temperatura correspondiente a la hora analizada. Es por esta razón que en la Figura 4.1 la secuencia de programación descrita se encuentra dentro de un lazo donde el tiempo ( $t$ ) varía de 1 a 24, ya que la metodología utilizada considera el almacenamiento de calor durante el día, en la pared o el techo, y el rechazo del mismo hacia el interior en horas posteriores. Es por esta razón que, no es posible determinar la temperatura de la superficie interna al medio día únicamente con la radiación incidente y la temperatura ambiental, ya que no es un proceso en estado estable.

### 4.2.3. Determinación de la radiación incidente

La radiación solar (el programa requiere como dato de entrada) corresponde a la radiación global medida sobre una superficie horizontal. Es por esta razón que al evaluar el ángulo de inclinación de la superficie ( $\theta_p$ ) de un techo, el dato de entrada corresponde a la radiación incidente.

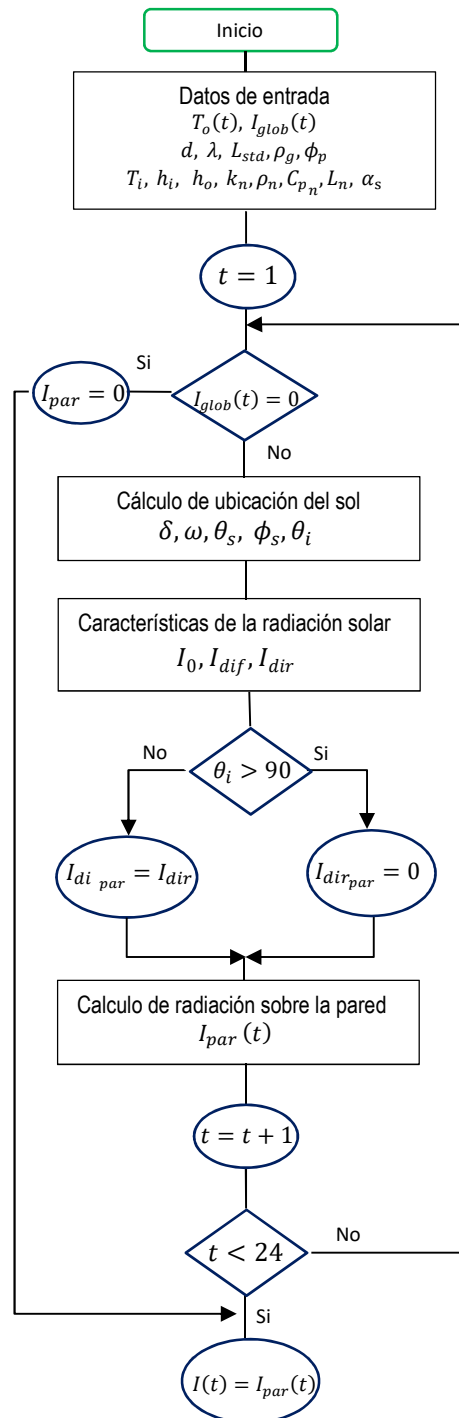


Figura 4.3. Diagrama de flujo de la subrutina- radiación incidente sobre una pared.

Al disponer únicamente de la radiación global sobre una superficie horizontal es necesario determinar la radiación incidente sobre una superficie inclinada cuando el elemento analizado es una pared. Para esto se desarrolló una subrutina que calcula la radiación incidente sobre una superficie inclinada a  $90^\circ$  en base a la sección 2.1.3.

En la subrutina, como primer paso, se verifica el valor de la radiación global, ya que, al presentar un valor de cero significa que no existe radiación incidente sobre la pared como se muestra en la Figura 4.3. Cuando la radiación global no es nula, se determina los siguientes parámetros: declinación de la Tierra, el ángulo de la hora solar, el ángulo cenital y acimutal del sol, ángulo de incidencia, radiación solar fuera de la atmósfera, radiación directa y difusa.

El ángulo de incidencia se evalúa respecto a la dirección normal de la pared (ver Figura 2.5), por lo que, si alcanza un valor mayor o igual a  $90^\circ$  no hay radiación directa sobre la superficie. Es por esta razón que, la subrutina presenta una restricción para determinar el valor de la radiación directa incidente en una pared como se muestra en la Figura 4.3.

La radiación total incidente sobre una pared se determinó mediante la ecuación 2.9, fue calculada para cada hora del día dentro de un lazo de programación en el cual el tiempo varía de 1 a 24 horas.

## 5. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN EXPERIMENTAL

Se realizaron experimentos para medir las temperaturas superficiales externas e internas en una pared y un techo plano bajo condiciones locales de Monterrey. Estas mediciones se compararon con los resultados obtenidos de la metodología CFFT utilizada en el algoritmo desarrollado. Estos experimentos permiten determinar los valores de CLTD mediante el uso de una relación directa. Para esto se requiere obtener información suficiente y confiable que permita conocer el comportamiento térmico en estado transitorio de los elementos externos anteriormente mencionados como respuesta a las condiciones térmicas tanto internas como externas.

### 5.1. Descripción del lugar

Para cumplir con el objetivo, se seleccionó un cuarto de monitoreo ubicado en la ciudad de Monterrey. Las instalaciones son parte del ITESM – Campus Monterrey y se encuentra en las inmediaciones de la Casa Solar. En la Figura 5.1 se presenta la fachada frontal del lugar en mención.



*Figura 5.1. Cuarto de monitoreo- Casa Solar ITESM, campus MTY.*

El cuarto de monitoreo es un espacio físico de 2.6 metros de altura y con un área interna de 7.20 m<sup>2</sup>, construido con paredes de bloque de concreto de 4 pulgadas de espesor y un techo plano de 6 pulgadas de espesor y 2/5 de pulgada (1 cm) de revestido como se observa en la Figura 5.2. El material y el espesor de cada capa del techo y pared son parámetros muy importantes ya que tienen una influencia directa en el comportamiento térmico de los elementos.

El cuarto cuenta con un equipo de aire acondicionado tipo ventana, el cual presenta ciclos de operación de encendido y apagado que mantienen el aire del cuarto dentro de un rango de temperaturas con un valor promedio de 23°C, condición que se ajusta al modelo matemático, debido a que es un parámetro de entrada en la simulación para obtener la solución analítica.



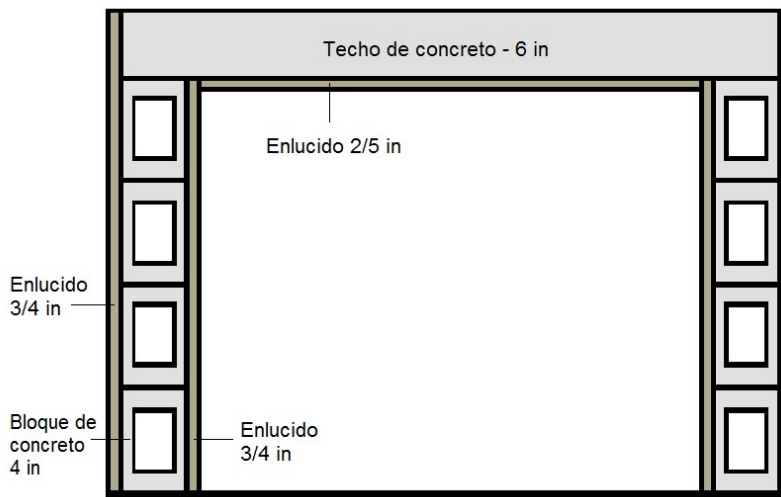


Figura 5.2. Esquema de la pared y el techo plano del cuarto de monitoreo.

## 5.2. Instrumentación

La instrumentación del espacio seleccionado se realizó en base a los lineamientos establecidos en la norma ASTM (C1046:2013) en la cual, se describen las técnicas para la medición en sitio del comportamiento térmico en estado estable y transitorio de componentes opacos de la envolvente de una edificación.

Para la medición de temperatura se utilizaron termopares de junta expuesta tipo K debido a que:

- El rango de temperaturas esperadas (15 a 80 °C), tanto de los elementos de la envolvente como del aire se encuentra dentro del rango de operación de este tipo de termopares (-270 a 1372 °C).
- La medición de temperatura del aire se debe realizar con sensores pequeños ya que esto disminuye el error producido por la temperatura radiante [13].
- Son sensores pequeños y de acuerdo a la literatura tienen una constante de tiempo baja, lo cual significa que presentan una respuesta rápida a los cambios de temperatura [13]. Esta característica es de gran importancia para detectar los cambios de temperatura del aire interno, debido a que ésta varía como respuesta a los ciclos de operación del equipo de aire acondicionado.

### 5.2.1. Medición de la temperatura superficial

Para conocer el comportamiento térmico real de los elementos de la envolvente es necesario instalar sensores que permitan conocer la diferencia de temperatura entre la superficie externa y superficie interna del elemento. Es por esta razón que todos los puntos de análisis cuentan con dos puntos de medición ubicados paralelamente (uno en la parte exterior y otro en la parte interior) en dirección del flujo de calor como se muestra en la Figura 5.3.

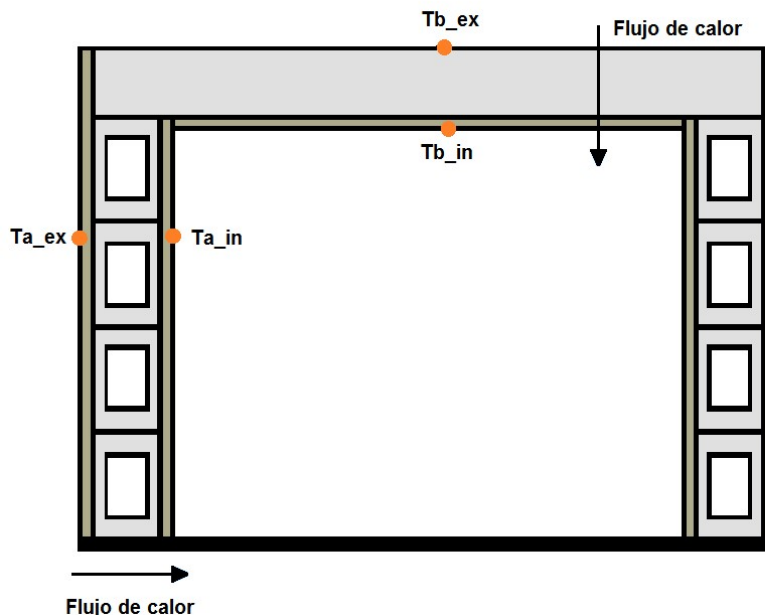
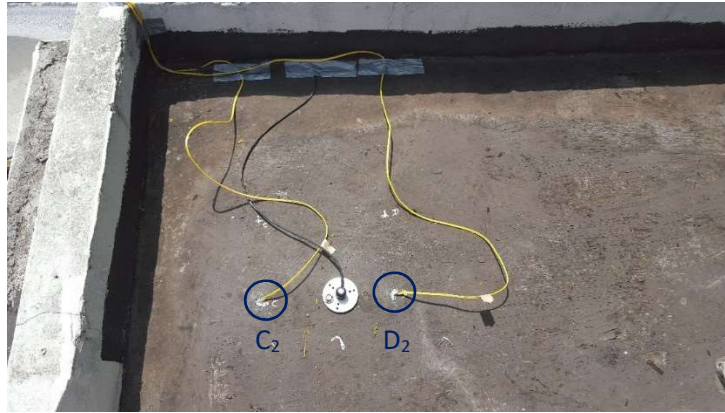


Figura 5.3. Esquema de los puntos de medición de temperatura en la pared y techo.

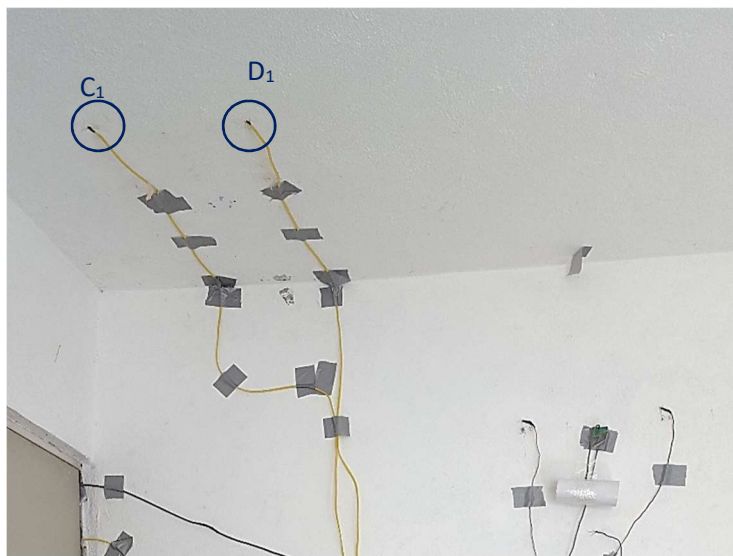
Los sensores fueron instalados dentro del techo y de la pared a través de un orificio realizado en la superficie de medición. Esto permitió obtener datos más confiables debido a que, el sensor, al estar inmerso en la superficie, es protegido de las pérdidas de calor por convección y las diferentes fuentes de radiación de calor por lo que existe menor variación en los valores obtenidos. Si el sensor se instala en la superficie del elemento las temperaturas mediadas incluirían la temperatura del aire.

Los orificios se realizaron siguiendo una trayectoria diagonal a la superficie de interés con una profundidad de 3 mm para que la junta del termopar este a una profundidad de 1-2 mm lo que no representa un error considerable. En las superficies exteriores este tipo de instalación garantiza que, el punto de medición no presente alteraciones a causa de posibles sombras generadas por el cable del termopar ya que, la absorptancia solar de la superficie y la cantidad de radiación térmica recibida no son modificadas por la presencia del sensor. Para mejorar el contacto térmico entre la superficie y la junta del termopar se utilizó una pasta conductiva como relleno del orificio durante el monitoreo de acuerdo al procedimiento establecido en la norma ASTM (C1046:2013)

En el techo se seleccionaron dos ubicaciones (C y D), ya que esto permite tener un sensor de respaldo en caso de falla, para la medición de temperatura en la zona que presentaban mayor tiempo de exposición solar con menor obstrucción a causa de elementos externos que generen sombra. Se establecieron dos puntos de medición para la superficie interna ( $C_1$  y  $D_1$ ) como se observa en la Figura 5.4 y para la superficie externa ( $C_2$  y  $D_2$ ) como se presenta en la Figura 5.5. De esta manera se cuenta con un sensor de respaldo que garantiza la continuidad del monitoreo.



*Figura 5.4. Puntos de medición de la superficie externa del techo*



*Figura 5.5. Puntos de medición de la superficie interna del techo.*

Se instrumentó la pared orientada hacia el oeste y se seleccionaron tres ubicaciones (A, B y E), esto permite conocer si hay variación del comportamiento térmico de la pared en función de la ubicación del sensor. Para la medición de temperatura cada una de ellas presenta dos sensores, uno instalado en la superficie interna de la pared ( $A_1$ ,  $B_1$  y  $E_1$ ) y otro en la superficie externa ( $A_2$ ,  $B_2$  y  $E_2$ ) en posición paralela a la dirección del flujo de calor como se muestra en la Figura 5.3. Los termopares instalados en la pared se presentan en la Figura 5.6 y en la Figura 5.7 de acuerdo a la nomenclatura utilizada.

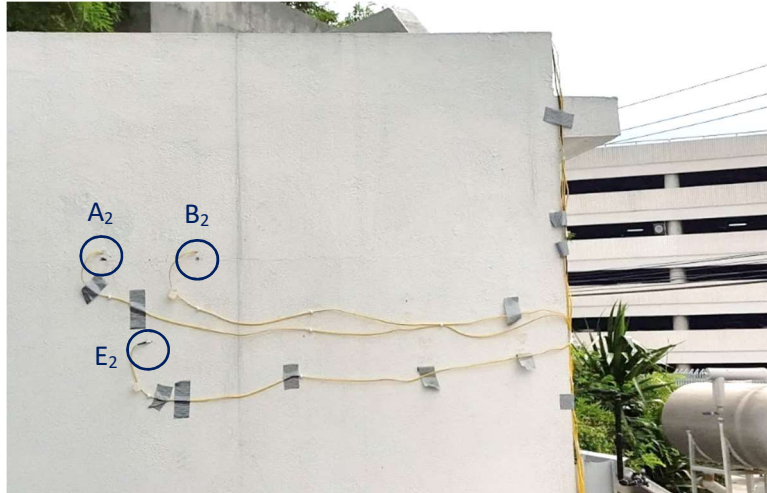


Figura 5.6. Puntos de medición de la superficie externa de la pared.

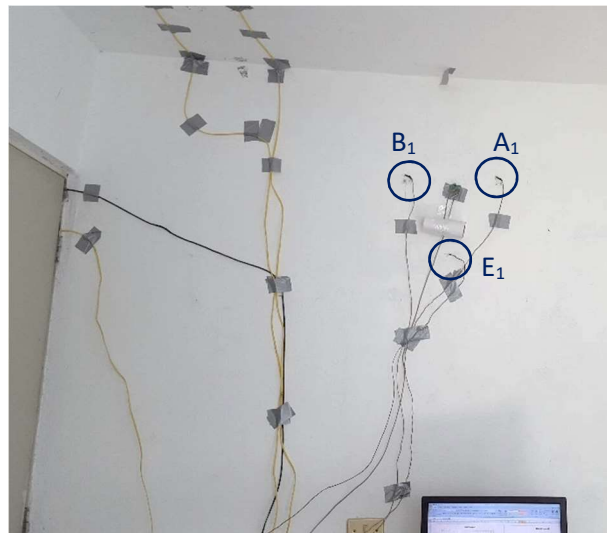


Figura 5.7. Puntos de medición de la superficie interna de la pared.

### 5.2.2. Medición de la temperatura del aire

Se instalaron dos termopares para medir la temperatura del aire interno del cuarto de pruebas, uno en la mitad del espacio acondicionado ( $S_1$ ) y un segundo termopar cerca de la pared monitoreada ( $S_2$ ) para verificar la variación de temperatura entre en aire en la mitad del cuarto y el aire cercano a las superficies monitoreadas como se muestra en la Figura 5.8.

La radiación térmica puede afectar considerablemente los valores medidos de la temperatura del aire. La protección de los termopares con escudos cilíndricos abiertos en sus extremos permite reducir el error de la medición[13].

Para reducir el error de medición a causa de la radiación térmica se utilizó un escudo en forma de cilindro abierto en sus extremos en cada uno de los termopares como se observa en la Figura 5.8.

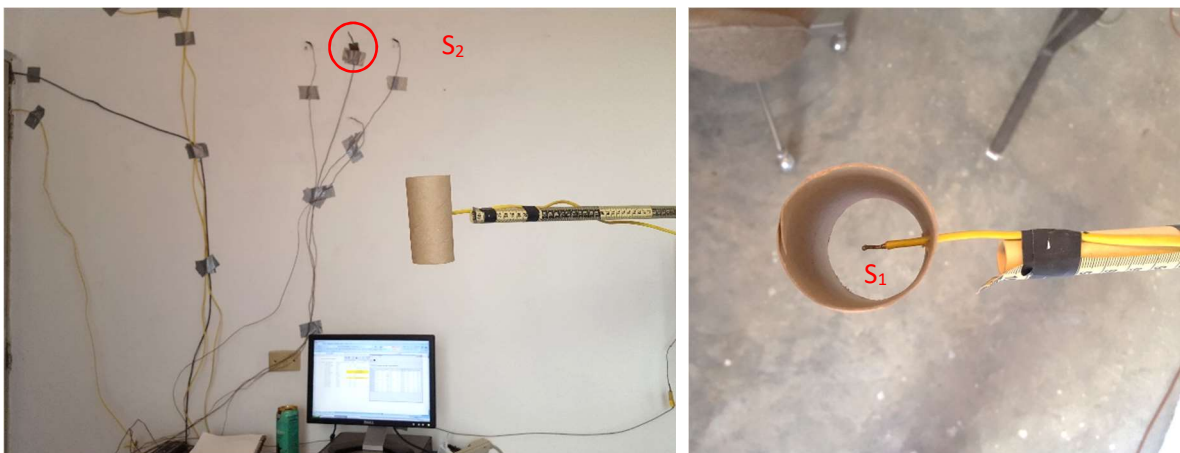


Figura 5.8. Ubicación de los sensores de aire interno del cuarto de monitoreo.

### 5.2.3. Adquisición de datos

Para conocer el comportamiento térmico de los elementos analizados es necesario registrar la información entregada por los sensores de forma continua en periodos completos de 24 horas [28]. Por esta razón se utilizó un sistema de adquisición de datos conformado por los siguientes dispositivos:

- Tarjeta de adquisición de datos OMEGA, modelo OMB-DAQ-55 con comunicación vía USB.
- Módulo de expansión modelo OMB-PDQ1.
- Computadora para el almacenamiento de información.

Los intervalos de registro comúnmente utilizados para este tipo de análisis son 0.5 o 1 hora. Es recomendable que los valores registrados en dichos intervalos sea información promedio de datos recopilados en intervalos menores de monitoreo [28], por esta razón el monitoreo de la temperatura se realizó cada 3 minutos.

Para determinar la resistencia y transmitancia térmica de un elemento de la envolvente de una edificación con mediciones de temperatura y flujo de calor se requiere como tiempo mínimo de monitoreo 72 horas de forma continua si las condiciones térmicas son estables alrededor de los sensores [28]. Por esta razón y por las condiciones climáticas del sitio que el monitoreo se realizó desde el 12 al 27 agosto del 2016, periodo en el cual a partir del décimo día las condiciones se mantuvieron estables por más de tres días continuos lo que permitió obtener los datos que se alinean con los objetivos del presente proyecto.

El sistema de adquisición de datos presenta una incertidumbre de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  de acuerdo al catálogo del equipo utilizado.

### 5.3. Datos recopilados

El monitoreo de la envolvente se realizó durante 15 días aproximadamente de forma continua. Los últimos 5 días del monitoreo, desde el 22 hasta el 26 de agosto del 2016 las condiciones climatológicas fueron idóneas ya que no existieron precipitaciones y el cielo

estuvo despejado permitiendo que las condiciones climáticas sean similares como se observa en la Figura 5.9. Por esta razón los datos presentados corresponden a dicho intervalo de tiempo en el cual se monitoreo una radiación solar máxima de  $994 \text{ W/m}^2$  y una temperatura ambiental de  $35^\circ\text{C}$ .

El sistema de adquisición de datos recopiló la temperatura de cada punto medido en intervalos de tres minutos es decir que durante una hora se obtuvieron 20 valores de temperatura de cada punto. A partir de estos valores se determinó la temperatura promedio cada hora, información que es necesaria para validar los cálculos del algoritmo desarrollado y de acuerdo a la literatura revisada [31] es la forma adecuada para reportar los datos recopilados en este tipo de mediciones en sitio.

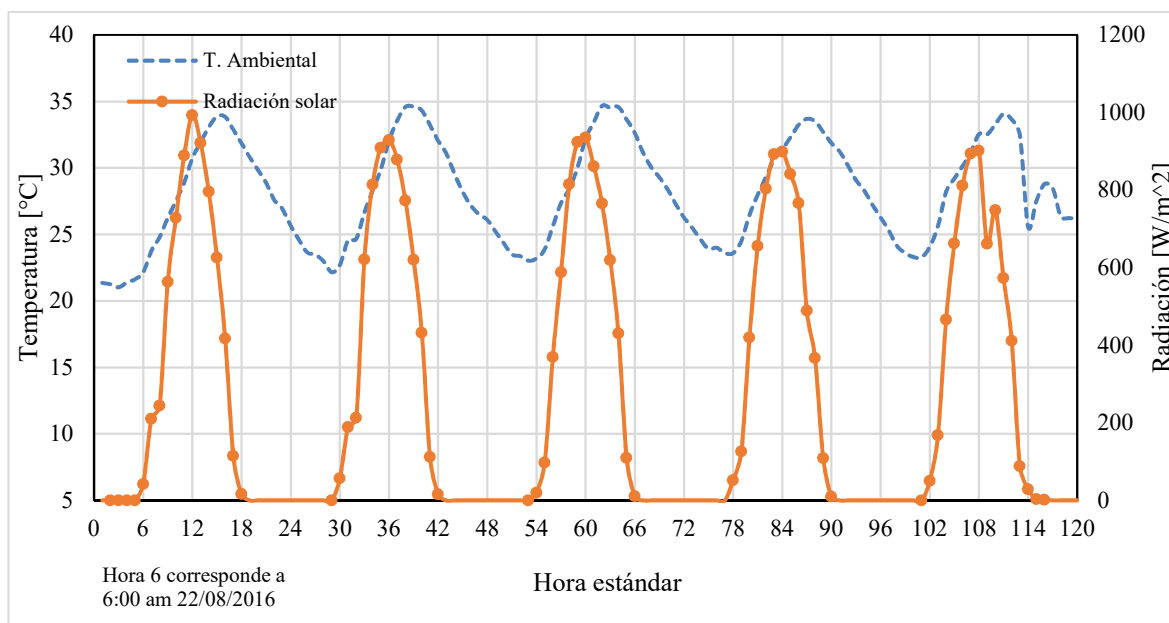


Figura 5.9. Datos climatológicos obtenidos de la estación meteorológica de la casa solar.

