

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA



“EFECTO DE LA MASA TÉRMICA DE LA
ENVOLVENTE SOBRE LA CLIMATIZACIÓN DE
EDIFICACIONES HABITACIONALES”

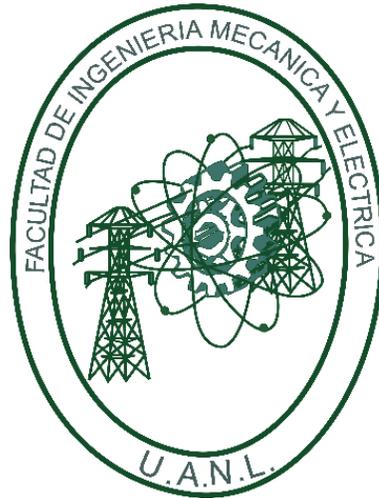
MONTERREY, NUEVO LEÓN

Por:
JESÚS EDUARDO FERRER HURTADO

Como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRÍA en Ciencias
de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

NOVIEMBRE, 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA



“EFECTO DE LA MASA TÉRMICA DE LA
ENVOLVENTE SOBRE LA CLIMATIZACIÓN DE
EDIFICACIONES HABITACIONALES”

MONTERREY, NUEVO LEÓN

Por:
JESÚS EDUARDO FERRER HURTADO

Como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRÍA en Ciencias
de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

NOVIEMBRE, 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la tesis “Efecto de la masa térmica de la envolvente sobre la climatización de edificaciones habitacionales” realizada por el alumno JESÚS EDUARDO FERRER HURTADO, con número de matrícula 1198728, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

El Comité de Tesis

Dr. Fausto Alejandro Sánchez Cruz

Director

Dr. Simón Martínez Martínez
Revisor

Dr. Salvador Valtierra Gallardo
Revisor

Dr. Moisés Hinojosa Rivera
Subdirector de la División de Estudios de Posgrado

A mi Madre, María Esther Hurtado Licón, por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida, su dedicación para darme un mejor futuro, por su amor y cariño el cual me ha dado fortaleza desde mi infancia.

A María Dolores Ramos Bazaldúa, por brindarme su amor y confianza.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi Madre María Esther Hurtado Licón por inculcarme desde pequeño la importancia del estudio y la superación personal.

A María Dolores Ramos Bazaldúa por sus consejos, ternura y su apoyo incondicional a cualquier proyecto que he emprendido.

A Carlos Elizondo, hombre sabio y bondadoso. Que en paz descanse.

A mis hermanos Osvaldo y Verónica, por sus consejos, confianza y por siempre haber cuidado de mi.

De manera muy especial a mi abuelo Jesús Hurtado, que en paz descanse.

A la Familia Hurtado Licón, especialmente a mi tía Guadalupe del Roble, por haber formado una parte esencial de mi infancia al enseñarme el valor de la disciplina, la honestidad y el respeto.

A mi primo Israel Hurtado, al cual considero un hermano más y con quien he compartido momentos muy importantes y felices a lo largo de mi vida.

A mis amigos, lo cuales tengo el gusto de conocer desde mi infancia y la fortuna de seguir en contacto con ellos después de todos estos años, Abner Rodríguez, Axel Rodríguez, Abraham de la Cerda, Ángel Garza y especialmente a Gilberto Garza.

Al Cuerpo Académico: Procesos Termofluidodinámicos y Sistemas Energéticos. A mi director de tesis, el Dr. Fausto Alejandro Sánchez Cruz por su orientación en la realización de esta tesis. Al Dr. Simón Martínez Martínez, por su orientación profesional y por permitirme incorporarme a la maestría y a su equipo de trabajo. A los profesores del Cuerpo Académico, Dra. Elvira Martínez García, M.C. Miguel García Yera, Dr. Santos Méndez Díaz, al M.C. Hugo Ramírez Hernández y al Ing. Eliud Soto Espinosa por colaborar en mi aprendizaje del lenguaje \LaTeX , el cual utilicé en la redacción de este trabajo. Al Dr. Arturo Morales Fuentes y al Dr. Jesús Chávez Galán por la confianza que mostraron hacia mi trabajo, y por sus consejos a nivel profesional y académico, los cuales valoro de gran forma.

A mis compañeros de la maestría con los que he compartido un periodo de aprendizaje lleno de retos y alegrías, Fernando Ibarra, David Mares, Rafael Olvera, Roberto Eliud Soto, Rubén D. Leal Garza, Edgar Martínez, Bernardino Brizuela y Luis Fernando.

A la empresa Owens Corning. Al Dr. Salvador Valtierra Gallardo y a Benjamín Zamudio Barrera.

A CONACyT por su apoyo a través del proyecto 155133.

A PAICyT-UANL por su apoyo a través del proyecto GIT050-10.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	X
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Factores que afectan a la masa térmica	3
1.2. Confort Higrotérmico Humano	8
1.3. Niveles socioeconómicos en México	9
1.4. Motivación	11
1.5. Hipótesis	14
1.6. Objetivo General	15
1.6.1. Objetivos Particulares	15
2. Metodología	17
2.1. Estimación del desempeño energético	17
2.2. Mecanismos de transferencia de calor	20
2.2.1. Conducción de calor en edificaciones	23
2.2.2. Convección en edificaciones	24
2.2.3. Radiación térmica en edificaciones	27
2.3. Simulación computacional	30
2.3.1. EnergyPlus	31

2.3.2. Meteoronorm	35
2.4. Definición del problema	36
2.4.1. Consideraciones de simulación	37
2.5. Diseño de experimentos	44
3. Resultados	50
3.1. El caso de referencia	50
3.1.1. Definición del caso base	50
3.2. Efecto del sombreado	54
3.3. Ocupación	58
3.4. Efecto del tipo de Envolvente	60
3.5. Efecto de la ventilación natural	69
3.6. Efecto del aislamiento térmico y su posición en la envolvente	76
3.6.1. Efecto de la posición del aislamiento térmico en el consumo eléctrico de los sistemas de aire acondicionado	79
3.7. Análisis de la relación entre los parámetros que afectan la inercia térmica de la envolvente	81
4. Conclusiones y Recomendaciones	85
4.1. Conclusiones	85
4.2. Recomendaciones	88
4.3. Trabajo futuro	89

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Representación gráfica del tiempo de retraso (ϕ) y del factor de decremento (A_o/A_e). Adaptada de Asan [5].	4
1.2. Población total y tasa de crecimiento, 2000-2050, de acuerdo al Consejo Nacional de Población [17].	13
1.3. Ventas de energía eléctrica al sector público, de acuerdo a la Comisión Federal de Electricidad [18].	14
2.1. Mecanismos de transferencia de calor y masa en un edificio. Adaptada de Under- wood [23].	23
2.2. Transferencia de calor en el muro exterior de una edificación. Adaptada de Un- derwood [23].	29
2.3. Planta baja de la edificación analizada.	38
2.4. Planta alta de la edificación analizada.	39
2.5. Distribución de las regiones climáticas en México según la clasificación Köppen- Geiger.	40
2.6. Representación esquemática de los tipos de muros utilizados en el estudio. (A): Muro de block de concreto “pesado”. (B): Muro de block de concreto “ligero”. . . .	43
2.7. Representación esquemática de los tipos de losas utilizados en el estudio. (A): Losa de bovedilla de concreto “ligero”. (B): Losa de bovedilla de concreto “pesado”. . .	44

2.8. Representación esquemática de las configuraciones de aislamiento térmico. (A): Aislamiento térmico situado en la parte exterior de la envolvente. (B): Aislamiento térmico situado en la parte interior de la envolvente. (C): Aislamiento térmico dividido en partes iguales y colocado en ambos lados de la envolvente.	48
2.9. Representación esquemática de la estrategia <i>Aislamiento de Zona</i>	48
2.10. Diseño de experimentos.	49
3.1. Cartas de la trayectoria solar para las ciudades de Monterrey (A) y Cancún (B). .	53
3.2. Modelo de vivienda con la fachada orientada al Norte, sin elementos de sombreado. Exposición solar típica de julio a las 3 pm.	55
3.3. Modelo de vivienda con la fachada orientada al Norte, considerando viviendas vecinas como elementos de sombreado. Exposición solar típica de julio a las 3 pm.	56
3.4. Temperaturas del aire en la planta baja de la vivienda para los casos <i>sin sombrear</i> y <i>sombreado</i> para la ciudad de Monterrey. Semana del 15 al 21 de Julio.	56
3.5. Temperaturas del aire en la planta baja de la vivienda para los casos <i>sin sombrear</i> y <i>sombreado</i> para la ciudad de Cancún. Semana del 15 al 21 de Julio.	57
3.6. Carta bioclimática de Givoni para países en desarrollo de clima cálido. Límites de confort para aire quieto.	60
3.7. Temperatura del aire dentro de la casa con envolvente ligera, envolvente pesada y exterior. Valores registrados del 20 al 22 de Julio en Monterrey.	64
3.8. Temperatura del aire dentro de la casa con envolvente ligera, envolvente pesada y exterior. Valores registrados del 20 al 22 de Julio en Cancún.	65
3.9. Temperatura del aire dentro de la casa con envolvente ligera, envolvente pesada y exterior. Valores registrados del 13 al 15 de Enero en Monterrey.	65
3.10. Temperatura del aire dentro de la casa con envolvente ligera, envolvente pesada y exterior. Valores registrados del 13 al 15 de Enero en Cancún.	66

3.11. Exposición solar típica de diciembre a las 12 pm en la fachada posterior de la vivienda. La fachada frontal está orientada al Norte.	66
3.12. Calor transferido en los componentes de la envolvente. Valores registrados del 13 al 15 de Enero en Monterrey	67
3.13. Calor transferido en los componentes de la envolvente. Valores registrados del 20 al 22 de Julio en Monterrey	67
3.14. Calor transferido en los componentes de la envolvente. Valores registrados del 13 al 15 de Enero en Cancún	68
3.15. Calor transferido en los componentes de la envolvente. Valores registrados del 20 al 22 de Julio en Cancún	68
3.16. Calor transferido en la envolvente “pesada”, incluyendo estrategias de ventilación. Valores registrados del 13 al 15 de Enero en la ciudad de Monterrey.	72
3.17. Calor transferido en la envolvente “ligera”, incluyendo estrategias de ventilación. Valores registrados del 13 al 15 de Enero en la ciudad de Monterrey.	72
3.18. Calor transferido en la envolvente “pesada”, incluyendo estrategias de ventilación. Valores registrados del 13 al 15 de Enero en la ciudad de Cancún.	73
3.19. Calor transferido en la envolvente “ligera”, incluyendo estrategias de ventilación. Valores registrados del 13 al 15 de Enero en la ciudad de Cancún.	73
3.20. Calor transferido en la envolvente “pesada”, incluyendo estrategias de ventilación. Valores registrados del 20 al 22 de Julio en la ciudad de Monterrey.	74
3.21. Calor transferido en la envolvente “ligera”, incluyendo estrategias de ventilación. Valores registrados del 20 al 22 de Julio en la ciudad de Monterrey.	74
3.22. Calor transferido en la envolvente “pesada”, incluyendo estrategias de ventilación. Valores registrados del 20 al 22 de Julio en la ciudad de Cancún.	75
3.23. Calor transferido en la envolvente “ligera”, incluyendo estrategias de ventilación. Valores registrados del 20 al 22 de Julio en la ciudad de Cancún.	75

3.24. Consumo eléctrico (C_e) anual atribuido a equipos de aire acondicionado, para la vivienda en la ciudad de Monterrey. El consumo eléctrico se evaluó para las siguientes estrategias: (A) Caso de referencia, (B) E_P sin aislamiento térmico, (C) E_P con XPS por fuera, (D) E_P con XPS dividido, (E) E_P con XPS por dentro, (F) E_P con XPS al interior de las zonas climatizadas, (G) E_L sin aislamiento térmico, (H) E_L con XPS por fuera, (I) E_L con XPS dividido, (J) E_L con XPS por dentro, (K) E_L al interior de las zonas climatizadas 81

3.25. Consumo eléctrico (C_e) anual atribuido a equipos de aire acondicionado, para la vivienda en la ciudad de Cancún. El consumo eléctrico se evaluó para las siguientes estrategias: (A) Caso de referencia, (B) E_P sin aislamiento térmico, (C) E_P con XPS por fuera, (D) E_P con XPS dividido, (E) E_P con XPS por dentro, (F) E_P con XPS al interior de las zonas climatizadas, (G) E_L sin aislamiento térmico, (H) E_L con XPS por fuera, (I) E_L con XPS dividido, (J) E_L con XPS por dentro, (K) E_L al interior de las zonas climatizadas 82

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Características de los proyectos de monitoreo en edificios. Adaptada de ASHRAE [21]	19
2.2. Especificaciones de la guía. Adaptada de Ternes [22]	21
2.3. Comparativa de temperatura media normal mensual SMN vs. Meteoronorm, para Monterrey, N.L.	37
2.4. Comparativa de temperatura media normal mensual SMN vs Meteoronorm, para Cancún, Quintana Roo.	38
2.5. Dimensiones y ubicación del acristalamiento del edificio.	39
2.6. Características climáticas de Monterrey y Cancún según la clasificación Köppen-Geiger. Adaptada de Ternes [22].	41
2.7. Temperatura mensual del suelo para las ciudades de Monterrey y Cancún.	41
2.8. Horarios de ocupación y ventilación natural utilizados en la vivienda.	42
2.9. Materiales utilizados en los muros, losas, puertas y ventanas	45
3.1. Temperaturas promedio mensuales para los casos sin elementos de sombreado y sombreado por viviendas vecinas. Datos de la vivienda ubicada en Monterrey.	57

3.2. Temperaturas promedio mensuales para los casos sin elementos de sombreado y sombreado por viviendas vecinas. Datos de la vivienda ubicada en Cancún.	58
3.3. Porcentaje de horas de confort anual para la vivienda sin ocupación, evaluado para las ciudades de Monterrey y Cancún mediante la carta bioclimática de Givoni para países en desarrollo de clima cálido [38]. .	60
3.4. Valores característicos de la masa térmica de los componentes de la envolvente.	62
3.5. Porcentajes de confort por temporada y anual de las dos recámaras y planta baja de la vivienda ubicada en Monterrey. Valores estimados mediante la carta bioclimática de Givoni para países en desarrollo de clima cálido.	62
3.6. Porcentajes de confort por temporada y anual de las dos recámaras y planta baja de la vivienda ubicada en Cancún. Valores estimados mediante la carta bioclimática de Givoni para países en desarrollo de clima cálido.	62
3.7. Porcentajes de confort anuales de las dos recámaras y planta baja de la vivienda ubicada en Monterrey y Cancún. Valores estimados mediante la carta bioclimática de Givoni para países en desarrollo de clima cálido.	71
3.8. Valores característicos de la masa térmica de los componentes de la envolvente.	78
3.9. Porcentajes de confort anuales de las dos recámaras y planta baja de la vivienda ubicada en Monterrey y Cancún, para tres configuraciones de aislamiento térmico en la envolvente. Valores estimados mediante la carta bioclimática de Givoni para países en desarrollo de clima cálido.	79

RESUMEN

En la actualidad existe un interés creciente por el uso eficiente de la energía, esto como consecuencia del agotamiento de las reservas de combustibles fósiles y a los altos índices de contaminación ambiental. Recientemente en México se han aprobado normativas cuyo objetivo es promover el uso de estrategias que reduzcan la ganancia de calor a través de la envolvente en edificios habitacionales para disminuir el consumo energético de los sistemas de aire acondicionado.

Diversos autores han llevado a cabo numerosas investigaciones relacionadas con el desempeño térmico de la envolvente de edificaciones. Una gran cantidad de estos trabajos no consideran la ventilación natural, ocupación, entre otros factores, que afectan de manera importante el comportamiento de la masa térmica de la construcción.

En este trabajo de tesis se analiza el efecto de la inercia térmica de la envolvente de una edificación habitacional unifamiliar, con el fin de identificar y evaluar los parámetros que afectan el comportamiento térmico de la envolvente. Es bien sabido que la sensación de confort está estrechamente relacionada con las condiciones térmicas de la envolvente de los recintos. El planteamiento del problema analizado en esta tesis y la metodología utilizada son consistentes con otros estudios recientemente publicados en la literatura especializada.

El presente trabajo está basado en resultados obtenidos a través de simulación computacional. Para analizar de manera adecuada el efecto de la inercia térmica se

utilizó el código computacional llamado *Energy Plus*, el cual utiliza balances de calor y masa que conducen al planteamiento de sistemas de ecuaciones, que una vez que son manejados mediante *funciones de transferencia*, son resueltos a través de métodos numéricos. Con el uso de esta herramienta es posible evaluar la transferencia de calor y masa en estado transitorio a través de todas y cada una de las componentes de la envolvente de las edificaciones.

En esta investigación se empleó una metodología basada en un diseño de experimentos para evaluar la importancia de los distintos parámetros que modifican el comportamiento de la masa térmica del edificio. El objeto principal es aprovechar la masa térmica para promover el confort dentro de la edificación con un consumo bajo de energía para la climatización. Un estudio sistemático como el que se presenta en este trabajo permite conducir al desarrollo de estrategias de ahorro de energía en los sistemas de climatización de recintos habitables.

Finalmente, como resultado del análisis de este estudio, se emiten recomendaciones prácticas que se deben considerar al construir una vivienda con el objeto de maximizar los periodos de confort dentro del recinto y disminuir el consumo eléctrico de los equipos de aire acondicionado aprovechando la inercia térmica de la edificación.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Se denomina masa térmica a la masa que puede almacenar energía en forma de calor. La masa térmica es función de la densidad y el calor específico, y en una edificación se puede dividir en externa e interna. La masa térmica externa es aquella que está en contacto directo con el ambiente exterior y el interior, i.e. la envolvente, mientras que la masa térmica interna, como los muebles y las particiones, es aquella que está en contacto solamente con el ambiente interior.

La masa térmica representa la inercia del sistema, por lo que en gran parte define la respuesta dinámica que presenta la edificación ante las variaciones de las condiciones internas y externas de éste. El efecto que tiene la transferencia de calor sobre las condiciones térmicas dentro de la edificación está relacionada entonces con la llamada masa térmica. En consecuencia, la demanda del sistema de acondicionamiento de aire depende en gran medida de las características de la masa térmica, tanto interna como externa.

Surge entonces la posibilidad de tomar ventaja de la masa térmica para reducir la demanda del uso del sistema de climatización. La masa térmica que forma una edificación representa entonces una opción sustentable para reducir el consumo energético de una vivienda, ya que cuando una edificación utiliza sistemas de acondicionamiento

de aire gran parte del consumo eléctrico está asociado a su uso, a su vez al reducirse el tiempo de uso de equipos de aire acondicionado existe una disminución en las emisiones de CO₂.

La masa térmica de las edificaciones puede tener un efecto benéfico en las condiciones interiores sin importar la estación climática del año. La energía almacenada por la envolvente durante el día puede ser liberada horas más adelante. En invierno, el calor almacenado durante la tarde puede ser liberado en la noche cuando las temperaturas exteriores son más bajas, lo cual contribuye a la reducción del periodo en que se necesita utilizar un equipo de calefacción. En verano, la masa térmica del edificio almacena calor, cuando la temperatura exterior llega a su punto más alto el aire al interior del edificio aun no ha llegado a este valor, conforme las horas pasan y la temperatura exterior comienza a disminuir, el calor almacenado por la masa térmica empieza a liberarse tanto al interior como al exterior. Este efecto es útil para evitar el sobrecalentamiento de la edificación y la sensación desagradable en los periodos más calientes del día. Este fenómeno puede ser aprovechado, no solo para disminuir el periodo de uso del equipo de acondicionamiento de aire, sino también para reducir su dimensionamiento antes de la instalación.

El uso de la masa térmica de la construcción se vuelve atractivo solo en lugares que poseen grandes variaciones de temperatura durante el día. La efectividad de la estrategia de almacenamiento de calor es aceptable en regiones que presentan variaciones diarias superiores a los 10 K en la temperatura ambiente exterior. Se ha observado que cuando el edificio permanece cerrado durante el día y es ampliamente ventilado durante la noche, la temperatura interior se vuelve más estable y presenta variaciones de solamente 2.5 K [1].

1.1.1. Factores que afectan a la masa térmica

Desde hace varios años se han realizado investigaciones experimentales y numéricas con el fin de determinar los factores que afectan el comportamiento de la masa térmica de la envolvente de las edificaciones. También se ha estudiado el impacto que tiene la masa térmica en las condiciones de confort y ahorro de energía en el interior de los recintos.

La distribución de la masa térmica y su relación con la orientación cardinal de la vivienda es importante, ya que dependiendo de la posición geográfica de la misma, existirá una mayor cantidad de incidencia solar en ciertos muros en particular. El aislamiento térmico es una herramienta útil para poder controlar las grandes variaciones de temperatura al interior de la vivienda y prolongar los periodos de confort que se tienen en el día.

Existen dos parámetros que caracterizan el comportamiento de la masa térmica, estos son el *factor de decremento* y el *tiempo de retraso*. La variación en la temperatura ambiente exterior tiene como resultado un proceso de propagación de calor debido a una onda térmica periódica, del exterior al interior del muro, con el flujo de calor transmitiéndose de la superficie más caliente a la más fría. El factor de decremento se define como la relación A_o/A_e , donde A_e es la amplitud de la onda que atraviesa la superficie exterior de la pared y A_o es la amplitud de la onda que atraviesa la superficie interior. Evidentemente, el factor de decremento indica la disminución que sufre la amplitud onda al atravesar la pared. Por otra parte, el tiempo de retraso ϕ es el tiempo que le toma a una onda, con periodo de 24 horas, propagarse del exterior al interior [2]. Una representación gráfica de estos dos parámetros se muestra en la figura 1.1.

Asan y Sancaktar [3] investigaron la manera en la que las propiedades termo

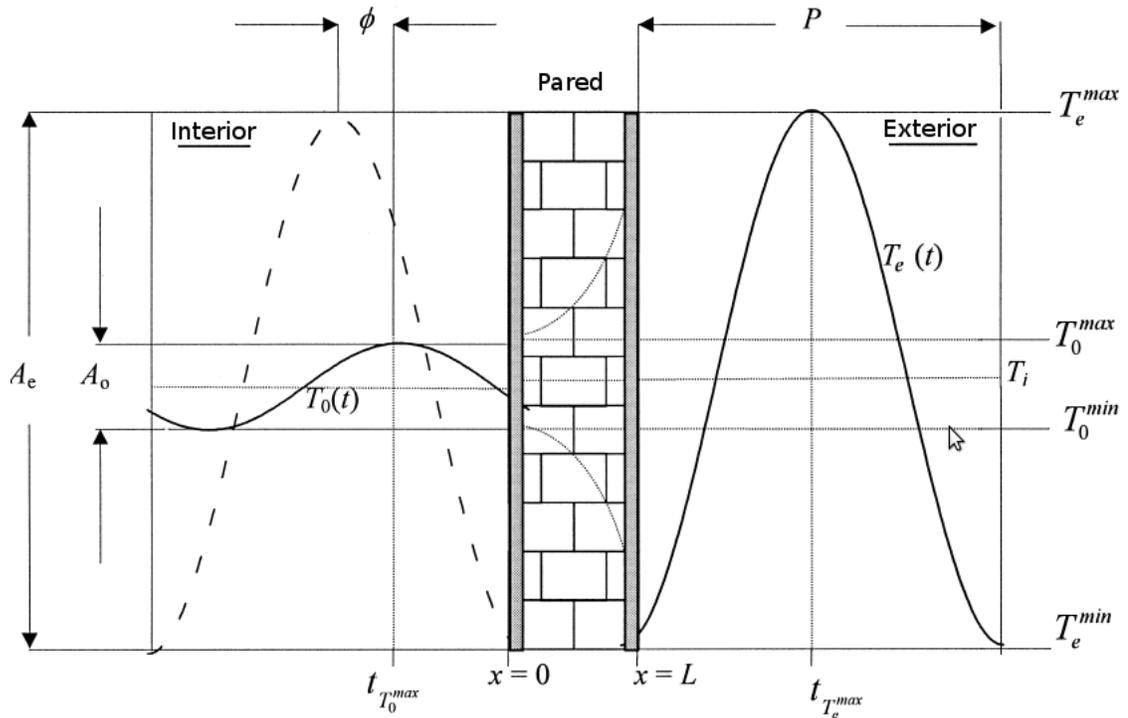


Figura 1.1: Representación gráfica del tiempo de retraso (ϕ) y del factor de decremento (A_o/A_e). Adaptada de Asan [5].

físicas de los materiales afectan el comportamiento del factor de decremento y tiempo de retraso. Encontraron que la conductividad térmica, el calor específico (C) y el espesor afectan de manera importante a estos factores.