En la Figura 5.10 se presentan los datos promediados de los tres puntos de medición de la superficie interna de la pared. Es posible observar que la temperatura de los puntos A y B no presenta una diferencia considerable entre si y que la máxima diferencia con el punto E es menor a  $1^\circ\text{C}$  en la hora 45, por lo que las mediciones se consideran correctas.

Los datos promediados de la temperatura de la superficie externa de la pared se presentan en la Figura 5.11 donde se observa que cada punto de medición presenta una tendencia que se mantiene constante durante las 120 horas. Esta tendencia muestra que, el punto E presenta mayor temperatura que los dos puntos restantes mientras que el punto A presenta una temperatura intermedia. La máxima diferencia entre la temperatura del punto A y el punto B se presenta en la hora 19 y corresponde a  $3.1^\circ\text{C}$ .

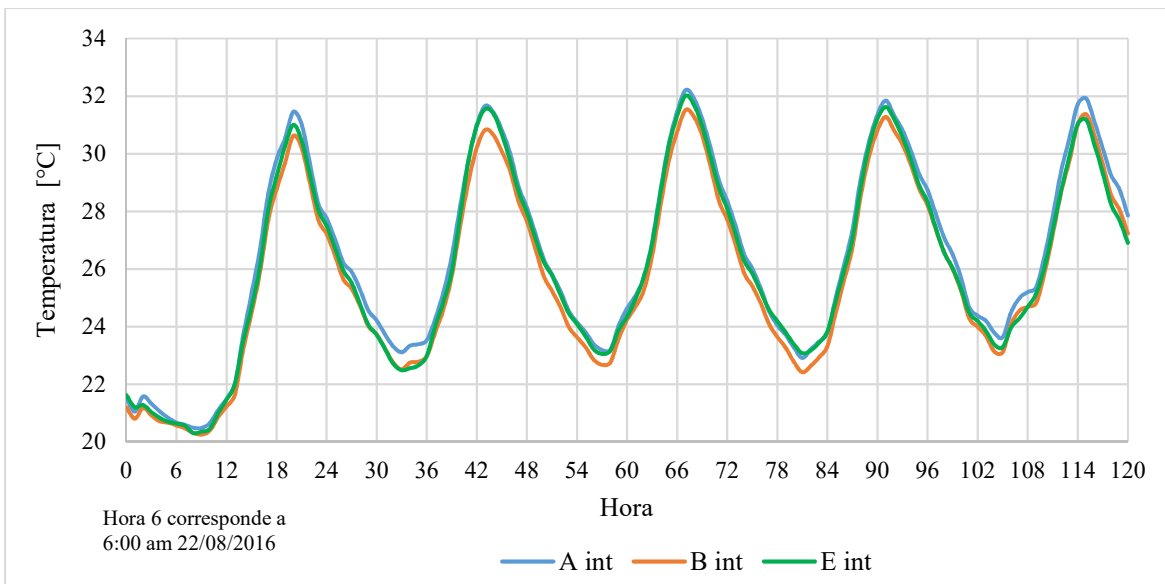


Figura 5.10. Temperatura de los tres puntos de monitoreo de la superficie interna de la pared.

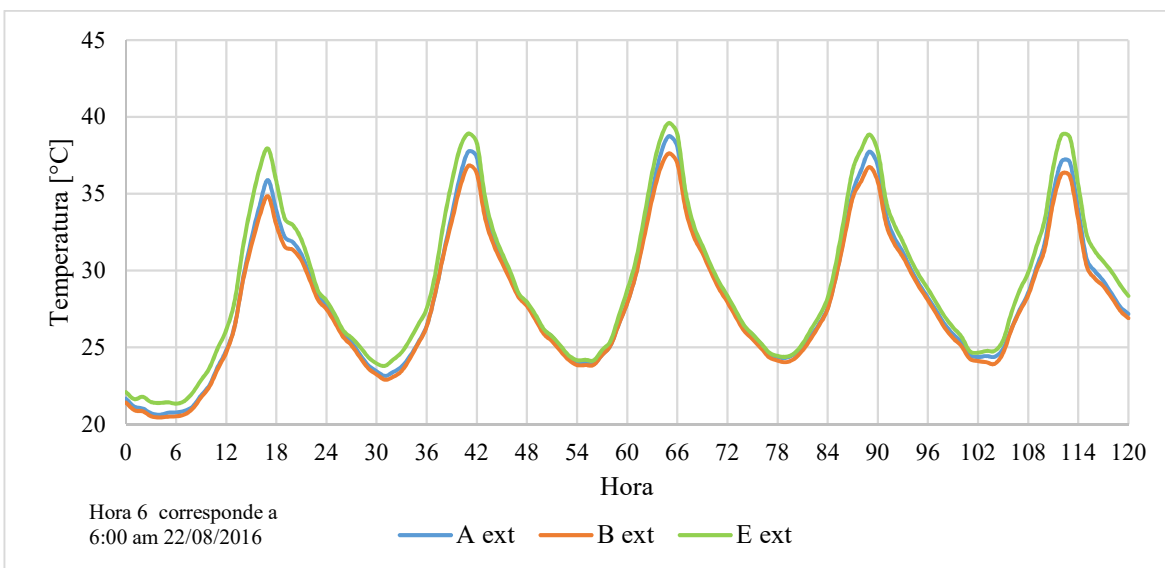


Figura 5.11. Temperatura de los tres puntos de monitoreo de la superficie externa de la pared.

En el techo se cuenta con dos puntos de medición C y D en la superficie interna y la variación de su temperatura se presenta en la Figura 5.12. La máxima diferencia es de  $0.8^{\circ}\text{C}$  y se presenta en la hora 68. Adicionalmente, se observa que la temperatura medida del punto C siempre es mayor a la del punto D. Esta diferencia es aceptable por lo que, se asume que las mediciones con aceptables.



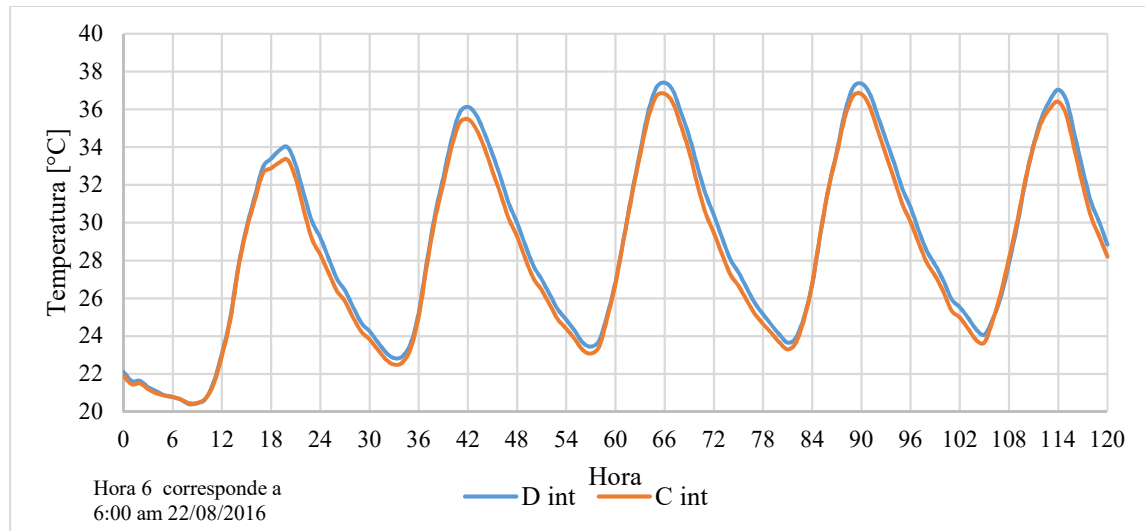


Figura 5.12. Temperatura de los dos puntos de monitoreo de la superficie interna del techo.

En la Figura 5.13 se presenta la variación de temperatura de los puntos C y D de la superficie externa del techo. Se observa que el valor medido en el punto C siempre es mayor en las primeras horas de la tarde y que presenta una diferencia máxima de 5.5 °C en la hora 111. Esta diferencia posiblemente se presenta debido a que, la ubicación de los termopares dentro del techo no es exactamente igual ya que, la profundidad del orificio, donde está instalado cada termopar, es muy pequeño lo que dificulta obtener la misma inclinación y en consecuencia la distancia, respecto a la superficie horizontal, a la que se encuentra cada termopar es diferente y la temperatura medida no corresponde a la misma ubicación.

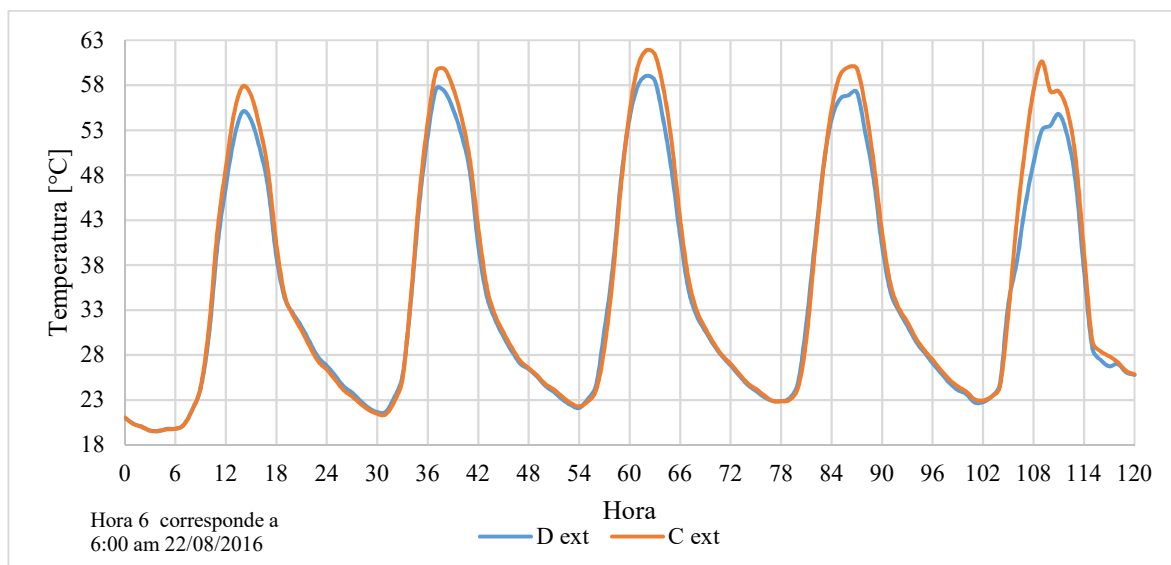


Figura 5.13. Temperatura de los dos puntos de monitoreo de la superficie externa del techo.

El sistema de aire acondicionado opera con ciclos de encendido y apagado por lo que, la temperatura del aire interno no se mantuvo constante y varió de forma cíclica desde 21 hasta 25°C como se muestra en la Figura 5.14. Las temperaturas internas más bajas se presentan a las 10:00 am y las más altas 12 horas después, intervalo de tiempo en el cual los



elementos de la envolvente están sometidos a la radiación solar. Por lo tanto, el análisis se realizará considerando la temperatura real del aire interno real y la temperatura promedio como un valor constante para conocer si el supuesto de temperatura constante es adecuado.

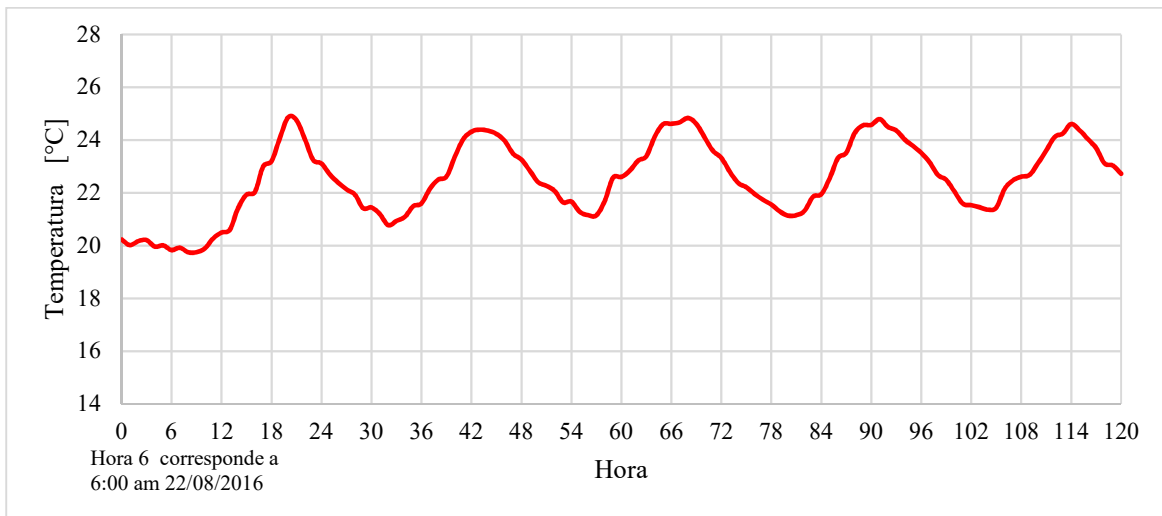


Figura 5.14. Temperatura del aire interno del cuarto monitoreado.

La Figura 5.15 presenta información acerca de la variación de temperatura superficial externa e interna de la pared. En esta se observa que la pared retrasa, una hora, el tiempo de ocurrencia de la temperatura máxima de la superficie interna respecto a la máxima temperatura de la superficie externa. Esta característica es conocida como inercia térmica es decir que, las capas internas de la pared almacenan energía térmica que, posteriormente, es rechazada hacia la superficie exterior de la misma.

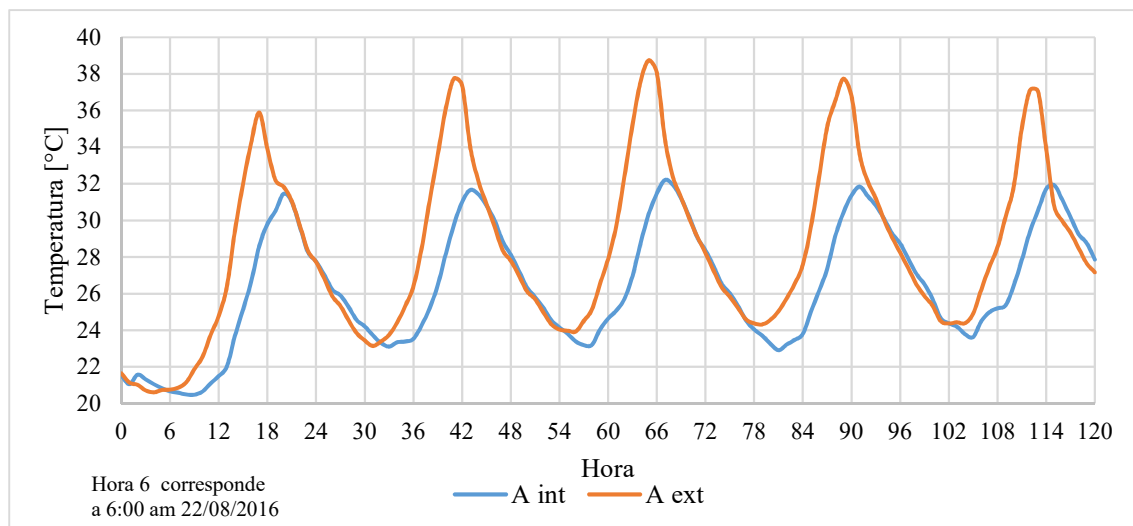


Figura 5.15. Variación de temperatura superficial interna y externa de la pared.

Analizando la Figura 5.15 y la Figura 5.16 se determina que el techo presenta mayor inercia térmica que la pared, ya que la superficie externa del techo alcanza mayores temperaturas y el tiempo de ocurrencia de la máxima temperatura de la superficie del techo

en 4 horas aproximadamente y disminuye considerablemente la amplitud de la temperatura externa alcanzada. Esto se produce porque, el concreto en un elemento macizo con calor específico similar al bloque de concreto, pero con mayor densidad por lo que su capacidad de almacenar energía por unidad de volumen es mayor.

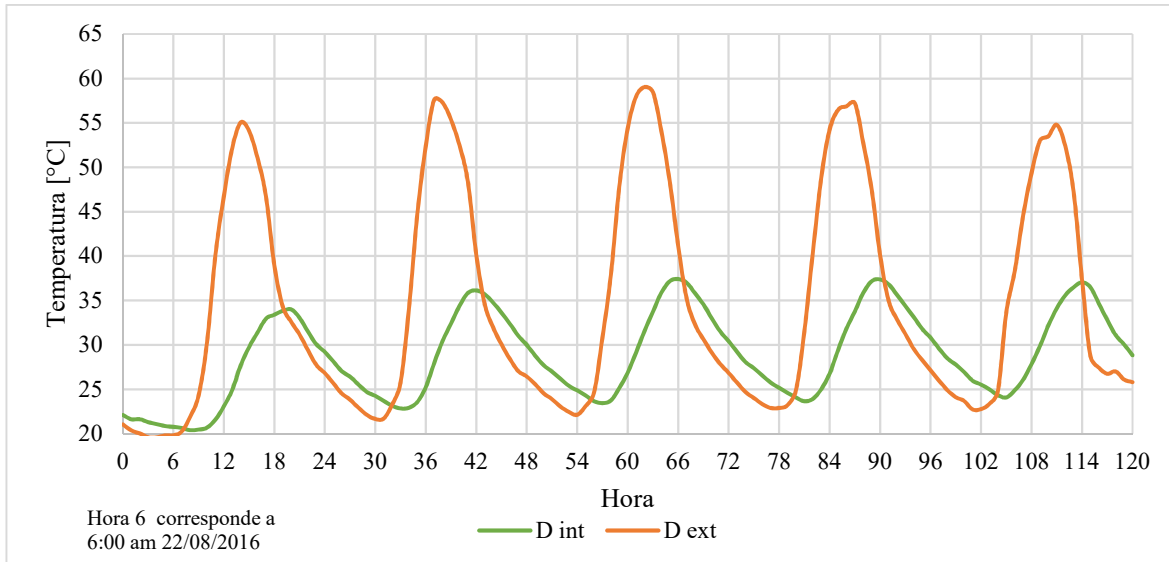


Figura 5.16. Variación de temperatura superficial interna y externa del techo.

Mediante los datos presentados anteriormente, se observa que el techo y la pared presentan un comportamiento periódico en intervalos de 24 horas, esto implica que es adecuada la implementación de una técnica matemática que estudia al fenómeno como una señal básica con un periodo de 24 horas, como la técnica CFFT.

## 6. COMPARACIÓN DEL RESULTADOS ANALÍTICOS Y EXPERIMENTALES

En este capítulo se presenta la comparación de los resultados obtenidos del algoritmo desarrollado considerando como datos de entrada las características reales del cuarto de monitoreo y las condiciones climatológicas locales descritas en la sección 5.

La comparación se realiza respecto a la temperatura de la superficie interna de los elementos opacos de la envolvente (pared y techo), debido a que es el parámetro, de naturaleza transitoria, del cual depende de los valores de CLTD como se definió en la ecuación 3.23.

### 6.1. Datos obtenidos experimentalmente

El análisis se realizó para el día 24 de agosto del 2016 seleccionado en la sección 5.3, debido a que representa el día intermedio de un periodo de monitoreo consecutivo, en el cual las condiciones climáticas se replicaron de forma periódica como se observó en la Figura 5.9.

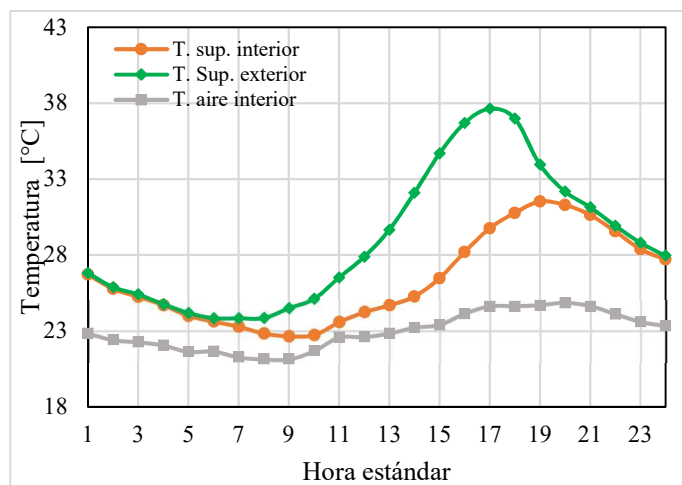


Figura 6.1. Datos promediados obtenidos experimentalmente en la pared y el aire interno.

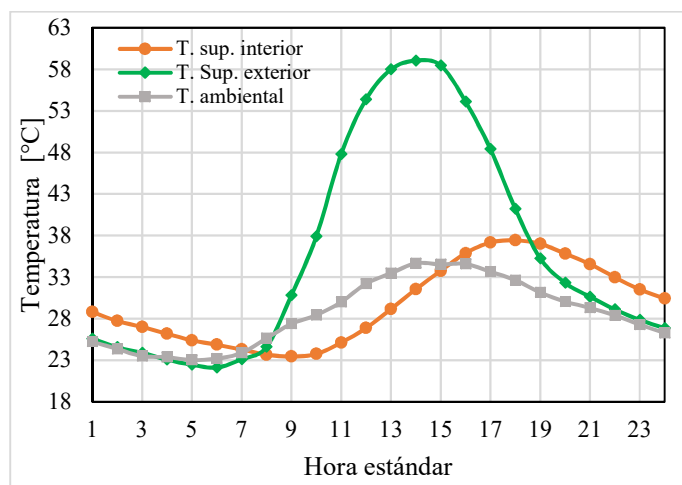


Figura 6.2. Datos promediados obtenidos experimentalmente en el techo.

Los datos obtenidos experimentalmente, en el cuarto de monitoreo, se presentan en la Figura 6.1 para la pared y en la Figura 6.2 para el techo. Los datos son presentados en función de la hora estándar, es decir, sin considerar la hora adicional del horario de verano, por lo que la hora 1 corresponde a las 2:00 am del horario local.

## 6.2. Información de entrada al modelo

El modelo requiere como datos de entrada: ubicación geográfica de la edificación, condiciones climatológicas, propiedades termo-físicas de los materiales y coeficientes de transferencia de calor.

### 6.2.1. Datos geográficos

La radiación incidente sobre la pared es calculada mediante la metodología descrita en la sección 2.1.3. Los datos de entrada para determinar la ubicación del sol en cada hora y el ángulo de incidencia sobre la pared orientada hacia el oeste son función del día del año y la ubicación geográfica, por esta razón se utilizó la información detallada en la Tabla 6.1.

Día del año	236
Longitud estándar	90° (grados oeste)
Longitud local	100.28 ° (grados oeste)
Latitud	25.65°N
Ángulo acimutal de la pared	90°
Reflectancia del suelo	0.25

Tabla 6.1. Parámetros geográficos de la ubicación del cuarto de monitoreo.

### 6.2.2. Datos climatológicos

La información climatológica utilizada (radiación solar sobre una superficie horizontal, velocidad del viento y temperatura ambiental) corresponde al 24 de agosto del 2016. Los datos climatológicos fueron monitoreados en intervalos de 10 minutos. Debido a que la metodología utilizada para el cálculo de la temperatura superficial de un elemento, requiere que los parámetros de entrada estén especificados cada hora, se calculó el valor promedio de la temperatura ambiental y la radiación solar para cada hora como se muestra en la Figura 6.3.

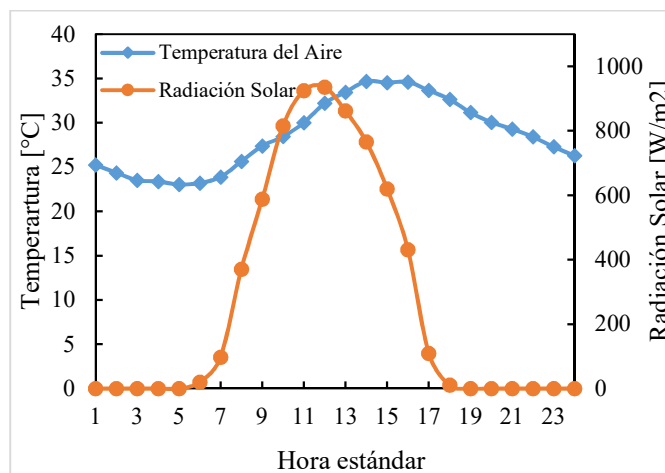


Figura 6.3. Datos promedio de la temperatura ambiente y radiación solar tomados en sitio – Monterrey, 24 agosto 2016.

### 6.2.3. Propiedades térmicas de los elementos

Los parámetros térmicos para el análisis del techo y de la pared dependen del material de cada una de las capas que los conforman. En la sección 5.1 se describió las características físicas de los elementos monitoreados (materiales, acabados y dimensiones) y en la Tabla 6.2 se presentan las propiedades de los materiales, considerados parámetros base para el análisis de los resultados debido a que no fueron determinadas experimentalmente.