El espesor de los muros y el espesor del aislamiento térmico están relacionados con el costo del edificio; a mayor cantidad de material el costo se incrementa. Por lo anterior, es importante conocer la manera en la que el espesor de dichos materiales influye sobre las condiciones de confort al interior del edificio. Kontoleon y Bikas [2] analizaron el efecto del espesor sobre la magnitud del factor de decremento y tiempo de retraso. Para el estudio se consideró un material de mampostería ($k = 0.6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$, $Cp = 1000 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$) y un aislamiento térmico ($k = 0.03 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, $\rho = 50 \text{ Kg/m}^3$, $Cp = 1000 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$) se obtuvo que, para el material típico de

mampostería el factor de decremento presenta una disminución abrupta cuando el espesor toma valores que van desde los cero hasta los veinte centímetros, a partir de este valor el factor de decremento permanece prácticamente sin cambio con una tasa de disminución pequeña. Este mismo comportamiento se observó con el material de aislamiento para un rango de espesor que va desde los cero a los cinco centímetros. En la industria de la construcción rara vez sería conveniente exceder un valor de veinte centímetros en materiales de mampostería y de cinco centímetros en materiales de aislamiento térmico.

Adicionalmente, se han estudiado diversas configuraciones de aislamiento y mampostería con el fin de evaluar el desempeño de cada una de ellas desde el punto de vista del máximo tiempo de retraso y mínimo factor de decremento. Asan [4, 5] ha llevado a cabo estudios numéricos utilizando balances de calor en una dimensión en estado transitorio bajo condiciones de convección, con el fin de analizar distintas configuraciones de aislamiento térmico cuando el espesor total de pared se mantiene constante. Se encontró que cuando se emplea aislamiento térmico dividido en dos partes iguales y se coloca una parte al interior y otra al exterior del muro, la configuración presenta los factores de decremento más bajos. Cuando el aislamiento es colocado como una sola pieza, como normalmente sucede, se obtienen los peores resultados; a excepción de cuando la pieza de aislamiento es colocada al exterior. La configuración que provee los máximos tiempos de retraso no coincide con la que otorga los menores factores de decremento. A partir de dicho estudio surgieron dos recomendaciones prácticas:

- Nunca usar el aislamiento térmico como una sola pieza, a excepción de cuando se pretende colocarlo al exterior, esto produce los peores resultados cuando se trata de maximizar el tiempo de retraso y minimizar el factor de decremento.

- Colocar la mitad del aislamiento en la parte central y la otra mitad al exterior resulta en grandes tiempos de retraso y factores de decremento pequeños, estos valores son cercanos a los valores óptimos. Esta configuración es práctica y puede ser realizada sin ningún problema durante la construcción.

La ventilación también afecta de manera importante el desempeño la masa térmica. Se han realizado diversas investigaciones para estimar el impacto que tiene la ventilación natural en las condiciones ambientales interiores de edificios residenciales.

Liping y Hien [6] estudiaron, mediante el uso de simulaciones, cuatro diferentes estrategias de ventilación natural para una edificación habitacional ubicada en un clima cálido y húmedo: ventilación nocturna, ventilación diurna, ventilación durante todo el día y sin ventilación. Observaron que para ese tipo de clima la estrategia que mejor desempeño tiene sobre las condiciones de confort al interior del edificio consiste en la ventilación natural durante todo el día, sin embargo, dichas simulaciones no consideraron ocupantes en el edificio.

Para varios investigadores, la ocupación es un parámetro que no debe de ser pasado por alto en el área de la simulación energética de edificios. Roetzel *et al.* [7] señalaron que ignorar la ocupación del edificio al realizar una simulación es una de las razones principales para que existan diferencias entre los resultados experimentales y resultados obtenidos mediante simulaciones. En la práctica los ocupantes ejercen una gran influencia sobre las condiciones de confort y el desempeño energético del edificio. La ocupación tiene una gran influencia sobre la ventilación natural.

Para Balaras [8] la ocupación representa un factor determinante para el diseño de cualquier sistema de construcción, incluyendo el diseño de la masa térmica. Recientemente se han realizado estudios que toman en cuenta la ventilación natural y los periodos de ocupación en edificios habitacionales.

Pereira y Ghisi [9] estudiaron la influencia que tienen las propiedades de la envolvente, la ventilación natural y la ocupación, sobre los periodos de confort en una vivienda ocupada por una familia en la ciudad de Florianópolis Brasil. Para estimar la temperatura del aire al interior de la casa, así como la humedad relativa se utilizó el software *Energy Plus*. El modelo utilizado para las simulaciones se calibró usando datos climáticos reales. Los resultados mostraron que el calor específico es la propiedad de la envolvente con mayor influencia sobre los periodos de confort. Se concluyó que es mejor la ventilación natural selectiva que la ventilación durante todo el día. Por ejemplo, en días de verano es conveniente abrir las ventanas solo cuando la temperatura exterior es menor que la interior; esto brinda mayor confort que abrir las ventanas durante todo el día.

Desde el punto de vista del ahorro de energía también se han llevado a cabo algunos estudios. Para observar el efecto que produce el aislamiento térmico en combinación con materiales de construcción Gregory *et al.* [10] analizaron cuatro sistemas de construcción para viviendas en Australia. Se observó que los sistemas que utilizan aislante térmico por el exterior de los muros presentan mejor desempeño al mantener más estables las temperaturas al interior de la vivienda. Adicionalmente, presentan un menor consumo de energía anual al reducir el periodo de uso de equipos de calefacción y enfriamiento, en comparación con sistemas de construcción que utilizan aislante térmico por la parte interna o en el centro.

Aunque se ha estudiado el impacto que tienen diversos factores en el desempeño térmico interior de recintos habitacionales, gran parte de los estudios efectuados enfocan su atención únicamente en la envolvente y algunos de ellos no consideran ventilación natural y periodos de ocupación, lo cual produce resultados que difieran de forma considerable de lo que ocurre realmente.

1.2. Confort Higrotérmico Humano

El confort higrotérmico humano está influenciado por procesos físicos, fisiológicos y psicológicos. Debido a esto, resulta difícil definir de manera precisa este concepto. Según ASHRAE [11] el confort se define como *Aquella condición mental que expresa satisfacción con el medio ambiente*, dicha definición enfatiza el hecho de que el confort es un concepto relativo que involucra diversos procesos. El confort higrotérmico de una persona no solo está influenciado por la temperatura ambiente y la humedad, también se ve afectado por la velocidad del viento, la actividad que realiza dicha persona y la ropa que usa.

La zona de confort puede ser definida como el rango de condiciones climáticas en el que la mayoría de las personas no sienten desconfort térmico, ya sea debido a una sensación de calor o de frío [12]. Existen diversas formas de estimar el confort higrotérmico, una forma de hacerlo es mediante el uso de las cartas bioclimáticas.

Las cartas bioclimáticas están estructuradas en base a la zona de confort, entre las más utilizadas se encuentran las cartas bioclimáticas de Givoni [13] y las de Olgyay [14]. Dichas cartas facilitan el análisis de las características climáticas para cualquier ubicación de interés, desde el punto de vista del confort humano. Se trata de representaciones, en una carta psicrométrica, de la combinación de temperatura y humedad que puede presentar el ambiente en cualquier momento dado. Esta herramienta es un auxiliar en el diseño de edificaciones ya que proporciona información útil para maximizar las condiciones de confort al interior de los edificios cuando estos no son climatizados por elementos mecánicos.

En la industria de la construcción de edificios se utilizan diferentes estrategias para mantener las condiciones ambientales interiores en un rango de confort aceptable. La diferencia de temperaturas es la causante de los flujos de calor, mientras

mayor es la diferencia de temperaturas más grande será la tasa de transferencia de calor [15]. Los aislamientos térmicos son materiales que se utilizan para oponer resistencia a los flujos de calor, lo cual ayuda a estabilizar la temperatura ambiente al interior de las edificaciones. Este efecto generalmente se ve reflejado en un incremento de los periodos de confort. Los aislamientos térmicos representan un elemento muy importante en los proyectos de ahorro de energía en todo tipo de edificios.

Una alternativa para tener control sobre las condiciones de confort en los recintos es el uso de equipos de acondicionamiento de aire, o sistemas de HVAC (por sus siglas en inglés, Heating, Ventilation and Air Conditioning). Estos equipos tienen como principales funciones el calentamiento, enfriamiento, ventilación, humidificación y des-humidificación del aire interior de los edificios, para mantener condiciones de confort. Existe una gran variedad de sistemas de HVAC, por ejemplo, los sistemas centralizados que distribuyen calefacción, enfriamiento y ventilación a múltiples zonas de edificios o sistemas descentralizados para zonas pequeñas o medianas. Hay que tener en cuenta que el uso de equipos de HVAC tiene asociado un consumo energético, ya sea debido a una fuente eléctrica o a un combustible fósil.

1.3. Niveles socioeconómicos en México

El nivel socioeconómico representa la capacidad para acceder a un conjunto de bienes y estilo de vida. En México el nivel socioeconómico se mide a través de la regla AMAI 8×7 [16]. El índice de nivel socioeconómico utilizado hasta ahora, clasifica a los hogares en siete niveles a partir de un árbol de asignaciones considerando ocho variables:

- Escolaridad del jefe del hogar
- Número de habitaciones

- Tipo de piso
- Número de focos
- Estufa de gas
- Regadera
- Número de automóviles

En base a las variables mencionadas, se definen siete niveles socioeconómicos:

El nivel *AB* es el nivel socioeconómico más alto, representa el 6.8 % de los hogares en México. Las viviendas de este nivel cuentan con un promedio de seis a ocho habitaciones, el 30 % de estos recintos cuenta con equipo de enfriamiento y el 26.5 % con algún sistema de calefacción. Las personas pertenecientes a este nivel poseen ingresos mensuales superiores a los \$85,000 pesos.

El nivel *C+*, representa la clase media alta y abarca un 14.2 % de la población, el ingreso asociado a este nivel va desde los \$35,000 a los \$84,999 pesos. Las viviendas tienen en promedio entre cinco y seis habitaciones, el 28 % de estas casas posee equipos de enfriamiento y el 15.8 % equipos de calefacción.

El nivel *C*, la clase media, abarca un 17 % de la población, las viviendas pertenecientes a este nivel tienen en promedio entre cuatro y cinco habitaciones, solo dos o tres son recámaras. El ingreso asociado a este nivel está entre el rango de los \$11,600 a los \$34,999. El 20 % de estas viviendas cuentan con equipo de enfriamiento de aire y solo el 8 % cuenta con algún equipo calefactor.

A partir del 2011 se reconoce un nuevo nivel, el nivel *C-*, el cual junto con el nivel *D+* forman la clase media baja, estos niveles en conjunto representan el 35.6 % de las viviendas mexicanas, poseen ingresos de hasta \$11,599 pesos y tienen un

máximo de cuatro habitaciones, de las cuales solo dos son recámaras. Los niveles *D* y *E* representan la clase baja, cuentan con ingresos máximos de \$6,799 y \$2,699 pesos respectivamente. El nivel *D* representa el 21.4% de la población y el número de viviendas que cuentan con equipo de aire acondicionado es prácticamente nulo, mientras que, el 5% de la población pertenece al nivel *E* y no poseen equipos de climatización.

Sin importar el nivel socioeconómico, los materiales que generalmente son utilizados en la construcción de edificios para uso habitacional en México son: el concreto, block de concreto, ladrillo, tabique y los techos de vigueta y bovedilla.

El nivel socioeconómico está asociado a la capacidad para adquirir herramientas que contribuyen a mantener estables las temperaturas en el interior de las viviendas, tales como el aislamiento térmico y los equipos de acondicionamiento de aire, sin embargo, aún para los sectores capaces de adquirir dichos bienes, existe una falta de cultura de ahorro energético entre los consumidores. Lo anterior, incrementa el área de oportunidad para aprovechar la masa térmica de los materiales de las edificaciones, en conjunto con el uso adecuado del aislamiento térmico, como estrategia para establecer condiciones de confort con un consumo razonable de energía.

1.4. Motivación

El aumento en la demanda de la energía eléctrica a nivel mundial representa un problema social, económico y ambiental. Dicha demanda contribuye al agotamiento de las reservas de combustibles fósiles, ya que dichos combustibles representan el insumo principal en la generación de electricidad. Asimismo, la quema de combustibles fósiles presenta un impacto negativo en el ambiente, debido a las grandes cantidades de CO₂ emitidas a la atmósfera.

Según el censo realizado en México en el 2010, el país cuenta con 112 millones 336 mil personas, se espera que la población siga incrementándose hasta llegar a cerca de los 123 millones de habitantes en el año 2040, como se muestra en la figura 1.2, de acuerdo con la proyección demográfica realizada por el Consejo Nacional de Población (CONAPO) [17]. Como consecuencia del crecimiento demográfico, en México la demanda de energía eléctrica crece considerablemente cada año. Se espera que las ventas al sector público crezcan a una tasa anual del 4.6 %, y se prevé que esta tendencia se mantendrá estable para el periodo del 2010 al 2025. En la Figura 1.3 se observa la tendencia de las ventas de energía eléctrica directas al público, según cifras de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) [18]. Actualmente, el sector doméstico abarca el 88 % del número de usuarios en el país, lo cual representa un 25.8 % de las ventas directas al público. De acuerdo a datos de la Secretaría de Energía (SENER), el 79.7 % de la energía eléctrica se genera a partir de combustibles fósiles [19]. Esto representa anualmente una emisión de 114.8 millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera, de lo cual aproximadamente 29 millones corresponden a la generación para el uso residencial.

Considerando la relación existente entre las reservas de combustibles fósiles y la tasa de producción en México, el ahorro de energía eléctrica en los diferentes sectores de consumo adquiere una mayor importancia. Para dar abasto al ritmo de producción que el país sostiene en la actualidad, se estima que se cuentan con reservas suficientes de petróleo y gas natural para un tiempo aproximado de 10.5 y 8.9 años, respectivamente.

De acuerdo con la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) [20], el consumo total de energía eléctrica en el sector doméstico se distribuye principalmente en iluminación con un 26 %, la refrigeración utiliza cerca del 20 %, donde destaca el uso de equipos de climatización con un 34 % del consumo eléctrico de

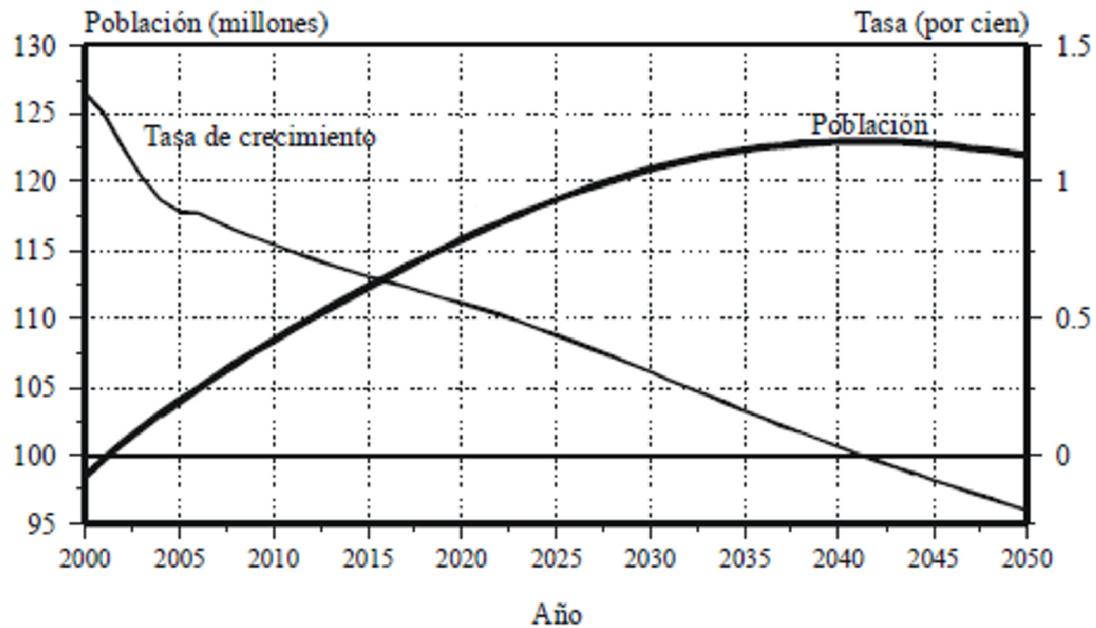


Figura 1.2: Población total y tasa de crecimiento, 2000-2050, de acuerdo al Consejo Nacional de Población [17].

la casa. Considerando el tipo de región climática en donde se encuentra ubicada la vivienda, se observa que para zonas de clima templado el gasto asociado a la climatización es prácticamente nulo, mientras que para climas cálidos y cálidos extremos, el consumo anual relacionado con equipos de acondicionamiento de aire se encuentra en un rango del 35 % al 77 %. Esta cifra es un indicador de la influencia que tienen dichos equipos en el consumo eléctrico en el sector habitacional.

Para enfrentar la problemática antes mencionada surge la necesidad de desarrollar alternativas sustentables que mejoren las condiciones de confort en el interior de las viviendas. El objeto es contribuir a la reducción en el consumo eléctrico mediante la disminución del periodo de uso de los equipos de acondicionamiento de aire. El uso correcto de aislamiento térmico, en conjunto con la capacidad para almacenar calor de los elementos que la construyen, puede conducir a la obtención de temperaturas estables en el interior de los recintos habitables, procurando de esta manera reducir

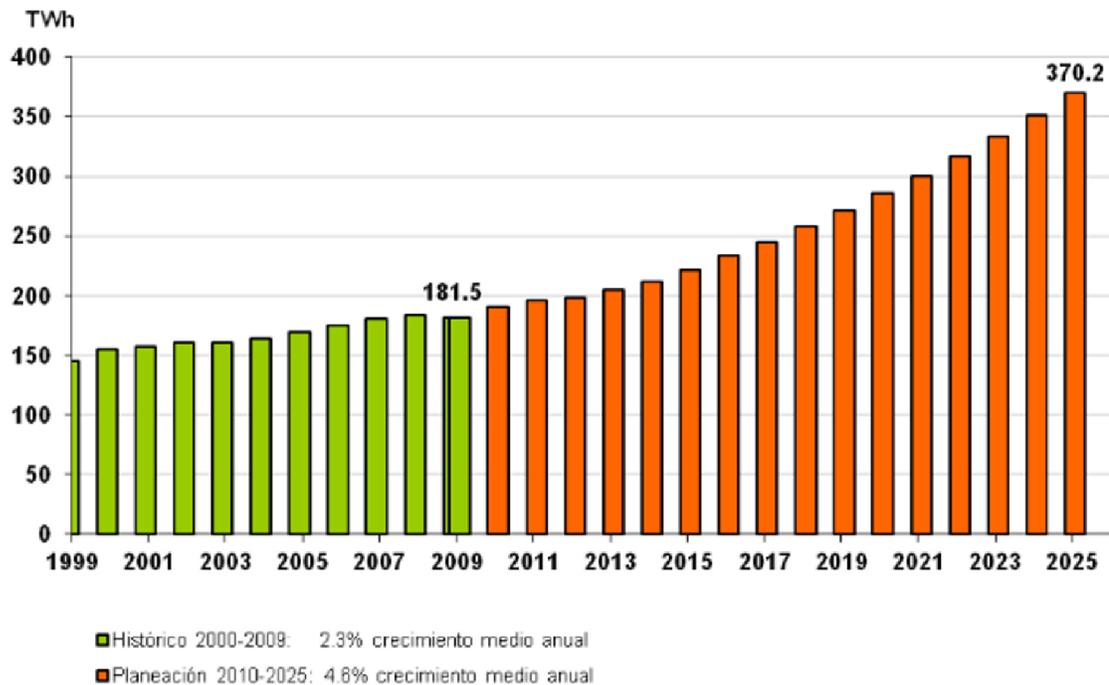


Figura 1.3: Ventas de energía eléctrica al sector público, de acuerdo a la Comisión Federal de Electricidad [18].

los periodos de discomfort durante el día.

1.5. Hipótesis

La masa térmica de una edificación afecta directamente las condiciones térmicas en el interior de la misma. El uso de aislamiento térmico en la envolvente y las particiones del edificio, las condiciones de sombreado, la ocupación y la ventilación del recinto, determinan el desempeño de la masa térmica. Si se caracteriza el comportamiento de la inercia térmica de los elementos que constituyen el edificio y se relaciona con los parámetros antes mencionados, se podrá utilizar la información para establecer estrategias que promuevan condiciones de confort dentro de la vivienda. En consecuencia, el uso conveniente de la masa térmica de una edificación contribuye al ahorro de energía eléctrica debido a la operación de sistemas de acondicionamiento

de aire.

1.6. Objetivo General

Analizar la atenuación de las variaciones de temperatura dentro de edificaciones de tipo habitacional y su relación con la masa térmica de la envolvente, cuando se utiliza aislamiento térmico, ventilación natural, sombreado y se considera la ocupación del recinto. Estimar el potencial ahorro de la energía eléctrica consumida por los sistemas de acondicionamiento de aire al tomar ventaja de la inercia térmica de la edificación. Aplicar la estrategia en dos regiones climáticas diferentes y observar el resultado de su aplicación para la atenuación de las variaciones de temperatura dentro de edificaciones de tipo habitacional.

1.6.1. Objetivos Particulares

Los objetivos particulares planteados para esta investigación son los siguientes:

- Analizar la atenuación de las variaciones de la temperatura dentro de edificaciones de tipo habitacional mediante el uso apropiado de la masa térmica de la envolvente. En el análisis se considerará el uso de aislamiento térmico, ventilación natural y ocupación del recinto.
- Estimar la disminución del consumo de energía eléctrica que utiliza un equipo de acondicionamiento de aire cuando se emplea favorablemente el efecto de la inercia térmica.
- Desarrollar alternativas específicas para la atenuación de las variaciones de la temperatura dentro de edificaciones de tipo habitacional en dos regiones climáticas diferentes, a través del uso favorable de la inercia térmica.

- Aplicar técnicas numéricas robustas para determinar el efecto del uso de aislamiento y ventilación natural sobre el desempeño térmico de la edificación, tomando en cuenta el periodo de ocupación de la vivienda.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

2.1. Estimación del desempeño energético

El monitoreo del desempeño energético de un edificio brinda información real de campo que ayuda a comprender mejor el comportamiento energético de una edificación, además, contribuye a cuantificar los cambios en el desempeño con el paso del tiempo. Aunque cada proyecto de evaluación energética posee diferentes objetivos, todos ellos tienen en común la medición de algunos parámetros, lo cual permite la elaboración de metodologías.

Generalmente los proyectos de monitoreo energético en el área de edificaciones son de dos tipos, no instrumentados e instrumentados. Los no instrumentados son aquellos que solo utilizan un medidor de electricidad, son aproximaciones menos costosas y sencillas, sin embargo, presentan una mayor incertidumbre en la interpretación de los resultados, especialmente cuando los cambios realizados en el edificio representan una pequeña fracción del consumo total de energía. Los proyectos instrumentados comúnmente involucran sistemas de adquisición y registro de datos. Es importante determinar la precisión necesaria para cumplir los objetivos planteados, el tipo de monitoreo necesario para brindar esta precisión, y si la precisión deseada justifica el costo de un monitoreo instrumentado.

La mayoría de los proyectos de monitoreo generalmente involucran las siguientes

actividades:

- Planeación del proyecto
- Instalación y calibración de equipos de adquisición de datos (si se requiere)
- Recolección y verificación de datos de manera continua
- Análisis de datos y elaboración de reportes

Los proyectos de monitoreo pueden clasificarse de acuerdo a sus objetivos, enfoque experimental, nivel de detalle del monitoreo y usos, como se muestra en la Tabla 2.1.

Ternes [22] desarrolló un protocolo de monitoreo de modificaciones para un edificio habitacional ocupado por una familia, mismo que sirve como una guía que identifica parámetros importantes a medir. La guía desarrollada por Ternes busca satisfacer cuatro objetivos generales:

- Identificar los datos críticos necesarios para hacer frente a una amplia gama de preguntas de investigación que interesan al Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE, por sus siglas en inglés), con respecto al desempeño energético de un edificio unifamiliar.
- Identificar un mínimo de datos a recopilar en todos los proyectos de investigación patrocinados por el Departamento de Energía de los Estados Unidos, relacionados con modificaciones que pudieran afectar el desempeño energético de viviendas unifamiliares.
- Establecer guías que ayuden a los investigadores, en general, en la selección de datos apropiados para determinar el desempeño energético de las mejoras implementadas.

Tabla 2.1: Características de los proyectos de monitoreo en edificios. Adaptada de ASHRAE [21]

Tipo de proyecto	Metas y Objetivos	Enfoque General	Nivel de Detalle	Usos
Uso final de la energía	Determinar las características de los usos finales de la energía en el edificio.	Comúnmente utiliza diseños de muestreo estadísticos amplios	Datos detallados relacionados a usos finales. Recopila datos del edificio y de operación que afectan los usos finales.	Previsión de cargas por usos finales. Cálculos de simulación. Tasa de diseño.
Evaluación de tecnología específica	Mediciones del desempeño energético de la tecnología de edificación o de cambios realizados al edificio.	Caracterizar individualmente edificio o tecnología, comportamiento de los ocupantes, y operación. Tomar en cuenta y corregir las variaciones	Utiliza auditorías detalladas, sub mediciones, temperatura interior, tipo de clima, y encuestas de ocupación. Puede utilizar datos semanales, horarios o datos de corto plazo.	Evaluación de tecnología. Desempeño de las modificaciones. Validación de modelos y predicciones.
Mediciones de ahorro de energía y verificación	Estimar el impacto de las modificaciones realizadas, puesta en marcha, u otra alteración hecha al edificio que sirva como base para calcular los beneficios obtenidos.	El consumo energético del edificio antes de ser modificado se utiliza como base. Se calcula el consumo del edificio después de realizar las modificaciones; la diferencia entre ellos es el ahorro.	Varia sustancialmente, incluye verificación del potencial de ahorro, análisis de las modificaciones por separado, todo el edificio, simulaciones calibradas.	Estimar el ahorro de energía en un edificio en específico, compuesto o sistema
Operación del edificio y diagnósticos	Resolver problemas. Medir parámetros físicos o de operación que afectan el uso de la energía o que son necesarios para modelar el edificio o el desempeño del sistema.	Típicamente utiliza mediciones de corto plazo o de una sola toma con métodos especiales, como lo son las imágenes infrarrojo, análisis de gases de combustión, entre otros.	Se concentra en un edificio, componente o sistema.	Auditoría energética. Identificar y resolver problemas relacionados con operación, mantenimiento, calidad del aire interior, o del sistema energético. Proporcionar datos de entrada para modelos. Puesta en marcha del edificio.

- Definir de manera suficiente los datos seleccionados para asegurar la coherencia, comparabilidad, y calidad entre los diversos experimentos a realizarse, mediante el seguimiento de la guía.

Los parámetros definidos en la guía propuesta por Ternes se muestran en la Tabla 2.2, dichos parámetros están divididos en dos categorías, datos básicos y datos opcionales. Dos intervalos de medición son recomendados, horarios y semanales. Los resultados obtenidos a través de la implementación de la guía consisten en información descriptiva obtenida en una sola toma y mediante mediciones secuenciales del desempeño energético. La información de una sola toma representa información obtenida antes, durante o después del experimento, por ejemplo información obtenida mediante diálogos con el propietario de la casa o inspección visual. Las mediciones secuenciales son monitoreadas de manera continua mediante instrumentos durante todo el experimento.

Independientemente de la metodología a seguir, el impacto que tiene la masa térmica de un edificio en las condiciones interiores, puede ser estimado comparando la duración de los periodos de confort o el consumo eléctrico de los equipos de HVAC (según el enfoque del proyecto) que existen antes y después de cualquier modificación implementada con el propósito de mejorar el desempeño térmico del edificio.

2.2. Mecanismos de transferencia de calor

La transferencia de calor es un proceso de transferencia de energía causado por una diferencia de temperaturas. La energía se transfiere de la región con mayor temperatura hacia la región más fría mediante uno o más de los tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, radiación y convección. En una edificación la conducción de calor ocurre entre las paredes, ventanas, puertas y demás elementos

Tabla 2.2: Especificaciones de la guía. Adaptada de Ternes [22]

	Periodo de muestreo	
	Mínimo	Opcional
<i>Parámetros básicos</i>		
Descripción de la casa		Una vez
Descripción del sistema de acondicionamiento de aire		Una vez
Información de diálogo de entrada		Una vez
Información de diálogo de salida		Una vez
Tasas de infiltración pre y post modificación		Una vez
Medición del rendimiento del sistema de acondicionamiento de aire		Una vez
Verificación de la calidad de instalación de implementaciones		Una vez
Consumo de equipos de HVAC	Semanal	Horario
Información climática de estación meteorológica	Semanal	Horario
Temperatura interior	Semanal	Horario
Humedad interior		Horario
Consumo de combustibles de la casa	Semanal	Horario
Consumo de eléctrico de la casa	Semanal	Horario
Consumo de madera para calefacción		Horario
Consumo de energía para calentamiento de agua	Semanal	Horario
<i>Parámetros opcionales</i>		
<i>Comportamiento de los ocupantes</i>		
Temperaturas interiores adicionales	Semanal	Horario
Set Point de calefacción	Semanal	Horario
Set Point de refrigeración	Semanal	Horario
Humedad interior	Semanal	
<i>Microclima</i>		
Temperaturas exteriores	Semanal	Horario
Radiación solar	Semanal	Horario
Humedad exterior	Semanal	Horario
Velocidad del viento	Semanal	Horario
Dirección del viento	Semanal	Horario
Sombreado		Una vez
Protección proporcionada por el entorno (contra viento, radiación)		Una vez
<i>Sistema de distribución</i>		
Evaluación de infiltración en ductos		Una vez

que forman la envolvente; los elementos semitransparentes, como las ventanas, permiten el paso de radiación hacia el interior del recinto, mientras que la masa de aire que está en contacto con el edificio intercambia calor con la estructura por medio de convección.

La gama de procesos de transferencia de calor y masa que toman lugar en un edificio se ilustra en la figura 2.1, donde se muestra un cuarto de un edificio de dos plantas. El cuarto está separado del exterior por un muro y una ventana, y de cuartos adyacentes por particiones internas; abajo se encuentra el suelo y arriba el entrepiso. El cuarto está equipado con un sistema de HVAC, el cual proveerá de calefacción o refrigeración al cuarto.

Desde el punto de vista térmico un edificio puede ser visto como un modificador de clima [24]. La función principal de la envolvente de una edificación es actuar como un elemento pasivo que contribuye a mantener las condiciones interiores en un rango de temperaturas más estable que el exterior, además de proteger el interior de humedad y corrientes de aire.

Como se observa en la figura 2.1, los procesos de transferencia de calor y masa que toman lugar en un edificio incluyen:

- Transferencia de calor por conducción a través de los elementos de construcción del edificio, incluyendo los muros externos, techo, piso, entrepisos y particiones.
- Transmisión de radiación solar y conducción a través de las ventanas.
- Infiltración de aire exterior y aire de cuartos adyacentes.
- Disipación de calor y humedad debido a ocupantes, iluminación, equipos eléctricos y otros elementos dentro del cuarto.

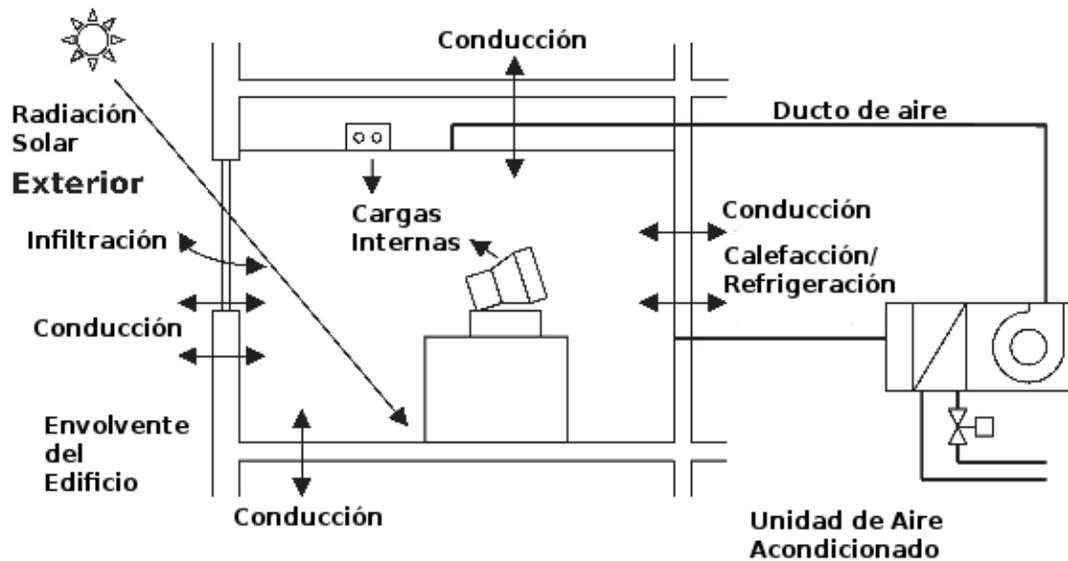


Figura 2.1: Mecanismos de transferencia de calor y masa en un edificio. Adaptada de Underwood [23].

- Calefacción o enfriamiento, y humidificación o deshumidificación provista por el sistema de HVAC.

2.2.1. Conducción de calor en edificaciones

La conducción es la transferencia de calor a través de un material por difusión molecular, debido a un gradiente de temperatura [25]. La solución a problemas de conducción de calor están basados en la expresión empírica llamada *ley de Fourier*, dicha expresión se muestra a continuación:

$$\vec{q}'' = -k\nabla T, \quad (2.1)$$

donde

$$\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}. \quad (2.2)$$

El factor de proporcionalidad, k , es llamado conductividad térmica y \vec{q}'' expresa el flujo de calor por conducción como resultado del gradiente de temperatura. La dirección del flujo de calor es normal a una superficie de temperatura constante, llamada una superficie isotérmica. Por lo tanto, con el fin de calcular la transferencia de calor en cualquier dirección dentro de un material es necesario determinar la distribución de temperatura. Esto es, una vez que la distribución de temperatura es conocida, la tasa de transferencia de calor por conducción en cualquier punto dentro del material o en su superficie puede ser calculado mediante la *ley de Fourier*. La ecuación vectorial de la difusión de calor, en estado transitorio, para calcular la distribución de temperatura es:

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3)$$

2.2.2. Convección en edificaciones

El fenómeno de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos. Además de la transferencia de energía debida al movimiento molecular aleatorio, *i.e.* difusión, la energía también se transfiere mediante el movimiento global, o macroscópico del fluido. El movimiento del fluido se asocia con el hecho de que, en cualquier instante, grandes números de moléculas se mueven de forma colectiva o como agregados. Tal movimiento en presencia de un gradiente de temperatura, contribuye a la transferencia de calor. La transferencia de calor y masa por convección entre el interior de una edificación y el medio ambiente desempeña un papel muy importante en las condiciones de temperatura y humedad que se obtendrán al interior del edificio.

La transferencia de calor por convección se clasifica en convección natural y convección forzada, de acuerdo a la naturaleza del flujo. Sin importar la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por convección, la expresión apropiada para dicho fenómeno recibe el nombre de *ley de enfriamiento de Newton* y posee la siguiente forma:

$$q'' = h(T_\infty - T_S), \quad (2.4)$$

donde q'' es el flujo de calor por convección, y es proporcional a la diferencia que existe entre las temperaturas del ambiente y de la superficie, T_∞ y T_S , respectivamente, y h es la constante de proporcionalidad llamada coeficiente de transferencia de calor por convección.

Convección Natural

La convección natural es aquella en donde el flujo es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidad ocasionadas por variaciones de temperatura en el fluido. La convección natural es un medio muy importante de transferencia de calor dentro de edificios, donde la flotación térmica es con frecuencia la principal causante del flujo de aire. En una edificación, los gradientes de temperatura que inducen un movimiento del aire surgen, por ejemplo, en las paredes frías y superficies de las ventanas, muros y techos calientes, y en la mayoría de los equipos eléctricos. Para calcular el coeficiente h en la superficie interior de los muros verticales de un edificio se puede utilizar la siguiente ecuación [25]:

$$Nu = \frac{hH}{k} = 0.1Ra^{1/3} = 0.1 \left(\frac{g\beta H^3 \Delta T}{\nu\alpha} \right)^{1/3}, \quad (2.5)$$

donde:

Nu : Número de Nusselt

Ra : Número de Rayleigh

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección

H : Altura de la pared

k : Conductividad térmica del fluido evaluada a la temperatura de la pared

g : Aceleración de la gravedad

β : Coeficiente de expansión volumétrica

ν : Viscosidad cinemática

α : Difusividad térmica del fluido evaluada a la temperatura de la pared

Convección Forzada

La convección forzada ocurre cuando el flujo es causado por medios externos, como un ventilador o vientos atmosféricos. Al interior de un edificio la convección forzada se encuentra en aquellas zonas que poseen sistemas mecánicos que producen un flujo de aire, mientras que al exterior, dicho mecanismo de transferencia de calor se puede observar en el intercambio de energía que ocurre entre las corrientes de aire que rodean al edificio y la envolvente. La convección forzada es muy importante en las superficies exteriores de los edificios, como los techos, ya que el viento suele ser el elemento principal que propicia la transferencia de calor por convección. Una correlación a partir de la cual se puede obtener el coeficiente de transferencia de calor por convección para una placa plana, como por ejemplo el techo de un edificio, para números de Reynolds mayores a 2×10^5 es [26]:

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0.036Pr^{0.43}(Re^{0.8} - 9200) \left(\frac{\mu_{\infty}}{\mu_w} \right)^{0.25}, \quad (2.6)$$

donde:

Nu : Número de Nusselt

Pr : Número de Prandtl

Re : Número de Reynolds

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección

L : Longitud de pared en la dirección del flujo

k : Conductividad térmica del fluido evaluada a la temperatura de la pared

μ_∞ : Viscosidad dinámica del fluido en la corriente libre

μ_w : Viscosidad dinámica del fluido evaluada a la temperatura de la pared

2.2.3. Radiación térmica en edificaciones

La radiación térmica involucra la transferencia de calor de un cuerpo a otro a menor temperatura, mediante ondas electromagnéticas que atraviesan un medio o el vacío. Las ondas de radiación térmica poseen propiedades similares a otras ondas electromagnéticas, difiriendo únicamente en la longitud de onda. El rango de longitud de onda aproximado para la radiación térmica va de los $0.1 \mu\text{m}$ a los $100 \mu\text{m}$ [25].

En las edificaciones, la carga térmica provista por la radiación solar influye de manera importante en el desempeño que tiene la masa térmica del edificio en las condiciones ambientales interiores. Tomando como ejemplo una edificación con muros masivos, ubicada en un clima desértico el cual está expuesto a grandes cantidades de radiación solar, el calor almacenado por la envolvente puede llegar a no ser liberado en su totalidad en el periodo nocturno, dicho fenómeno producirá que la temperatura ambiente interior aumente hasta salir del rango de confort, causando un incremento en el tiempo de uso del equipo de aire acondicionado [27].

Radiación de cuerpo negro

Un concepto importante en la radiación térmica es el concepto del *cuerpo negro*. Un cuerpo negro o superficie negra es una superficie ideal que posee las siguientes

propiedades:

- Absorbe toda la radiación que incide sobre él, sin importar la longitud de onda o dirección.
- Para una temperatura y longitud de onda dadas, ninguna superficie puede emitir más energía que un cuerpo negro.
- La radiación emitida por un cuerpo negro es independiente de la dirección. Es decir, un cuerpo negro es un emisor difuso.

Entonces, como un emisor y absorbente perfecto, el cuerpo negro es el estándar contra el cual serán comparadas las propiedades de la radiación de las superficies reales. La cantidad de radiación emitida por un cuerpo negro puede ser evaluada mediante la *ley de Stefan-Boltzmann*:

$$E = \sigma T^4 \tag{2.7}$$

donde E es la potencia emisiva superficial, la cual representa la rapidez a la cual una superficie libera energía por unidad de área; T es la temperatura absoluta y σ es la *constante de Stefan-Boltzmann*.

Propiedades de la radiación

La mayoría de las superficies no se comportan como un cuerpo negro. Para caracterizar las propiedades de radiación de superficies normales se emplean cantidades adimensionales. La *emisividad*, *absortividad*, *reflectividad* y *transmitividad* permiten relacionar las capacidades de emitir, absorber, reflejar y transmitir radiación, de una superficie real con las de un cuerpo negro. Las propiedades de las superficies reales

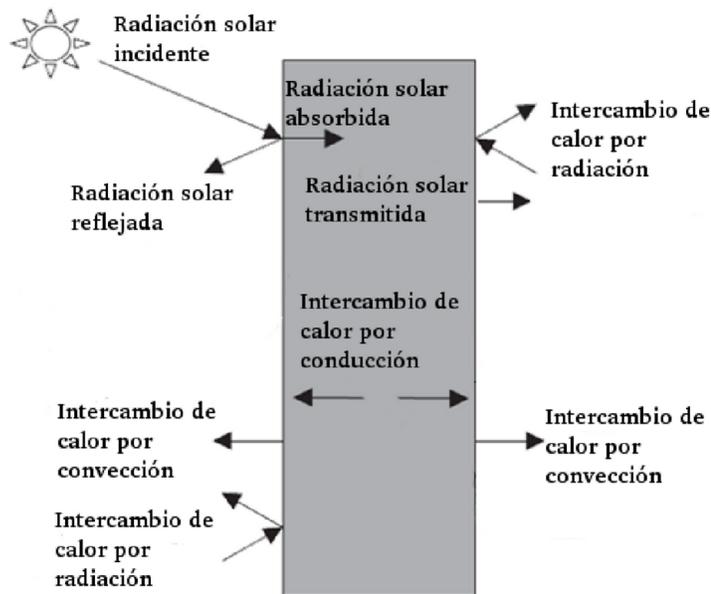


Figura 2.2: Transferencia de calor en el muro exterior de una edificación. Adaptada de Underwood [23].

son funciones de la temperatura, longitud de onda, y dirección. Las propiedades que describen como se comporta una superficie en función de la longitud de onda son llamadas *propiedades espectrales o monocromáticas*. Las *propiedades direccionales* describen la distribución de la radiación en relación a la dirección angular.

En la figura 2.2 se muestra cómo la radiación solar incide sobre el muro externo de un edificio para posteriormente fraccionarse en tres partes; en dicha figura también se observa cómo el muro es afectado por los tres mecanismos de transferencia de calor, conducción, convección y radiación.

Realizando un balance de energía a partir de la radiación que incide sobre una superficie real, se obtiene que:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.8)$$

donde la *absortividad* (α) es la fracción absorbida, la *reflectividad* (ρ) es la fracción reflejada, y la *transmitividad* (τ) es la fracción transmitida.

Otra propiedad importante en las superficies reales es la *emisividad* (ε), con valores en el rango $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Esta propiedad proporciona una medida de la eficiencia con la que una superficie emite energía en relación con un cuerpo negro. Al incluir el valor de la *emisividad* en la ecuación (2.7), se obtiene que el flujo de calor emitido por una superficie real está dado por:

$$E = \varepsilon\sigma T^4 \quad (2.9)$$

2.3. Simulación computacional

Con frecuencia la manera más confiable de obtener información en relación a un proceso físico es mediante mediciones reales. Sin embargo, la mayoría de las veces una investigación experimental requiere de equipos de medición costosos y, como en el caso de la simulación energética de edificaciones, de largos periodos de medición para evaluar de manera apropiada el desempeño térmico del edificio.

El estudio del comportamiento de la masa térmica de una vivienda puede ser efectuado mediante simulación computacional, dicha herramienta ha sido utilizada en investigaciones recientes orientadas a estimar el impacto que tiene el efecto de la inercia térmica en las condiciones interiores de diversos tipos de edificios [9, 10, 27, 28].

Las principales ventajas que ofrece una solución teórica asistida por computadora sobre una investigación experimental son [29]:

- **Bajo costo.** La ventaja principal de una predicción computacional es el bajo costo. En la mayoría de las aplicaciones, el costo de una simulación asistida

por computadora es mucho menor que su correspondiente investigación experimental.

- **Velocidad.** Un investigador puede utilizar esta herramienta para estudiar las implicaciones que tendrían diferentes configuraciones y así elegir el diseño óptimo, este proceso puede ser llevado a cabo en horas o días.
- **Información completa.** Una solución computacional brinda información detallada y completa, puede proveer los valores de las variables relevantes en un dominio de interés.
- **Habilidad para simular condiciones realistas.** En un cálculo teórico, un problema con condiciones realistas pueden ser fácilmente simulado. No hay necesidad de utilizar modelos a escala.
- **Habilidad para simular condiciones ideales.** En algunos estudios, cuando se requiere enfocar la atención a unos cuantos parámetros esenciales pueden ser eliminadas algunas variables irrelevantes. Algunas idealizaciones que pueden ser consideradas son por ejemplo, considerar la densidad del aire en un cuarto como constante y considerar una superficie como adiabática.

Debido a las ventajas antes mencionadas, en el presente estudio se utilizó la simulación computacional para evaluar el desempeño térmico y el ahorro de energía de una vivienda.

2.3.1. EnergyPlus

EnergyPlus es un programa de simulación diseñado para evaluar el desempeño térmico, el consumo de energía y la producción de contaminantes de un edificio [32]. Este *software* es capaz de estimar los intercambios térmicos y las tasas de consumo

de energía en edificaciones a partir del modelo físico del edificio y considerando ventilación, iluminación, y sistemas de refrigeración y calefacción.

La formulación de la solución comienza con un balance de calor por zona del edificio [33], como lo establece la ecuación (2.10). En el balance se consideran los tres mecanismos de transferencia de calor, conducción, convección y radiación, así como el transporte de energía que surge debido al intercambio de masa de aire entre el exterior y el interior del edificio.

$$C_a \frac{dT_a}{dt} = \sum_{i=1}^N \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superf.}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zona}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sis} \quad (2.10)$$

donde:

$C_z \frac{dT_z}{dt}$: Cambio de la energía almacenada en el aire.

$\sum_{i=1}^N \dot{Q}_i$: Suma de las cargas térmicas internas.

$\sum_{i=1}^{N_{superf.}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$: Suma de las cargas térmicas por convección de todas las superficies internas de la zona.

$\sum_{i=1}^{N_{zona}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$: Carga térmica debido al intercambio de aire entre zonas.

$\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$: Carga térmica debida a la infiltración del aire externo.

\dot{Q}_{sis} : Calor de salida de la zona.

C_z : $\rho_a C_p C_T$

ρ_a : Densidad del aire en la zona.

C_p : Calor específico del aire en la zona.

C_T : Multiplicador de capacidad calorífica sensible.

De manera similar al balance de calor realizado por zona, *EnergyPlus* utiliza el balance de masa establecido por la ecuación (2.11) con la finalidad de calcular el intercambio de humedad que existe en cada zona del edificio.

$$\begin{aligned} \rho_a V_z C_w \frac{dW_z}{dt} = & \sum_{i=1}^N K g_{masa} + \sum_{i=1}^{N_{superf.}} A_i h_{mi} \rho_{az} (W_{si} - W_z^t) + \sum_{i=1}^{N_{zona}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z^t) \\ & + \dot{m}_{inf} (W_\infty - W_z^t) + \dot{m}_{sis} (W_{sup} - W_z^t) \end{aligned} \quad (2.11)$$

donde:

$\rho_a V_z C_w \frac{dW_z}{dt}$: Cambio de la tasa de humedad.

$\sum_{i=1}^N K g_{agua}$: Suma de la humedad provista por las cargas latentes interiores.

$\sum_{i=1}^{N_{superf.}} A_i h_{mi} \rho_{az} (W_{si} - W_z^t)$: Humedad intercambiada entre las superficies y el aire de una zona.

$\sum_{i=1}^{N_{zona}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z^t)$: Humedad debida al intercambio de aire entre zonas.

$\dot{m}_{inf} (W_\infty - W_z^t)$: Humedad debida a la infiltración del aire externo.

$\dot{m}_{sis} (W_{sup} - W_z^t)$: Humedad suministrada por sistemas de HVAC.

ρ_a : Densidad del aire.

V_z : Volumen de la zona.

C_w : Multiplicador de capacidad de humedad.

En estudios relacionados con la inercia térmica *EnergyPlus* ha demostrado ser una herramienta útil en el análisis del desempeño térmico de viviendas y edificios en general [9, 28].