		Conductividad térmica [W/m·C]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Calor específico [J/kg·C]	Absorptancia solar
Revestido	[1]	0.7	2778	840	0.3
Bloque de concreto	[7]	0.81	977.13	837.36	--
Concreto	[7]	1.73	2242	840	0.80 <sup>a</sup>

Tabla 6.2. Propiedades termo-físicas de los elementos monitoreados experimentalmente.

<sup>a</sup> La superficie exterior del techo está pintada de color oscuro.

### 6.2.4. Cálculo del coeficiente combinado de transferencia de calor para superficies exteriores ( $h_o$ ).

El coeficiente combinado (radiación y convección) para la superficie exterior es un parámetro de entrada en el algoritmo computacional desarrollado. Por esta razón, se requiere determinar su valor para la pared y el techo plano.

La velocidad del viento es un parámetro importante que permite evaluar el tipo de convección presente en la superficie y que influye sobre el coeficiente de transferencia de calor por convección. La estación meteorológica monitoreó la velocidad del viento a una altura aproximada de 10 metros respecto al suelo en intervalos de 10 minutos. Los datos promediados cada hora 24 de agosto del 2016 se presentan en la Figura 6.4.

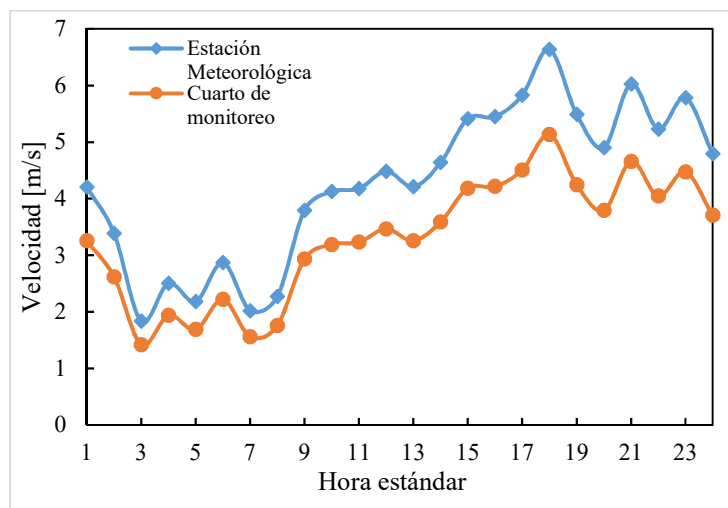


Figura 6.4. Datos medidos acerca de la velocidad del viento en sitio – 24 de agosto 2016.

La estimación de la velocidad local al nivel del cuarto de monitoreo se realizó aplicando la ecuación 2.12 considerando que, la estación meteorológica y el cuarto de monitoreo se encuentran en la misma zona y esta pertenece a la categoría 2 de la Tabla 2.5, la velocidad del viento calculada a la altura del techo (2.75 m) para cada hora se presentan en la Figura 6.4 y presenta un valor promedio de 3.3 m/s.

Las propiedades del aire fueron evaluadas a la temperatura de película considerando la temperatura promedio de la superficie externa del techo para cada hora (ver Figura 6.2) y la temperatura del aire exterior (ver Figura 6.3).

Al evaluar las propiedades del aire y calcular los números adimensionales de Reynolds y Grashof (ecuación 3.12 y ecuación 3.14 respectivamente) se obtuvo que la relación  $Gr/Re^2$  obtenida para cada hora fue menor a 0.1. De acuerdo a los conceptos presentados en la sección 3.2.2 se determinó que, la transferencia de calor entre la superficie y el aire durante todo el día analizado fue por convección forzada. Por esta razón, se obtuvo el coeficiente de transferencia de calor por convección aplicando la ecuación 3.18 cuando el flujo es laminar y la ecuación 3.19 cuando el flujo es turbulento.

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por radiación se utilizó la ecuación 3.10 donde la temperatura de los alrededores ( $T_{sur}$ ) fue evaluada considerando las condiciones más críticas. La menor temperatura que pueden presentar los alrededores corresponde a la temperatura del cielo y la máxima temperatura corresponde a la temperatura del ambiente. Al calcular el coeficiente de transferencia de calor por radiación del techo, bajo las dos condiciones, se observó una diferencia máxima del 7% entre los valores reportados, lo cual representa una variación máxima del 2% en el coeficiente combinado de transferencia de calor. Por esta razón se consideró válido aproximar la temperatura de los alrededores a la temperatura ambiental.

Bajo dicha aproximación se determinó el coeficiente combinado de transferencia de calor en la superficie externa del cuarto de monitoreo mediante la ecuación 3.9 y los resultados obtenidos se presentan en la Figura 6.5.

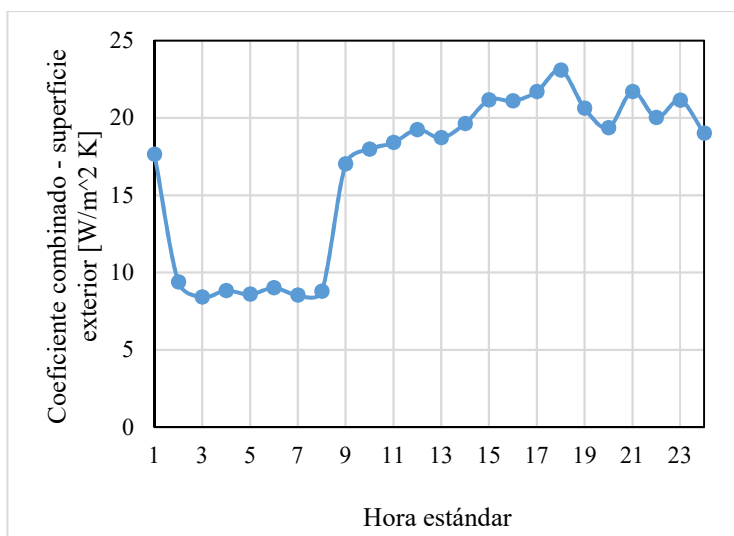


Figura 6.5. Coeficiente combinado de transferencia de calor en la superficie externa.

En la Figura 6.5. se observa que el coeficiente combinado presenta un valor mínimo

de  $8.4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  en la hora 3, un valor máximo de  $23.1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  a las 18 horas.

Para una velocidad promedio de viento de  $3.4 \text{ m/s}$ , un valor promedio del coeficiente combinado de una superficie exterior, en cualquier posición de acuerdo a la literatura, es  $22.7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ [13]. Este valor se encuentra dentro del intervalo de los coeficientes obtenidos y presentados en la Figura 6.5 lo que indica que los valores obtenidos tienen correspondencia con lo reportado en la bibliografía.

### 6.2.5. Cálculo del coeficiente combinado de transferencia de calor para superficies interiores ( $h_i$ ).

El coeficiente combinado de transferencia de calor de las superficies internas, del techo y de la pared, es un parámetro de entrada en el algoritmo desarrollado. Por esta razón, considerando que, la velocidad del aire dentro de cuarto de monitoreo es casi imperceptible, se asume que el techo y la pared están sometidos a un proceso de transferencia de calor por convección natural.

En base a los conceptos presentados en las secciones 3.2.1, 3.2.2 y a los datos obtenidos experimentalmente (temperatura del aire interno y temperatura de la superficie interna del techo y la pared) se calcularon los coeficientes combinados de transferencia de calor en cada hora. Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por radiación en el techo y la pared se utilizó la ecuación 3.10. El coeficiente de transferencia de calor por convección natural se calculó en base al número de Nusselt, el cual se determinó con la ecuación 3.16 y la ecuación 3.17 para la pared y el techo respectivamente. Finalmente, el coeficiente combinado de transferencia de calor en la superficie interna de cada elemento se determinó mediante la ecuación 3.19 y los resultados obtenidos se presentan en la Figura 6.6.

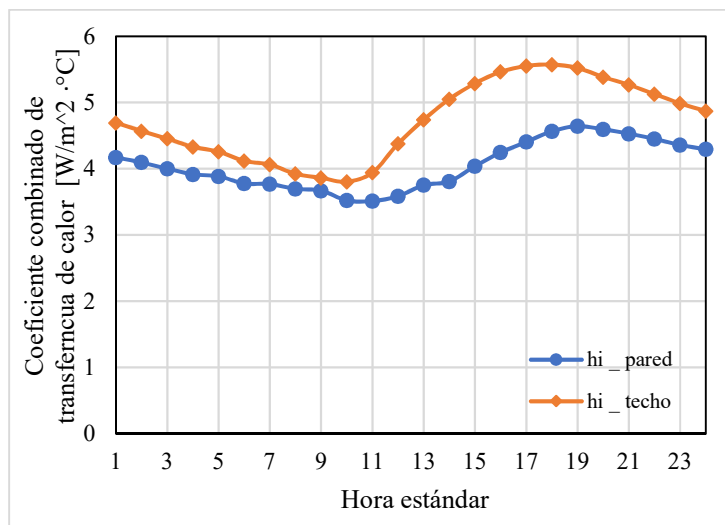


Figura 6.6. Coeficiente combinado de transferencia de calor para superficies internas.

En la Figura 6.6, se observa que el techo presenta valores mayores del coeficiente combinado de transferencia de calor en comparación con la pared. Una de las razones por las cuales esto ocurre es debido a que, el techo presenta mayores temperaturas en la superficie interna como se observó en la Figura 6.2.

De acuerdo a información encontrada en la literatura, el coeficiente combinado de transferencia de calor interno de una superficie vertical, con emisividad de 0.2 (revestido 0.1-0.3), es  $4.20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  para aire quieto[13]. En la pared  $h_i$  presenta un valor máximo de  $4.64 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$  a las 19 horas y un valor mínimo de  $3.5$  a las 11 horas  $\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ , valores que se encuentran en el rango esperado.

El coeficiente combinado de transferencia de calor de la superficie interna del techo presenta un valor máximo de  $5.6 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$  a las 18 horas y un valor mínimo de  $3.80 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$  a las 10 horas. Valores que se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura ( $5 - 9 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ )[13].

### 6.3. Resultados obtenidos: Radiación incidente sobre la pared

El procedimiento desarrollado para determinar la temperatura de la superficie interna de la pared calcula la radiación incidente (en función de la orientación), sobre la superficie externa como se explicó en la sección 4.2.3. Los parámetros de entrada utilizados fueron los detallados en la Figura 6.3 y la Tabla 6.1. Los resultados de la radiación incidente sobre la pared monitoreada (orientada hacia el oeste) se presentan en la Figura 6.7 y se observa que la máxima cantidad de radiación que recibe la pared es a las 15 horas y presenta un valor de  $488 \text{ W/m}^2$ . A partir de las 13 horas existe un incremento del 50% de la radiación incidente y esto se produce debido a que, la radiación solar directa también incide sobre la pared a diferencia de horas anteriores en las que únicamente recibe radiación difusa.

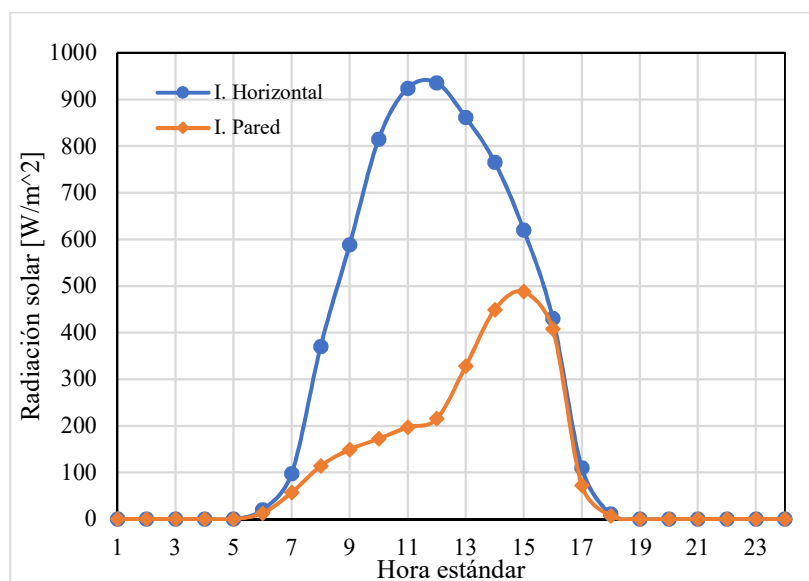


Figura 6.7. Radiación solar incidente medida (I. horizontal) y calculada (I. Pared) para el 24 de agosto 2016.

### 6.4. Temperatura de la superficie interna de la pared obtenida bajo diferentes condiciones térmicas

Las propiedades térmicas de las capas que conforman la pared no se conoce de manera exacta por lo que, se realizó un análisis para determinar su influencia en la



temperatura de la superficie interna de la pared.

#### 6.4.1. Análisis de sensibilidad respecto a la temperatura del aire interior ( $T_i$ )

El modelo planteado para determinar la temperatura de la superficie interna de la pared considera constante la temperatura del aire interno. El equipo de aire acondicionado del cuarto de monitoreo no mantienen constante la temperatura del espacio como se observa en la Figura 6.1. Para conocer la influencia que tiene este parámetro se calculó la temperatura superficial de la pared considerando la temperatura medida experimentalmente (ver Figura 6.1) y una temperatura constante de 23 °C, valor que corresponde a la temperatura promedio de las 24 horas del día analizado. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 6.8.

En la Figura 6.8 se observa que la temperatura superficial de la pared difiere máximo en 1.25 °C en la hora 9 que corresponde a una diferencia del 6% respecto al valor obtenido considerando la temperatura real del aire interno. Esto significa que, considerar constante  $T_i$  es una simplificación válida en el modelo ya que no altera considerablemente los resultados.

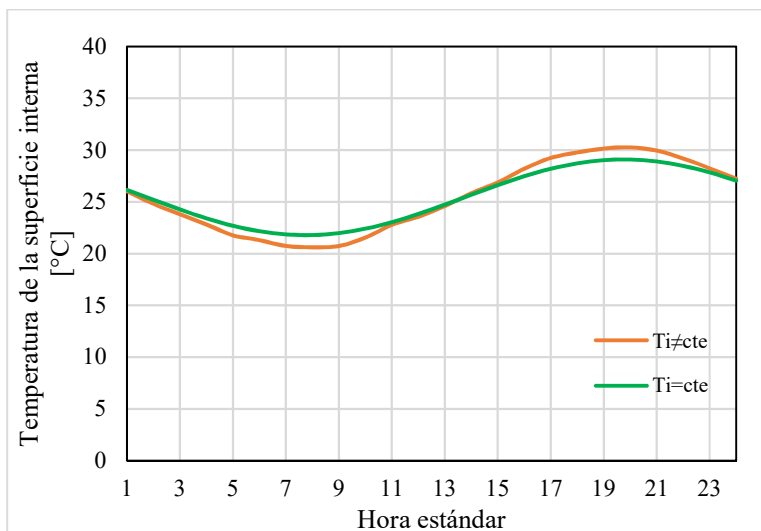


Figura 6.8. Sensibilidad de la temperatura interna de la pared respecto a  $T_i$ .

#### 6.4.2. Análisis de sensibilidad respecto al coeficiente combinado de transferencia de calor de la superficie interna ( $h_i$ )

De acuerdo a la bibliografía, los rangos típicos del coeficiente combinado de transferencia de calor en superficies internas ( $h_i$ ) no metálicas es de 5 a 8.33 W/m<sup>2</sup>·K[13]. Debido a que, el modelo matemático definido considera constantes los coeficientes combinados de transferencia de calor interno y externo se realizó un análisis de sensibilidad para conocer la influencia de dichos parámetros en la temperatura de la pared. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 6.10 y en la Figura 6.9.

En la Figura 6.9 se observa que  $h_i$  tiene mayor influencia sobre la temperatura de la superficie interna pared en las horas en que el flujo de calor a través de la pared depende, en mayor proporción, de la cantidad de energía térmica almacenada y no de los parámetros climatológicos (1-6 y 16-24 horas). Es por esta razón que, a mayor  $h_i$ , la cantidad de calor

transferido hacia el aire interno es mayor y en consecuencia la temperatura superficial de la pared disminuye. Adicionalmente, se observa que al disminuir  $h_i$ , la temperatura analítica difiere en menor proporción respecto a los datos experimentales.

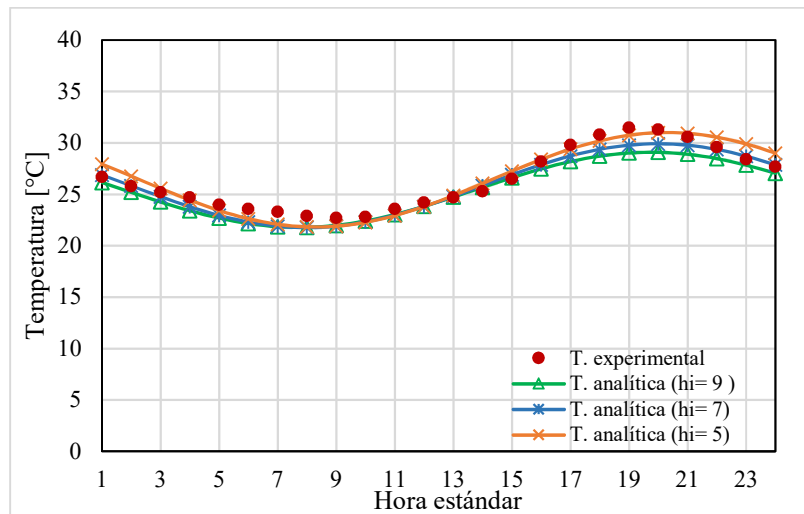


Figura 6.9. Sensibilidad de temperatura de la superficie interna de la pared respecto a  $h_i$ .

Considerando que desde 17 hasta las 24 h,  $h_i$  es más influyente en la temperatura superficial y presenta un valor promedio de  $4.5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  se seleccionó dicho valor como parámetro constante para los análisis de sensibilidad posteriores y la generación de resultados finales.

#### 6.4.3. Análisis de sensibilidad respecto al coeficiente combinado de transferencia de calor de la superficie exterior ( $h_o$ )

En la sección 6.2.4 se determinó que, para la superficie externa el coeficiente combinado de transferencia calor ( $h_o$ ) varía de  $8.4$  a  $23.1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ .

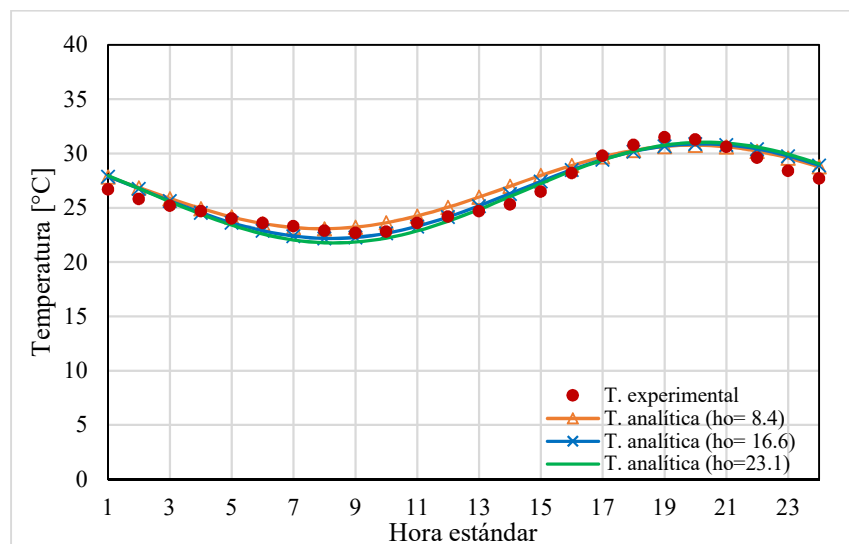


Figura 6.10. Sensibilidad de temperatura de la superficie interna de la pared respecto a  $h_o$ .

En la Figura 6.10 se observa que, el coeficiente combinado de transferencia de calor de la superficie externa tiene mayor influencia de 6 a 15 horas. Esto se produce porque, el flujo de calor a través de la pared, en ese intervalo de tiempo, está regulado en gran proporción, por las condiciones climatológicas debido a que, la cantidad de energía almacenada en la pared es pequeña. Es decir, que el flujo de calor a través de la pared es menor debido a que la superficie externa cede mayor calor hacia el ambiente a causa de un alto coeficiente externo de transferencia de calor y esto genera que, la temperatura de la superficie interna de la pared es menor y viceversa.

En los periodos de tiempo adicionales, de 1 a 5 y de 16 a 24 horas, la temperatura de la pared no es afectada por  $h_o$  debido a que el flujo de calor de a través de la pared depende en mayor proporción de la cantidad de energía almacenada durante el día y el mecanismo por el cual es liberada no depende de  $h_o$ .

De acuerdo a lo explicado en sección 6.2.4 el coeficiente combinado de transferencia de calor de las superficies externas del experimento considerado es  $22.7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  y es un parámetro constante para la generación de resultados posteriores.

#### 6.4.4. Análisis de sensibilidad respecto a la absorptancia solar de la superficie externa ( $\alpha_s$ )

La absorptancia solar de la superficie exterior de la pared se establece de acuerdo al tipo de acabado que esta presenta. La pared monitoreada presenta una capa exterior de revestido con pintura blanca. De acuerdo a la Tabla 2.3, este tipo de superficie presenta una absorptancia que varía desde 0.1 hasta 0.3. Se realizó un análisis de sensibilidad respecto a este parámetro y los resultados obtenidos se presentan en la Figura 6.11.

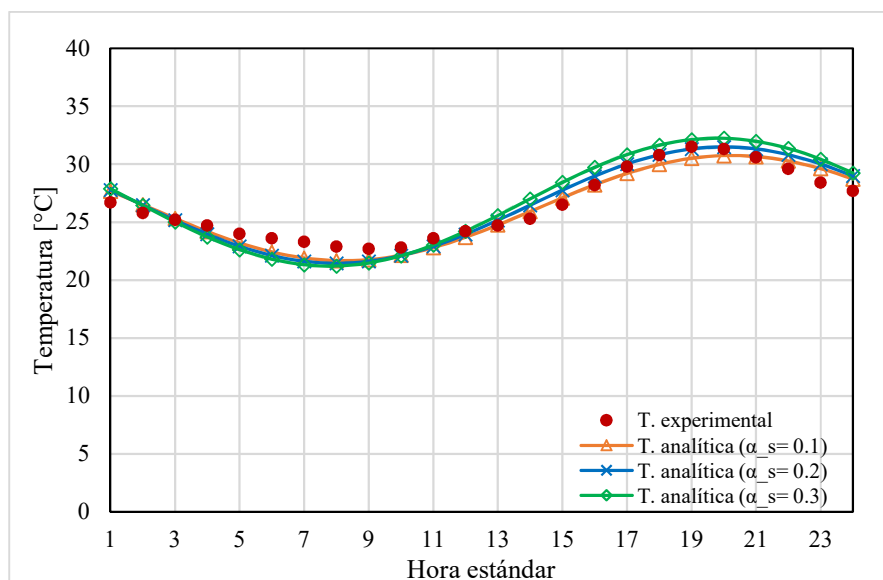


Figura 6.11. Sensibilidad de temperatura de la superficie interna de la pared respecto a la absorptancia.

En la Figura 6.11 se observa que, la absorptancia solar tiene mayor influencia sobre la temperatura de la superficie interna de la pared a partir de las 13 horas, tiempo en el cual, la radiación incidente sobre la pared presenta un aumento considerable como se observó en la Figura 6.7. De acuerdo a la ecuación 3.8, el flujo de calor total a través de la superficie

externa depende directamente de la cantidad de radiación que es absorbida por la superficie, es decir que a mayor absorptancia se incrementa el flujo de calor a través de la pared y en consecuencia la temperatura de la superficie interna de la pared aumenta.

## 6.5. Comparación de las temperaturas analítica y experimental de la pared

Para determinar la temperatura analítica de la superficie interna de la pared se consideró una absorptancia solar de 0.2, ya que la superficie exterior monitoreada es de color blanco mate (ver la Tabla 2.3). Los resultados obtenidos se presenta en la Figura 6.12.

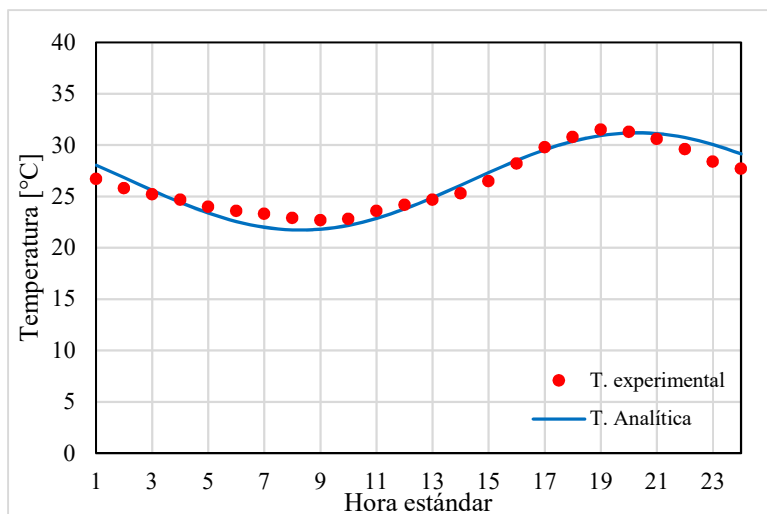


Figura 6.12. Comparación de la temperatura de la superficie interna de la pared.