Para evaluar el efecto de la inercia térmica de la estructura de un edificio es indispensable evaluar la transferencia de calor en estado transitorio. Para realizar este cálculo existen diferentes métodos, entre ellos se encuentran el método del *factor de respuesta* y las *funciones de transferencia* (CTF, por sus siglas en inglés). Estos métodos son utilizados en programas de simulación de edificios para calcular la solución, en pasos de tiempo grandes, a problemas de transferencia de calor en estado transitorio cuando las propiedades del sistema no varían con el tiempo. En el método de *factor de respuesta* se relaciona el flujo de calor de una superficie de un elemento a una serie que representa el historial de temperaturas en ambos lados de dicha superficie. El método de *funciones de transferencia* que utiliza *EnergyPlus*, al igual que el método de *factor de respuesta*, se basa en series de temperaturas, sin embargo adiciona un término que representa el flujo de calor que atraviesa un elemento en pasos de tiempo anteriores. La metodología de solución basada en *funciones de transferencia* resulta muy eficiente en la evaluación de problemas de transferencia de calor que utilizan pasos grandes de tiempo, usualmente de una hora en simulación de edificaciones.

Las funciones de transferencia para una superficie interior y una superficie exterior se muestran en las ecuaciones (2.12) y (2.13), respectivamente.

$$q''_{ki}(t) = - \sum_{j=0}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + \sum_{j=0}^{nz} Y_j T_{e,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi q''_{ki,t-j\delta} \quad (2.12)$$

$$q''_{ke}(t) = - \sum_{j=0}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + \sum_{j=0}^{nz} X_j T_{e,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi q''_{ke,t-j\delta} \quad (2.13)$$

donde:

q''_{ki} : Flujo de calor en la superficie interior.

q''_{ke} : Flujo de calor en la superficie exterior.

X_j : Coeficiente CTF exterior.

Y_j : Coeficiente CTF cruzado.

Z_j : Coeficiente CTF interior.

Φ_j : Coeficiente CTF del flujo de calor.

T_i : Temperatura de superficie interior.

T_e : Temperatura de superficie exterior.

δ : Paso de tiempo.

2.3.2. Meteonorm

Meteonorm es una programa computacional que proporciona datos climáticos. En sí, los datos son obtenidos de estaciones climatológicas ubicadas en distintos lugares y mediante el uso de interpolación se obtiene información para los lugares que no cuentan con registro de datos climáticos. La interpolación se realiza a través de modelos estocásticos.

Los parámetros que se obtienen mediante Meteonorm se pueden utilizar como datos de entrada en las simulaciones con *EnergyPlus*. Particularmente son importantes los siguientes:

- Temperatura de bulbo seco y de punto de rocío.
- Radiación: Global horizontal, normal directa, difusa horizontal.
- Velocidad y dirección del viento.

- Humedad relativa.
- Presión atmosférica.
- Grado de nubosidad.

Los valores provistos por Meteonorm han sido sujetos a pruebas para su validación en investigaciones especializadas. Se ha encontrado que el error en la interpolación de los valores de radiación mensuales es del 9 %, y para la temperatura se han encontrado desviaciones de 1.5 °C [30].

En las tablas 2.3 y 2.4 se muestra un comparativo entre las temperaturas medias normales proporcionadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) [31] y las obtenidas mediante el software Meteonorm para las ciudades de Monterrey y Cancún, respectivamente. La diferencia porcentual promedio que resulta de dicha comparación es de 1.3 % para la ciudad de Monterrey y de 2.5 % para la ciudad de Cancún.

2.4. Definición del problema

El presente estudio tiene como finalidad analizar el impacto que tiene la masa térmica de la envolvente de un edificio habitacional, en las condiciones interiores del edificio. Para llevar a cabo dicho estudio se utilizó el software *EnergyPlus*. En el estudio se consideraron diversos factores que afectan de manera importante el desempeño de la masa térmica, entre ellos: la ventilación, la ocupación, los materiales y el tipo de clima. A continuación se describen las características de la geometría utilizada para las simulaciones y los parámetros que fueron considerados en el modelado térmico de la vivienda.

Tabla 2.3: Comparativa de temperatura media normal mensual SMN vs. Meteonorm, para Monterrey, N.L.

Periodo	Temperatura media normal. Datos del SMN (°C)	Temperatura media normal. Datos de Meteonorm (°C)
Enero	14.4	14.3
Febrero	16.7	16.5
Marzo	20.7	20.5
Abril	23.5	23.9
Mayo	26.2	26.5
Junio	27.9	27.4
Julio	28.2	28.7
Agosto	28.2	28.4
Septiembre	25.9	26.0
Octubre	22.4	22.5
Noviembre	18.5	17.9
Diciembre	15.2	15.2

2.4.1. Consideraciones de simulación

Geometría

En el estudio se consideró una vivienda típica del sector residencial de clase media o clase *C*. El edificio habitacional analizado posee 102 m² de construcción, la vivienda está distribuida en dos plantas. La planta baja cuenta con un comedor, cocina y un baño, como se muestra en la figura 2.3, mientras que en la planta alta se encuentran dos recámaras y dos baños, como se observa en la figura 2.4. La fachada de la casa se consideró orientada hacia el Norte. Las dimensiones y distribución del acristalamiento del edificio se muestran en la tabla 2.5.

Tabla 2.4: Comparativa de temperatura media normal mensual SMN vs Meteonorm, para Cancún, Quintana Roo.

Periodo	Temperatura media normal. Datos del SMN (°C)	Temperatura media normal. Datos de Meteonorm (°C)
Enero	24.3	23.9
Febrero	24.7	23.8
Marzo	25.7	25.3
Abril	27.4	26.5
Mayo	28.6	28.3
Junio	29.1	28.4
Julio	29.3	28.8
Agosto	29.2	28.6
Septiembre	28.7	27.3
Octubre	27.4	26.9
Noviembre	26.2	25.0
Diciembre	24.7	24.4

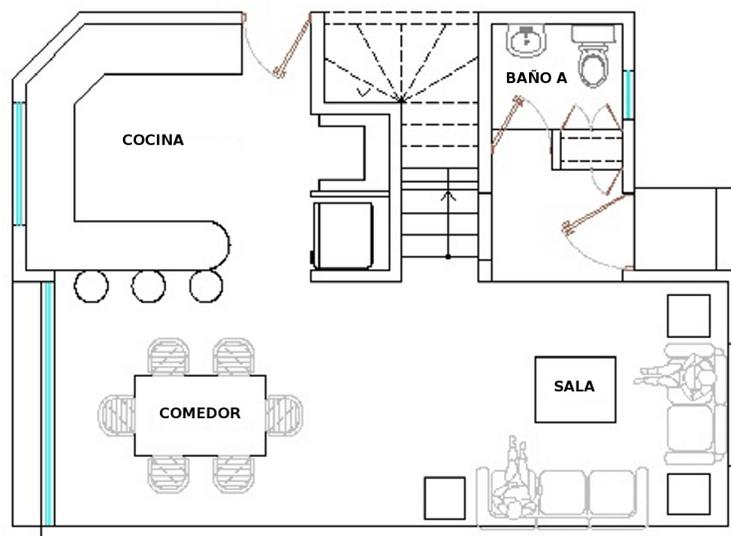


Figura 2.3: Planta baja de la edificación analizada.

Tabla 2.5: Dimensiones y ubicación del acristalamiento del edificio.

Planta	Zona	Área de abertura
Baja	Sala	1.8 m ²
	Comedor	7.5 m ²
	Cocina	1.35 m ²
	Baño A	0.36 m ²
Alta	Recámara A	3.15 m ²
	Recámara B	1.8 m ²
	Baño B	0.36 m ²
	Baño C	0.36 m ²
	Vestíbulo	0.73 m ² y 0.56 m ²

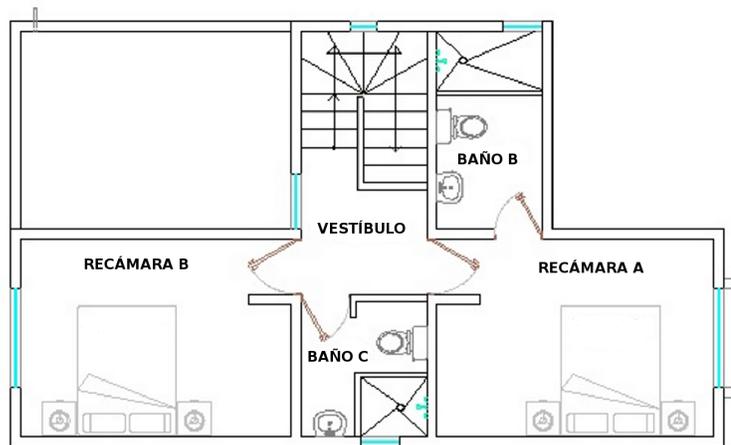


Figura 2.4: Planta alta de la edificación analizada.

Tipo de clima

Para el presente análisis se seleccionaron las ciudades de Monterrey y Cancún, debido a que estas ciudades poseen un clima cálido con valores de humedad relativa ambiental distintos. Estas condiciones provocan que las viviendas ubicadas en ambas regiones sean propensas a presentar largos periodos de discomfort en su interior y altos consumos eléctricos cuando utilizan sistemas de acondicionamiento de aire. Las

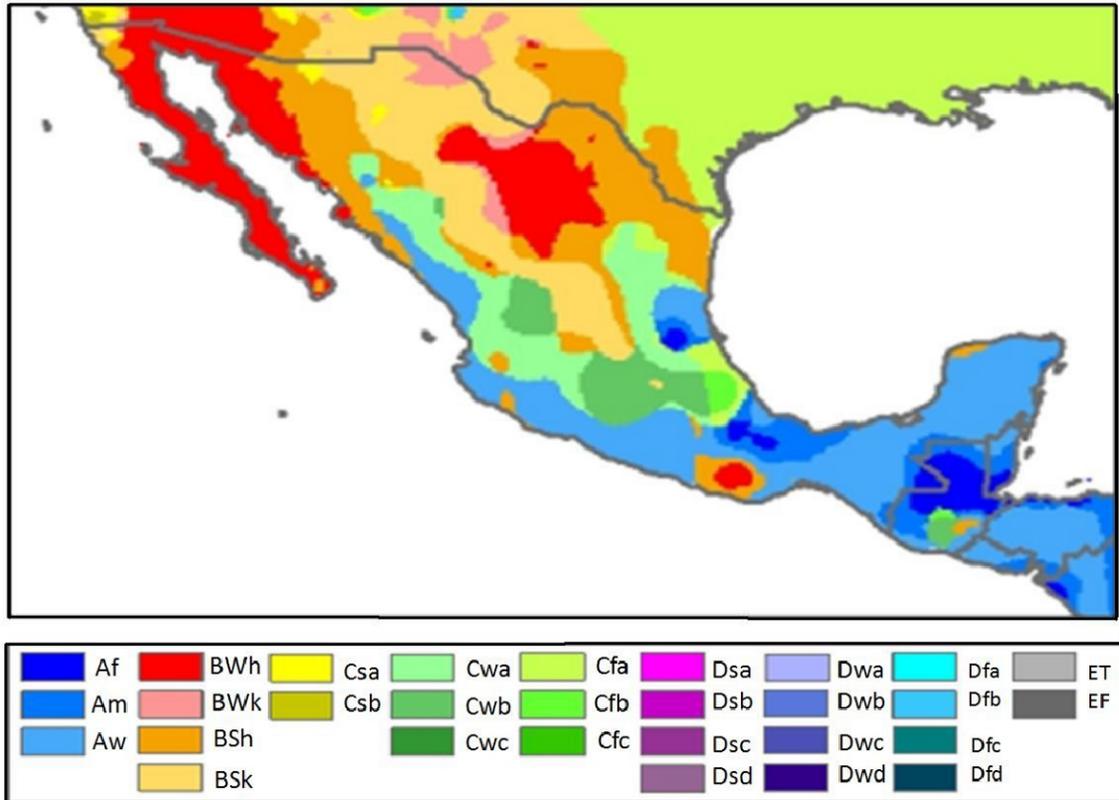


Figura 2.5: Distribución de las regiones climáticas en México según la clasificación Köppen-Geiger.

ciudades antes mencionadas pertenecen a regiones climáticas diferentes. De acuerdo a la clasificación Köppen-Geiger, la ciudad de Monterrey posee un clima tipo *BSh* mientras que la ciudad de Cancún pertenece a la región climática *Aw*, como se muestra en la figura 2.5. En la tabla 2.6 se presentan las características de las regiones climáticas de Monterrey y Cancún de acuerdo a la clasificación Köppen-Geiger.

Las temperaturas mensuales del terreno para las ciudades de Monterrey y Cancún se muestran en la tabla 2.7. Los valores se calcularon utilizando el programa auxiliar *Slab* [34], que forma parte de *EnergyPlus*.

Tabla 2.6: Características climáticas de Monterrey y Cancún según la clasificación Köppen-Geiger. Adaptada de Ternes [22].

Ciudad	Clasificación	Tipo de clima
Monterrey	BSh	Estepas cálidas (semi-áridos). Precipitaciones escasas e irregulares, entre 250 mm y 500 mm al año. Estación seca en verano. Temperatura media anual superior a los 18°C.
Cancún	Aw	Tropical. Caliente sub-húmedo con lluvias en verano. Lluvias superiores a los 750 mm anuales. Estación seca en invierno. Temperatura media superior a 18°C durante todos los meses.

Tabla 2.7: Temperatura mensual del suelo para las ciudades de Monterrey y Cancún.

Periodo	Monterrey. Temperatura del terreno (°C)	Cancún. Temperatura del terreno (°C)
Enero	18.6	24.0
Febrero	19.6	24.0
Marzo	21.5	24.5
Abril	23.3	25.3
Mayo	24.6	26.5
Junio	25.5	26.9
Julio	26.2	27.4
Agosto	26.2	27.2
Septiembre	25.0	26.4
Octubre	23.7	26.0
Noviembre	21.3	24.9
Diciembre	19.7	24.5

Tabla 2.8: Horarios de ocupación y ventilación natural utilizados en la vivienda.

Ocupación	Lunes a Viernes	Sábado y Domingo
Ocupación laboral	18:00 a 7:00	Todo el día
24 Horas	Todo el día	Todo el día
Ventilación		
Nocturna	21:00 a 7:00	21:00 a 7:00
24 Horas	Todo el día	Todo el día

Ocupación, ventilación y HVAC

La ocupación desempeña un papel muy importante en el funcionamiento de la masa térmica de cualquier edificación. Las personas no solamente representan una carga térmica interna, sino que también influyen en el comportamiento de la ventilación natural. Para llevar a cabo las simulaciones se consideró una ocupación de cuatro personas, dos adultos y dos niños. Se utilizaron dos horarios de ventilación natural en el estudio con el fin de determinar la manera en la que este parámetro afecta la masa térmica de la envolvente. En la tabla 2.8, se muestran los periodos de tiempo en que estarán activadas cada una de las estrategias de ventilación natural, así como el periodo en que se consideró ocupado el edificio. Las cargas térmicas internas debido a equipos eléctricos e iluminación se despreciaron en el presente estudio. Las puertas interiores se mantuvieron abiertas todo el tiempo, a excepción de las recámaras cuando éstas utilizaron equipos de HVAC.

En los casos en donde se utilizan sistemas acondicionamiento de aire el set-point de refrigeración se consideró en 25 °C, de acuerdo con las recomendaciones de ahorro de energía de la Comisión Federal de Electricidad [35], y se supuso un *coeficiente de desempeño* (COP, por sus siglas en inglés) de 3.

Materiales

Los materiales utilizados para la construcción del modelo de vivienda se muestran en la tabla 2.9. Con la finalidad de observar el impacto que tiene una envolvente “pesada” y una envolvente “ligera” sobre la climatización del edificio, se eligieron dos tipos de envolventes, cada una de ellas con materiales con distintas propiedades termofísicas. En las figuras 2.6 y 2.7 se observan las configuraciones de muros y losas, respectivamente. Adicionalmente, se muestra la capacidad calorífica de cada una de ellas. La envolvente “pesada” es aquella que utiliza muros y losas cuyas densidades son relativamente altas, mientras que la envolvente “ligera” es aquella que se forma usando el conjunto de muros y losas de menor densidad.

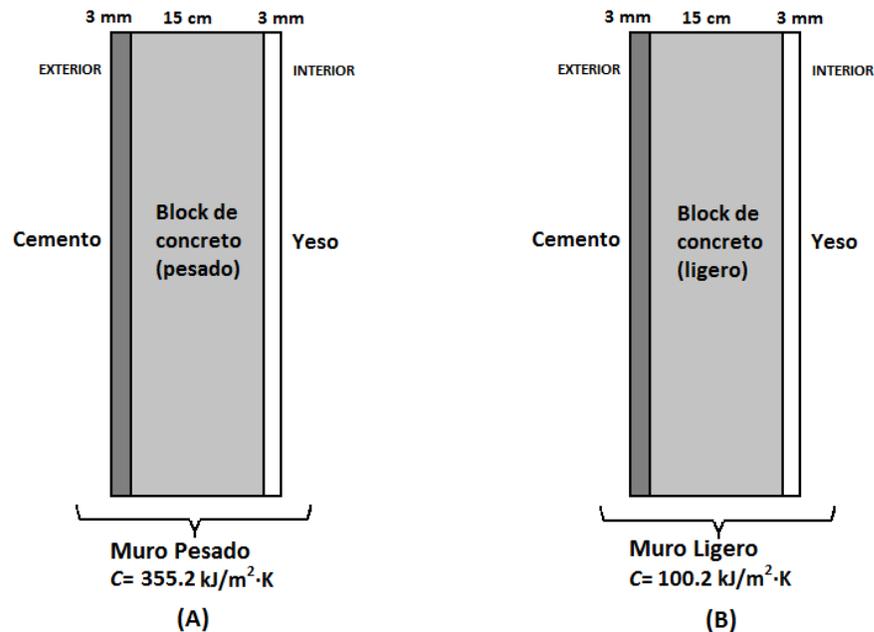


Figura 2.6: Representación esquemática de los tipos de muros utilizados en el estudio. (A): Muro de block de concreto “pesado”. (B): Muro de block de concreto “ligero”.

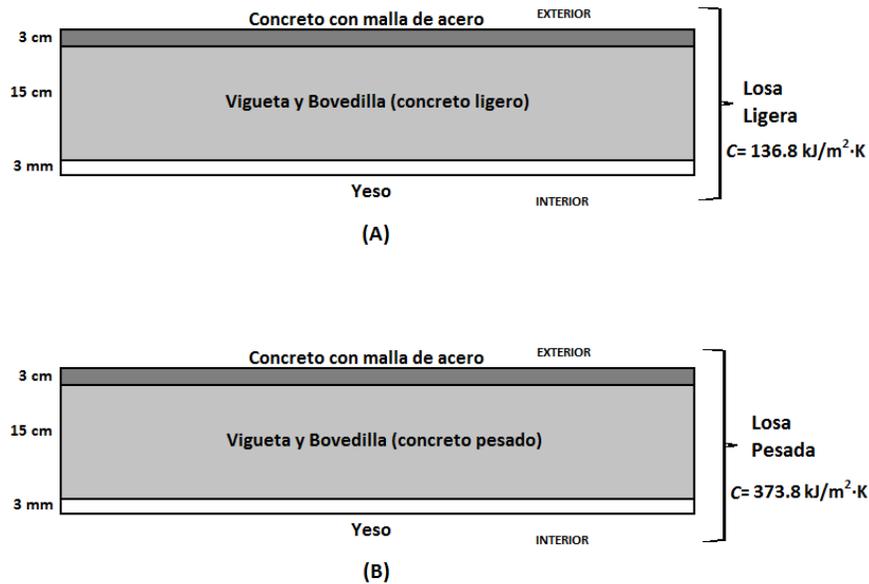


Figura 2.7: Representación esquemática de los tipos de losas utilizados en el estudio. (A): Losa de bovedilla de concreto “ligero”. (B): Losa de bovedilla de concreto “pesado”.

2.5. Diseño de experimentos

El diseño de experimentos es una metodología basada en la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente. La metodología propuesta para la realización de las simulaciones está enfocada en analizar la manera en la que diversos parámetros afectan el comportamiento de la inercia térmica de la envolvente de una vivienda. Para determinar qué configuración de materiales, estrategia de ventilación natural y posición de aislamiento térmico representan un mayor beneficio para las condiciones interiores del edificio, se midió el rendimiento de cada configuración en horas de confort, exceptuando aquellos casos que cuentan con zonas climatizadas, donde el rendimiento se midió a través del consumo eléctrico anual.

Con la finalidad de observar la forma en la que los diversos factores modifican el

Tabla 2.9: Materiales utilizados en los muros, losas, puertas y ventanas

Material	Conductividad térmica (W/m · K)	Densidad (kg/m³)	Calor específico (J/kg · K)
Concreto reforzado con 1 % de acero	2.3	2300	1000
Concreto (pesado)	1.13	2000	1000
Concreto (ligero)	0.16	500	840
Yeso	0.80	1600	1000
Cemento	1.00	1800	1000
Poliestireno Extruído (XPS)	0.027	30.77	1210
Block de concreto (pe- sado)	1.63	2300	1000
Block de concreto (ligero)	0.190	600	1000
Puerta de madera	0.190	700	2390
Acristalamiento	Conductividad térmica (W/m · K)	Transmitancia solar	
Vidrio	0.9	0.837	

comportamiento de la inercia térmica de una vivienda, afectando así las condiciones de confort en su interior, se siguieron los pasos que se enumeran a continuación:

1. Se simuló un caso base, en donde el modelo de vivienda se consideró sin ventilación ni sistemas de acondicionamiento de aire. La simulación del modelo se realizó orientando la fachada hacia el Norte. No se consideraron elementos de sombreado.
2. Se agregaron viviendas vecinas, las cuales actuaron como elementos de sombreado.
3. Utilizando la orientación de la fachada hacia el Norte y elementos de sombreado, se analizaron dos opciones de envolventes del edificio. Se utilizó un sistema de envoltente “pesado” y uno “ligero”, para observar el comportamiento de elementos de construcción con propiedades termofísicas contrastantes.
4. Para cada tipo de envoltente se analizaron dos estrategias de ventilación natural, los horarios de funcionamiento de dichas estrategias de muestran en la tabla 2.8. En ambos casos la vivienda se consideró ocupada en el horario laboral.
5. Se utilizaron tres configuraciones de aislamiento térmico (como se muestra en la figura 2.8) para cada caso del paso 4. El objetivo de este planteamiento fue observar cómo la configuración geométrica de la envoltente influye en la inercia térmica y su efecto sobre las condiciones de confort dentro del edificio.
6. Finalmente, se analizó el ahorro de energía eléctrica que resulta al usar aislamiento en la envoltente, y su efecto al utilizarlo únicamente en las zonas climatizadas. Ambas recámaras de la vivienda se consideraron equipadas con un sistema de enfriamiento de aire suponiendo un horario de ocupación laboral.

Se consideró ventilación natural nocturna en las zonas sin aire acondicionado. Se estudiaron las configuraciones de aislamiento de envolvente mostradas en la figura 2.8, además, se analizó el impacto que tiene la estrategia de *Aislamiento de Zona* sobre el ahorro de energía. El Aislamiento de Zona consiste en aislar por dentro las zonas que poseen equipos de aire acondicionado, incluyendo sus particiones, como se muestra en la figura 2.9.

Una representación gráfica del diseño de experimentos que se aplicó en este estudio se muestra en la figura 2.10.

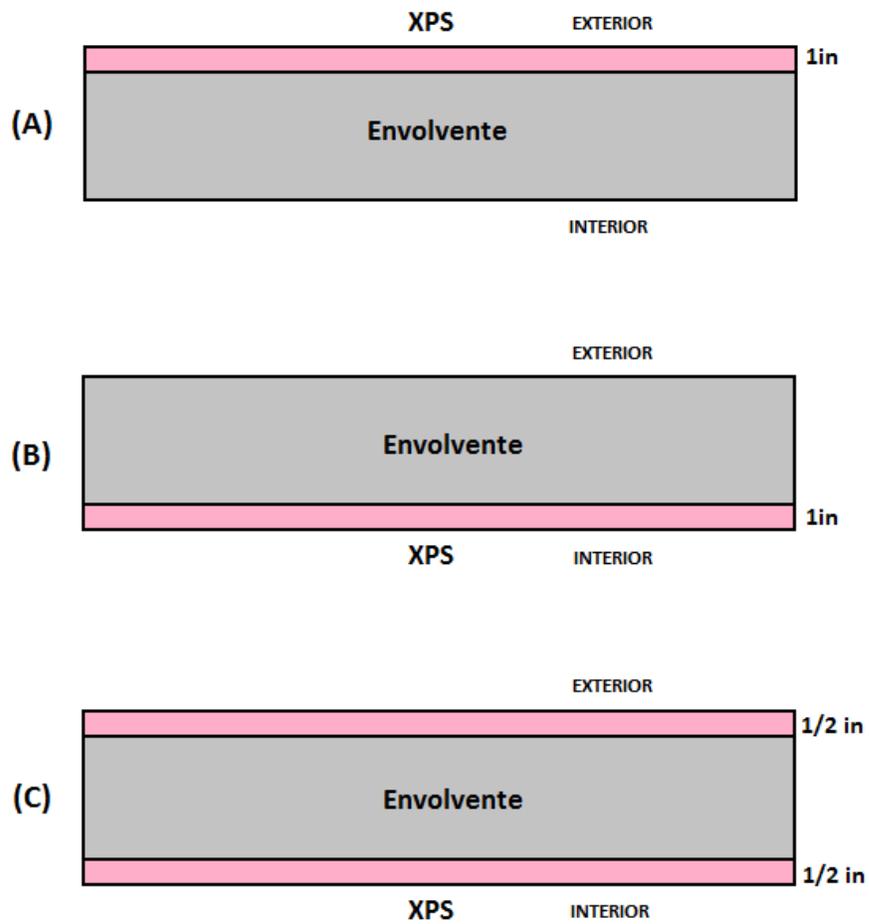


Figura 2.8: Representación esquemática de las configuraciones de aislamiento térmico. (A): Aislamiento térmico situado en la parte exterior de la envoltura. (B): Aislamiento térmico situado en la parte interior de la envoltura. (C): Aislamiento térmico dividido en partes iguales y colocado en ambos lados de la envoltura.