La temperatura analítica de la superficie interna de la pared monitoreada presenta una diferencia máxima de 1.62 °C en la hora 23 y una hora de desplazamiento de temperatura máxima (31.5 °C – 20 h) respecto a los datos experimentales como se observa en la Figura 6.12. Estas discrepancias se generan debido a que, las propiedades de los materiales utilizadas para obtener la temperatura analítica no fueron obtenidas experimentalmente y el modelo matemático establecido considera como constantes a parámetros que en la ejecución del experimento variaron en el tiempo ( $T_i$ ,  $h_i$  y  $h_o$ ). Por lo tanto, se observa una correspondencia aceptable entre la temperatura medida experimentalmente y la temperatura analítica considerando las incertidumbres presentes.

## 6.6. Temperatura de la superficie interna del techo obtenida bajo diferentes condiciones térmicas

El techo monitoreado está conformado por una capa de concreto de 6 in y una capa interna de revestido de 2/5 in. Para determinar la influencia que tienen los parámetros térmicos sobre la temperatura de la superficie interna se realizó un análisis de sensibilidad de las diferentes variables.

### 6.6.1. Análisis de sensibilidad respecto a la temperatura del aire interno ( $T_i$ )

En la Figura 6.3 se observó que la temperatura del aire interno no permaneció constante durante la ejecución del experimento. Debido a que el modelo matemático que representa el comportamiento térmico del techo considera que la temperatura del aire interno es constante, se calculó la temperatura de la superficie del techo considerando los datos reales de la temperatura del aire y su valor promedio, 23 °C como constante. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 6.13.

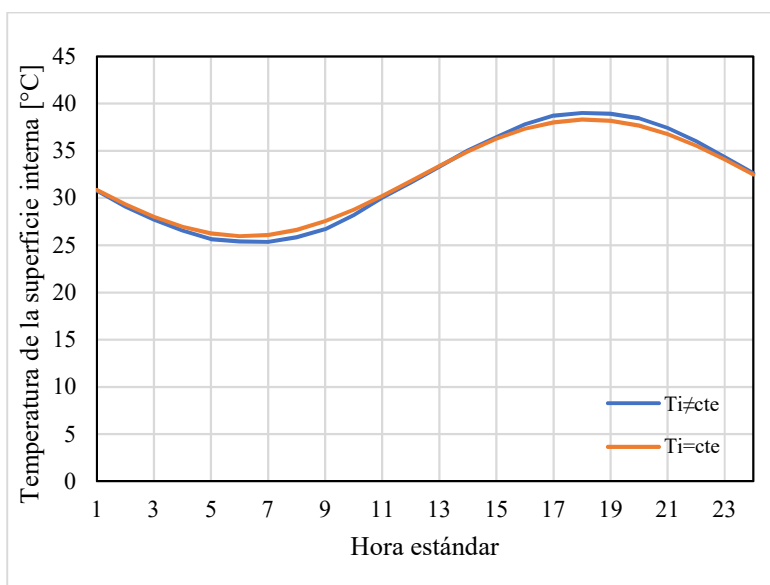


Figura 6.13. Sensibilidad de la temperatura interna de la pared respecto a  $T_i$

En la Figura 6.13. se observa que, en la hora 9 se presenta una diferencia máxima de 0.82°C entre la temperatura interna del techo considerando  $T_i$  constante. Esto indica que, considerar  $T_i$  constante a 23°C es un supuesto válido dentro del modelo ya que no genera diferencias significativas en los resultados obtenidos.

### 6.6.2. Análisis de sensibilidad respecto al coeficiente combinado de transferencia de calor de la superficie interna ( $h_i$ )

El coeficiente combinado de transferencia de calor de la superficie interna del techo, comúnmente, presenta valores entre 5 y 9 W/m<sup>2</sup>·K de acuerdo a la bibliografía. Es por esta razón que se determinó la temperatura del techo para diferentes valores de  $h_i$ . En la Figura 6.14 se observa que  $h_i$  tiene mayor influencia a partir de las 17 horas. Esto se debe a que, el proceso de transferencia de calor en la tarde está regulado, principalmente, por la cantidad de calor que puede ser transferido por convección desde el techo hacia el aire interno de cuarto de monitoreo. Por esta razón a mayor  $h_i$ , menor es la temperatura de la superficie del techo ya que pierde mayor cantidad de calor.

Despreciando la velocidad del aire dentro del cuarto de monitoreo, el coeficiente combinado de transferencia de calor de la superficie interna de techo fue calculado en la sección 6.2.5. Se determinó que  $h_i$  para el cálculo de resultados posteriores es 5.25 W/m<sup>2</sup>·K debido a que, este valor corresponde al  $h_i$  promedio en el periodo de mayor influencia sobre la temperatura del techo (13-24 horas).

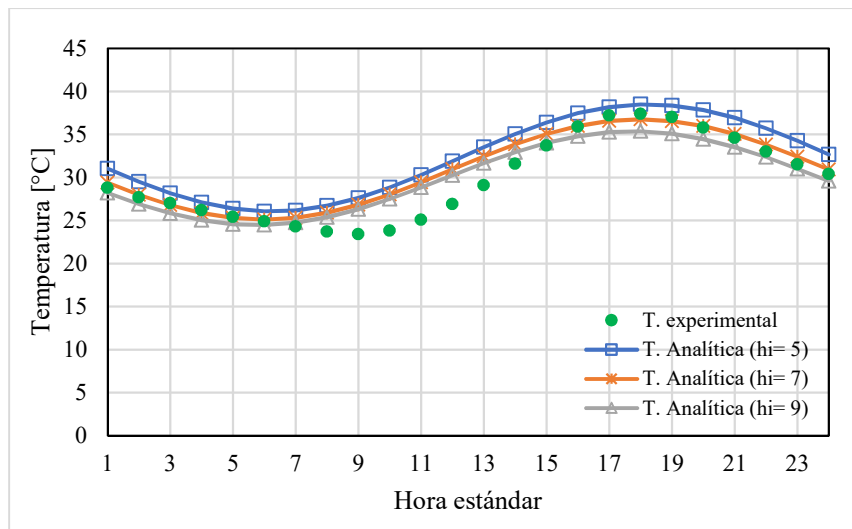


Figura 6.14. Sensibilidad de temperatura de la superficie interna del techo respecto a  $h_i$ .

### 6.6.3. Análisis de sensibilidad respecto al coeficiente combinado de transferencia de calor de la superficie externa ( $h_o$ )

En la sección 6.2.4 se determinó que, el coeficiente combinado de transferencia de calor externo del techo varía desde 8.4 a 23.1 W/m<sup>2</sup>·K. Debido a que la metodología utilizada para determinar la temperatura de la superficie interna de techo considera  $h_o$  constante se realizó un análisis de sensibilidad de este parámetro y los resultados se presentan en la Figura 6.15.

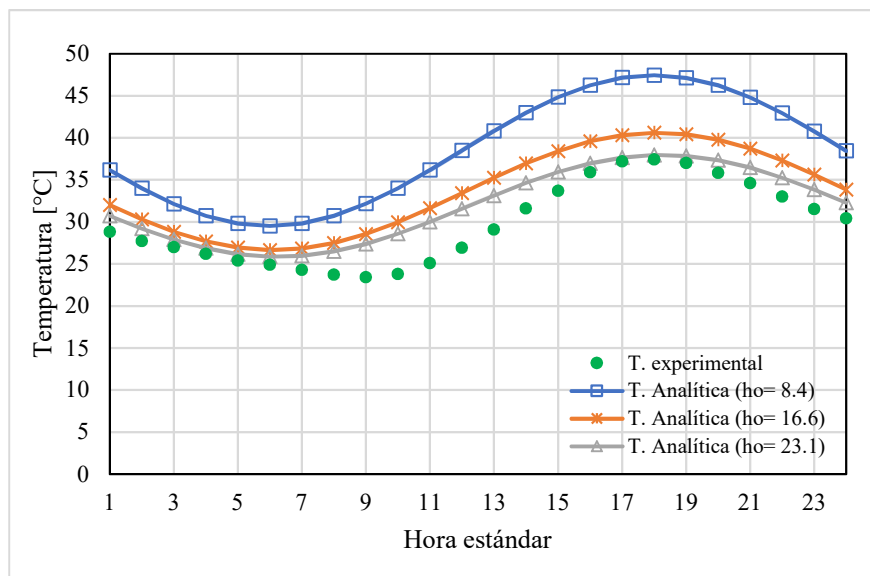


Figura 6.15. Sensibilidad de temperatura de la superficie interna del techo respecto a  $h_o$ .

El techo alcanza temperaturas hasta 25°C más altas que la temperatura ambiente (ver Figura 6.2), es decir que el calor ganado por radiación es el mecanismo predominante. De acuerdo a la Figura 6.2 la inercia térmica del techo genera un retraso de, aproximadamente, 4 horas en la transferencia de calor hacia la superficie interna. Por esta razón, en la Figura 6.15 se observa que  $h_o$  es un parámetro muy influyente en la temperatura de la superficie

interna del techo a partir de las 15 horas ya que, es el parámetro que regula la cantidad de calor que la superficie externa cede hacia sus alrededores. Si,  $h_o$  incrementa la cantidad de calor que pierde techo hacia el exterior es mayor y en consecuencia la temperatura de la superficie interna disminuye, debido a que el calor transferido por conducción es menor.

Los resultados presentados en la Figura 6.15 demuestran que la metodología de cálculo utilizada responde adecuadamente al fenómeno estudiado. El resultado obtenido para  $h_o = 23.1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  demuestra que el valor determinado en la sección 6.2.4 ( $h_o = 22.7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ) representa adecuadamente las condiciones experimentales.

#### 6.6.4. Análisis de sensibilidad respecto a la absorptancia solar de la superficie externa ( $\alpha_s$ )

Debido a que la transferencia de calor por radiación es el mecanismo predominante en la superficie exterior del techo es necesario conocer la influencia de la absorptancia solar ( $\alpha_s$ ) en la superficie interna del techo. Se determinó la temperatura del techo considerando que, la capa de concreto tiene un acabado de pintura oscura y de acuerdo a la Tabla 2.3 la absorptancia para este tipo de superficies puede variar desde 0.4 hasta 0.95. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 6.16.

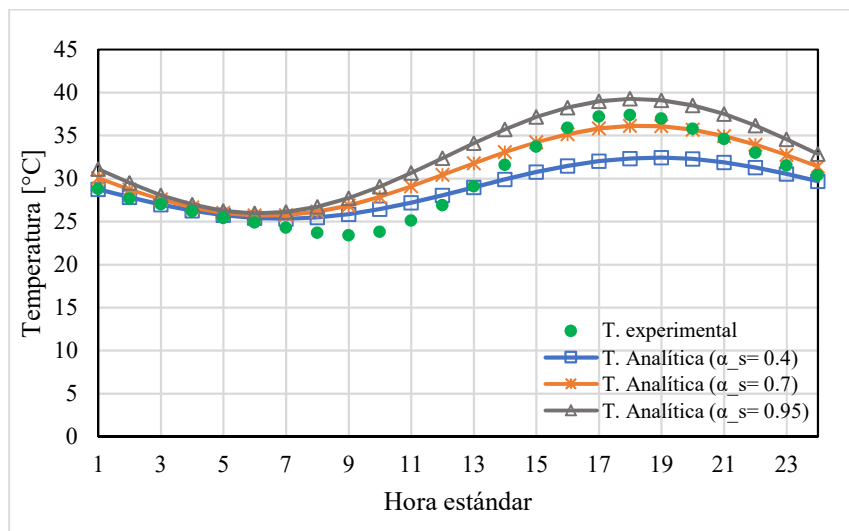


Figura 6.16. Sensibilidad de temperatura de la superficie interna del techo respecto a la absorptancia solar.

Se observa que, la absorptancia solar presenta influencia a partir de las 7 horas, que corresponde a la hora en la cual existe radiación solar (ver Figura 6.3) y su influencia se mantiene en las horas en las cuales no existe radiación (a partir de las 18 horas). Esto se debe a que, la temperatura de la superficie del techo en la noche es una respuesta que depende de la energía que recibió el techo y su inercia térmica. (La absorptancia solar influye de forma directa en el calor que recibe el elemento y por esto a mayor  $\alpha_s$  la temperatura superficial es mayor).

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Figura 6.16 y que la superficie externa está pintada de color oscuro, se determinó que la absorptancia solar del techo es 0.8.

### 6.6.5. Análisis de sensibilidad respecto a la capacidad calorífica del concreto

Las propiedades de las capas del techo no fueron identificadas con exactitud y se conoce que las propiedades del concreto dependen del tipo de materiales utilizados durante su preparación y de su proporción en la mezcla [32]. Para mezclas de concreto típicamente utilizadas (cemento, arena, piedra y agua) los rangos de las propiedades varían de acuerdo a la Tabla 6.3. Por esta razón se realizó un análisis de sensibilidad de la temperatura de la superficie interna de techo respecto la capacidad calorífica ( $\rho \cdot C_p$ ) y la conductividad térmica del concreto, los resultados obtenidos se presentan en las siguientes figuras.

<b>Conductividad térmica</b> [W/m·C]	1.3-2.9
<b>Densidad</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	2080-2400
<b>Calor específico</b> [J/kg·C]	800-1000

Tabla 6.3. Propiedades del concreto [13].

Los resultados presentados en la Figura 6.17 fueron obtenidos considerando que, el techo está sometido a las mismas condiciones climatológicas en los tres casos, es decir que, la cantidad de energía que recibe a través de la superficie exterior es la misma.

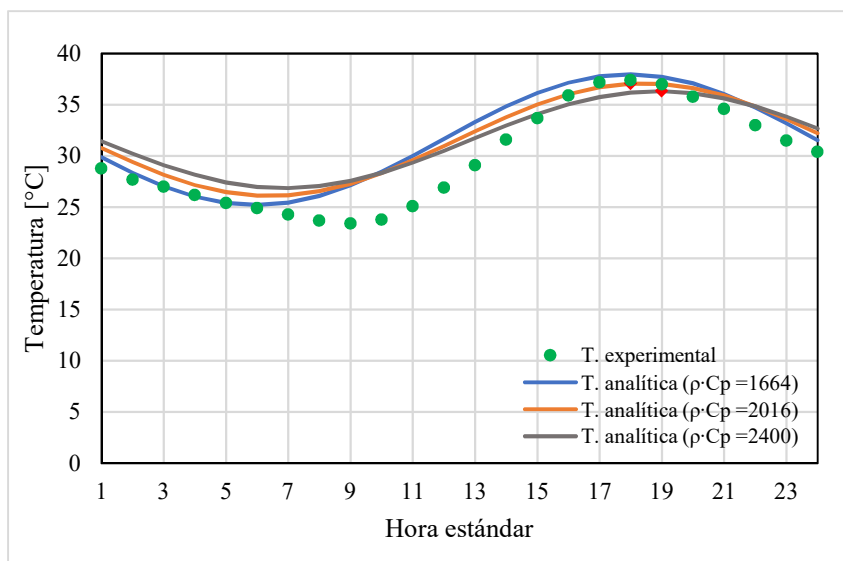


Figura 6.17. Sensibilidad de temperatura de la superficie interna del techo respecto capacidad calorífica del concreto.

Al incrementar la capacidad que tiene el concreto para almacenar energía (mayor capacidad calorífica) se observa que, la superficie interior del techo alcanza mayores temperaturas en las primeras horas del día y menores temperaturas a partir de las 10 de la mañana. Esto se produce porque, el concreto con  $\rho \cdot C_p$  de 2400 kJ/m<sup>3</sup>·K transmite el calor hacia el interior a menor velocidad (menor difusividad térmica) lo cual implica que:

- 1) El tiempo de retraso entre la máxima temperatura de la superficie exterior e interior incrementa.
- 2) En la etapa del día posterior a las horas de máxima radiación el calor liberado es menor.
- 3) En las horas previas al amanecer el techo cuenta con mayor energía que, al ser liberada, incrementa la temperatura de la superficie interior como se observa en la Figura 6.17.



### 6.6.6. Análisis de sensibilidad respecto a la conductividad térmica del concreto

En la sección 3.2 se mencionó que la difusividad térmica está directamente relacionada con la transferencia de calor en estado transitorio y que es directamente proporcional a la conductividad térmica. Por esta razón se realizó un análisis para conocer la influencia de la conductividad térmica sobre el comportamiento térmico del techo. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 6.18 y se observa que la conductividad térmica tiene debido a que, el calor por ganado por radiación es el mecanismo mediante el cual el techo incrementa su temperatura y posteriormente es transferido hacia el interior.

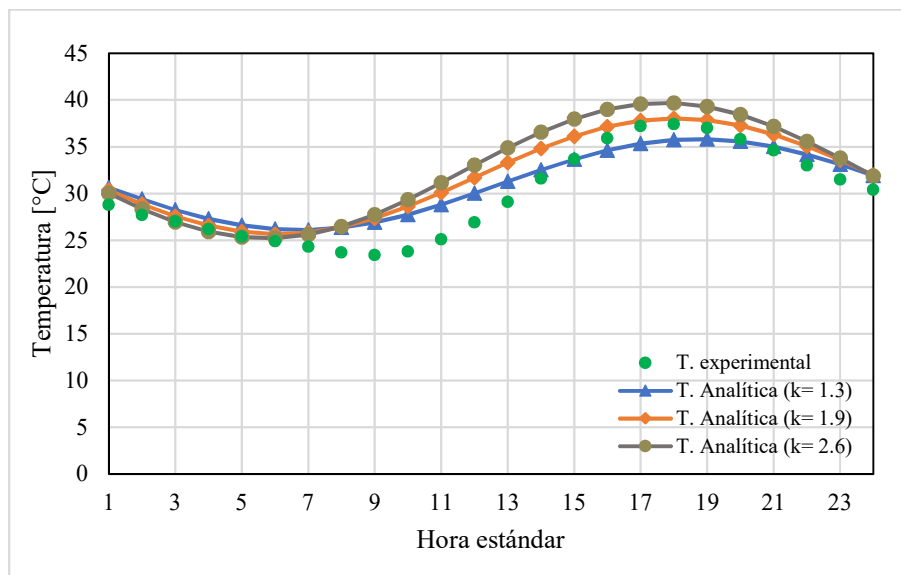


Figura 6.18. Sensibilidad de temperatura de la superficie interna del techo respecto a la conductividad térmica del concreto.

En la Figura 6.18 se observa que al aumentar la conductividad térmica del concreto la superficie interna del techo incrementa su temperatura debido al incremento de la difusividad térmica. Cuando el techo presenta mayor difusividad térmica libera a mayor velocidad la energía en los periodos de mayor radiación solar, pero esto no implica que el techo disminuya la capacidad de almacenar energía por lo que la temperatura en las primeras horas del día no se ve considerablemente afectada por un incremento de la conductividad térmica.

### 6.7. Comparación de las temperaturas analíticas y experimentales del techo

Al considerar las propiedades del concreto y del revestido de la Tabla 6.2 se obtuvieron los resultados presentados en la Figura 6.19 y se observa que la temperatura calculada (T. analítica) es considerablemente mayor desde las 7 hasta las 14 horas. En las primeras horas de este periodo la temperatura calculada es mayor debido a que, la radiación real incidente sobre el techo es menor a la considerada como dato de entrada y en consecuencia la radiación solar que corresponde a la real continúa incrementando lo temperatura en base al estado anterior.

En la Figura 5.1 se observó que, junto al cuarto de monitoreo existe un árbol, el cual genera sombra en las primeras horas de la mañana. Para el cálculo de la temperatura de la superficie del techo se utilizó, como dato de entrada, la radiación sobre una superficie horizontal monitoreada por la estación meteorológica de la casa solar, es decir que, la radiación solar considerada está sobredimensionada respecto a la radiación real incidente sobre el techo. Es por esta razón que, en todos los análisis de sensibilidad realizados en esta sección se observa que, la temperatura analítica, desde las 7 hasta las 10 horas, es considerablemente mayor respecto la temperatura de la superficie interna el techo medida experimentalmente.

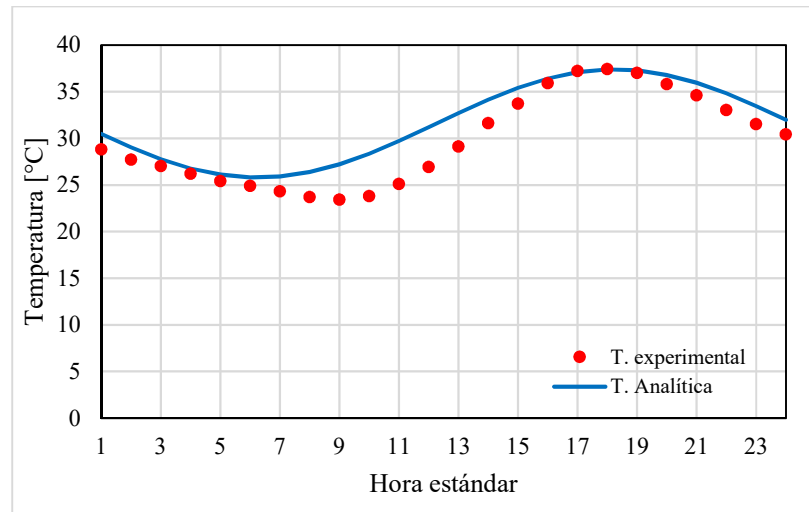


Figura 6.19. Comparación de la temperatura de la superficie interna del techo.

A partir de las 15 horas la diferencia entre T. analítica y T. experimental disminuye debido a que, la radiación solar considerada como dato de entrada corresponde a la radiación real (no hay sombra sobre el techo) y la temperatura de la superficie del techo es un efecto de liberación de energía almacenada por el techo la cual, en este caso particular, no es afectada por el sobredimensionamiento de la radiación en las primeras horas del día.

Considerando la incertidumbre presente en la toma de datos experimentales y que las propiedades térmicas utilizadas no fueron obtenidas experimentalmente los resultados obtenidos permiten determinar que, la metodología utilizada genera resultados válidos para el cálculo de la temperatura de la superficie interna de la pared y el techo analizados.

## 7. DETERMINACIÓN DE FACTORES CLTD

En esta sección se compara y analiza de factores CLTD generados en el algoritmo desarrollado respecto a valores reportados en la literatura y se presentan los factores CLTD para techos y paredes típicamente utilizados en México, considerando las condiciones climatológicas de Monterrey y Veracruz.

### 7.1. Factores CLTD para Gaziantep, Turquía

En esta sección se presenta información, en forma detallada, acerca de los parámetros utilizados para el cálculo de los valores de CLTD de un techo y una pared obtenidos mediante la técnica CFFT para un caso referencial desarrollado en Gaziantep – Turquía (Adil & Yumrutas, 2015). El techo seleccionado para el análisis está conformado por una capa de concreto de 12 cm y una capa interna de revestido de 2 cm. La pared analizada está orientada hacia el sur y cuenta con una capa de ladrillo de 20 cm de espesor y dos capas de revestido (una interna y otra externa) de 2 cm de espesor cada una.

#### 7.1.1. Datos climatológicos y parámetros de entrada.

El análisis de los valores de CLTD, para el caso específico de Gaziantep, se realizó en función de las características climatológicas publicadas en el artículo. Los datos requeridos corresponden a la radiación solar sobre una superficie horizontal, radiación solar sobre una pared orientada hacia el sur y la temperatura ambiental como se presenta en la Figura 7.1.

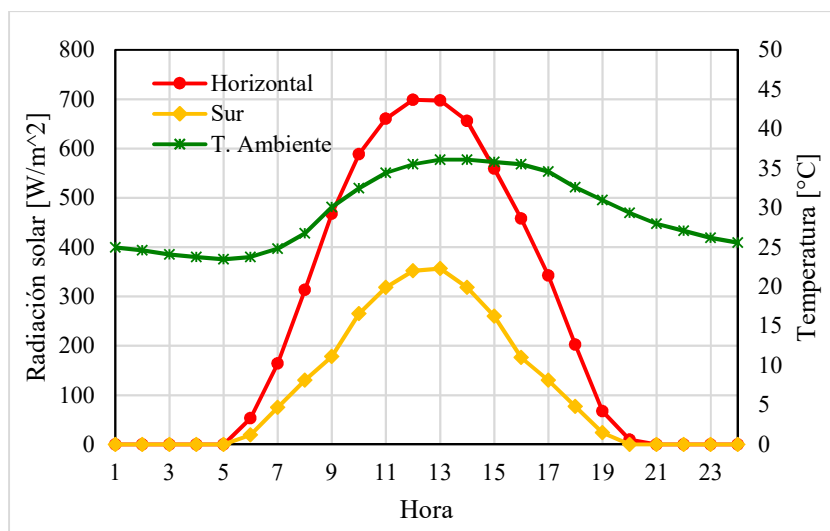


Figura 7.1. Temperatura ambiental y radiación incidente en superficies en época de verano, Gaziantep [1].