Figura 2.9: Representación esquemática de la estrategia *Aislamiento de Zona*.

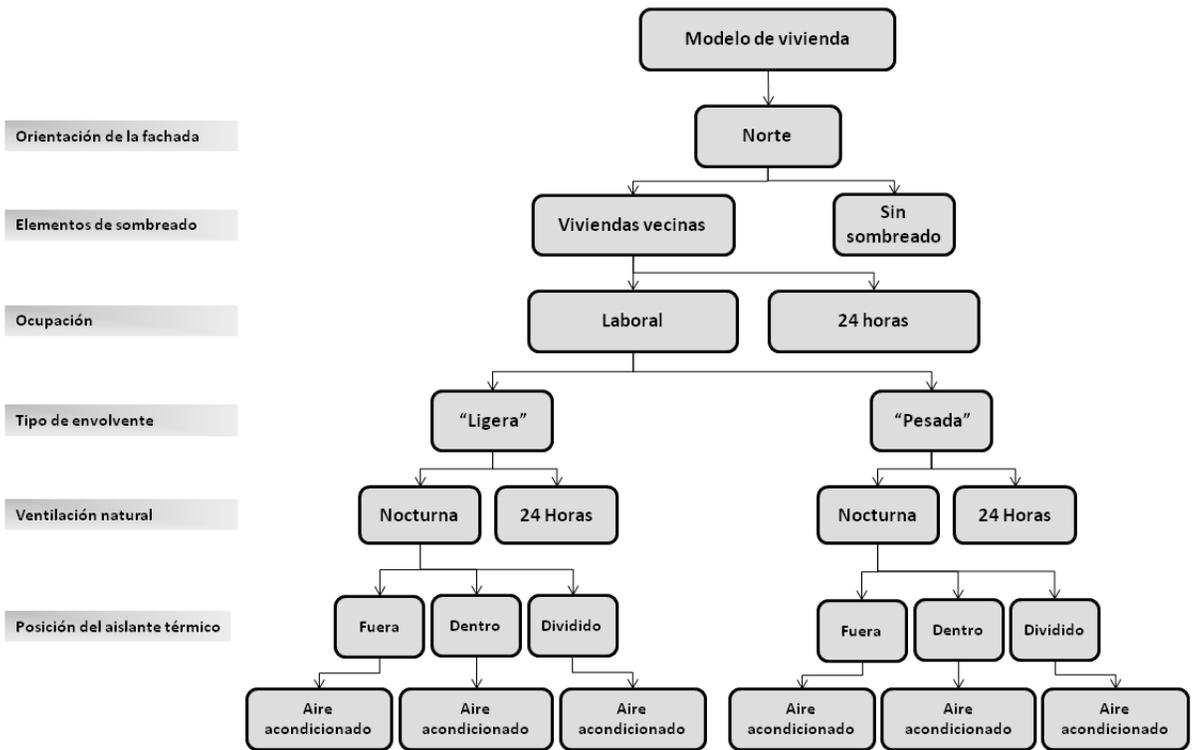


Figura 2.10: Diseño de experimentos.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3.1. El caso de referencia

Un *experimento* es un cambio en las condiciones de operación de un sistema o proceso, que se hace con el objeto de medir el efecto del cambio sobre una o varias propiedades del producto o resultado [36]. Debido a esto es importante definir un modelo de referencia, el cual sirva para generar un valor que sea representativo del resultado del experimento o prueba, es decir un modelo base contra el cual se pueda comparar el efecto que tiene en nuestro fenómeno de interés cualquier implementación realizada.

3.1.1. Definición del caso base

En el presente trabajo se definió una vivienda de referencia con la finalidad de analizar el efecto que presentan diversos factores sobre la inercia térmica y su relación con las condiciones de confort al interior del recinto y el consumo de energía eléctrica asociada a equipos de climatización.

Las particularidades del caso base se enumeran enseguida:

1. **Materiales:** Se consideró una envolvente conformada por los sistemas definidos como muros y losas “pesadas”.

2. **Aislamiento:** No se consideró aislamiento térmico en ninguna sección de la envolvente.
3. **Ocupación:** Se consideró una ocupación de 24 horas durante todo el año.
4. **Sombreado:** Se supuso que la casa no cuenta con viviendas vecinas ni otro tipo de elementos de sombreado.
5. **Ventilación:** Se consideró que no existe ventilación natural ni sistemas de HVAC, únicamente se consideraron las infiltraciones debido a fisuras, espacios entre puertas, ventanas, etc.

Los factores considerados fueron aquellos que se espera tengan un impacto importante sobre el fenómeno de la inercia térmica. La fachada se orientó hacia el Norte y no fue redireccionada durante las simulaciones con el fin de evaluar únicamente parámetros que puedan ser modificados, es decir en la práctica se puede agregar masa térmica a una vivienda, cambiar los elementos de sombreado, o variar la estrategia de ventilación natural, sin embargo, la orientación de un edificio no puede ser modificada una vez que ha sido construido. La orientación cardinal de una vivienda es importante en la etapa previa a su construcción. Dependiendo de la orientación las ganancias solares serán mayores en determinadas zonas de la edificación y esto influye de manera directa en el comportamiento térmico del recinto, modificando las condiciones ambientales al interior. Considerando por ejemplo un edificio climatizado ubicado en dos zonas climáticas contrastantes, una región “fría” y una región “cálida”, para el constructor del edificio situado en la región “fría” la problemática radicaré en maximizar las ganancias solares a través de la envolvente con la finalidad de reducir el consumo de los sistemas de calefacción, mientras que en una región caliente el constructor deberá orientar la edificación de tal forma que los muros de

mayor área y las ventanas no estén expuestos de manera directa al sol.

En la figura 3.1 se muestran las cartas de la trayectoria solar para las ciudades de Monterrey y Cancún. Se puede observar como cambia la trayectoria solar dependiendo de la época del año. Es importante notar que como no existe una gran diferencia entre las latitudes de ambos lugares, la trayectoria del sol en las dos ciudades es muy parecida.

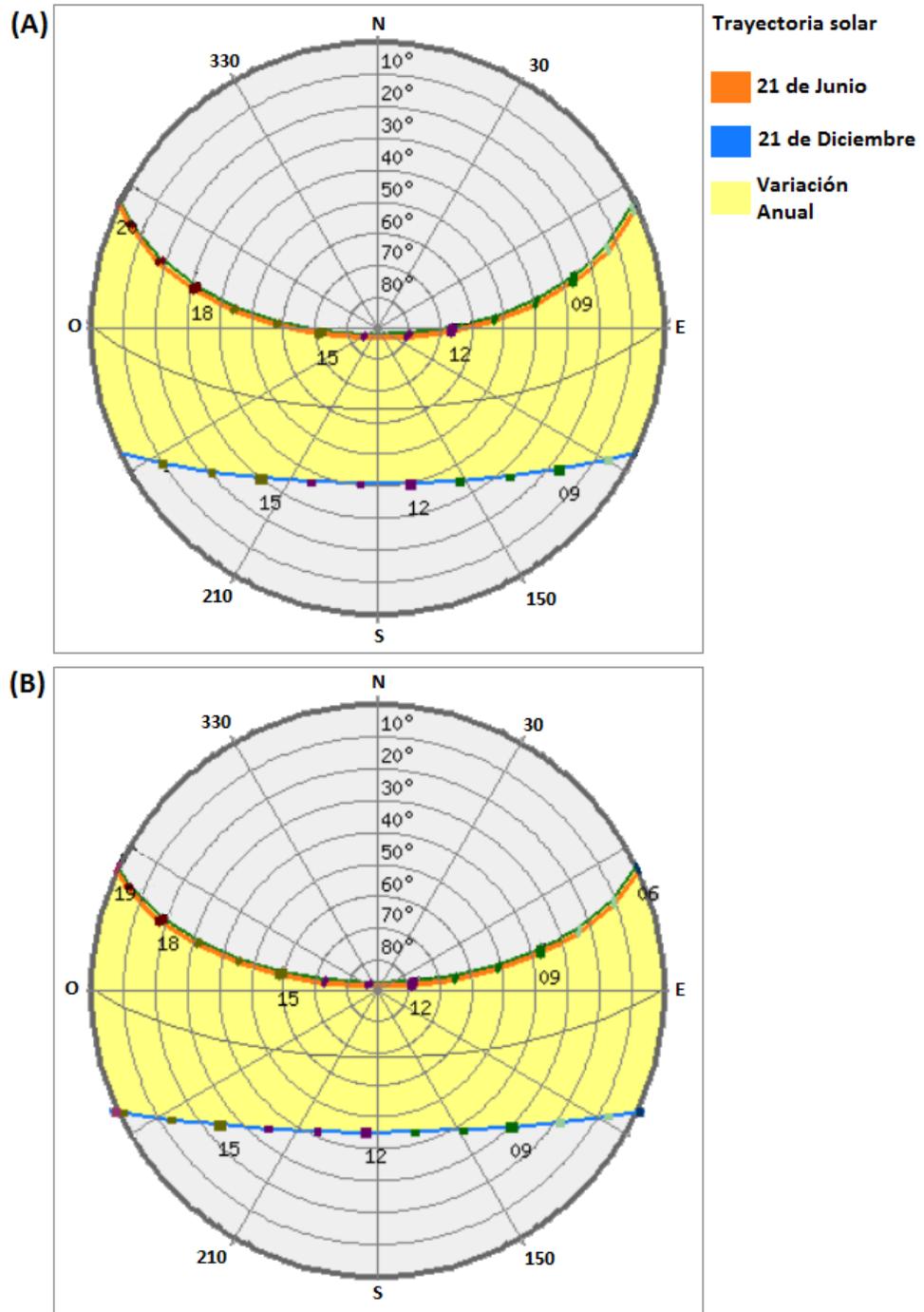


Figura 3.1: Cartas de la trayectoria solar para las ciudades de Monterrey (A) y Cancún (B).

3.2. Efecto del sombreado

Los elementos de sombreado, como los edificios vecinos, impactan en el requerimiento energético y en las condiciones ambientales interiores de los edificios debido a que reducen la cantidad de energía radiante absorbida y almacenada por su masa térmica. En un estudio realizado por Nikoofard *et al.* [37] se concluyó que los elementos de sombreado como casas vecinas y arboles pueden impactar el consumo energético de una vivienda, incrementando el consumo de calefacción en un 10 % y disminuyendo el consumo de refrigeración en un 90 %.

En general, los dispositivos de sombreado pueden ser divididos en dos categorías: fijos y operables [38]. En el presente estudio se consideraron las viviendas vecinas, *i.e.* elementos fijos. En la figura 3.2 se muestra la fachada de la vivienda sin tomar en cuenta elementos de sombreado. Se observa que el muro Oeste está totalmente expuesto a la radiación solar. Por otra parte, en la figura 3.3 las viviendas vecinas actúan como elementos de sombreado disminuyendo significativamente las ganancias solares en el muro Oeste y en parte de la fachada frontal. La posición del sol cambia dependiendo de la hora del día y de la época del año, sin embargo, las viviendas vecinas seguirán brindando sombra a la vivienda estudiada, lo cual contribuye a la atenuación de las altas temperaturas que se registran en regiones de climas cálidos, como Monterrey y Cancún.

En las figuras 3.4 y 3.5 se muestran las temperaturas en una de las semanas más calurosas del año para Monterrey y Cancún, respectivamente. La tendencia muestra que las temperaturas para los casos sombreados pueden llegar a ser hasta 2 °C más bajas que su contraparte sin elementos de sombreado. En las tablas 3.1 y 3.2 se presentan las temperaturas promedio mensuales de las dos recámaras de la edificación y de la planta baja, para Monterrey y Cancún, respectivamente. Durante todo el año,

en las tres zonas y en ambas ciudades la temperatura es menor en los casos en los que la vivienda cuenta con elementos de sombreado. Este comportamiento representa un beneficio notable en regiones de climas cálidos debido a que contribuye a atenuar las temperaturas dentro del edificio y, en consecuencia, permite ahorrar energía en casas que cuentan con equipos de aire acondicionado.

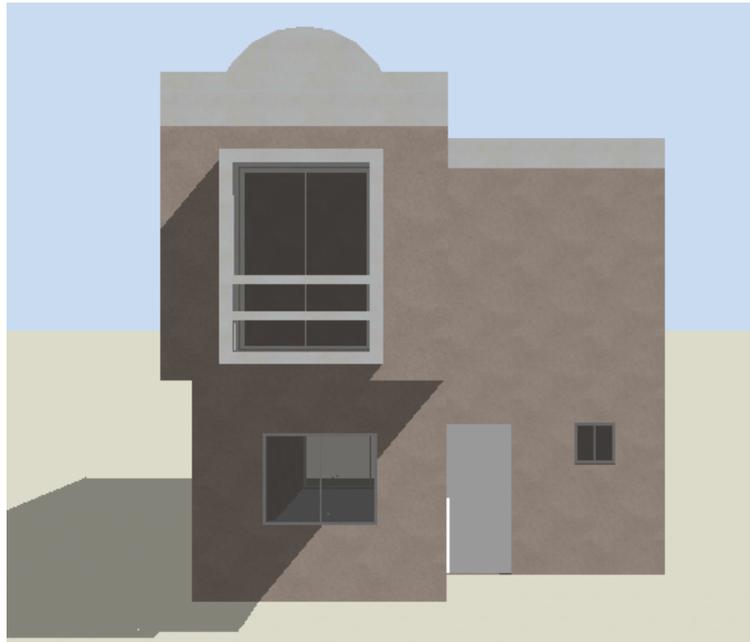


Figura 3.2: Modelo de vivienda con la fachada orientada al Norte, sin elementos de sombreado. Exposición solar típica de julio a las 3 pm.



Figura 3.3: Modelo de vivienda con la fachada orientada al Norte, considerando viviendas vecinas como elementos de sombreado. Exposición solar típica de julio a las 3 pm.

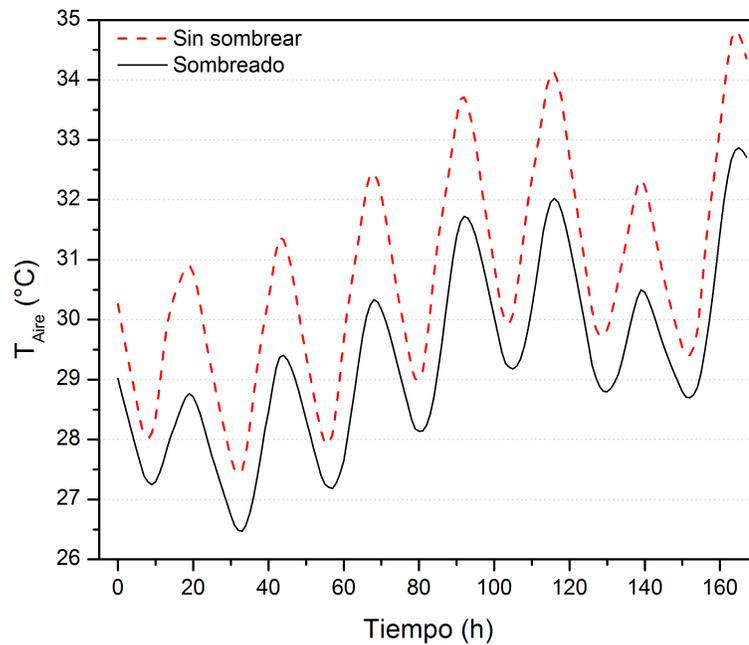


Figura 3.4: Temperaturas del aire en la planta baja de la vivienda para los casos *sin sombreado* y *sombreado* para la ciudad de Monterrey. Semana del 15 al 21 de Julio.

Tabla 3.1: Temperaturas promedio mensuales para los casos sin elementos de sombreado y sombreado por viviendas vecinas. Datos de la vivienda ubicada en Monterrey.

Temperatura del aire (°C)						
Mes	Sin sombrear			Sombreado		
	Planta Baja	Recámara A	Recámara B	Planta Baja	Recámara A	Recámara B
Enero	19.3	17.6	19.3	18.2	16.5	18.6
Febrero	21.2	20.2	21.8	20.0	19.2	20.9
Marzo	24.2	24.2	25.3	22.8	23.3	24.2
Abril	27.1	28.2	28.7	25.8	27.3	27.5
Mayo	28.9	30.2	30.5	27.7	29.4	29.4
Junio	30.2	31.8	31.9	28.9	30.9	30.7
Julio	31.1	32.8	32.9	29.8	31.9	31.8
Agosto	30.8	32.4	32.7	29.5	31.6	31.6
Septiembre	28.9	29.9	30.7	27.7	29.0	29.6
Octubre	26.6	26.5	27.9	25.2	25.5	26.9
Noviembre	22.4	21.2	22.5	21.4	20.5	21.8
Diciembre	20.4	18.5	20.4	19.1	17.6	19.7

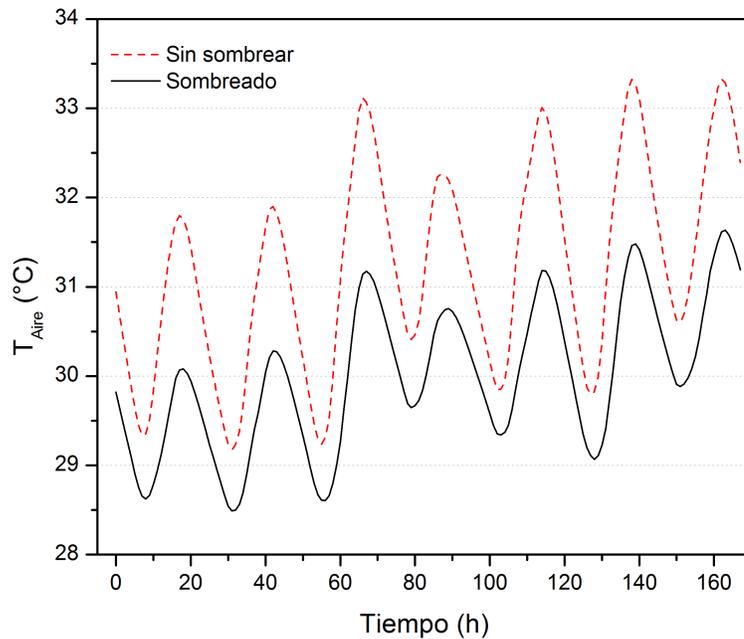


Figura 3.5: Temperaturas del aire en la planta baja de la vivienda para los casos *sin sombrear* y *sombreado* para la ciudad de Cancún. Semana del 15 al 21 de Julio.

Tabla 3.2: Temperaturas promedio mensuales para los casos sin elementos de sombreado y sombreado por viviendas vecinas. Datos de la vivienda ubicada en Cancún.

Temperatura del aire (°C)						
Mes	Sin sombrear			Sombreado		
	Planta Baja	Recámara A	Recámara B	Planta Baja	Recámara A	Recámara B
Enero	26.9	26.8	28.1	26.0	26.0	27.5
Febrero	26.7	26.8	27.8	25.7	26.1	27.1
Marzo	27.3	27.9	28.5	26.5	27.3	27.7
Abril	28.8	29.8	30.1	27.7	29.0	29.2
Mayo	30.4	31.6	31.9	29.3	30.9	30.9
Junio	30.8	32.1	32.5	29.6	31.4	31.5
Julio	31.3	32.6	33.0	30.1	31.8	31.9
Agosto	30.7	31.8	32.2	29.7	31.2	31.3
Septiembre	29.1	29.9	30.3	28.3	29.3	29.5
Octubre	28.8	29.4	30.0	28.0	28.8	29.4
Noviembre	27.7	27.7	28.8	26.7	27.0	28.1
Diciembre	27.7	27.3	28.8	26.4	26.3	28.0

3.3. Ocupación

La ocupación es uno de los parámetros de los que depende la optimización de los niveles de masa térmica de una edificación. Al cambiar el uso que se le da a un espacio interno o una superficie, una persona puede reducir drásticamente la efectividad de la masa térmica de dicho espacio, en consecuencia, es necesario considerar cuidadosamente el uso final cada zona del edificio.

El cuerpo humano produce calor debido a reacciones de procesos metabólicos. Este calor es transferido al ambiente por convección y radiación [38] y es considerado en los balances térmicos a través de la ocupación de los recintos cuando se pretende estimar la capacidad o el consumo energético de un equipo de HVAC. No incluir la ocupación del recinto puede conducir a estimaciones erróneas. Adicionalmente, la ocupación del edificio debe ser considerada en los estudios de confort debido a que las personas tienen control sobre la ventilación natural, modificando las condiciones

del aire en el lugar donde se encuentran [7]. Diversos investigadores [9, 39, 40] han realizado estudios relacionados con la masa térmica externa de edificios habitacionales y han concluido que los recintos que utilizan ventilación natural deben considerar los periodos de ocupación con el objeto de obtener resultados que permitan maximizar el beneficio que se puede obtener de la masa térmica de la envolvente, cuando el objetivo es incrementar los periodos de confort.

En la tabla 3.3 se aprecian los porcentajes de horas de confort en un año, para Monterrey y Cancún, en el caso hipotético de la vivienda que permanece desocupada y sin ventilación en todo el año, a excepción del intercambio de aire que existe a través de los espacios entre puertas y ventanas. De acuerdo a los resultados, una casa con elementos de sombreado, desocupada y sin ventilación resulta ser confortable por un periodo considerable para ambas ciudades, sin embargo, si se incluyen los habitantes en el análisis de la edificación, el periodo de confort es de 0%. La principal causa del disconfort es el aumento de la humedad en el aire interior; durante todo el año la humedad relativa se encuentra por encima del valor máximo permitido en la carta bioclimática de Givoni (80 %) para cualquier temperatura, como se aprecia en la figura 3.6. Los altos valores de humedad presentes en el aire de la vivienda ocupada se deben a dos factores, la falta de ventilación y el hecho de que el cuerpo humano aporta humedad al ambiente mediante los procesos de evaporación del sudor de la piel y la exhalación. Aunque una vivienda sin ventilación y habitada durante todo el año no es un caso realista, enfatiza el hecho de que la ocupación no debe ser ignorada en estudios que tratan de predecir las condiciones ambientales y el confort al interior de los recintos en vista de que las personas modifican su entorno no solo al controlar la ventilación natural sino también aportando calor y humedad al medio ambiente.

Tabla 3.3: Porcentaje de horas de confort anual para la vivienda sin ocupación, evaluado para las ciudades de Monterrey y Cancún mediante la carta bioclimática de Givoni para países en desarrollo de clima cálido [38].

Porcentaje de confort anual		
Zona	Monterrey (%)	Cancún (%)
Planta baja	58.9	36.1
Recámara A	44.9	26.7
Recámara B	48.2	21.3

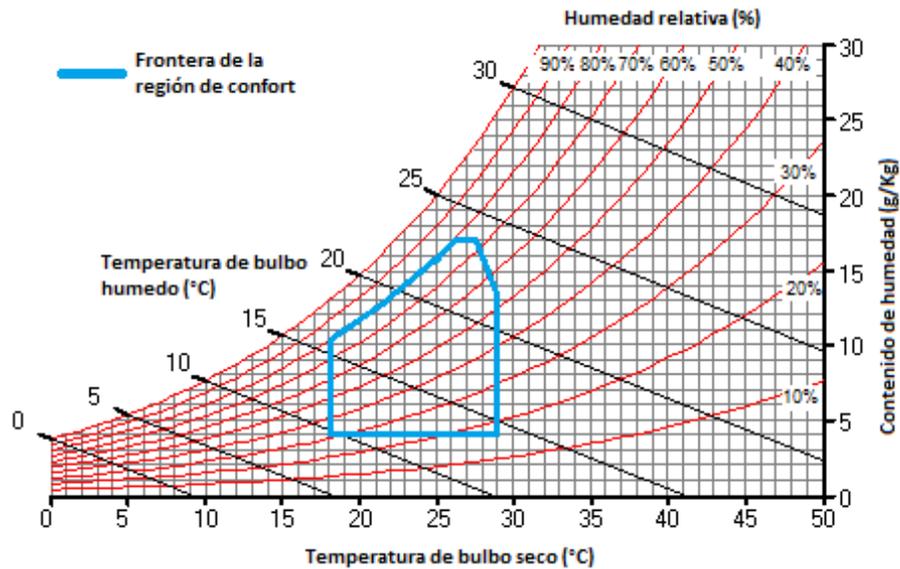


Figura 3.6: Carta bioclimática de Givoni para países en desarrollo de clima cálido. Límites de confort para aire quieto.

3.4. Efecto del tipo de Envoltente

Las propiedades termo físicas de los materiales que forman la envoltente pueden modificar significativamente el comportamiento del sistema de masa térmica. Para que un material pueda almacenar calor de manera efectiva debe poseer valores altos de densidad y calor específico. También es recomendable un valor alto de conduc-

tividad térmica con la finalidad de facilitar la carga y descarga del calor.

En general, cuando la envolvente de un edificio está expuesta a calentamiento por una fuente externa como el sol, los materiales con alta masa térmica pueden almacenar más calor que sus contra partes con baja masa térmica, sin embargo, los materiales con altos valores de masa térmica también tardarán más en liberar la energía almacenada una vez que se remueve la fuente de calor.

La finalidad de esta sección es comparar únicamente las propiedades termo físicas de los materiales de la envolvente. Por lo anterior, no se consideró ocupación ni ventilación natural.

En este estudio de tesis se utilizaron dos tipos de envolventes, una envolvente “pesada” (E_P) y una envolvente “ligera” (E_L). En la tabla 3.4 se presentan los tiempos de retraso (ϕ) y los factores de decremento (f) de los muros y los techos de cada tipo de envolvente. Estos parámetros se calcularon en base a la metodología descrita en la guía A de CIBSE [41]. En la misma tabla se observan los valores de la *capacidad calorífica* (C), calculada como el producto del calor específico, la densidad y el espesor del material. Entonces C representa la cantidad de calor necesaria para elevar en un grado la temperatura de un material por unidad de área [13].

Como se puede observar en las tablas 3.5 y 3.6, a lo largo del año las condiciones de confort prevalecen por una mayor cantidad de tiempo en las viviendas que utilizan la envolvente “ligera”. En ambas ciudades los periodos de confort siempre fueron menores en el verano. Lo anterior se debe a que ambos tipos de envolvente llegan a un sobrecalentamiento como consecuencia de las altas temperaturas exteriores y grandes cantidades de radiación solar que inciden de manera directa en gran parte de la envolvente. En las figuras 3.7 y 3.8 se observa que en los días más calurosos del año la temperatura del aire dentro de la vivienda con envolvente “ligera” es menor que su contra parte con envolvente “pesada”, en ambas localidades.

Tabla 3.4: Valores característicos de la masa térmica de los componentes de la envoltente.

Elemento	f	$\phi(h)$	C (kJ/m ² · K)
Muro pesado	0.64	4.48	355.2
Techo pesado	0.60	5.30	373.8
Muro ligero	0.77	4.39	100.2
Techo ligero	0.80	4.45	136.8

Tabla 3.5: Porcentajes de confort por temporada y anual de las dos recámaras y planta baja de la vivienda ubicada en Monterrey. Valores estimados mediante la carta bioclimática de Givoni para países en desarrollo de clima cálido.

Porcentaje de confort						
Periodo	Envoltente pesada			Envoltente ligera		
	Planta baja	Recámara A	Recámara B	Planta baja	Recámara A	Recámara B
Primavera	17.3	12.9	12.6	20.2	13.3	12.4
Verano	3.9	1.6	1.7	6.3	1.9	1.6
Otoño	22.2	18.5	18.8	24.2	18.9	18.0
Invierno	15.5	11.8	15.2	18.3	12.2	17.1
Anual	58.9	44.9	48.3	69.0	46.3	49.1

Tabla 3.6: Porcentajes de confort por temporada y anual de las dos recámaras y planta baja de la vivienda ubicada en Cancún. Valores estimados mediante la carta bioclimática de Givoni para países en desarrollo de clima cálido.

Porcentaje de confort						
Periodo	Envoltente pesada			Envoltente ligera		
	Planta baja	Recámara A	Recámara B	Planta baja	Recámara A	Recámara B
Primavera	6.1	2.4	2.2	8.5	2.8	1.9
Verano	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Otoño	9.7	7.7	5.8	10.2	7.4	4.3
Invierno	22.5	16.6	14.6	23.2	16.7	12.3
Anual	38.3	26.7	22.6	41.8	26.9	18.5

La situación encontrada en la envolvente “pesada” ocurre debido a dos factores: la mayor capacidad de almacenar calor de los materiales de dicha envolvente y las altas temperaturas que se registran en ambas latitudes durante gran parte del año. En conjunto, estos factores conducen a que la energía almacenada en forma de calor no sea liberada en su totalidad durante la puesta del sol, lo que produce una reducción en el periodo de confort. En la ciudad de Cancún el efecto de sobrecalentamiento de la envolvente se acentúa, sobretodo en el verano. Esto se debe a que las temperaturas en este periodo son muy altas, incluso más altas que las registradas en Monterrey, y se mantienen altas aún en la noche, causando una sensación de disconfort durante toda la temporada, como se puede ver en las tablas 2.3 y 2.4).

La envolvente “ligera” también demostró beneficiar las condiciones ambientales interiores durante la época de invierno. En las gráficas 3.9 y 3.10 se puede ver que las temperaturas en la vivienda con envolvente “ligera” son en promedio mayores que las encontradas dentro de la vivienda con envolvente “pesada”. Este fenómeno se atribuye a la orientación y geometría de la vivienda, y también a las propiedades de los materiales de la envolvente “ligera”. La parte sur de la vivienda posee una cantidad significativa de acristalamiento, como se muestra en la figura 3.11. Esto facilita que una mayor cantidad de radiación solar ingrese a la vivienda en la temporada invernal. Como se aprecia en las figuras 3.12 y 3.13, para la ciudad de Monterrey, y en las figuras 3.14 y 3.15, para Cancún, los flujos de calor a través del acristalamiento son mayores en invierno. Para ambas latitudes la trayectoria del sol en invierno va del sureste al suroeste (figura 3.1), considerando que la entrada de la casa está orientada al norte, la parte sur se ve expuesta a la radiación solar durante gran parte del día. Una vez que ha ingresado el calor aportado por la radiación solar, la envolvente “ligera” retarda la salida de esta energía al poseer una menor conductividad térmica. Esto no sucede en la envolvente “pesada” debido a que está construida con materi-

ales que poseen valores más altos de conductividad térmica. El comportamiento de los flujos de calor a través de los muros y cubiertas “ligeras” es un indicativo de la mayor oposición al flujo de calor de estos elementos. Esto contribuye a la estabilidad de las condiciones ambientales al interior de la vivienda, tanto para la ciudad de Monterrey como para Cancún.

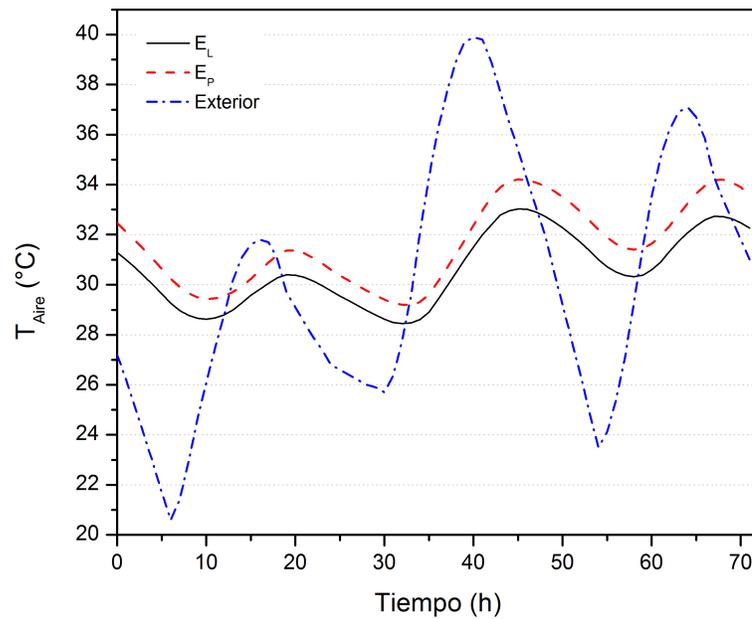


Figura 3.7: Temperatura del aire dentro de la casa con envolvente ligera, envolvente pesada y exterior. Valores registrados del 20 al 22 de Julio en Monterrey.

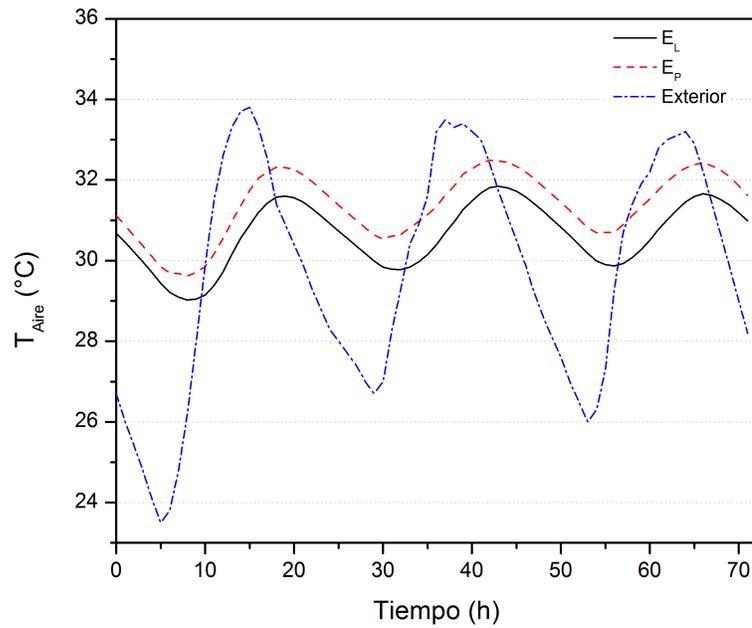


Figura 3.8: Temperatura del aire dentro de la casa con envoltente ligera, envoltente pesada y exterior. Valores registrados del 20 al 22 de Julio en Cancún.

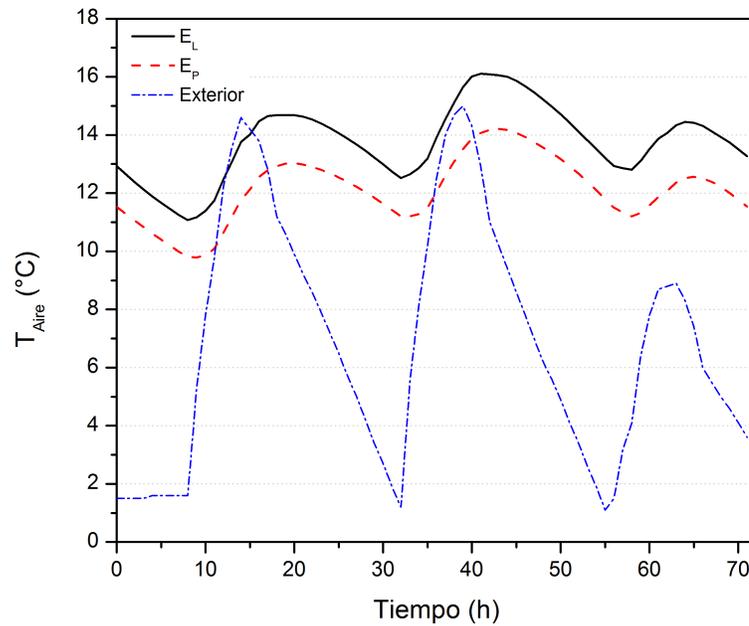


Figura 3.9: Temperatura del aire dentro de la casa con envoltente ligera, envoltente pesada y exterior. Valores registrados del 13 al 15 de Enero en Monterrey.

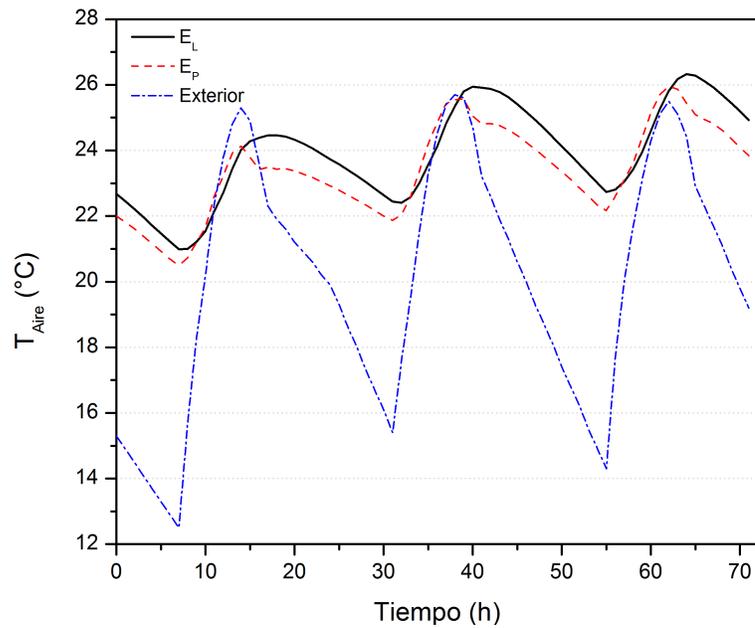


Figura 3.10: Temperatura del aire dentro de la casa con envoltente ligera, envoltente pesada y exterior. Valores registrados del 13 al 15 de Enero en Cancún.



Figura 3.11: Exposición solar típica de diciembre a las 12 pm en la fachada posterior de la vivienda. La fachada frontal está orientada al Norte.

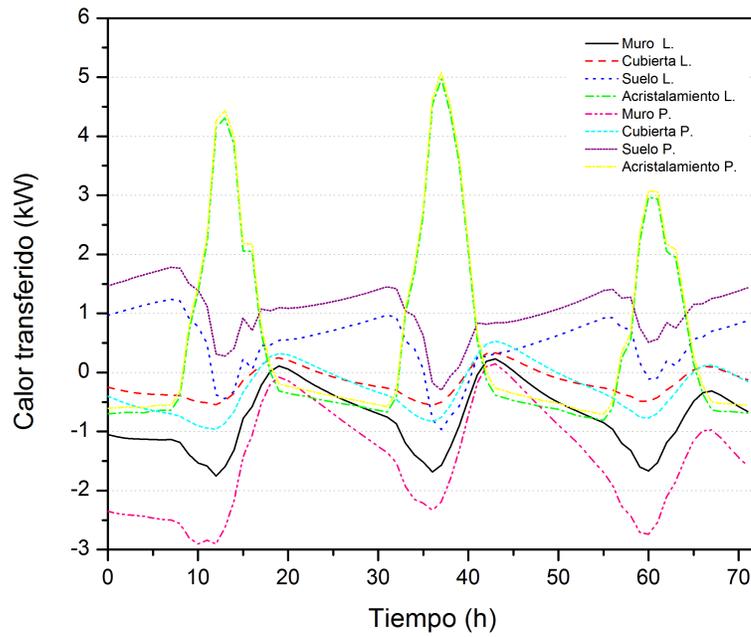


Figura 3.12: Calor transferido en los componentes de la envoltente. Valores registrados del 13 al 15 de Enero en Monterrey

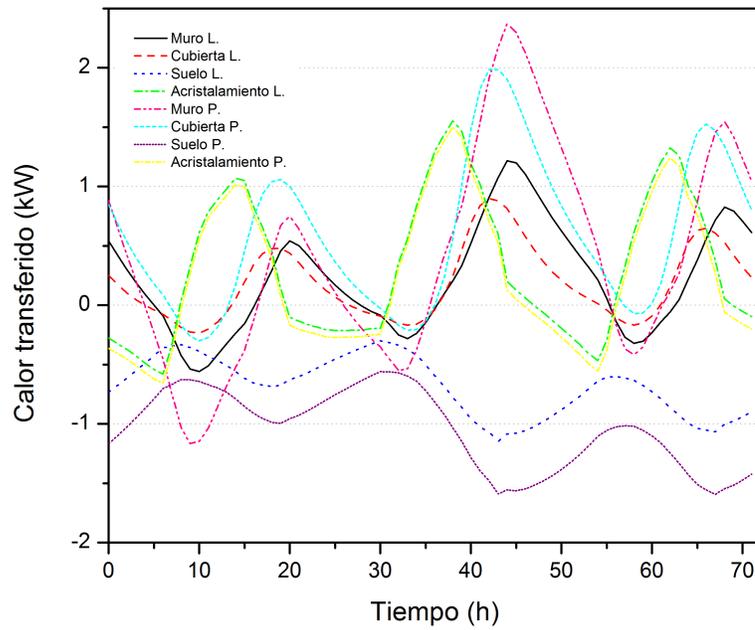


Figura 3.13: Calor transferido en los componentes de la envoltente. Valores registrados del 20 al 22 de Julio en Monterrey

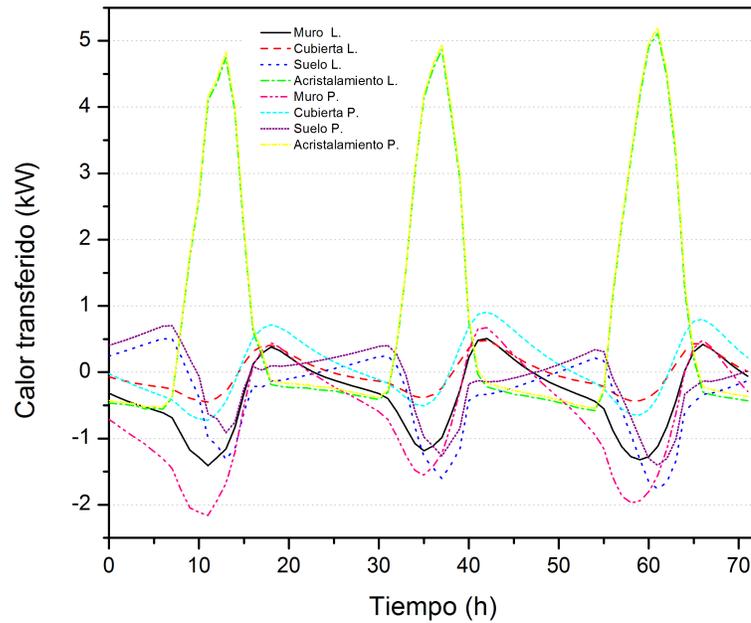


Figura 3.14: Calor transferido en los componentes de la envoltente. Valores registrados del 13 al 15 de Enero en Cancún

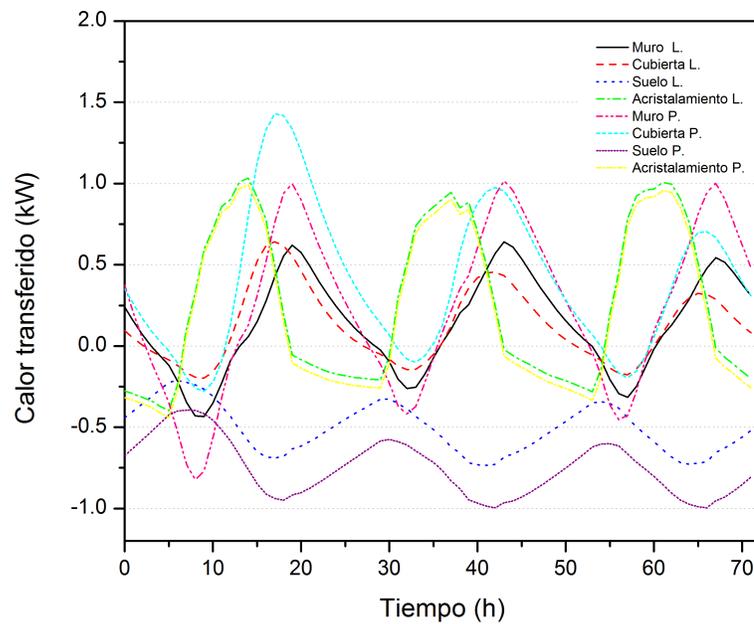


Figura 3.15: Calor transferido en los componentes de la envoltente. Valores registrados del 20 al 22 de Julio en Cancún

3.5. Efecto de la ventilación natural

En todas las regiones climáticas del mundo hay ocasiones en que la temperatura al exterior resulta confortable y la ventilación natural puede ser una estrategia simple y efectiva para proveer de confort al interior de la edificación. La ventilación natural también puede contribuir a reducir la necesidad de utilizar equipos de acondicionamiento de aire. Ventilar el edificio únicamente durante la noche puede enfriar la masa térmica de una construcción. Al cerrar las ventanas del edificio en las horas del día, la masa térmica “fría” reduce la tasa de incremento de las temperaturas interiores, manteniendo estas temperaturas significativamente más bajas que las exteriores. Dicha estrategia recibe el nombre de *ventilación nocturna*. La efectividad de la ventilación nocturna para abatir las temperaturas interiores durante las horas del día depende principalmente de los materiales de la edificación y los elementos de sombreado.

En esta sección se evalúa la efectividad de dos estrategias de ventilación natural para incrementar las condiciones de confort al interior de la vivienda. Las estrategias en particular son *ventilación nocturna* y *ventilación 24 horas*, y se analizaron para las envolventes “ligera” y “pesada”, bajo la consideración de ocupación laboral.

En la tabla 3.7 se muestran los valores de confort anual para ambas ciudades utilizando las dos estrategias de ventilación natural y en las dos envolventes propuestas. A diferencia de lo que se mostró en las tablas 3.5 y 3.6, estos valores refieren un panorama más realista al considerar la ocupación de la vivienda. La estrategia más eficiente para ambas latitudes fue la *ventilación nocturna*, sin importar el tipo de envolvente. Los mejores resultados en términos de las condiciones de confort se obtuvieron en los casos con envolvente “ligera” y *ventilación nocturna*. No obstante lo anterior, al utilizar *ventilación 24 horas* la envolvente “pesada” es un poco más

efectiva para proveer condiciones de confort. Indistintamente de los materiales de la envolvente, la estrategia de *ventilación nocturna* fue superior en todos los casos.

En las figuras 3.16 y 3.17 se aprecian los flujos de calor a través de la envolvente y la cantidad de energía que se transfiere al utilizar las dos estrategias de ventilación descritas para la estación de invierno en la ciudad de Monterrey. Puede observarse que ambas gráficas son muy parecidas y en ambos casos la ventilación contribuyó a la remoción de cantidades importantes de calor del edificio, este fenómeno resulta perjudicial en invierno debido a que la temperatura ambiente de Monterrey puede permanecer por debajo de los límites de confort durante gran parte de la estación. Al observar los flujos de calor se puede concluir que el comportamiento térmico de la envolvente “pesada” y “ligera” es muy similar en la estación de invierno, en los casos en que la envolvente interactúa con la ventilación natural. No obstante que la ciudad de Cancún posee un clima distinto a la ciudad de Monterrey, entre otras características, las temperaturas en invierno no son tan bajas, el desempeño de ambas envolventes en los días “fríos” es semejante, como se muestra en las figuras 3.18 y 3.19. Este comportamiento se debe a que la interacción que se produce entre la ventilación natural y la envolvente del recinto durante días fríos o templados, tiene como resultado que el calor sea removido de la masa térmica del edificio de una forma más eficiente, al ser extraída una gran cantidad de energía por convección producto de una constante renovación de aire proveniente del exterior.

La ventilación natural influye de forma relevante en el comportamiento térmico de las edificaciones durante la temporada de altas temperaturas. En Monterrey y Cancún predominan largas temporadas de calor, es entonces importante evaluar cuál estrategia de ventilación natural contribuirá a optimizar el funcionamiento de la masa térmica de la envolvente. En las figuras 3.20 y 3.21 se muestra como en la temporada de verano en Monterrey, la *ventilación nocturna* remueve grandes cantidades de calor

Tabla 3.7: Porcentajes de confort anuales de las dos recámaras y planta baja de la vivienda ubicada en Monterrey y Cancún. Valores estimados mediante la carta bioclimática de Givoni para países en desarrollo de clima cálido.