Como se mencionó en la sección 4.2.1, para realizar el análisis es necesario contar con las características termo-físicas de cada elemento, las cuales se presentan en la Tabla 7.1. Adicionalmente, en base los datos del artículo, se consideró: temperatura interna de diseño de 25°C, coeficiente combinado de la superficie externa 17 W/m²·K y 9 W/m²·K para la superficie interna, coeficiente global de transferencia de calor de la pared 1.9 W/m²·K y 3.135 W/m²·K para el techo. Los datos de referencia fueron obtenidos de la bibliografía [1] para compararlos con los resultados obtenidos del algoritmo desarrollado.

	<b>Conductividad térmica [W/m·C]</b>	<b>Densidad [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Calor específico [J/kg·C]</b>
<b>Revestido</b>	0.70	2778	840
<b>Concreto</b>	1.37	2076	880
<b>Ladrillo</b>	0.69	1580	840

Tabla 7.1. Propiedades termo-físicas de los materiales [1].

En la publicación revisada únicamente se presentan los valores de CLTD para elementos descritos anteriormente. Debido a que, la metodología utilizada para la determinación de los valores de CLTD se basa en el cálculo de la temperatura de la superficie interna, se determinó dicha temperatura a partir del valor de CLTD mediante la ecuación 3.23.

### 7.1.2. Resultados obtenidos de la temperatura de la superficie interna del techo

Utilizando los datos climatológicos y los parámetros correspondientes al techo de concreto se calculó la temperatura de la superficie interna para las 24 horas y los resultados obtenidos se presenta en la Figura 7.2.

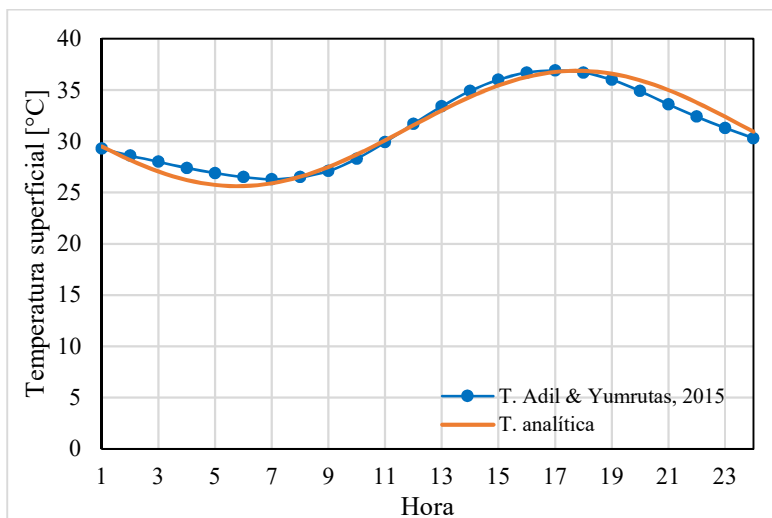


Figura 7.2. Temperatura superficial obtenida para un techo de 12 cm de concreto.

La diferencia máxima alcanzada son 1.4°C y se presenta a las 21 horas. El perfil de temperatura obtenido, presenta gran consistencia con el perfil de referencia. Se observa que existe un desplazamiento de una hora en los resultados y esto se debe a que:

- El método utilizado es sensible al espesor de cada capa y sus propiedades termo-físicas. Esto implica que, si los datos utilizados en el algoritmo desarrollado no son exactamente iguales a la información utilizada para obtener la temperatura de referencia se presentarán discrepancias.
- El método depende del número de términos utilizados en la serie de Fourier (ver sección 4.2.2) el cual puede ser diferente.

A partir de los valores de la temperatura superficial interna se determinó los valores

de CLTD para el techo analizado mediante la ecuación 3.23, los resultados obtenidos se presentan en la Figura 7.3.

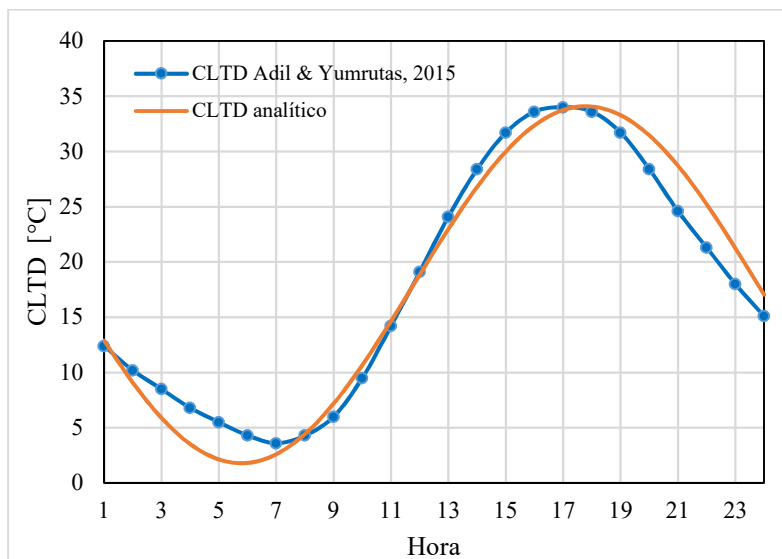


Figura 7.3. Valores de CLTD obtenidos para un techo de 12 cm de concreto.

La diferencia máxima alcanzada es 4.1°C a las 21:00 h como se observa en la Figura 7.3. Esta diferencia se genera debido a que, en el cálculo del factor CLTD se amplifica la diferencia entre la temperatura analítica y la temperatura de referencia. En la hora 11 el CLTD analítico es igual al CLTD de referencia debido a que la temperatura analítica calculada presenta el mismo valor que la temperatura del artículo mencionado. A pesar de esto, se considera aceptable la diferencia obtenida.

### 7.1.3. Resultados obtenidos de la temperatura de la superficie interna la pared

En el análisis de la pared se utilizó como dato de entrada la radiación incidente sobre una superficie orientada hacia el sur (ver Figura 7.1) y las propiedades termo-físicas de la Tabla 7.1. En la Figura 7.4 se observa que la temperatura analítica presenta una máxima diferencia de 0.68°C respecto a la temperatura de referencia a las 16:00 h y que, en el periodo de 6 a 18 horas se presenta una diferencia aproximada de 0.6°C en cada hora.

En función de la temperatura de la superficie calculada en la pared se determinó los valores de CLTD y los resultados obtenidos se presentan en la Figura 7.5. Se observa que existe una diferencia promedio de, aproximadamente, 2°C entre los valores referenciales y los calculados. Esto se debe a que, el CLTD es una función directa de la diferencia entre la temperatura de superficie interna de la pared y la temperatura del aire interno que al ser multiplicada por  $\frac{h_i}{U}$  veces se amplifica el error respecto al valor referencial.

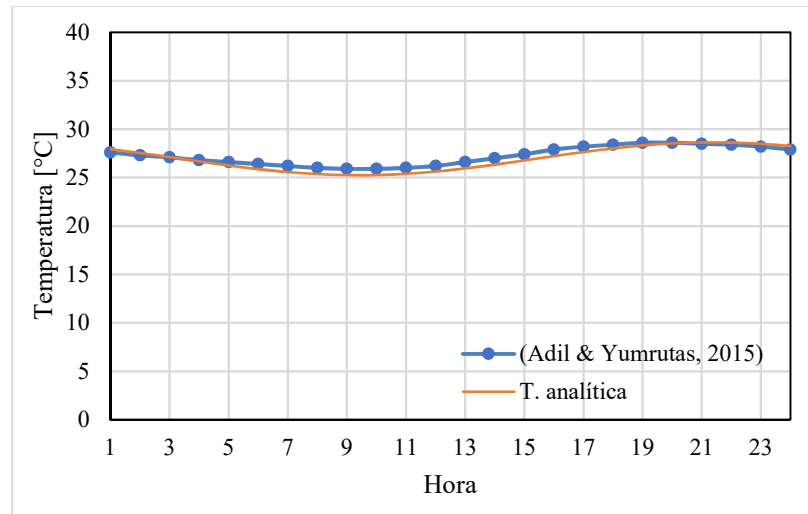


Figura 7.4. Temperatura superficial obtenida para una pared de 20 cm de ladrillo – Gaziantep.

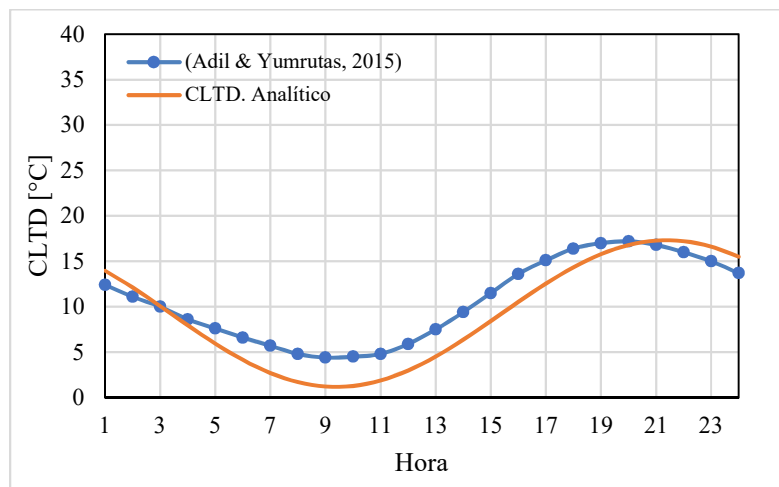


Figura 7.5. Valores de CLTD obtenidos para una pared de 20 cm de ladrillo – Gaziantep.

En el capítulo 6 se observó que los datos obtenidos a través de la metodología utilizada son muy sensibles a los parámetros de entrada, entre ellos las propiedades de las capas de los elementos, coeficientes combinados de transferencia calor, etc. Es por esta razón que las discrepancias obtenidas en el caso del Gaziantep podían deberse a:

- 1) Se utilizó el mismo valor para los coeficientes combinados de transferencia de calor de la superficie interna del techo y de la pared ya que, en el artículo analizado no presenta información específica acerca de este parámetro.
- 2) Se consideró una absorptancia solar para el techo de 0.8 (concreto) y 0.5 para la pared (color claro) debido a que los autores no incluyeron esta información.
- 3) Para determinar los valores de CLTD se asumió que, el coeficiente de convección interna era igual al coeficiente combinado de transferencia de calor puesto que en el artículo no se especificaba valores diferentes.

Considerando dichos supuestos y la sensibilidad del método de cálculo a los parámetros mencionados se determinó los resultados obtenidos acerca de la temperatura de la superficie interna y los valores de CLTD de los elementos analizados representan adecuadamente su comportamiento térmico lo que permite determinar los valores de CLTD para elementos opacos de la envolvente de una edificación en base a las condiciones reales a las que se encuentra sometidas cuyas características termo-físicas son conocidas.

## 7.2. Comparación de factores CLTD generados con valores reportados por ASHRAE.

Para conocer las ventajas o desventajas de la aplicación de CLTD obtenidos para condiciones locales se evaluó la diferencia entre los datos proporcionados por ASHRAE, considerando que son valores utilizados como referencia, y los resultados obtenidos para una pared y un techo sometidos a las condiciones ambientales (ver Figura 6.3) y de operación el 24 de agosto de 2016 en Monterrey.

Debido a que, el techo y la pared del cuarto de monitoreo estudiado experimentalmente presentan configuraciones no consideradas por ASHRAE, se seleccionó la pared #3 y el techo #13, que son las configuraciones más similares a los elementos monitoreados experimentalmente, cuyos valores de CLTD han sido reportados para el mes de agosto y latitud 24°N (ver Tabla 7.2) ya que, corresponde a los parámetros más cercanos las condiciones en la cuales se desarrolló la parte experimental. Los elementos seleccionados presentan la configuración esquematizada en la Figura 7.6 y sus características se utilizaron como datos de entrada al modelo para comparar con los datos reportados por ASHRAE.

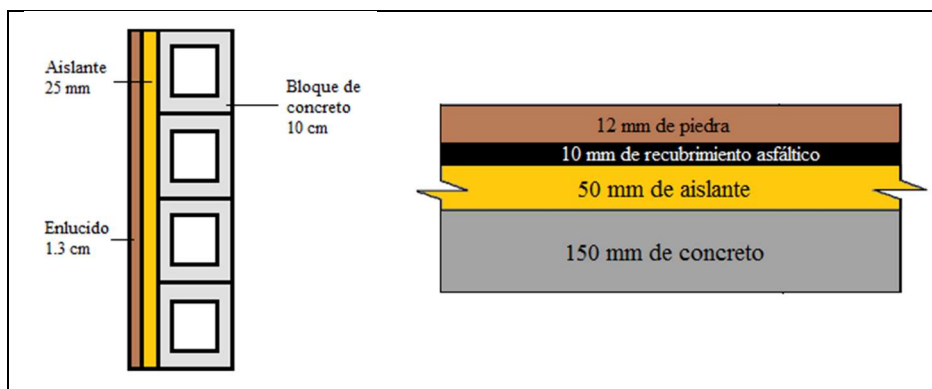


Figura 7.6. Materiales de Techo #13 y pared #3 [33].

### COOLING LOAD TEMPERATURE DIFFERENCE [°F]

Agosto - Latitud 24°N

Pared # 3	Tiempo solar [h]																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Norte	7.0	5.0	3.0	2.0	0.0	-1.0	-1.0	1.0	3.0	6.0	9.0	13.0	16.0	20.0	22.0	24.0	25.0	25.0	24.0	21.0	17.0	14.0	11.0	9
Este	7.0	5.0	3.0	2.0	1.0	0.0	2.0	13.0	27.0	38.0	45.0	46.0	43.0	40.0	37.0	35.0	33.0	30.0	26.0	23.0	19.0	15.0	12.0	10
Sur	7.0	5.0	3.0	2.0	0.0	-1.0	-1.0	0.0	2.0	6.0	12.0	19.0	25.0	30.0	34.0	35.0	34.0	31.0	27.0	23.0	19.0	15.0	12.0	9
Oeste	12.0	9.0	6.0	4.0	2.0	1.0	0.0	1.0	3.0	5.0	9.0	12.0	16.0	24.0	34.0	46.0	57.0	62.0	57.0	47.0	37.0	28.0	22.0	16
Techo # 13	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Horizontal	32	29	26	24	21	19	16	15	14	15	17	21	26	32	37	42	45	47	48	47	44	42	38	35

Tabla 7.2. CLTD para el techo N°13 y la pared N°3 reportados por ASHRAE [33].

De acuerdo a la sección 2.1.5, ASHRAE presenta, de forma alternativa, factores de corrección para temperaturas de diseño y temperaturas ambientales diferentes a las condiciones estándar. Debido a que, la temperatura de diseño definida es 25.55°C (igual a la condición estándar) y la temperatura media en el día de análisis seleccionado es 28.85°C, la ecuación 2.14 toma la forma de la ecuación 7.1.

$$CLTD_{corr} = CLTD - 0.59 \quad 7.1$$

En base a la ecuación 7.1 se determinó los valores de CLTD corregidos para las condiciones locales en Monterrey en base a los valores de la Tabla 7.2 y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 7.3.

#### COOLING LOAD TEMPERATURE DIFFERENCE [°C]

Agosto - Latitud 24°N

Orientación	Pared # 3 U= 1.085 [W/m2-K]														Tiempo solar [h]									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Norte	3.3	2.2	1.1	0.5	-0.6	-1.1	-1.1	0.0	1.1	2.7	4.4	6.6	8.3	10.5	11.6	12.7	13.3	13.3	12.7	11.1	8.9	7.2	5.5	4.4
Este	3.3	2.2	1.1	0.5	0.0	-0.6	0.5	6.6	14.4	20.5	24.4	25.0	23.3	21.6	20.0	18.9	17.7	16.1	13.9	12.2	10.0	7.7	6.1	5.0
Sur	3.3	2.2	1.1	0.5	-0.6	-1.1	-1.1	-0.6	0.5	2.7	6.1	10.0	13.3	16.1	18.3	18.9	18.3	16.6	14.4	12.2	10.0	7.7	6.1	4.4
Oeste	6.1	4.4	2.7	1.6	0.5	0.0	-0.6	0.0	1.1	2.2	4.4	6.1	8.3	12.7	18.3	25.0	31.1	33.9	31.1	25.5	20.0	15.0	11.6	8.3
Orientación	Techo # 13 U=0.665 [W/m2-K]														Tiempo solar [h]									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Horizontal	17.2	15.5	13.9	12.7	11.1	10.0	8.3	7.7	7.2	7.7	8.9	11.1	13.9	17.2	20.0	22.7	24.4	25.5	26.1	25.5	23.9	22.7	20.5	18.9

Tabla 7.3. Valores de CLTD corregidos para Monterrey.

### 7.2.1. Parámetros de entrada.

Se utilizó como datos de entrada detallados a continuación:

- Datos climatológicos correspondientes al 24 de agosto del 2016 presentados en la Figura 6.3
- Propiedades termo-físicas de los materiales presentadas en la Tabla 7.4.
- Coeficiente combinado de transferencia de calor para superficie externa para Monterrey ( $h_o=22.7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ) definido en la sección 6.2.4
- Coeficientes combinados de transferencia de calor de las superficies internas para Monterrey ( $h_{i\text{pared}}=4.5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  y  $h_{i\text{techo}}=5.25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ) definidos en las secciones 6.4.2 y 6.6.2.
- Temperatura de diseño del aire interior ( $T_i=25.55^\circ\text{C}$ ).
- Absorptancia solar de las superficies externas ( $\alpha_s=0.9$ ), debido a que los valores de CLTD reportados son únicamente para superficies oscuras.

Código	Descripción	Conductividad térmica [W/m·C]	Densidad [kg/m3]	Calor específico [J/kg·C]
A6	Revestido	0.41	1251	1086
B5	25 mm de aislamiento	0.04	91	836
B6	50 mm de aislamiento	0.04	91.4	836
C3	10 cm bloque de concreto	0.81	978	836
C13	15 cm concreto	1.7	2246	836
E3	13 mm de recubrimiento asfáltico	0.19	1123	1671.2
E2	50 mm de piedra	1.4	882.2	1671.2

Tabla 7.4. Propiedades termo-físicas, código y número de elemento definido por ASHRAE [7].



### 7.2.2. Resultados obtenidos de CLTD en el techo

Los valores de CLTD para el techo N°13 corregidos en base a las condiciones locales y los valores de CLTD obtenidos, utilizando los parámetros de entrada detallados anteriormente se presentan en la Figura 7.7. Se observa que, los resultados obtenidos presentan un comportamiento similar durante las 24 horas analizadas con un valor máximo en la hora 19.

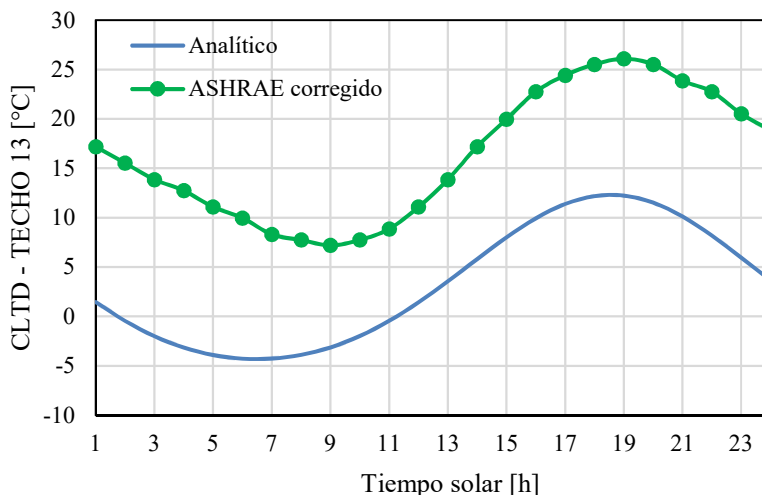


Figura 7.7. Valores de CLTD obtenidos para el techo N°13 vs CLTD reportados por ASHRAE.

La diferencia en magnitud, que se observa en la Figura 7.7, puede generarse, principalmente, por las siguientes razones:

- 1) Los factores CLTD reportados en la literatura consideran  $h_o=17 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , el cual es menor al valor local utilizado. En la sección 6.6.3 se observó que, valores mayores de  $h_o$  provocan que la temperatura de la superficie interna del techo disminuya considerablemente (ver Figura 6.15). En consecuencia, la diferencia entre dicha temperatura y la temperatura del aire, que se encuentra en el espacio acondicionado, es menor obteniéndose valores de CLTD menores de acuerdo a la ecuación 2.14.
- 2) Los valores de CLTD reportados en la literatura consideran  $h_i=8.28 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  que es, aproximadamente, 1.5 veces mayor al valor determinado para las condiciones locales. Debido que, el coeficiente de convección de la superficie interna del techo está directamente con este parámetro y este a su vez tiene una relación directamente proporcional con el CLTD (ver ecuación 2.14) valores menores de  $h_i$  disminuyen la magnitud de los CLTD.
- 3) Los datos climatológicos utilizados son diferentes ya que ASHRAE no reporta los datos de radiación y temperatura ambiental en base a los cuales determinó los factores CLTD.

De acuerdo a los resultados obtenidos se observa que, los valores de CLTD reportados por ASHRAE para el techo analizado sometido a las condiciones locales están sobre dimensionados.

### 7.2.3. Resultados obtenidos de CLTD en la pared

La radiación solar, sobre una superficie horizontal, se utiliza como dato de entrada. Para calcular la temperatura de la superficie interna de una pared y en consecuencia los valores de CLTD correspondientes es necesario determinar la radiación solar incidente sobre la pared analizada, la cual cambia en función de la orientación. Considerando, la radiación solar monitoreada el 24 de agosto de 2014 (ver Figura 6.3), se obtuvo, como resultado del algoritmo desarrollado, la radiación incidente para una superficie orientada en las cuatro direcciones principales y los resultados se presentan en la Figura 7.8. Se observa que, la máxima radiación incidente para cada orientación se presenta en horas diferentes y alcanza su máximo valor a las 9 horas en una superficie orientada hacia el este.

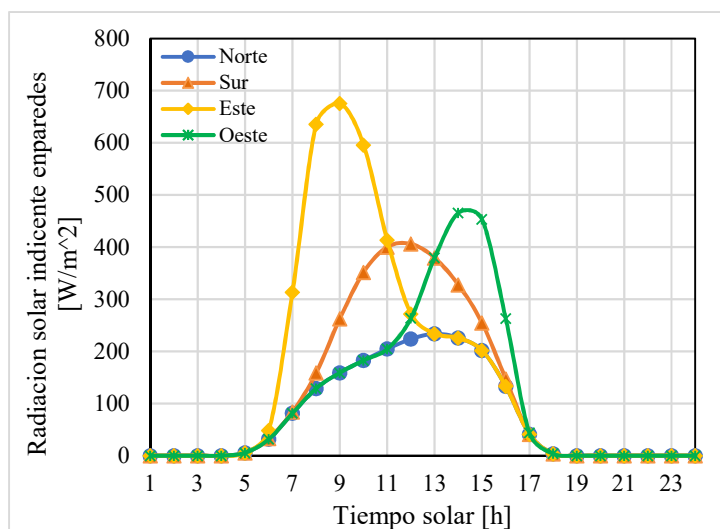


Figura 7.8. Radiación incidente sobre la pared orientada hacia: Norte, Sur, Este y Oeste en Monterrey.

Considerando la radiación incidente de la Figura 7.8 y los parámetros de entrada detallados anteriormente, se determinó los valores de CLTD para la pared N°3, orientada hacia las cuatro direcciones principales como se observa en la Figura 7.9 y en la Figura 7.10.

En la Figura 7.9 se presenta los valores de CLTD calculados para las orientaciones norte y sur. Se observa que, los valores máximos se presentan a la misma hora que los valores reportados por ASHRAE (16:00 h -Sur y 18:00 h-Norte), en todo el periodo analizado el CLTD calculado para condiciones locales es menor que el CLTD definido por ASHRAE y la pared orientada hacia el norte presenta CLTD menores, lo que indica la influencia directa de la radiación incidente. Las diferencias que se generan entre los factores CLTD reportados por ASHRAE y los factores CLTD calculados en el presente proyecto pueden generarse por las siguientes razones:

- 1) Las condiciones climáticas locales no son iguales a las condiciones climáticas utilizadas por ASHRAE. El fenómeno analizado para determinar los factores CLTD es de naturaleza transitoria por lo que, un cambio en los parámetros que regulan el fenómeno (condiciones climáticas) afectan el comportamiento térmico del elemento en cada hora analizada.
- 2) La radiación incidente depende de la ubicación geográfica (latitud y longitud),

día del año y la reflectancia del suelo. Estos parámetros fueron establecidos de acuerdo a las condiciones locales, pero se desconoce los valores utilizados por ASHRAE.

- 3) Los factores CLTD reportados en la literatura consideran  $h_i=8.28 W/m^2\cdot K$ , el cual mayor al valor local utilizado ( $h_i=4.5 W/m^2\cdot K$ ). Esto implica que el coeficiente de transferencia de calor por convección de la pared es menor que el valor estándar utilizado por ASHRAE. Debido a que, los CLTD son directamente proporcionales al coeficiente de convección al tener un valor local menor los factores CLTD presentaran valores más pequeños de acuerdo a la ecuación 2.14.