Porcentaje de confort anual						
Monterrey						
	Envolvente pesada			Envolvente ligera		
Ventilación	Planta baja	Recámara A	Recámara B	Planta baja	Recámara A	Recámara B
Nocturna	56.1	50.6	52.9	60.3	54.0	56.2
24 horas	47.4	48.2	48.6	47.1	48.0	48.1
Cancún						
	Envolvente pesada			Envolvente ligera		
Ventilación	Planta baja	Recámara A	Recámara B	Planta baja	Recámara A	Recámara B
Nocturna	36.5	37.0	36.2	37.7	38.3	38.0
24 horas	29.1	31.7	32.6	27.7	30.1	31.2

lo cual evita el sobrecalentamiento del recinto y promueve las condiciones de confort. Por su parte, la *ventilación 24 horas* no solo remueve calor por la noche, sino que permite la entrada de aire caliente durante las horas más calurosas del día, elevando la temperatura del aire interior por encima de los límites de la zona de confort. En la ciudad de Cancún el comportamiento es el mismo que en Monterrey, como se aprecia en las gráficas 3.22 y 3.23, sin embargo, el potencial de la *ventilación nocturna* es mayor debido a que en Cancún predominan los periodos cálidos durante todo el año.

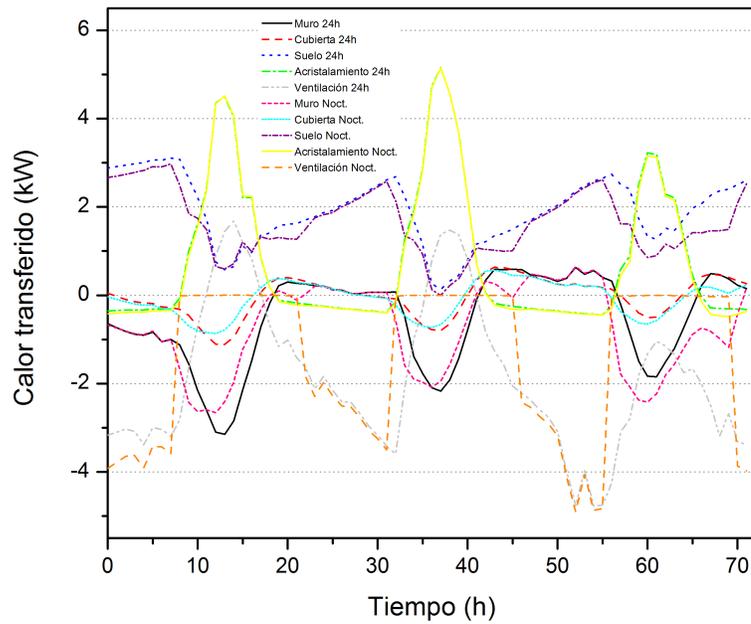


Figura 3.16: Calor transferido en la envolvente “pesada”, incluyendo estrategias de ventilación. Valores registrados del 13 al 15 de Enero en la ciudad de Monterrey.

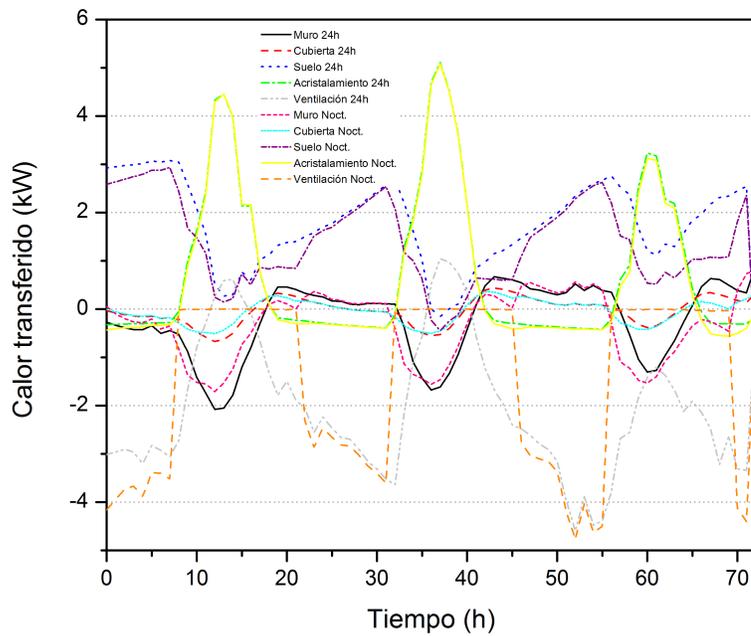


Figura 3.17: Calor transferido en la envolvente “ligera”, incluyendo estrategias de ventilación. Valores registrados del 13 al 15 de Enero en la ciudad de Monterrey.

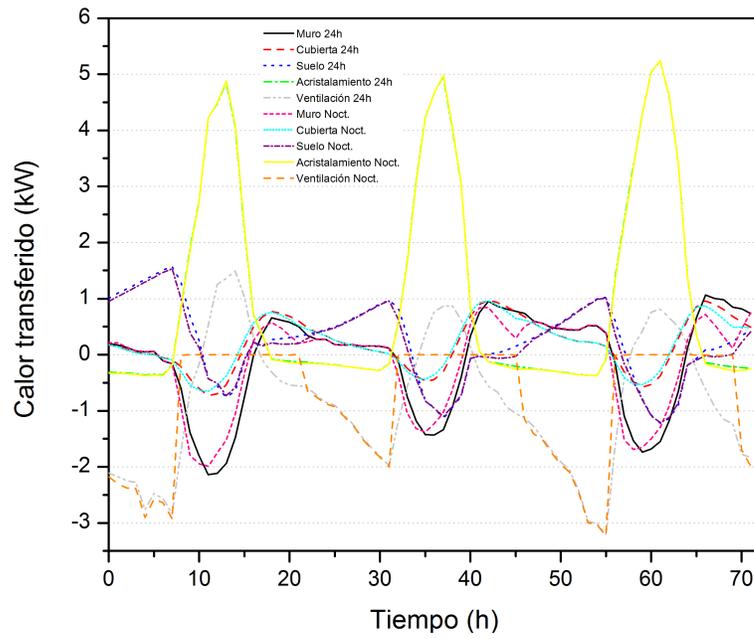


Figura 3.18: Calor transferido en la envolvente “pesada”, incluyendo estrategias de ventilación. Valores registrados del 13 al 15 de Enero en la ciudad de Cancún.

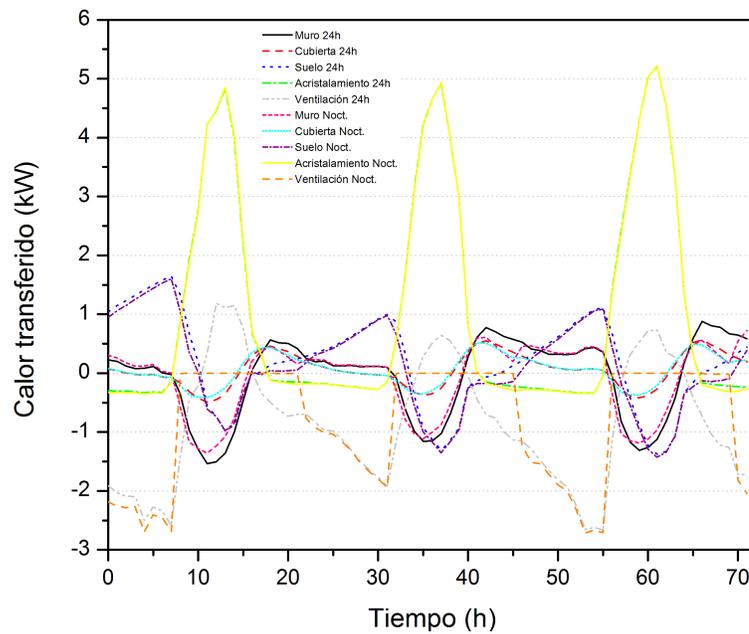


Figura 3.19: Calor transferido en la envolvente “ligera”, incluyendo estrategias de ventilación. Valores registrados del 13 al 15 de Enero en la ciudad de Cancún.

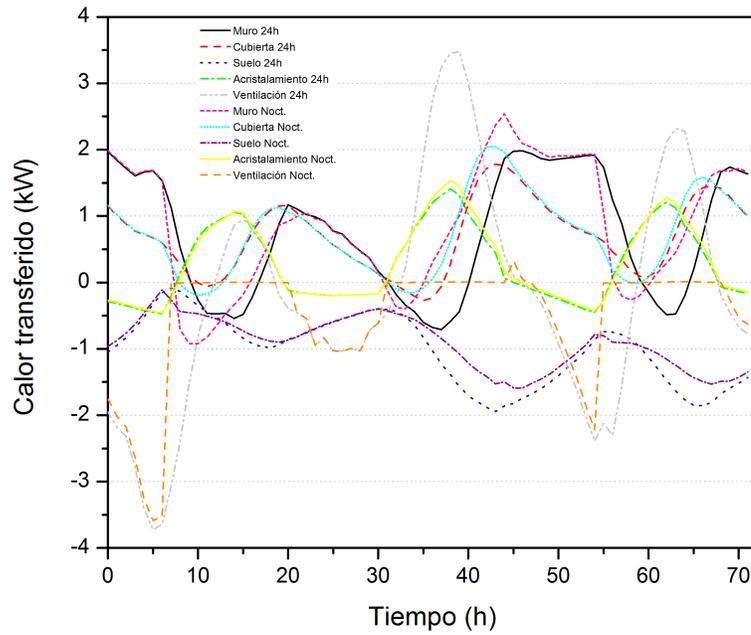


Figura 3.20: Calor transferido en la envolvente “pesada”, incluyendo estrategias de ventilación. Valores registrados del 20 al 22 de Julio en la ciudad de Monterrey.

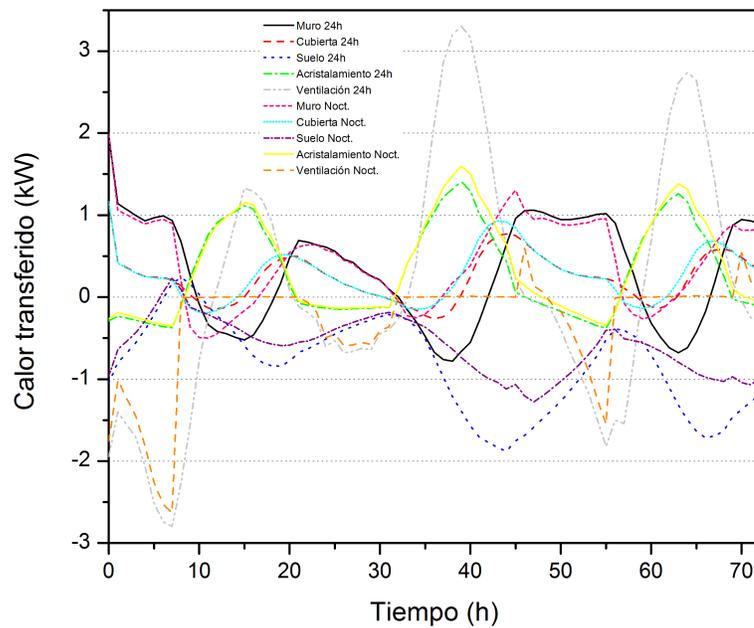


Figura 3.21: Calor transferido en la envolvente “ligera”, incluyendo estrategias de ventilación. Valores registrados del 20 al 22 de Julio en la ciudad de Monterrey.

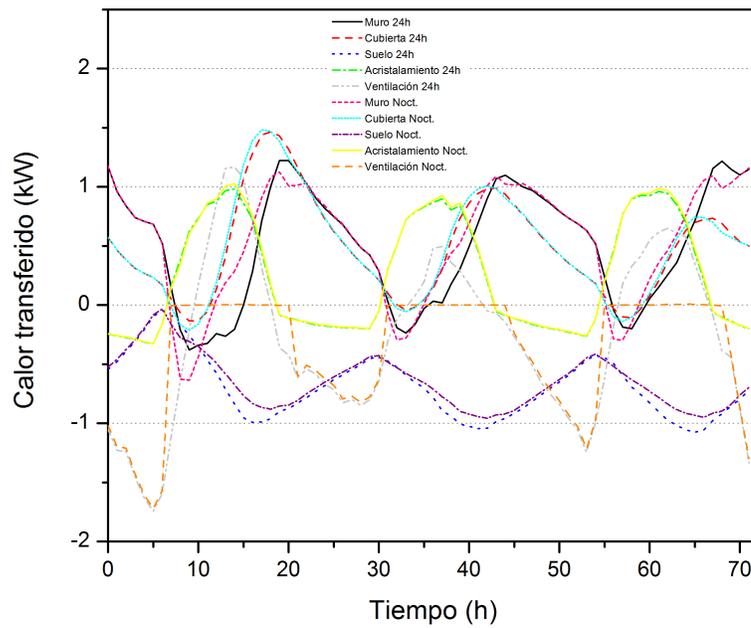


Figura 3.22: Calor transferido en la envolvente “pesada”, incluyendo estrategias de ventilación. Valores registrados del 20 al 22 de Julio en la ciudad de Cancún.

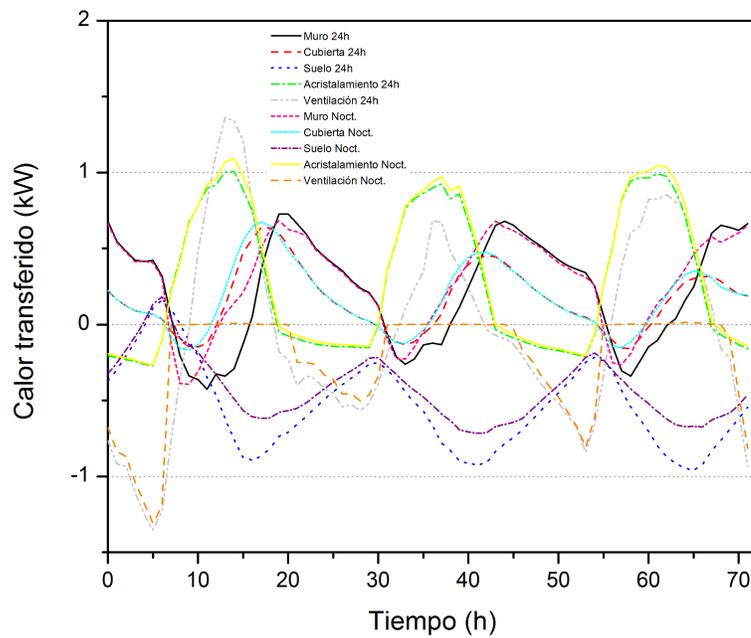


Figura 3.23: Calor transferido en la envolvente “ligera”, incluyendo estrategias de ventilación. Valores registrados del 20 al 22 de Julio en la ciudad de Cancún.

3.6. Efecto del aislamiento térmico y su posición en la envolvente

Los aislamientos térmicos son materiales o combinaciones de materiales fibrosos, partículas, hojas o películas, cuyo propósito es retardar la tasa de transferencia de calor por conducción, convección, y/o radiación [42]. Los aislamientos térmicos juegan un rol importante en el diseño y manufactura de todos los dispositivos o sistemas que utilizan energía de manera eficiente, y usualmente representan la piedra angular de los proyectos de conservación de energía [15]. En las edificaciones, cuando no se utiliza algún sistema de acondicionamiento de aire, los aislamientos térmicos pueden resultar benéficos para el edificio al mejorar las condiciones ambientales al interior del recinto.

En esta sección se analiza el efecto de añadir aislamiento térmico a dos tipos de envolventes cuando éstas utilizan la estrategia de ventilación natural nocturna.

En la tabla 3.8 se muestran los valores del factor de decremento, tiempo de retraso y capacidad calorífica de cada una de las combinaciones de muros y losas aisladas. Se puede ver que los mejores valores del factor de decremento y del tiempo de retraso, i.e. factor de decremento pequeño y tiempo de retraso grande, se obtienen al utilizar el aislamiento térmico dividido en partes iguales y colocándolo como se muestra en la figura 2.8. Este resultado concuerda con los resultados obtenidos por Asan [5] en un estudio en donde se encontró que los menores factores de decremento y mayores tiempos de retraso se obtienen cuando el aislante está dividido en dos piezas. Es importante señalar que, aunque la capacidad calorífica no se ve afectada por la posición de los materiales, la posición sí afecta el comportamiento térmico dinámico de la envolvente al influir de manera importante en el factor de decremento y tiempo de retraso.

Como se muestra en la tabla 3.9, el hecho de utilizar materiales con los factores de decremento más bajos y con altos tiempos de retraso, no siempre es una garantía para maximizar los periodos de confort dentro de una edificación. Como se observa en dicha tabla, los mayores porcentajes de confort anuales se obtuvieron en casos en los que la envolvente se aisló por el exterior, en ambos casos.

Debido a que el cálculo del factor de decremento y el tiempo de retraso considera únicamente flujo de calor en una dirección y no se ve afectado por la ventilación, se puede explicar que la estrategia de aislar la envolvente por fuera sea ligeramente superior a las demás. Colocar el aislamiento en la parte exterior del edificio resulta conveniente cuando se combina con la ventilación nocturna. Esto ocurre debido a que el aislamiento externo retarda el flujo de calor que surge debido al gradiente de temperaturas causado por las altas temperaturas exteriores y las temperaturas moderadas del interior del recinto, permitiendo así a la ventilación nocturna remover el calor que haya sido absorbido por la envolvente a través de la constante renovación de aire a menor temperatura.

Al comparar los valores de confort de la tabla 3.9 con los mostrados en la 3.7, se puede observar que el aislamiento térmico incrementa el porcentaje horario de confort, aún cuando este utiliza ventilación nocturna. En Monterrey, el resultado promedio para ambas recámaras y la planta baja, para el caso de aislamiento térmico, el periodo de confort en el edificio incrementó en un 4.4 % para la envolvente “pesada” y en 1.7 % para la envolvente “ligera”. En ciudad de Cancún el porcentaje horario de confort se incrementa en un promedio de 3.3 % para la envolvente pesada y en 0.9 % para la envolvente ligera. Este comportamiento se atribuye a la capacidad del aislante térmico para disminuir la cantidad de calor que ingresa al recinto, lo cual incrementa la eficiencia de la envolvente para obtener temperaturas confortables al interior de la vivienda. Este efecto resulta útil en lugares de clima cálido como las

Tabla 3.8: Valores característicos de la masa térmica de los componentes de la envolvente.

Elemento	f	ϕ (h)	C (kJ/m ² · K)
Envolvente pesada			
Muro pesado con xps por fuera	0.26	6.41	365.2
Muro pesado con xps por dentro	0.48	5.35	365.2
Muro pesado con xps por dividido	0.13	6.99	365.2
Techo pesado con xps por fuera	0.22	7.42	374.8
Techo pesado con xps por dentro	0.41	6.31	374.8
Techo pesado con xps por dividido	0.12	8.00	374.8
Envolvente ligera			
Muro ligero con xps por fuera	0.44	6.72	101.2
Muro ligero con xps por dentro	0.50	6.16	101.2
Muro ligero con xps por dividido	0.35	7.49	101.2
Techo ligero con xps por fuera	0.24	8.10	137.8
Techo ligero con xps por dentro	0.56	6.24	137.8
Techo ligero con xps por dividido	0.24	8.85	137.8

ciudades de Monterrey y Cancún.

Los resultados anteriormente descritos para los periodos de confort muestran que el uso de aislamiento térmico en la envolvente afecta la capacidad para transferir calor de muros y techos al grado de reducir la diferencia entre el desempeño térmico de las dos envolventes estudiadas, sin importar que éstas posean propiedades termo físicas distintas. Esta situación demuestra que el aislamiento térmico es probablemente el elemento que afecta de manera más importante el comportamiento de la envolvente. La diferencia promedio entre zonas de la vivienda con envolvente pesada y envolvente ligera fue del 1 %, lo que representa solamente 87.6 horas de confort al año.

Tabla 3.9: Porcentajes de confort anuales de las dos recámaras y planta baja de la vivienda ubicada en Monterrey y Cancún, para tres configuraciones de aislamiento térmico en la envolvente. Valores estimados mediante la carta bioclimática de Givoni para países en desarrollo de clima cálido.

Porcentaje de confort anual						
Monterrey						
Aislamiento	Envolvente pesada			Envolvente ligera		
	Planta baja	Recámara A	Recámara B	Planta baja	Recámara A	Recámara B
Fuera	60.9	54.8	57.4	62.0	55.4	58.2
Dentro	60.7	55.0	57.1	62.0	56.0	58.0
Dividido	60.7	54.6	56.9	61.9	55.7	57.7
Cancún						
Aislamiento	Envolvente pesada			Envolvente ligera		
	Planta baja	Recámara A	Recámara B	Planta baja	Recámara A	Recámara B
Fuera	39.1	41.4	42.0	38.7	40.6	40.1
Dentro	37.6	40.2	39.7	37.8	38.8	38.2
Dividido	37.8	40.5	40.2	37.9	39.2	38.6

3.6.1. Efecto de la posición del aislamiento térmico en el consumo eléctrico de los sistemas de aire acondicionado

La posición del aislamiento térmico desempeña un papel importante en el ahorro de energía en zonas que cuentan con equipos de acondicionamiento de aire. Se analizar cuatro estrategias de aislamiento para cada tipo de envolvente. En las figura 3.24 y 3.25 se muestran los consumos eléctricos anuales de las edificaciones en Monterrey y Cancún, respectivamente, cuando dos recámaras de la vivienda utilizan un equipo de refrigeración. Tres de las estrategias utilizan aislamiento en la envolvente, como se muestra en la figura 2.8. Se evalúa la efectividad de aislar únicamente las zonas que cuentan con aire acondicionado, aislando las recámaras por la parte interior, incluyendo las particiones y el entrepiso, como se observa en la figura 2.9.

Para el caso de la edificación en la ciudad de Monterrey las cuatro estrategias

de aislamiento presentaron un desempeño muy similar, sin embargo, el ahorro más notable se consiguió al utilizar aislamiento térmico por fuera de la envolvente. Comparando el caso aislado por fuera contra el caso de referencia, los resultados muestran una reducción en el consumo eléctrico anual de 57 % para la envolvente “pesada” y de 64 % para la envolvente “ligera”. Comparando el caso aislado por fuera con el caso sin aislamiento térmico, la reducción en el consumo es del 42 % y 22 %. Las estrategias de aislamiento dividido y de zona presentaron consumos eléctricos superiores al conseguido utilizando aislamiento por dentro, sin embargo, la diferencia es solamente de 1 % y 3 %, respectivamente. El peor desempeño se obtuvo colocando el aislamiento por fuera, con un consumo 4 % mayor al del caso aislado por dentro.

En la ciudad de Cancún la estrategia con el mejor desempeño fue *aislamiento de zona*, presentando un ahorro promedio del 66 % comparado con el consumo del caso de referencia. El aislante térmico redujo el consumo de la vivienda con ventilación nocturna y elementos de sombreado en un 47 % y 24 % para las envolventes “pesada” y “ligera”, respectivamente. Al igual que en la ciudad de Monterrey, las diferencias porcentuales entre los consumos anuales obtenidos entre las distintas configuraciones de aislamiento térmico fueron pequeñas, exceptuando el caso en el que la envolvente es aislada por fuera, misma que presentó un consumo 9 % mayor al obtenido con *aislamiento de zona*. Utilizar aislamiento térmico por dentro o dividido presenta un consumo eléctrico mayor de 2 % y 5 %, respectivamente, respecto al *aislamiento de zona*.