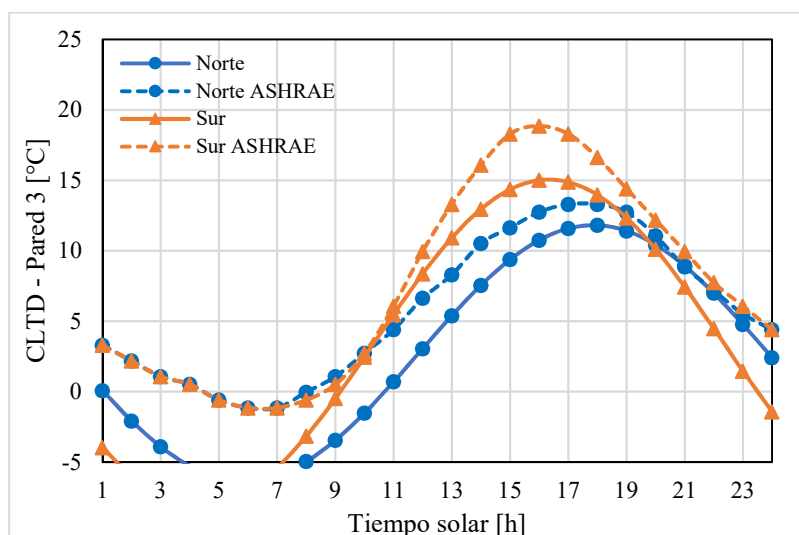


Figura 7.9. Valores de CLTD obtenidos para la pared N°3 con orientación Norte y Sur vs CLTD reportados por ASHRAE.

En la Figura 7.10 se presentan los factores de CLTD calculados y reportados por ASHRAE para la pared N°13 orientada hacia el Este y Oeste. Se observa que los factores calculados son menores a los reportados en la literatura, el CLTD máximo alcanzado ocurre a las 12 horas en la pared orientada hacia el este y a las 20 horas en la pared orientada hacia el oeste.

El comportamiento de los factores de CLTD en el tiempo presentan una distribución diferente para las dos orientaciones. Los resultados obtenidos en la pared orientada hacia el oeste presentan un comportamiento sinusoidal (tipo de respuesta de la técnica matemática utilizada en el modelo) similar al observado en los datos experimentales tomados en la superficie interna en la pared (orientada hacia el oeste) del cuarto de monitoreo (ver Figura 6.1). Debido a que, la temperatura de la superficie interna es el único parámetro variable utilizado para determinar el CLTD a una hora determinada (ver ecuación 2.14) el comportamiento observado en la Figura 7.10 es el esperado para las condiciones locales.

Las diferencias observadas entre los factores CLTD reportados por ASHRAE y los resultados obtenidos pueden generarse debido a que, los parámetros térmicos y las condiciones climáticas locales son diferentes y presentan la misma influencia detallada para las paredes orientadas hacia el norte y sur.

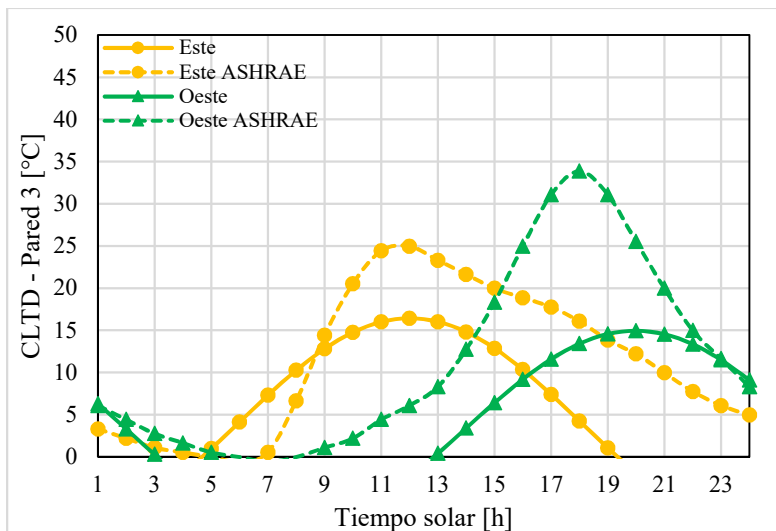


Figura 7.10. Valores de CLTD obtenidos para la pared N°3 con orientación Este y Oeste vs CLTD reportados por ASHRAE.

De acuerdo a los resultados observados en esta sección se considera que los factores CLTD establecidos por ASHRAE para la pared y el techo sobredimensionan la carga de enfriamiento, por lo que la utilización de factores CLTD basados en condiciones específicas estiman de forma más precisa la carga de enfriamiento generada por el calor ganado a través de elementos opacos de la envolvente de una edificación. Esto permite evitar el sobredimensionamiento de los equipos de aire acondicionado.

### 7.3. Factores CLTD determinados para México

Debido a que, no existen valores de CLTD reportados en la literatura para el tipo de techos y paredes comúnmente utilizados en México, se seleccionaron dos ciudades, que cuentan con algunos de los climas representativos del país de acuerdo a la Figura 1.5, tres configuraciones de techos y cuatro tipos de paredes para obtener los valores de CLTD en función de las condiciones climáticas locales y parámetros térmicos de cada material.

Es importante mencionar que, el algoritmo desarrollado permite calcular los CLTD para cualquier ubicación geográfica y configuración de techos y paredes hasta de 4 capas. Se seleccionó dos ciudades para poder mostrar la versatilidad del algoritmo. En el Apéndice B se reportan los valores de CLTD para Mexicali.

#### 7.3.1. Selección de ciudades, materiales y configuración de elementos de la envolvente

Los climas más representativos de México son cálido seco y cálido semi-húmedo debido a que más del 50% del territorio mexicano presenta este tipo de climas como se observa en la Figura 1.5. De acuerdo a la CONUEE, aproximadamente el 30% de las viviendas de las ciudades con estos tipos de clima utilizan aire acondicionado (20% clima semi-húmedo y 30% clima cálido seco) como se observó en la Figura 1.4. Debido a esto, se seleccionó como ciudades de estudio, Monterrey y Veracruz las cuales se encuentran en zonas con clima cálido seco y cálido semi-húmedo, respectivamente.

La losa de concreto y las viguetas con bovedillas forman parte del grupo de materiales resistentes a partir de los cuales se construyen más del 70% de las viviendas en México [9].

Las viguetas son elementos que soportan el peso de la losa y lo distribuyen hacia los cerramientos. Las bovedillas son elementos ligeros que no cumplen ninguna función estructural y su función principal es aliviar el peso de la losa. Debido a que los materiales de bovedillas comúnmente utilizados son concreto y poliestirero expandido (EPS) [34], se seleccionaron dos configuraciones de techo con viguetas de EPS, que se observan en la Figura 7.11 y un techo de losa de concreto para obtener los valores de CLTDs correspondientes.

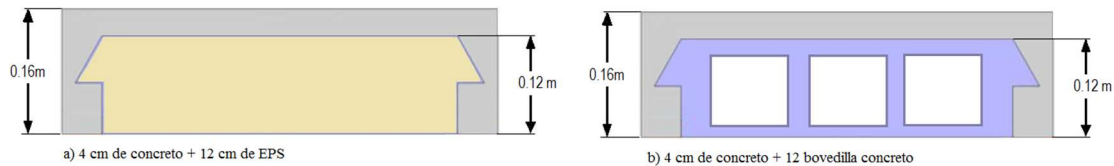


Figura 7.11. Configuraciones seleccionadas de techos con bovedilla de EPS [34] y bovedilla de concreto.

Debido a que, el ladrillo, el bloque de concreto y el bloque de adobe se encuentran dentro del grupo de los materiales resistentes con los cuales se construyen más del 80% de las casas en México de acuerdo al INEGI (ver Figura 2.2), se seleccionaron 3 tipos de paredes, las cuales están conformadas por dos capas de revestido (interna y externa) con espesor  $\frac{3}{4}$  in cada capa y una capa intermedia de 4 pulgadas del material resistente, para determinar los valores de CLTD correspondientes a las cuatro orientaciones principales (norte, sur, este y oeste).

### 7.3.2. Condiciones climáticas y parámetros de entrada.

Para la generación de CLTD se consideró la temperatura ambiental y radiación solar medidas experimentalmente el 24 de agosto del 2017 en Monterrey y los datos climatológicos de Veracruz, tomados de la base de datos de Energyplus [35] (ver Figura 7.12). Dicha información corresponde al mes de agosto ya que es la época del año donde se reportan mayor radiación solar y temperaturas ambientales.

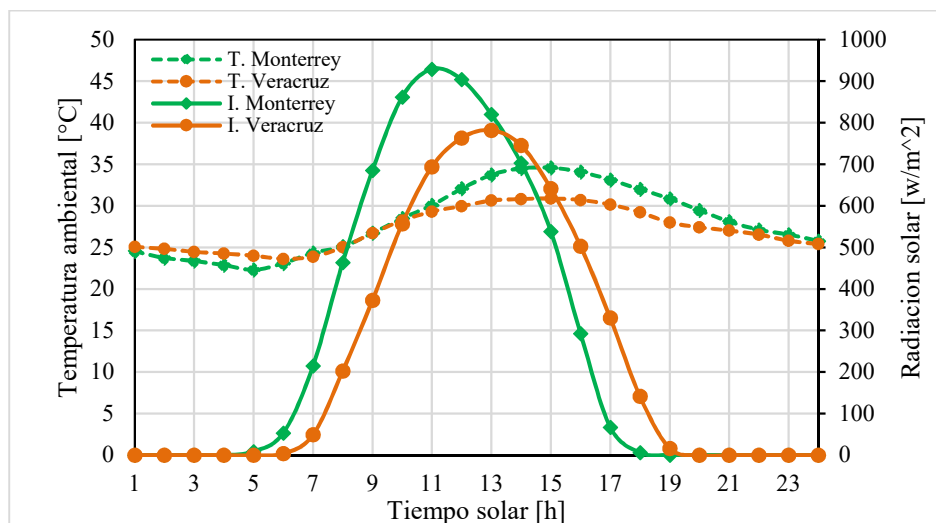


Figura 7.12. Datos climatológicos de Veracruz [35] y Monterrey.

Como parámetros térmicos de entrada se utilizó: el coeficiente combinado de transferencia de calor de la superficie interna para la pared y el techo de 4.5 y 5.25 W/m<sup>2</sup>·°C respectivamente, coeficiente combinado de transferencia de calor de la superficie externa de 22.7 W/m<sup>2</sup>·°C (valores determinados de manera experimental para condiciones locales en Monterrey), temperatura de diseño del aire interno 25°C y las propiedades de los materiales presentados en la Tabla 6.2 y en la Tabla 7.5.

		Conductividad térmica [W/m·°C]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Calor específico [J/kg·°C]	Absorptancia solar
<b>Concreto</b>	[7]	1.73	2242	840	0.50
<b>Bloque de adobe</b>	[36]	0.49	1960	1240	--
<b>Ladrillo</b>	[7]	0.73	1922.22	837.36	--
<b>Poliestireno expandido (EPS)</b>	[34]	0.046	10	1400	--
<b>Poliestireno extruido (XPS)</b>	[34]	0.02885	35	1210	

Tabla 7.5. Propiedades de los materiales típicamente utilizados en México.

Para el cálculo de la radiación incidente sobre las paredes orientadas hacia las cuatro direcciones principales (N, S, E y O) se utilizaron las características geográficas descritas en la Tabla 6.1 y en la Tabla 7.6 para Monterrey y Veracruz, respectivamente. El valor del ángulo acimutal de la pared corresponde a la orientación analizada.

Día del año	236
Longitud estándar	90.0° (grados oeste)
Longitud local	96.7 ° (grados oeste)
Latitud	19.12°N
Reflectancia del suelo	0.25

Tabla 7.6. Parámetros geográficos de Veracruz

En este documento se reportan los resultados para las cuatro orientaciones principales pero el algoritmo fue diseñado para determinar los valores de CLTD para cualquier orientación, ejemplo N45°E.

### 7.3.3. Resultados obtenidos de CLTD en el techo

Los valores de CLTD para la pared y el techo se reportan en función del tiempo solar debido a que, es más sencillo el análisis de los ángulos de incidencia de la radiación solar respecto a una superficie en comparación al tiempo local [8]. Adicionalmente, en la literatura revisada los CLTD han sido reportados en función del tiempo solar.

En la Tabla 7.7 se presentan los valores de CLTD calculados para tres tipos de techo para cada ciudad. El techo Tipo 1 está conformado por una capa de concreto, espesor 15 cm y una capa interna de revestido de 1 cm de espesor. El techo Tipo 2 presenta una capa externa de 4 cm de concreto y la bovedilla de poliestireno expandido, espesor 12 cm (ver Figura 7.11.a). El techo Tipo 3 está conformado por una capa de concreto y bovedilla de concreto (ver Figura 7.11.b).

### COOLING LOAD TEMPERATURE DIFFERENCE [°C]

MONTERREY - Latitud 25.65°N, Longitud 100.28°

Techo	U W/m2-K	Tiempo solar [h]																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Tipo1	2.98	5.2	4.0	3.0	2.3	1.7	1.5	1.6	2.0	2.7	3.6	4.7	5.9	7.1	8.3	9.3	10.0	10.6	10.8	10.7	10.3	9.6	8.7	7.6	6.4
Tipo 2	0.35	-1.9	-5.1	-7.4	-8.9	-9.3	-8.7	-7.0	-4.5	-1.2	2.6	6.6	10.6	14.2	17.4	19.7	21.2	21.6	21.0	19.3	16.8	13.5	9.7	5.7	1.7
Tipo 3	2.46	2.9	0.4	-1.8	-3.3	-4.3	-4.5	-4.0	-2.8	-1.0	1.3	3.9	6.7	9.4	11.9	14.1	15.6	16.6	16.8	16.3	15.1	13.3	11.0	8.4	5.6

### COOLING LOAD TEMPERATURE DIFFERENCE [°C]

VERACRUZ - Latitud 19.12°N, Longitud 96.13°

Techo	U W/m2-K	Tiempo solar [h]																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Tipo1	2.98	4.6	3.6	2.7	1.9	1.3	1.0	0.9	1.1	1.5	2.2	3.0	4.0	5.0	6.0	6.9	7.7	8.2	8.6	8.7	8.5	8.1	7.4	6.6	5.6
Tipo 2	0.35	-0.1	-3.0	-5.4	-7.1	-8.0	-8.1	-7.2	-5.5	-3.1	-0.2	3.0	6.4	9.7	12.6	15.0	16.7	17.6	17.6	16.8	15.1	12.7	9.8	6.6	3.2
Tipo 3	2.46	3.5	1.2	-0.8	-2.4	-3.5	-4.1	-4.0	-3.4	-2.2	-0.5	1.5	3.8	6.1	8.4	10.4	12.0	13.1	13.7	13.6	13.0	11.8	10.1	8.1	5.8

Tabla 7.7. CLTD calculados para techos en Monterrey y Veracruz.

En la Figura 7.13 se graficó los datos de la Tabla 7.7 y se observa que, los techos conformados por una capa de poliestireno expandido presenta valores mayores en las horas críticas, a partir de mediodía, y valores menores en las primeras horas del día respecto al techo con losa de concreto y la bovedilla de concreto en las ciudades analizadas. Esto se debe a que el CLTD es inversamente proporcional al coeficiente global de transferencia de calor ( $U$ ) y el techo de poliestireno expandido presenta menores valores de  $U$  en comparación a las configuraciones adicionales.

El techo de EPS modelado en Monterrey presenta un CLTD crítico de 21.6°C y en Veracruz el máximo valor alcanzado es 17.6°C. Considerando que, en la modelación realizada la capacidad del almacenar calor de los materiales estudiados se mantiene constante y no depende de la ubicación geográfica, la temperatura interna del techo incrementa si la radiación incidente y la temperatura exterior son mayores. Monterrey presenta temperaturas ambientales y la radiación solar más altas respecto a Veracruz, es por esta razón que, los valores de CLTD son más altos para Monterrey.

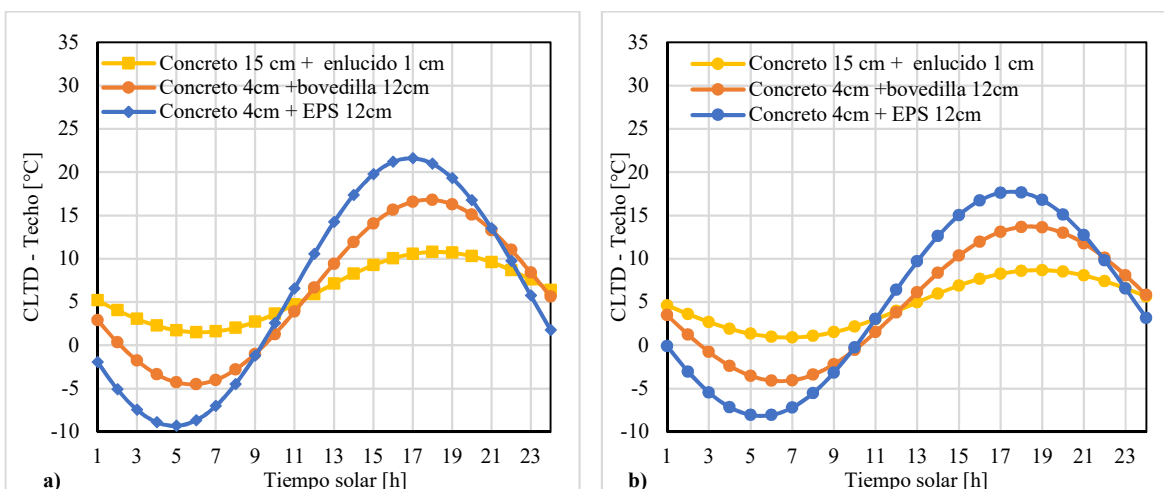


Figura 7.13. Comparación de Valores de CLTD para techos de edificaciones en: a) Monterrey y b) Veracruz.

Los valores negativos de CLTD indican que, la temperatura de la superficie interna del techo es menor a la temperatura del aire interno debido a que en las primeras horas de la mañana el techo no recibe radiación solar y la temperatura ambiental es menor a 25°C. Al analizar las condiciones climatológicas Monterrey se observó que en las primeras horas de la mañana presenta temperaturas ambientales menores respecto a Veracruz. Esto produce valores más bajos de CLTD como se observa en la Figura 7.13.

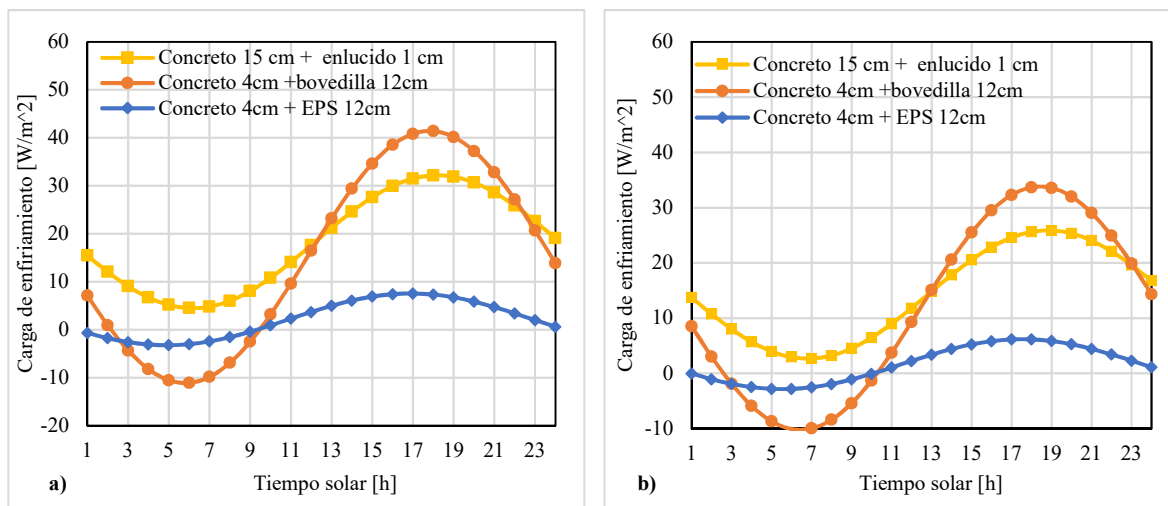


Figura 7.14. Cargas de enfriamiento por unidad de área de techos en edificaciones: a) Monterrey y b) Veracruz.

Utilizando la ecuación 2.13 se determinó la carga de enfriamiento por unidad de área que se produce a causa del calor ganado a través de cada configuración de techo de la Figura 7.13. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 7.14 y se observa que el techo de poliestireno expandido es la mejor configuración ya que aísla el espacio interior de las condiciones térmicas externas disminuyendo la carga de enfriamiento. El techo de bovedilla no es una configuración recomendable ya que, bajo las mismas condiciones el calor ganado a través de este elemento es mayor generando cargas de enfriamiento mayores

#### 7.3.4. Resultados obtenidos de CLTD en la pared

La determinación de los factores CLTD, para las paredes descritas en la sección 7.3.2, requiere el cálculo de la radiación incidente en una superficie vertical orientada en la dirección analizada. Mediante el algoritmo desarrollado se determinó que en Veracruz las paredes orientadas hacia las cuatro direcciones principales (N, S, E y O) están expuestas a la radiación solar con las características presentadas en la Figura 7.15. En Monterrey, la radiación incidente sobre las paredes presenta las características mostradas en la Figura 7.8.

De acuerdo a la ubicación geográfica de Veracruz, la trayectoria que sigue el sol, desde el amanecer hasta el atardecer, ocasiona que las paredes orientadas hacia el sur y el norte no reciban radiación solar directa obteniéndose valores bajos de radiación incidente respecto a las demás orientaciones como se observa en la Figura 7.15. La pared orientada hacia el oeste tiene la particularidad de que, en horas de la tarde, cuando la radiación global presenta valores altos, el ángulo de incidencia del sol sobre la pared es pequeño. Esto genera que la radiación solar directa incidente sobre la pared sea alta y en consecuencia la radiación total incidente es mayor.



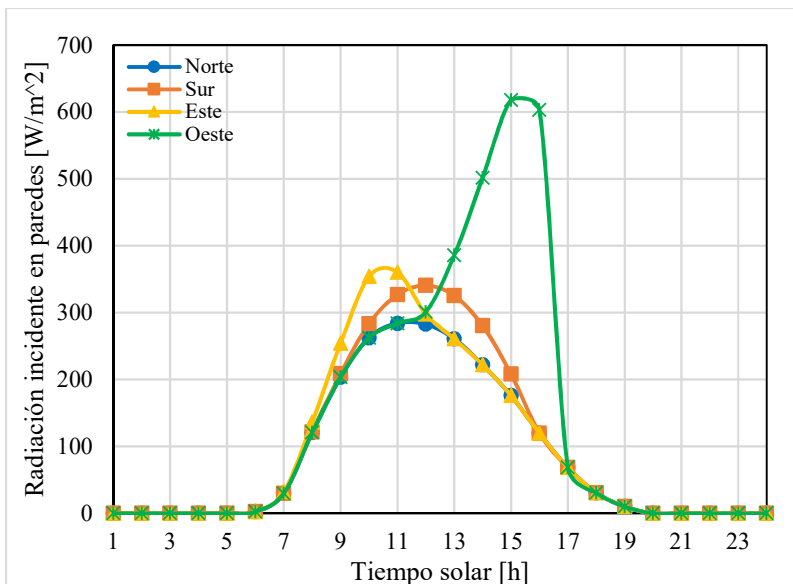


Figura 7.15. Radiación incidente sobre paredes orientadas hacia: Norte, Sur, Este y Oeste en Veracruz.

Los valores de CLTD obtenidos, como resultados del algoritmo computacional, para los tres tipos de paredes detalladas anteriormente se presentan en la Tabla 7.8 y Tabla 7.9 para Monterrey y Veracruz, respectivamente.

### COOLING LOAD TEMPERATURE DIFFERENCE [°C]

MONTERREY - Latitud 25.65°N, Longitud 100.28°

Orientación	Pared - Bloque de adobe U= 1.918 [W/m2-K]																							
	Tiempo solar [h]																							
Norte	2.9	2.4	1.9	1.3	0.9	0.5	0.2	0.1	0.1	0.2	0.4	0.8	1.2	1.8	2.3	2.8	3.3	3.6	3.9	4.1	4.1	4.0	3.7	3.4
Este	0.8	1.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.8	1.2	1.7	2.3	2.8	3.4	3.9	4.3	4.6	4.7	4.7	4.6	4.3	3.9	3.4	2.8	2.3	1.7
Sur	2.5	1.9	1.3	0.8	0.5	0.2	0.1	0.1	0.3	0.6	1.1	1.6	2.2	2.8	3.3	3.8	4.2	4.4	4.6	4.5	4.3	4.0	3.6	3.0
Oeste	4.1	3.7	3.2	2.6	2.0	1.4	0.9	0.5	0.2	0.0	0.0	0.1	0.4	0.8	1.4	1.9	2.5	3.1	3.6	4.1	4.4	4.5	4.5	4.4
Orientación	Pared - Bloque de concreto U= 2.275 [W/m2-K]																							
	Tiempo solar [h]																							
Norte	0.9	-0.1	-0.8	-1.4	-1.7	-1.8	-1.6	-1.2	-0.5	0.3	1.3	2.3	3.3	4.2	5.0	5.5	5.9	5.9	5.7	5.3	4.6	3.8	2.9	1.8
Este	-1.6	-1.3	-0.8	-0.1	0.8	1.8	2.9	4.0	4.9	5.7	6.3	6.6	6.7	6.4	5.9	5.2	4.3	3.3	2.2	1.1	0.2	-0.6	-1.2	-1.5
Sur	-0.4	-1.1	-1.7	-1.9	-1.9	-1.6	-1.0	-0.2	0.8	1.9	3.0	4.1	5.0	5.8	6.3	6.6	6.5	6.2	5.6	4.8	3.9	2.8	1.7	0.6
Oeste	3.1	2.0	0.9	-0.2	-1.0	-1.6	-2.0	-2.1	-1.9	-1.3	-0.6	0.4	1.4	2.6	3.7	4.7	5.6	6.2	6.6	6.6	6.4	5.9	5.1	4.2
Orientación	Pared - Ladrillo U= 2.20 [W/m2-K]																							
	Tiempo solar [h]																							
Norte	2.0	1.3	0.6	0.1	-0.4	-0.6	-0.7	-0.6	-0.3	0.2	0.7	1.4	2.1	2.8	3.5	4.1	4.5	4.8	4.9	4.7	4.4	4.0	3.4	2.7
Este	-0.3	-0.4	-0.3	0.1	0.6	1.2	1.9	2.7	3.5	4.2	4.8	5.2	5.5	5.5	5.4	5.0	4.5	3.9	3.2	2.4	1.6	0.9	0.4	-0.1
Sur	1.2	0.5	-0.1	-0.5	-0.7	-0.7	-0.5	-0.1	0.4	1.1	1.9	2.7	3.5	4.2	4.7	5.1	5.4	5.4	5.2	4.8	4.2	3.5	2.8	2.0
Oeste	3.8	3.0	2.2	1.4	0.6	0.0	-0.5	-0.8	-0.9	-0.7	-0.4	0.1	0.8	1.6	2.4	3.2	3.9	4.6	5.0	5.3	5.4	5.3	4.9	4.4

Tabla 7.8 CLTD calculados para tres tipos de paredes en Veracruz.

COOLING LOAD TEMPERATURE DIFFERENCE [°C]

VERACRUZ - Latitud 19.12°N, Longitud 96.7°

Orientación	Pared - Bloque de adobe U= 1.918 [W/m2-K]												Tiempo solar [h]											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Norte	1.1	0.8	0.5	0.2	0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	1.1	1.4	1.8	2.2	2.5	2.7	2.9	3.0	2.9	2.8	2.6	2.3	1.9	1.5
Este	0.8	0.5	0.2	0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.8	1.2	1.6	2.0	2.3	2.6	2.9	3.0	3.1	3.0	2.8	2.6	2.3	1.9	1.5	1.1
Sur	1.2	0.8	0.5	0.2	0.1	0.0	0.1	0.2	0.5	0.8	1.1	1.5	2.0	2.3	2.6	2.9	3.1	3.1	3.1	2.9	2.7	2.3	2.0	1.6
Oeste	3.3	2.9	2.4	2.0	1.5	1.0	0.6	0.2	0.0	-0.1	-0.1	0.1	0.4	0.8	1.2	1.7	2.2	2.6	3.1	3.4	3.6	3.7	3.7	3.5

Orientación	Pared - Bloque de concreto U= 2.275 [W/m2-K]												Tiempo solar [h]											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Norte	-0.8	-1.2	-1.3	-1.3	-1.0	-0.6	-0.1	0.6	1.3	2.0	2.7	3.3	3.8	4.1	4.3	4.2	4.0	3.6	3.1	2.4	1.7	0.9	0.3	-0.4
Este	-1.2	-1.3	-1.3	-1.0	-0.5	0.0	0.7	1.5	2.2	2.9	3.5	4.0	4.3	4.4	4.3	4.1	3.6	3.0	2.4	1.6	0.9	0.2	-0.4	-0.9
Sur	-0.9	-1.3	-1.4	-1.3	-1.1	-0.6	0.0	0.7	1.4	2.2	2.9	3.5	4.0	4.4	4.5	4.4	4.2	3.7	3.2	2.5	1.7	0.9	0.2	-0.4
Oeste	2.2	1.3	0.4	-0.4	-1.1	-1.6	-1.8	-1.8	-1.5	-1.0	-0.3	0.5	1.4	2.3	3.3	4.1	4.7	5.2	5.4	5.1	4.7	4.0	3.2	2.4

Orientación	Pared - Ladrillo U= 2.20 [W/m2-K]												Tiempo solar [h]											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Norte	0.2	-0.1	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	-0.1	0.3	0.8	1.3	1.8	2.3	2.7	3.1	3.4	3.5	3.5	3.3	3.1	2.7	2.2	1.7	1.2	0.7
Este	-0.2	-0.4	-0.5	-0.5	-0.3	0.0	0.4	0.9	1.4	2.0	2.5	2.9	3.3	3.5	3.6	3.6	3.4	3.1	2.7	2.2	1.7	1.1	0.6	0.2
Sur	0.2	-0.2	-0.4	-0.6	-0.5	-0.4	-0.1	0.3	0.8	1.4	1.9	2.5	2.9	3.3	3.6	3.7	3.6	3.5	3.2	2.8	2.3	1.7	1.2	0.7
Oeste	2.9	2.2	1.5	0.9	0.3	-0.2	-0.6	-0.8	-0.8	-0.6	-0.3	0.2	0.8	1.4	2.1	2.8	3.4	3.9	4.2	4.4	4.4	4.2	3.9	3.5

Tabla 7.9. CLTD calculados para tres tipos de paredes en Veracruz.

En la Figura 7.16 se presentan los valores de CLTD para los tres tipos de paredes orientadas hacia el Oeste y Norte en Veracruz. Se observa que, en las dos orientaciones, la pared construida con bloque de adobe presenta un menor rango de CLTD y el valor más crítico ocurre tres horas después que la pared con bloque de concreto. Esto indica que, el bloque de adobe presenta características aislantes y mayor inercia térmica, lo cual disminuye el calor ganado a través de la pared siendo la mejor opción para disminuir la cantidad de calor ganado a través de dichos elementos. Adicionalmente, el valor máximo de CLTD de cada tipo de pared ocurre antes para la orientación Norte y esto se debe a que, la máxima radiación incidente en la pared orientada al Norte ocurre antes que, la máxima radiación en la pared orientada hacia el oeste. En la Figura 7.17 se observa que, todas las características descritas se presentan de forma similar en las paredes analizadas en Monterrey, pero con valores de CLTD ligeramente mayores.

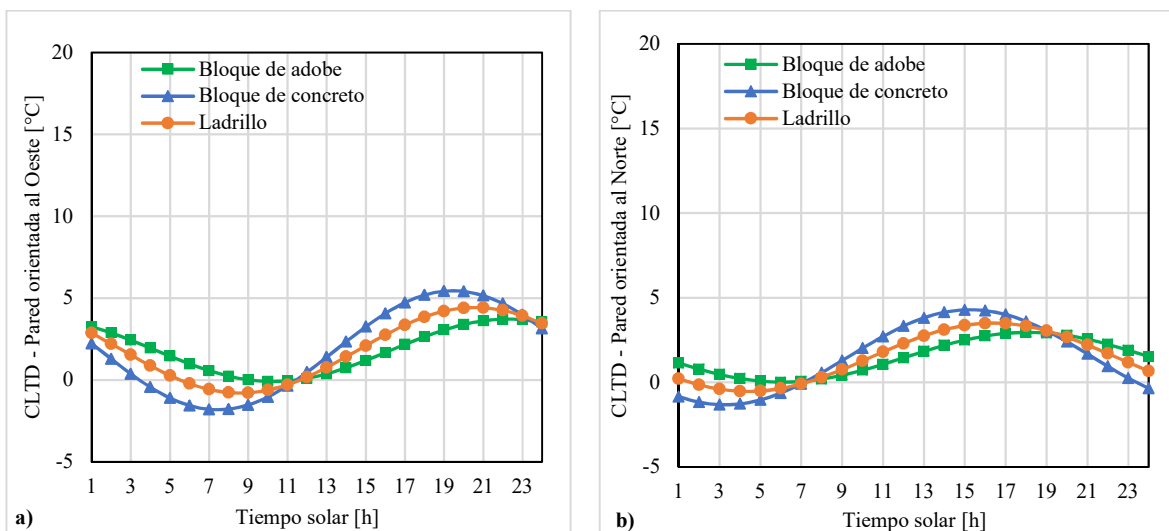


Figura 7.16. CLTD obtenidos para diferentes tipos de pares orientadas hacia: a) Oeste y b) Norte en Veracruz.

Al analizar la pared de concreto de la Figura 7.16 y la Figura 7.17 se observa que, el CLTD más alto, de la pared de concreto orientada hacia el oeste y norte, se alcanzan en Monterrey ( $6.6^{\circ}\text{C}/20:00\text{h}/\text{oeste}$  y  $5.9^{\circ}\text{C}/18:00\text{h}/\text{norte}$ ). En Monterrey se tiene temperaturas ambientales y radiación solar más alta, lo que genera que el calor transferido por conducción hacia los elementos opacos de la envolvente incrementa y en consecuencia se obtienen CLTD más altos.

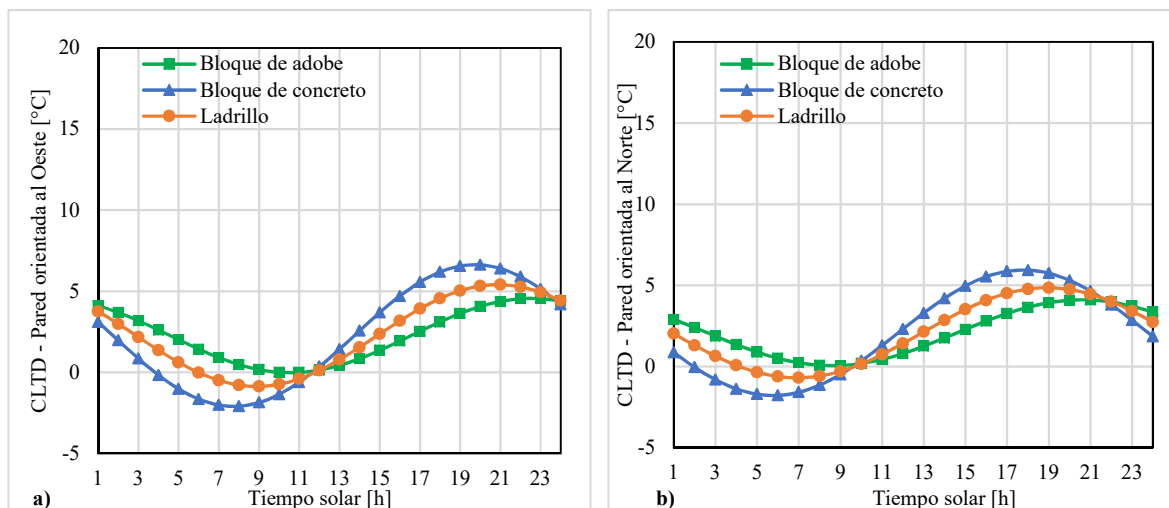


Figura 7.17. CLTD obtenidos para diferentes tipos de pares orientadas hacia: a) Oeste y b) Norte en Monterrey.

En la Figura 7.12 se observa que, en las primeras horas de la mañana, Monterrey presenta temperaturas ambientales menores a  $25^{\circ}\text{C}$  (temperatura de diseño del aire interno). Considerando que, desde la 1:00h hasta las 7:00h no hay radiación solar, la temperatura ambiental es el parámetro térmico externo que regula el proceso de transferencia de calor a través de las paredes. Por esta razón, los valores de CLTD más bajos se presentan en Monterrey ( $-2.1/8:00\text{h}/\text{oeste}$  y  $-1.7/6:00\text{h}/\text{norte}$ ).

La ubicación geográfica del elemento analizado y las condiciones climatológicas de la zona en la que se encuentra son aspectos muy influyentes en el comportamiento térmico de la envolvente de una edificación. Por esta razón, en la Figura 7.18 se observa que la pared de concreto presenta factores de CLTD en un rango más amplio en Monterrey.

En la Figura 7.18 se observa que, el máximo valor de CLTD en Monterrey se presenta a las 13:00h en la pared orientada hacia el este ( $6.7^{\circ}\text{C}$ ) y en Veracruz a las 20 horas en la pared orientada al oeste ( $5.4^{\circ}\text{C}$ ). Esto indica que al utilizar los factores CLTD de Monterrey, en paredes ubicadas en Veracruz, se sobreestimaría la carga de enfriamiento como se observa en la Figura 7.19. Esto implicaría un sobredimensionamiento de la capacidad del sistema de climatización.

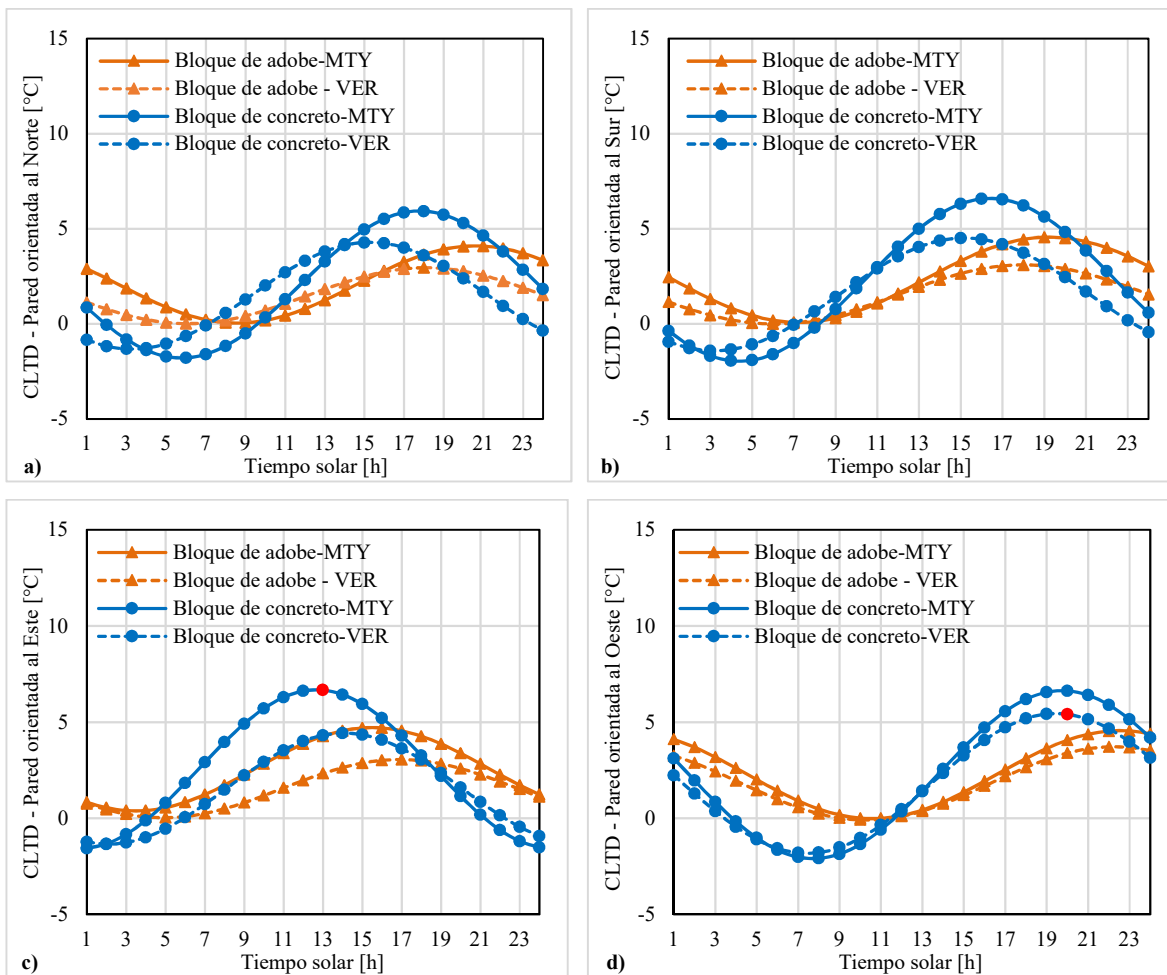


Figura 7.18. Comparación de CLTD de paredes de bloque de concreto y adobe en Monterrey y Veracruz.

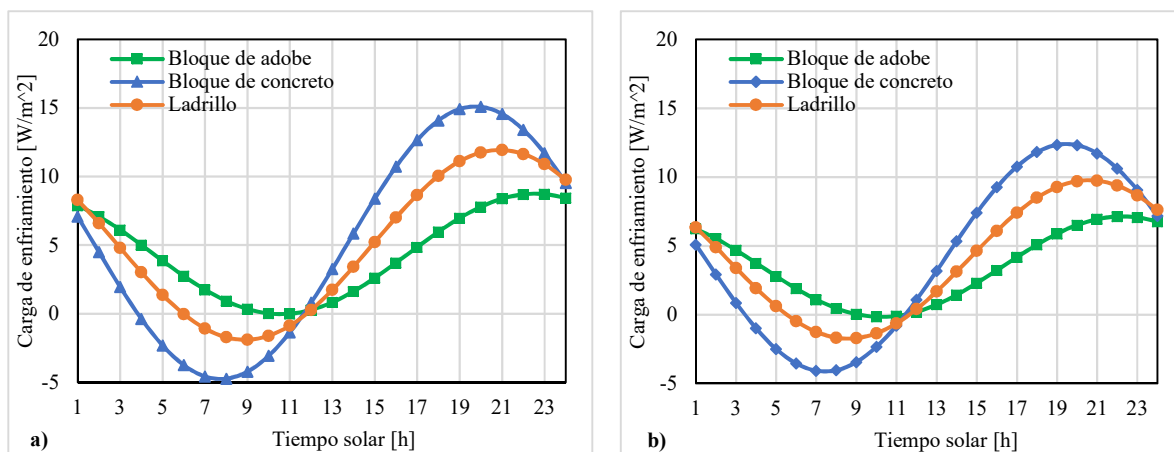


Figura 7.19 Cargas de enfriamiento por unidad de área de una pared orientada hacia el oeste

a) Monterrey y b) Veracruz.

## 8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En la primera sección de este capítulo se presentan conclusiones acerca de: 1) la comparación de los resultados obtenidos del algoritmo desarrollado con los datos obtenidos durante la ejecución del experimento, 2) los valores de CLTD calculados en base a casos específicos establecidos por ASHRAE y 3) los valores de CLTD obtenidos para techos planos y paredes construidos con materiales típicos de México considerando las condiciones climatológicas de Monterrey y Veracruz. En la segunda sección se establece los trabajos sugeridos para nuevos proyectos tomando como punto de partida el presente proyecto.

### 8.1. Conclusiones

En los datos obtenidos experimentalmente se observó que las condiciones climáticas presentan un comportamiento periódico en época de verano y en consecuencia la pared y el techo presentan una respuesta térmica similar. Es por esta razón que la aplicación de la técnica CFFT asumiendo una condición en la temperatura de la pared en cualquier posición, es adecuada ya que es una simplificación que representa una condición real que permite analizar la inercia térmica de los elementos analizados.

Experimentalmente se determinó que el techo de concreto monitoreado presenta mayor inercia térmica que la pared de bloque de concreto debido a que, la temperatura de la superficie interna del techo (máxima de 35°C) presentó valores menores a la superficie exterior a pesar de que esta alcanzó temperaturas hasta 59°C. Esto implica que el techo de concreto aísla el espacio interno de las condiciones térmicas externas de mejor manera que la pared de bloque, la cual presentó una máxima temperatura de 38°C en la superficie externa y 32°C en la superficie interna.

La determinación del coeficiente de transferencia por radiación, considerando que la temperatura de los alrededores es igual a la temperatura ambiental, representó una simplificación válida para las condiciones climatológicas de Monterrey. Esto se comprobó calculando el coeficiente combinado de transferencia de calor suponiendo que la temperatura de los alrededores es igual a la temperatura del cielo y el valor del coeficiente disminuyó únicamente 2%.

El modelo matemático determina la transferencia de calor por conducción, en una dimensión, a través de una pared o un techo plano multicapas. Para resolver dicho modelo, se asumió que la temperatura del aire en el espacio acondicionado es constante durante las 24 horas en las cuales se realiza el análisis. Este supuesto es una simplificación que no genera diferencias considerables respecto a los resultados obtenidos al considerar la temperatura del aire interno real (varía con el tiempo) como se observó en los resultados obtenidos en la sección 6.4 y en la sección 6.6. Por lo que, es una simplificación válida para obtener la solución analítica del problema bajo condiciones reales.

El coeficiente combinado de transferencia de calor en la superficie externa es el parámetro térmico más influyente en los resultados del modelo, que no está relacionado con el material de los componentes, sobre el comportamiento del techo y de la pared debido a que, determina el calor total disponible a ser transferido por conducción a través del elemento. Debido a que es un parámetro que depende de las condiciones climáticas locales

debe ser determinado experimentalmente o establecido en base a información de la literatura para las condiciones climatológicas del caso de estudio.

La absorptancia solar es un parámetro térmico, directamente relacionado con el color y el acabado de la superficie externa, muy influyente en la cantidad calor que gana un elemento por radiación. Al considerar este parámetro en la selección de los materiales y colores de la envolvente es posible disminuir el consumo de energía eléctrica para garantizar confort de los ocupantes, sin requerir grandes inversiones.

Los resultados obtenidos de la temperatura de la superficie interna del techo monitoreado, mediante el algoritmo desarrollado, presentaron valores mayores a los datos experimentales desde las 8:00h hasta 15:00h debido a que la radiación solar utilizada como dato de entrada al modelo fue mayor a la radiación real desde las 7:00h hasta 10:00h.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la sección 7.2, la aplicación de CLTD publicados por ASHRAE de forma directa o considerando los factores de corrección pueden generar sobredimensionamiento de las cargas de enfriamiento a través de las paredes y techos cuando las condiciones climatológicas, los parámetros térmicos locales, los materiales y configuraciones de las capas de los elementos son diferentes a los definidos como parámetros estándar o típico según ASHRAE.

La ubicación geográfica, las condiciones climáticas y los parámetros térmicos de la pared y el techo analizado tienen gran influencia en los factores CLTD. Considerar las condiciones locales permitirá estimar las cargas térmicas a través de elementos opacos de la envolvente de manera más precisa.

En base a los valores de CLTD obtenidos para techos y las cargas de enfriamiento calculadas por unidad de área, se determinó que los techos construidos con una estructura de vigueta y bovedilla de poliestireno expandido disminuyen el calor ganado a través del techo respecto a la de losa maciza de concreto y la bovedilla de concreto. Por lo que, es la configuración de techo más recomendada para disminuir las cargas requeridas para el enfriamiento de un espacio interno.

Los resultados obtenidos en la sección 7.3.4 mostraron que, el material resistente, utilizado en la construcción de paredes, más adecuado para aislar el espacio interior y disminuir los requerimientos energéticos y garantizar condiciones de confort en los espacios que requieren climatización es el bloque de adobe respecto al ladrillo y al bloque de concreto.

El cálculo de los factores CLTD, a partir de condiciones climáticas específicas, ubicación geográfica de la edificación y parámetros térmicos locales presentan beneficios cuantitativos que permiten estimar la carga de enfriamiento a causa de calor ganado a través de paredes y techos de manera más precisa y disminuye la posibilidad de sobredimensionamiento de los sistemas de climatización.

El algoritmo desarrollado incluye el cálculo de la radiación incidente sobre una superficie vertical orientada en cualquier dirección y ubicada geográficamente en cualquier parte del mundo. Esta característica permite que, el algoritmo tenga gran versatilidad en el cálculo de los valores de CLTD y adicionalmente provee información útil para el diseño

arquitectónico de las edificaciones.

El procedimiento utilizado para determinar los factores CLTD permite analizar el comportamiento térmico de diferentes materiales utilizados en la construcción de techos planos y paredes sometidos a distintas condiciones climatológicas por lo que, es una herramienta útil para la toma de decisiones en etapas tempranas del diseño de las edificaciones.

## **8.2. Trabajos futuros**

Para conocer las ventajas del método CLTD en la estimación de cargas de enfriamiento sería indicado comparar los resultados obtenidos en el presente proyecto con simulaciones basadas en técnica numéricas. De esta manera se puede ampliar la cobertura de materiales y configuraciones de techos y paredes para los climas representativos de México.

Para modelar el comportamiento térmico de un techo plano y una pared, mediante el procedimiento utilizado, y obtener resultados más precisos es necesaria la determinación experimental de las propiedades de los materiales ya que son los parámetros más influyentes para la simulación térmica.

Instrumentar el cuarto de monitoreo con equipos de medición de radiación solar y flujo de calor permitirá conocer la precisión de la metodología utilizada y si los supuestos realizados en la modelación no alteran considerablemente los resultados.