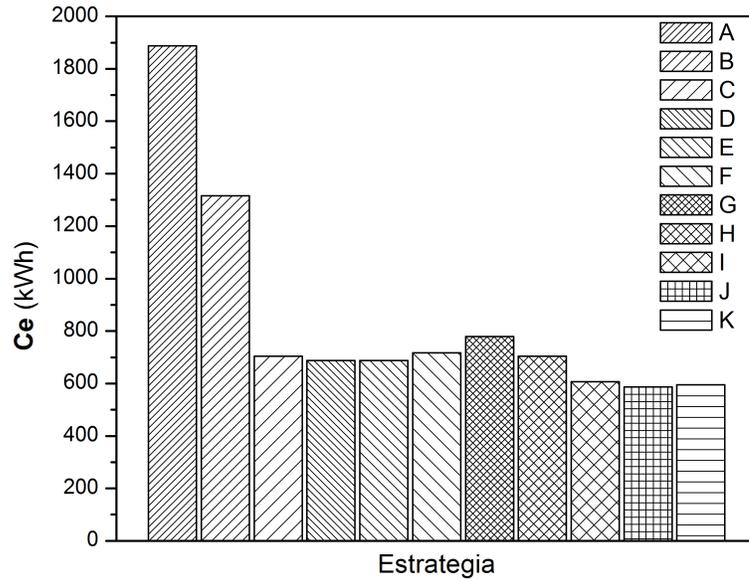


Figura 3.24: Consumo eléctrico (C_e) anual atribuido a equipos de aire acondicionado, para la vivienda en la ciudad de Monterrey. El consumo eléctrico se evaluó para las siguientes estrategias: (A) Caso de referencia, (B) E_P sin aislamiento térmico, (C) E_P con XPS por fuera, (D) E_P con XPS dividido, (E) E_P con XPS por dentro, (F) E_P con XPS al interior de las zonas climatizadas, (G) E_L sin aislamiento térmico, (H) E_L con XPS por fuera, (I) E_L con XPS dividido, (J) E_L con XPS por dentro, (K) E_L al interior de las zonas climatizadas

3.7. Análisis de la relación entre los parámetros que afectan la inercia térmica de la envolvente

La metodología propuesta en el presente estudio de tesis se orientó a determinar la manera en la que diversos parámetros afectan el comportamiento de la masa térmica de la envolvente de un edificio del tipo habitacional. El diseño de experimentos se diseñó en base a casos de interés práctico y se consideró cada parámetro por separado, se utilizaron materiales que comúnmente se emplean en la construcción mexicana, además, se consideraron horarios de ocupación y ventilación realistas y de fácil seguimiento por el usuario.

Los resultados encontrados indican que la orientación cardinal de una vivienda

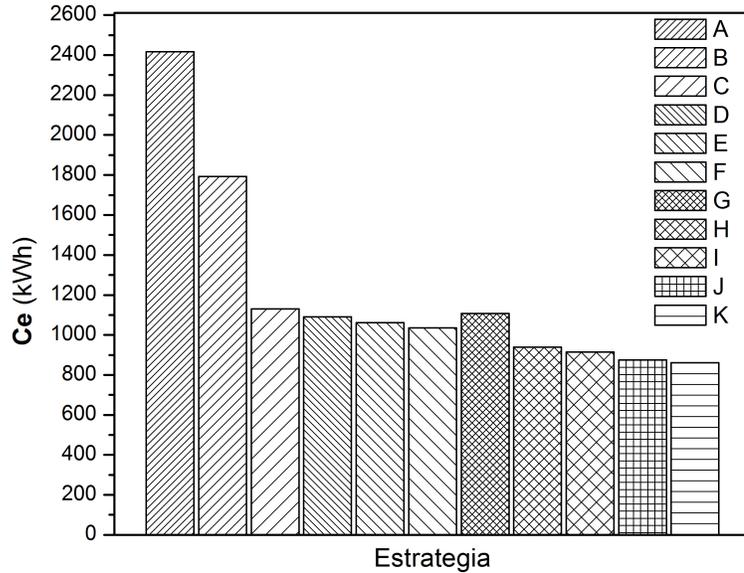


Figura 3.25: Consumo eléctrico (C_e) anual atribuido a equipos de aire acondicionado, para la vivienda en la ciudad de Cancún. El consumo eléctrico se evaluó para las siguientes estrategias: (A) Caso de referencia, (B) E_P sin aislamiento térmico, (C) E_P con XPS por fuera, (D) E_P con XPS dividido, (E) E_P con XPS por dentro, (F) E_P con XPS al interior de las zonas climatizadas, (G) E_L sin aislamiento térmico, (H) E_L con XPS por fuera, (I) E_L con XPS dividido, (J) E_L con XPS por dentro, (K) E_L al interior de las zonas climatizadas

afecta su desempeño térmico, y la magnitud de este efecto depende principalmente de la geometría del edificio y la trayectoria solar que existe en la latitud en donde este se encuentra. Debido a que la cantidad de geometrías que pueden encontrarse en edificaciones residenciales es infinita, no es posible designar una orientación óptima para todos los edificios de una región, sin embargo, para las ciudades de Monterrey y Cancún, es recomendable evitar grandes cantidades de acristalamiento en las partes Norte y Este del edificio. Se debe privilegiar el acristalamiento hacia el sur, lo que evitará el ingreso de grandes cantidades de radiación solar en verano, mientras que en invierno permitirá el ingreso de una cantidad moderada de calor.

Debido a que una gran parte del calor que ingresa a través de la envolvente se debe a la radiación que incide sobre el edificio, los elementos de sombreado se deben tomar en cuenta cuando se intenta estimar el desempeño que tendrá la masa térmica

de la envolvente. En zonas cálidas, el adecuado sombreado del edificio contribuye a reducir la cantidad de calor que atraviesa la envolvente, disminuyendo la posibilidad del sobrecalentamiento de la edificación.

Se ha encontrado que ninguna estrategia de masa térmica presenta un funcionamiento óptimo durante todo el año, por lo que es importante considerar conjuntamente el periodo en que se espera este ocupado el lugar. La ocupación representa una carga térmica interna, una fuente de humedad para el ambiente y una influencia importante para el adecuado desempeño de la masa térmica del edificio al tener la capacidad de manipular la ventilación natural.

Cuando se considera la ventilación en el análisis, se encuentra que las envolventes estudiadas presentan temperaturas interiores muy diferentes. Para ambas localidades la envolvente “ligera” proporcionó mayores periodos de confort a la vivienda. El mejor rendimiento de la envolvente “ligera” se atribuye a su baja masa y conductividad térmica, lo cual reduce la posibilidad de que ocurra un sobrecalentamiento de la masa térmica externa en regiones que poseen altas temperaturas.

Cuando existe ventilación natural de la edificación, la transferencia de calor por convección modifica las condiciones ambientales del recinto. La ventilación natural nocturna tiende a facilitar la remoción de calor absorbido por la envolvente al estabilizar las temperaturas dentro de la casa, lo que conduce a un aumento en el periodo de confort anual en zonas de clima caluroso como Monterrey y Cancún. Se observó que el comportamiento de los dos tipos de envolvente cambia drásticamente cuando interactúa con la ventilación. El uso de la ventilación natural alteró el funcionamiento de la envolvente al grado de obtenerse condiciones similares dentro del edificio con envolvente “pesada” y con envolvente “ligera”. Dicho comportamiento indica la fuerte influencia que tiene la ventilación sobre la inercia térmica, actuando como un factor determinante en el desempeño térmico del edificio.

No obstante que el funcionamiento del aislamiento térmico se ha estudiado en diversas investigaciones, la mayoría de ellas se basan en métodos de estudio unidimensionales [4, 5], no consideran ventilación natural [43], ocupación [6] y en algunos casos se basan en condiciones ambientales exteriores [44]. En el presente estudio se analizaron las condiciones de confort en un edificio habitacional tomando en consideración la interacción de los factores antes mencionados. Se encontró que el aislamiento térmico incrementó los periodos de confort dentro de la vivienda ubicada en climas cálidos, además se observó una variación mínima entre los periodos de confort proporcionados mediante el uso de cada una de las tres configuraciones geométricas de aislamiento en la envolvente.

La evaluación del ahorro de energía mediante el uso de aislamiento térmico muestra resultados diferentes a las tendencias obtenidas en el estudio de confort. En efecto, aunque la diferencia entre el consumo eléctrico anual obtenido al aislar la envolvente de formas distintas es mínima (como puede verse en las figuras 3.24 y 3.25), utilizar aislante por dentro de la envolvente presentó los menores consumos del sistema de aire acondicionado. El análisis del desempeño que se obtiene al aislar únicamente las zonas climatizadas mostró que dicha estrategia es una opción práctica y económica en comparación con el aislamiento de toda la envolvente. Esta estrategia presentó el mayor ahorro energético en la zona de Cancún, donde predominan las altas temperaturas durante todo el año, encontrándose un ahorro apenas 3% inferior comparado con la estrategia de aislamiento por dentro en Monterrey.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

El uso de estrategias sustentables para la climatización de edificios de tipo habitacional, así como la disminución del consumo eléctrico asociado al uso de equipos promotores de confort, representan necesidades de actualidad a nivel mundial. En México las tendencias poblacionales y de demanda de energía eléctrica muestran un panorama en el cual el ahorro es uno de los factores principales para el desarrollo sustentable del país. El estudio realizado en esta tesis se planteó con un enfoque práctico con el objeto de analizar oportunidades de ahorro el sector residencial de clase social media. Está bien documentada la importancia que este nivel social (y superiores) tiene en el consumo de energía eléctrica para la climatización y el potencial uso de aislamientos térmicos.

La simulación computacional ha demostrado ser una herramienta que proporciona resultados confiables para analizar los fenómenos físicos de la transferencia de calor que ocurren en un gran número de aplicaciones, incluyendo aquellos que ocurren en los edificios. En este trabajo se utilizó el software *EnergyPlus* para poner en práctica un diseño de experimentos enfocado a analizar el comportamiento de la inercia térmica de la envolvente de una vivienda. A diferencia de estudios que han sido reportados en la literatura, el presente trabajo se enfoca al análisis del desempeño

de la envolvente cuando interactúan diferentes factores en estado transitorio. Para realizar el estudio se consideraron diversos parámetros y se analizó la manera en la que éstos afectan el desempeño de la envolvente. Específicamente, se evaluaron los periodos de confort y los ahorros de energía.

Los resultados obtenidos muestran que los elementos de sombreado se deben considerar en toda evaluación energética de edificaciones con el fin de obtener conclusiones aplicables a problemas reales. Al considerar el sombreado provisto por las viviendas vecinas, en la planta baja del edificio se obtuvieron temperaturas horarias hasta 2 °C por debajo de las estimadas para la misma vivienda sin vecinos. Además, las temperaturas promedio mensuales de las dos recámaras y la planta baja fueron menores en la vivienda con elementos de sombreado durante todo el año. La efectividad de los elementos de sombreado se debe a que disminuyen la cantidad de radiación que incide sobre los muros de la vivienda durante gran parte del día.

Cuando se tiene por objetivo predecir las condiciones de confort o el consumo eléctrico de los equipos de climatización, se debe tener en consideración que la ocupación de una edificación afecta sus condiciones ambientales de dos formas determinantes. La primera es mediante la aportación de calor y humedad al aire del recinto. La segunda consiste en que la ocupación controla la ventilación natural, la cual afecta directamente el desempeño de la inercia térmica de la envolvente.

Las propiedades termofísicas de los materiales de la envolvente son determinantes en el funcionamiento de un edificio en vista de que representan la barrera entre las condiciones ambientales exteriores e interiores. En las dos regiones climáticas estudiadas (“Bsh” y “Aw”) el sistema denominado envolvente “ligera” presentó periodos más largos de confort dentro de la vivienda, en comparación con la envolvente “pesada”. Aunque la envolvente “pesada” posee valores mayores de *factor de decremento* y *tiempo de retraso*, su alta conductividad térmica y capacidad calorífica resultan in-

convenientes en la atenuación de las variaciones de las temperaturas interiores. Por lo anterior, los materiales de construcción con baja conductividad térmica y capacidad calorífica resultan recomendables para las construcciones en lugares de clima caluroso.

La estrategia de ventilación natural utilizada en un edificio debe ser elegida de acuerdo a la región climática en donde se encuentre dicha construcción. La *ventilación natural nocturna* mostró el mejor desempeño para ambos tipos de envolvente. En la planta baja de la vivienda ubicada en la ciudad de Monterrey, la *ventilación natural nocturna* proporcionó 48 días más de confort al año que la estrategia de *ventilación 24 horas*, dicha cifra representa un incremento del 13 % del confort anual. Utilizando *ventilación natural nocturna* se consiguieron valores superiores al 50 % de confort anual en todas las zonas internas de la edificación, para ambos tipos de envolventes en Monterrey. Cancún pertenece a la zona climática “Aw” y aunque la *ventilación natural nocturna* fue superior a la *ventilación 24 horas*, el mayor periodo de confort alcanzado representa solamente el 38 % del total de horas del año, lo cual indica que lograr condiciones de confort utilizando únicamente ventilación natural y elementos de sombreado resulta complicado en dicha región. Esto es consecuencia del hecho de que predominan temperaturas altas durante todo el año, además de un alto contenido de humedad en el aire. Lo anterior resulta en un impedimento para conseguir periodos importantes de confort higrotérmico dentro del edificio.

En ambas ciudades, Monterrey y Cancún, la envolvente “ligera” combinada con *ventilación natural nocturna* brindó mayores periodos de confort a los provistos por la envolvente “pesada” al usar la misma estrategia de ventilación. Este efecto en particular se debe a la tendencia que tiene la envolvente “pesada” a presentar sobrecalentamiento, lo que dificulta la remoción de calor utilizando únicamente ventilación natural.

El uso de aislamiento térmico en conjunto con una adecuada estrategia de ventilación natural permite a los habitantes de una vivienda aprovechar la capacidad de la envolvente para absorber calor, reduciendo la cantidad de calor que ingresa al recinto, para posteriormente liberar esta energía hacia el exterior en el periodo nocturno. Utilizar una envolvente con poca o gran masa térmica no excluye la necesidad del uso de aislamiento térmico en regiones del tipo “Bsh” y “Aw”, principalmente cuando se tiene por objetivo reducir el consumo de algún sistema de aire acondicionado.

Los resultados correspondientes al confort y consumo de energía, cuando se emplea aislamiento térmico en la envolvente “ligera” y en la envolvente “pesada”, muestra comportamientos muy similares, aún y cuando las propiedades termofísicas de ambas construcciones son contrastantes. Este fenómeno indica la gran influencia que posee el aislamiento térmico sobre el efecto de la inercia térmica en lugares de clima caluroso. En efecto, los resultados muestran que el aislamiento térmico llega a ser el elemento clave en el desempeño favorable de la masa térmica de la envolvente para la obtención de condiciones de confort dentro del recinto.

4.2. Recomendaciones

Tomando como base el estudio realizado y los efectos de los parámetros que afectan a la masa térmica de edificios habitacionales, resulta pertinente emitir las siguientes recomendaciones:

- Considerar, en el estudio previo a la construcción de recintos habitacionales, todos los factores que pudieran afectar el desempeño térmico de la vivienda como la ventilación natural, ocupación, materiales de construcción, ubicación y orientación del edificio.
- En regiones climáticas “Bsh” y “Aw” se debe utilizar únicamente ventilación

natural nocturna, con el fin de evitar el ingreso de aire caliente en las horas más calurosas del día y facilitar la descarga del calor absorbido por la envolvente hacia el exterior.

- Es conveniente aislar el edificio por fuera, cuando éste no sea climatizado. Por otra parte, es recomendable utilizar aislamiento por la parte interior del recinto cuando se utilizan equipos de acondicionamiento de aire.
- Aislar por dentro las zonas que cuentan con aire acondicionado, incluyendo las particiones, es una opción práctica, de buen desempeño y económica, cuando se conoce con anticipación que zonas de la vivienda serán climatizadas.
- Se deben considerar los elementos de sombreado que afectan al edificio, como los edificios vecinos, cuando se realiza una evaluación energética de un edificio. Esto permitirá estimar adecuadamente los periodos de confort y dimensionar un equipo de HVAC.
- Es conveniente considerar el horario de ocupación antes de diseñar una estrategia de ventilación natural debido a que el desempeño térmico del edificio depende de los hábitos y actividades de los habitantes del lugar.
- Utilizar materiales de construcción con valores moderados de capacidad calorífica y conductividad térmica, en conjunto con el uso de aislamiento térmico, resulta una opción sustentable para el ahorro de energía en edificios climatizados que están ubicados en las regiones cálidas de México.

4.3. Trabajo futuro

El presente trabajo de tesis se centró en el estudio de la inercia térmica de la envolvente de un edificio habitacional mediante el uso de simulación computacional.

En vista de que el análisis se realizó únicamente para zonas cálidas, es recomendable extender este estudio para que cubra zonas con clima templado y zonas frías, aunque estas últimas no predominen en México.

Como se mostró en este trabajo, los aislamientos térmicos impactan de forma importante en las condiciones de confort de una vivienda y en el consumo de energía cuando se utilizan sistemas de acondicionamiento de aire, como consecuencia de su efecto sobre la inercia térmica del edificio. Sin embargo, debido al costo de estos elementos y de su instalación, resulta difícil que las viviendas de interés social cuenten con aislamiento Térmico. Adicionalmente, en nuestro país aún existe una pobre cultura del ahorro de energía. Entonces, para atender las necesidades de este sector económico, se deben estudiar alternativas de menor costo, como los sistemas integrales en donde el aislamiento térmico está unido a los materiales de construcción previo a la creación del edificio.

Además de lo antes expuesto, es recomendable estudiar el efecto de la humedad que absorben los elementos que forman la envolvente de las edificaciones. Valdría la pena evaluar el efecto que tiene la humedad contenida en los elementos constructivos sobre la inercia térmica. Este análisis resultaría especialmente importante para edificios ubicados en regiones de clima húmedo, como Cancún.

Finalmente, se recomienda complementar este trabajo con un estudio experimental, para validar los datos climatológicos obtenidos mediante *Meteonorm* y los resultados correspondientes al comportamiento de la inercia térmica que se realizaron con *EnergyPlus*.

NOMENCLATURA

ϕ	Tiempo de retraso.
f	Factor de decremento.
C	Capacidad calorífica.
k	Conductividad térmica.
h	Coficiente de transferencia de calor.
COP	Coficiente de desempeño.
C_p	Calor específico.
ρ	Densidad.
$HVAC$	Heating Ventilation and air conditioning.
E_L	Envolvente Ligera.
E_P	Envolvente pesada.
C_e	Consumo eléctrico anual.
T_{Aire}	Temperatura del aire.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **S. Szokolay**, *Passive and low energy design for thermal and visual comfort*, Passive and Low Energy Ecorechniyum 3rdInt. PLEA CONF 3rdInt. PLEA Conf., Mexico City. 6-11 Aug. 1984, pp. 11-28.
- [2] **K.J. Kontoleon and D.K. Bikas**, *Thermal mass vs. thermal response factors: determining optimal geometrical properties and envelope assemblies of building materials*, International Conference Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment, May 2005, Santorini, Greece
- [3] **Asan, H. and Y.S. Sancaktar**, *Effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor*, Energy and Buildings Vol. 28 (No. 2)(1998) pp. 159-166
- [4] **H. Asan**, *Effects of wall's insulation thickness and position on time lag and decrement factor*, Energy and Buildings 28 (1998) 299-305
- [5] **H. Asan**, *Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view*, Energy and Buildings 32 (2000) 197-203
- [6] **W. Liping, W.N. Hien**, *The impacts of ventilation strategies and facade on indoor thermal environment for naturally ventilated residential buildings in Singapore*, Building and Environment 42 (12) (2007) 4006-4015.

- [7] **A. Roetzel, A. Tsangrassoulis, U. Dietrich, S. Busching**, *A review of occupant control on natural ventilation*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (3) (2010) 1001-1013.
- [8] **C.A. Balaras**, *The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods*, Energy and Buildings 24 (1996) 1-10.
- [9] **Cláudia Donald Pereira, Enedir Ghisi**, *The influence of the envelope on the thermal performance of ventilated and occupied houses*, Energy and Buildings 43 (2011) 3391-3399.
- [10] **K. Gregory, B. Moghtaderi, H. Sugo, A. Page**, *Effects of thermal mass on the thermal performance of various Australian residential constructions systems*, Energy and Buildings 40 (4) (2008) 459-465.
- [11] **ASHRAE STANDARD 55P**, *Proposed American National Standard Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, Third Public Review, February 2003.
- [12] **B. Givoni**, *Comfort, climate analysis and building design guidelines*, Energy and Buildings 18 (1) (1992) 11-23.
- [13] **B. Givoni**, *Man, Climate and Architecture*, London, 2nd edn., 1976.
- [14] **V. Olgyay**, *Design With Climate*, Princeton University Press, 1963.
- [15] **Cengel, Y.**, *Heat and mass transfer: A practical approach*, McGraw-Hill; 3 Edición. 2006.
- [16] **AMAI**, *Asociación Mexicana de Agencias de Investigación de Mercado y Opinión Pública*, www.amai.org, Consultado el 14 de Febrero del 2012.

- [17] **CONAPO**, *Consejo Nacional de Población* , www.conapo.gob.mx, Consultado el 11 de Febrero del 2012.
- [18] **CFE**, *Informe Anual 2010*, Comisión Federal de Electricidad.
- [19] **SENER**, *Balance Nacional de Energía 2010*, Secretaría de Energía.
- [20] **CONUEE**, *Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía*, www.conuee.gob.mx, Consultado el 24 de Enero del 2012.
- [21] **ASHRAE 2007**, *ASHRAE Handbook-Applications:Building Energy Monitoring*.
- [22] **Ternes, M.P.**, *Single-family building retrofit performance monitoring protocol: Data specification guideline*. ORNL Report ORNL/CON-196(1986)
- [23] **Underwood, C.P. y Yik, F.W.H**, *Modelling Methods for Energy in Buildings* Blackwell Science (2004).
- [24] **Morris Grenfell Davies**, *Building Heat Transfer*. John Wiley & Sons(2004).
- [25] **Kuehn, Ramsey y Threlkeld**, *Thermal Enviromental Engineering*. Prentice Hall(1998).
- [26] **M.N. Ozisik**, *Heat Transfer: A Basic Aproeach*. McGraw-Hill(1985).
- [27] **L. Zhu, R. Hurt, D. Correia, R. Boehm**, *Detailed energy saving performance analyses on thermal mass walls demonstrated in a zero energy house*, Energy and Buildings 41 (3) (2009) 303-310.
- [28] **C. Di Perna, F. Stazi, A. Ursini Casalena, M. D’Orazio**, *Influence of the internal inertia of the building envelope on summertime comfort in buildings with high internal heat loads*, Energy and Buildings 43 (1) (2011) 200-206.

- [29] **Patankar S.V.**, *Numerical heat transfer and fluid*, Ed. Taylor & Francis, Primera edición (1980).
- [30] **METEONORM**, *Handbook Part 1: Software*, www.meteonorm.com, 9 de Diciembre 2010.
- [31] **Servicio Meteorológico Nacional**, *Normales Climatológicas*, www.smn.cna.gob.mx, Consultado el 19 de Abril de 2012.
- [32] **EnergyPlus**, *Guide for Module Developers: Everything You Need to Know about EnergyPlus Computational Development*, US Department of Energy, Noviembre 2007.
- [33] **EnergyPlus**, *Engineering reference: The reference to EnergyPlus Calculations*, US Department of Energy, Octubre 2011.
- [34] **EnergyPlus**, *Auxiliary EnergyPlus Programs: Extra programs for EnergyPlus*, US Department of Energy, Octubre 2011.
- [35] **CFE**, *Comisión Federal de Electricidad*, <http://www.cfe.gob.mx/sustentabilidad/ahorroenergia/Paginas/ahorroenergia.aspx>, Consultado el 20 de Abril de 2012.
- [36] **Gutiérrez pulido H., De la Vara Salazar R.**, *Análisis y diseño de experimentos*, Ed. McGraw-Hill, Segunda edición (2008).
- [37] **Sara Nikoofard, V. Ismet Ugursal, Ian Beausoleil-Morrison**, *Effect of external shading on household energy requirement for heating and cooling in Canada*, *Energy and Buildings* 43 (7) (2011) 1627-1635.
- [38] **B. Givoni**, *Climate considerations in building and urban design*, John Wiley & Sons (1998).

- [39] **V. Cheng, E. Ng, B. Givoni**, *Effect of envelope colour and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate*, Solar Energy 78 (4) (2005) 528-534.
- [40] **Eusébio Z.E. Conceição, João M.M. Gomes, Nuno H. Antão, M Manuela J.R. Lúcio**, *Application of a developed adaptive model in the evaluation of thermal comfort in ventilated kindergarten occupied spaces*, Building and Environment 50 (2012) 190-201.
- [41] **CIBSE**, *Environmental design, guide A*, The Chartes Institute of Building Services Engineers, Octubre 1999.
- [42] **Mohammad S. Al-Homoud**, *The Effectiveness of Thermal Insulation in Different Types of Buildings in Hot Climates*, Journal of Thermal Envelope and Building Science 27 (3) (2004) 235-247.
- [43] **Z. Yilmaz**, *Evaluation of energy efficient design strategies for different climatic zones: Comparison of thermal performance of buildings in temperate-humid and hot-dry climate*, Energy and Buildings 39 (3) (2007) 306-316.
- [44] **O. Kaynakli**, *A study on residential heating energy requirement and optimum insulation thickness*, Renewable Energy 33 (6) (2008) 1164-1772.