El método CLTD/SCL/CLF utiliza los factores (solar cooling load) que permiten determinar de forma más precisa la carga solar a través del vidrio [7]. Para complementar el presente proyecto se puede trabajar en la generación de dichos factores para las zonas climatológicas analizadas y de esta manera aplicar el método con los factores requeridos en base a características locales para una vivienda típica en México y comparar los resultados de la carga de enfriamiento estimada con programas de simulación existentes.

Determinar los factores CLTD para varias ciudades en México, considerando los parámetros locales para el diseño de sistemas de aire acondicionado permitiría determinar un factor de corrección para los valores de CLTD reportados por ASHRAE, aplicable a todo el territorio mexicano.

## Apéndice A. Nomenclatura

$C_p$	Calor específico (J/kg-K)
$d$	Día del año
$Gr$	Número de Grashof
$h_{conv}$	Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m <sup>2</sup> -K)
$h_i$	Coefficiente combinado de transferencia de calor en la superficie interna (W/m <sup>2</sup> -K)
$h_o$	Coefficiente combinado de transferencia de calor en la superficie externa (W/m <sup>2</sup> -K)
$h_{rad}$	Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m <sup>2</sup> -K)
$I$	Radiación incidente sobre una superficie (W/m <sup>2</sup> )
$I_{dif}$	Radiación difusa (W/m <sup>2</sup> )
$I_{dir}$	Radiación directa (W/m <sup>2</sup> )
$I_{par}$	Radiación global incidente en una pared (W/m <sup>2</sup> )
$I_{glob}$	Irradiación global incidente en una superficie horizontal (W/m <sup>2</sup> )
$I_0$	Irradiación solar fuera de la atmosfera (W/m <sup>2</sup> )
$k$	Conductividad térmica (W/m-K)
$L$	Espesor (m)
$L_{loc}$	Longitud local (°)
$L_{std}$	Meridiano estándar para la zona horaria local (°)
$N$	Número total de capas
$Pr$	Número de Prandtl
$\dot{q}$	Calor generado (W/m <sup>3</sup> )
$q_s$	Flujo de calor por radiación sobre una superficie (W/m <sup>2</sup> )
$Re$	Numero de Reynolds
$T$	Temperatura (°C)
$T_i$	Temperatura del aire interior (°C)
$T_o$	Temperatura del aire exterior (°C)



$T_s$	Temperatura de superficie (°C)
$t_{sol}$	Tiempo solar (hora)
$t_{std}$	Tiempo estándar (hora)
$T_{surr}$	Temperatura de los alrededores (°C)
$U$	Coefficiente global de transferencia de calor (W/m <sup>2</sup> )

### Letras griegas

$\alpha_n$	Difusividad térmica de la capa $n$ (m <sup>2</sup> /s)
$\alpha_s$	Absorptancia solar de la superficie externa
$\delta$	Declinación (°)
$\varepsilon$	Emisividad
$\lambda$	Latitud (°)
$\rho$	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_g$	Reflectancia del suelo
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann, $5.6703 \times 10^{-8}$ (W/m <sup>2</sup> -K <sup>4</sup> )
$\mu$	Viscosidad dinámica (kg/m-s)
$\theta_i$	Ángulo de incidencia sobre una superficie inclinada (°)
$\theta_p$	Ángulo de inclinación de una superficie (°)
$\theta_s$	Ángulo cenital del sol (°)
$\phi_p$	Ángulo de orientación de la superficie inclinada (°)
$\phi_s$	Ángulo acimutal del sol (°)
$\omega$	Ángulo de la hora solar (°)

### Subíndices

$n$	Número de capa analizada
-----	--------------------------

## Apéndice B. CLTD determinados para diferentes tipos de techo y pared en Mexicali

En este apéndice se presentan los valores de CLTD calculados para los techo y paredes detallados en la sección 7.3.1 considerando las condiciones climatológicas del 24 de agosto del 2016 en Mexicali. Los datos climatológicos de la Figura 1-b fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional.

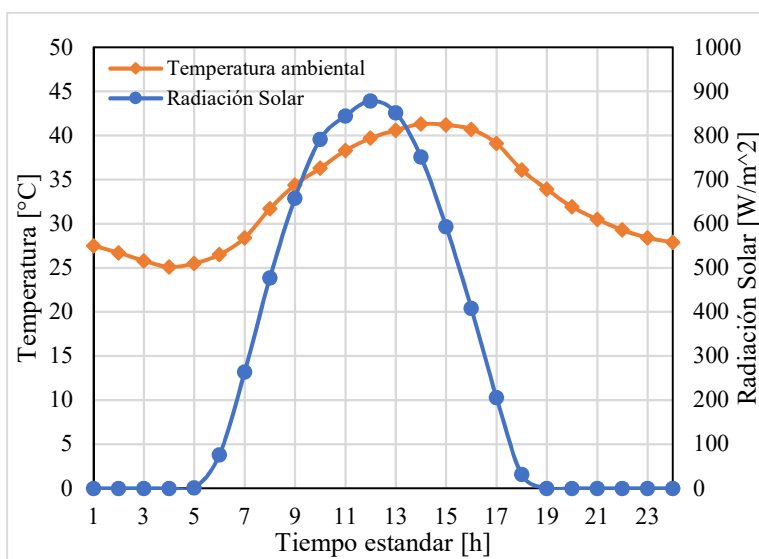


Figura 1-b. Datos climatológicos de Mexicali – 24 de agosto 2016.

### VALORES DE CLTD OBTENIDOS PARA TECHOS

En la Tabla 1-b se presentan los valores de CLTD calculados para tres tipos de techo en Mexicali. El techo Tipo 1 está conformado por una capa de concreto, espesor 15 cm y una capa interna de revestido de 1 cm de espesor. El techo Tipo 2 presenta una capa externa de 4 cm de concreto y la bovedilla de poliestireno expandido, espesor 12 cm (ver Figura 7.11.a). El techo Tipo 3 está conformado por una capa de concreto y bovedilla de concreto (ver Figura 7.11.b). Los datos de la Tabla 1-b se presentan gráficamente en la Figura 2-b.

#### COOLING LOAD TEMPERATURE DIFFERENCE [°C]

MEXICALI - Latitud 32.41°N, Longitud 115.19°

Techo	U W/m²-K	Tiempo solar [h]																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Tipo1	2.98	8.7	7.3	5.9	4.8	4.0	3.5	3.4	3.6	4.3	5.2	6.4	7.8	9.3	10.7	12.1	13.2	14.0	14.5	14.6	14.4	13.7	12.8	11.6	10.2
Tipo 2	0.35	1.8	-2.4	-5.9	-8.3	-9.6	-9.6	-8.4	-5.9	-2.5	1.8	6.5	11.4	16.1	20.4	23.9	26.3	27.6	27.6	26.4	23.9	20.5	16.2	11.5	6.6
Tipo 3	2.46	7.0	3.8	0.9	-1.4	-3.1	-3.9	-3.8	-2.9	-1.1	1.3	4.3	7.6	10.9	14.2	17.1	19.4	21.1	21.9	21.8	20.9	19.1	16.7	13.7	10.4

Tabla 1-b. CLTD de diferentes tipos de techo en Mexicali.

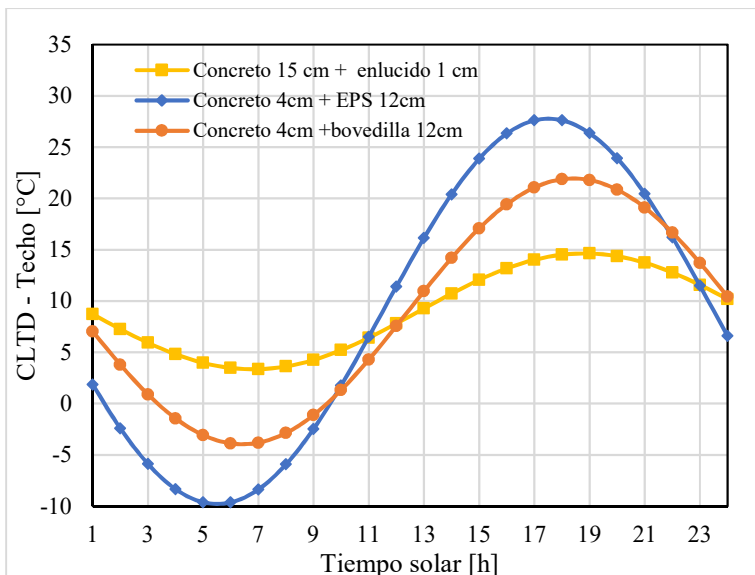


Figura 2-b. CLTD de diferentes tipos de pared en Mexicali.

**VALORES DE CLTD OBTENIDOS PARA PAREDES**

En la Tabla 2-b se reportan los valores de CLTD para 3 tipos de paredes, las cuales están conformadas por dos capas de revestido (interna y externa) con espesor 3/4 in cada capa y una capa intermedia de 4 pulgadas del material resistente. Los valores reportados consideran: las condiciones climáticas de Mexicali y las cuatro orientaciones principales (norte, sur, este y oeste). En la Figura 3-b se presentan gráficamente los factores CLTD contenidos en la Tabla 2-b.

**COOLING LOAD TEMPERATURE DIFFERENCE [°C]**

MEXICALI - Latitud 32.41°N, Longitud 115.19°

Orientación	Pared - Bloque de adobe U= 1.918 [W/m2-K]																							
	Tiempo solar [h]																							
Norte	2.2	1.8	1.4	1.3	1.3	1.5	1.8	2.4	3.0	3.7	4.4	5.0	5.7	6.1	6.5	6.6	6.6	6.4	6.0	5.5	4.9	4.2	3.5	2.8
Este	1.5	1.4	1.5	1.8	2.3	2.8	3.5	4.3	5.0	5.7	6.2	6.7	6.9	7.0	6.9	6.6	6.2	5.6	4.9	4.2	3.4	2.8	2.2	1.8
Sur	2.9	2.2	1.7	1.4	1.2	1.3	1.6	2.1	2.7	3.4	4.2	5.1	5.8	6.5	7.0	7.4	7.5	7.4	7.1	6.7	6.0	5.3	4.5	3.7
Oeste	7.8	7.2	6.4	5.5	4.5	3.6	2.7	2.0	1.5	1.2	1.1	1.3	1.7	2.3	3.1	4.0	4.9	5.9	6.7	7.5	8.0	8.3	8.4	8.2
Orientación	Pared - Bloque de concreto U= 2.275 [W/m2-K]																							
	Tiempo solar [h]																							
Norte	-1.2	-1.2	-0.9	-0.2	0.7	1.9	3.2	4.5	5.8	7.0	8.0	8.7	9.1	9.1	8.7	8.1	7.2	6.0	4.7	3.4	2.1	0.9	-0.1	-0.8
Este	-0.5	0.3	1.4	2.7	4.1	5.4	6.7	7.9	8.8	9.3	9.6	9.4	8.9	8.1	7.0	5.7	4.4	3.0	1.7	0.5	-0.3	-0.9	-1.1	-1.0
Sur	-1.3	-1.6	-1.5	-1.0	-0.2	1.0	2.4	3.9	5.4	6.9	8.2	9.3	10.0	10.3	10.2	9.8	8.9	7.8	6.4	4.8	3.3	1.8	0.5	-0.6
Oeste	6.5	4.7	2.9	1.2	-0.2	-1.3	-2.0	-2.2	-2.0	-1.3	-0.1	1.3	3.0	4.8	6.6	8.3	9.7	10.8	11.5	11.7	11.5	10.7	9.6	8.2
Orientación	Pared - Ladrillo U= 2.20 [W/m2-K]																							
	Tiempo solar [h]																							
Norte	0.6	0.3	0.2	0.4	0.9	1.5	2.3	3.3	4.2	5.2	6.0	6.8	7.3	7.6	7.6	7.4	7.0	6.4	5.6	4.6	3.7	2.7	1.9	1.1
Este	0.4	0.8	1.3	2.1	3.0	4.0	5.0	5.9	6.7	7.4	7.8	8.0	8.0	7.7	7.1	6.4	5.5	4.5	3.5	2.5	1.7	1.0	0.6	0.4
Sur	0.9	0.4	0.1	0.1	0.4	1.0	1.8	2.8	3.9	5.0	6.1	7.0	7.8	8.3	8.6	8.6	8.3	7.7	6.9	6.0	4.9	3.7	2.7	1.7
Oeste	7.4	6.2	4.9	3.6	2.4	1.3	0.5	-0.1	-0.3	-0.1	0.3	1.1	2.1	3.3	4.6	5.9	7.1	8.2	9.0	9.5	9.8	9.6	9.2	8.4

Tabla 2-b. CLTD de diferentes tipos de pared en Mexicali.

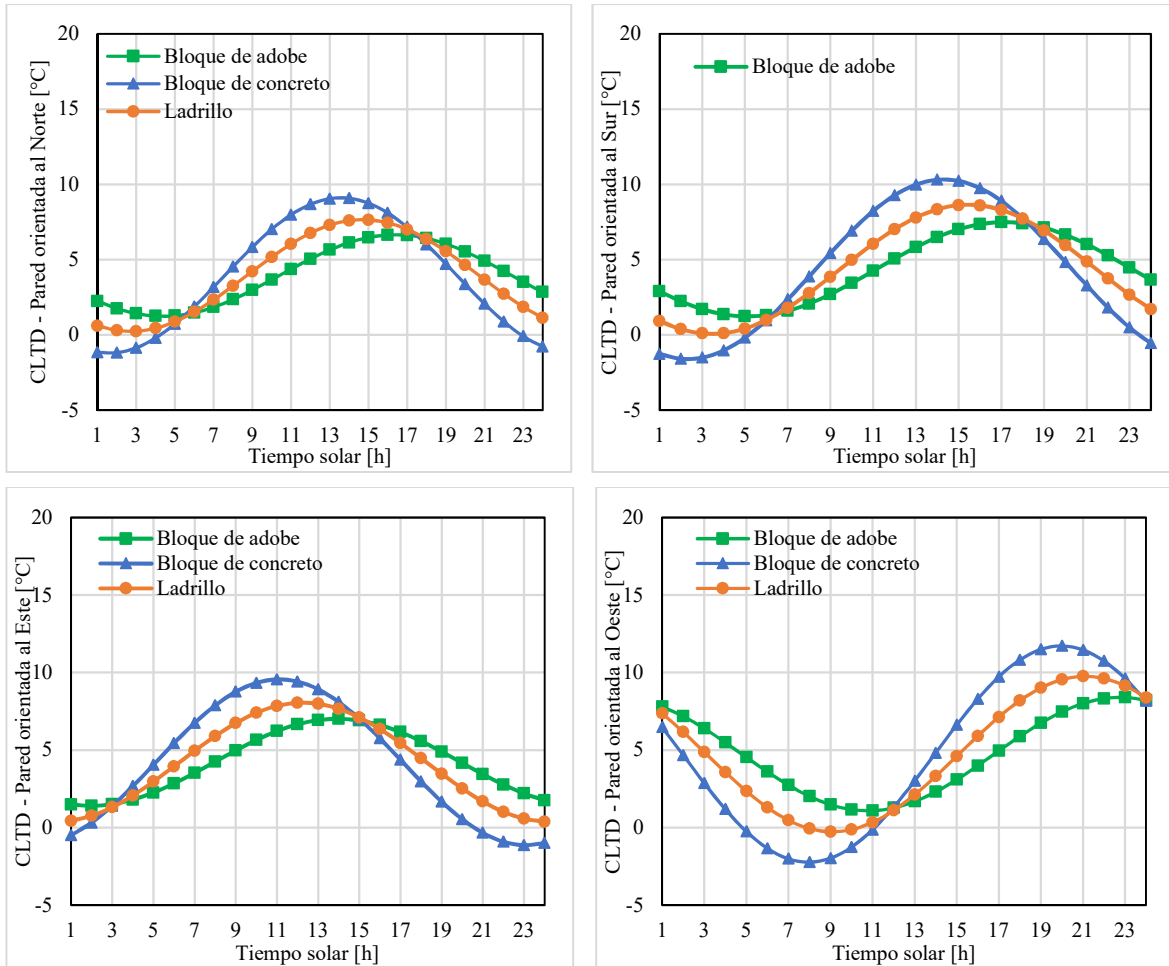


Figura 3-b. CLTD de diferentes tipos de pared en Mexicali.

## Referencias

- [1] O. Adil Zainal and R. Yumrutas, "Validation of periodic solution for computing CLTD (cooling load temperature difference) values for building walls and flat roofs," *Energy*, vol. 82, pp. 758–768, 2015.
- [2] International Energy Agency (IEA), "World Energy Statistics and Balances." 2015.
- [3] DIRECCIÓN GENERAL DE GENERACIÓN Y TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, "Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2016-2030," Mexico, 2016.
- [4] W. Gang, S. Wang, K. Shan, and D. Gao, "Impacts of cooling load calculation uncertainties on the design optimization of building cooling systems," *Energy Build.*, vol. 94, pp. 1–9, 2015.
- [5] CONUEE, "Estudio de caracterización del uso de aire acondicionado en vivienda de interés social," México D.F., 2016.
- [6] O. de B. R., "LA IMPORTANCIA DE LOS EDIFICIOS COMO USUARIOS DE ENERGÍA Y LAS ACCIONES DE LA CONUEE," 2013.
- [7] ASHRAE, *ASHRAE Handbook - Fundamentals*. 1997.
- [8] F. Kreider, *Heating and cooling of buildings*, Second. CRC Press, 2010.
- [9] Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía, "Características de las viviendas," 2016. [Online]. Available: <http://www.inegi.org.mx>.
- [10] K. Bansal, S. Chowdhury, and M. R. Gopal, "Development of CLTD values for buildings located in Kolkata, India," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 28, no. 10, pp. 1127–1137, 2008.
- [11] C. R. Ruivo, P. M. Ferreira, and D. C. Vaz, "Prediction of thermal load temperature difference values for the external envelope of rooms with setback and setup thermostats," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 51, no. 1–2, pp. 980–987, 2013.
- [12] C. Yunus, *Thermodynamics : an engineering approach*. New York: McGraw-Hill, 2015.
- [13] ASHRAE, *ASHRAE Handbook - Fundamentals*. 2009.
- [14] J. Threlkeld, *Thermal Enviromental Engineering*. Prentice Hall, 1970.
- [15] B. Yesilata, H. Bulut, and P. Turgut, "Experimental study on thermal behavior of a building structure using rubberized," *Energy Build.*, vol. 43, pp. 393–399, 2011.
- [16] Y. Cengel, *Heat Transfer*, 2nd Editio. 2004.
- [17] R. Bolz and G. Tuve, *CRC Handbook of tables for applied engineering science*, 2nd editio. USA: CRC Press, 1973.
- [18] INEGI, "Calculadora de inflación." [Online]. Available: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/indiceprecios/calculadorainflacion.aspx>.
- [19] J. Duffie and W. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2013.
- [20] F. Mills, *Heat Transfer*, 2nd ed. Prentice Hall.
- [21] R. Yumrutaş, M. Ünsal, and M. Kanoğlu, "Periodic solution of transient heat flow through multilayer walls and flat roofs by complex finite Fourier transform technique," *Build. Environ.*, vol. 40, no. 8, pp. 1117–1125, 2005.
- [22] Ö. Kaşka and R. Yumrutaş, "Comparison of experimental and theoretical results for the transient heat flow through multilayer walls and flat roofs," *Energy*, vol. 33, no. 12, pp. 1816–1823, 2008.
- [23] R. Yumrutaş, Ö. Kaşka, and E. Yildirim, "Estimation of total equivalent temperature difference values for multilayer walls and flat roofs by using periodic solution," *Build. Environ.*, vol. 42, no. 5, pp. 1878–1885, 2007.
- [24] C. Rodríguez, B. Sarría, J. Fajardo, and R. Lugo, "Estudio comparativo del método de cálculo de carga térmica para sistemas de aire acondicionado en buques," *Sh. Sci. Technol.*, vol. 2, pp. 5–24, 2008.
- [25] M. D. Suziyana, S. N. Nina, T. M. Yusof, and A. A. S. Basirul, "Analysis of heat gain in computer laboratory and excellent centre by using CLTD/CLF/SCL method," *Procedia*

- Eng.*, vol. 53, pp. 655–664, 2013.
- [26] G. Nellis and S. Klein, *Heat transfer*. New York: Cambridge University Press, 2009.
- [27] ASTM C1046, “Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components.” 2013.
- [28] ISO 9869-1, “Thermal insulation-Building elements- In situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance.” 2014.
- [29] K. R. Nagle, E. B. Saff, and A. D. Snider, *Ecuaciones diferenciales*, 4th ed. México: Pearson / Addison Wesley, 2005.
- [30] E. Uresti, “Matemáticas avanzadas para ingeniería-ITESM,” *Complex Fourier Series*, 2014. [Online]. Available: <http://homepages.mty.itesm.mx/euresti/>.
- [31] A. Ahmad, M. Maslehuddin, and L. M. Al-Hadhrami, “In situ measurement of thermal transmittance and thermal resistance of hollow reinforced precast concrete walls,” *Energy Build.*, vol. 84, pp. 132–141, 2014.
- [32] ASTM International, *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials*. Bridgeport-USA: ASTM International, 2006.
- [33] H. Sauer, *Principles of heating, ventilating, and air conditioning : a textbook with design data based on the 2001 ASHRAE handbook--Fundamentals*. Atlanta: ASHRAE, 2001.
- [34] S. Martínez-martínez, F. A. Sánchez-cruz, J. Chávez-galán, E. Soto-espínosa, and V. F. J. Tavitas-medrano, “Análisis térmico de sistemas constructivos para techos elaborados a base de vigueta-bovedilla,” in *MEMORIAS DEL XVI CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM*, 2010.
- [35] Energy Plus, “Weather Data by Location.” [Online]. Available: [https://energyplus.net/weather-location/north\\_and\\_central\\_america\\_wmo\\_region\\_4/MEX//MEX\\_Veracruz.766910\\_IWEC](https://energyplus.net/weather-location/north_and_central_america_wmo_region_4/MEX//MEX_Veracruz.766910_IWEC).
- [36] M. Gijón, J. Serrano, and J. Xamán, “Effect of different building materials on conjugate heat and mass transfer,” *Ing. MECÁNICA Tecnol. Y Desarro.*, vol. 5, no. 4, pp. 395–404, 2016.

## Curriculum Vitae



Evelyn Catalina Vallejo Coral nació en Quito-Ecuador, el 21 de diciembre de 1986. Realizó sus estudios de tercer nivel en la Escuela Politécnica Nacional (Quito-Ecuador) y en el año 2011 obtuvo el título de Ingeniera Mecánica. En el año 2014 ganó una beca, del gobierno ecuatoriano, a través de SENESCYT, para realizar continuar con su formación académica en el extranjero.

En agosto del 2015 inició sus estudios en el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, para cursar el programa de Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería Energética, obteniendo su grado académico en mayo del 2017.

En el proyecto de tesis de su carrera rehabilitó, rediseñó y automatizó un sistema de refrigeración, con su respectivo software de análisis termodinámico, del laboratorio de termodinámica de la Escuela Politécnica Nacional. Mediante este proyecto desarrolló sus habilidades de programación y descubrió su afinidad por el área térmica. A partir de junio de 2011 inició su vida profesional en una empresa de consultorías energéticas en Ecuador, donde realizó: el análisis térmico para la implementación de un ciclo combinado en una central térmica que opera con motores de combustión interna, el diseño y construcción de un proyecto piloto para la gasificación de madera y, el diseño térmico-hidráulico para el almacenamiento y despacho de bunker en un puerto de entrega de combustibles.

En agosto del 2013 inició su desarrollo en el campo de las edificaciones, como residente de fiscalización de todos los sistemas mecánicos en la construcción de la Sede permanente de la Unión de Naciones Sudamericanas (UNASUR). Posteriormente realizó el diseño de sistemas de climatización de aire y ventilación, sistema hidráulico – sanitario y sistemas de protección contra incendios en diferentes proyectos.

A partir de su experiencia profesional descubrió un área de oportunidad acerca del uso eficiente de la energía en todo tipo de proyectos que involucren la utilización o generación energía térmica y/o energía eléctrica. Por esta razón, eligió la maestría anteriormente mencionada, en la cual desarrolló el presente proyecto de tesis.

Es una profesional que disfruta del trabajo en equipo, dispuesta a compartir sus conocimientos y aprender de las virtudes que los demás poseen. Le apasiona la lectura y la natación por lo que gran parte de su tiempo libre lo dedica a dichas actividades. Disfruta de las nuevas oportunidades y retos tanto personales como profesionales ya que a través de estos puede identificar sus debilidades y potenciarlas.

La información de contacto de Catalina es:

- Dirección: Alfredo Carpio N84 y Av. Los Pinos, Quito, Ecuador.
- Correo electrónico: [catas2112@hotmail.com](mailto:catas2112@hotmail.com), [catalina.vallejo.ec@gmail.com](mailto:catalina.vallejo.ec@gmail.com)
- Teléfono celular: +(593) 99-904-6860
- LinkedIn: [www.linkedin.com/in/catalina-vallejo](http://www.linkedin.com/in/catalina-vallejo)