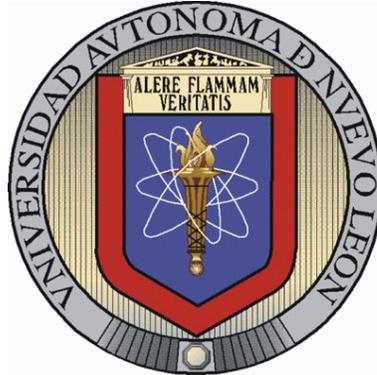


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL USO DE
ESTRATEGIAS DE CLIMATIZACIÓN PASIVA EN EL
CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE
DISPOSITIVOS DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE
EN VIVIENDAS EN MONTERREY

POR

MILTON CARLOS MENDOZA CÁRDENAS

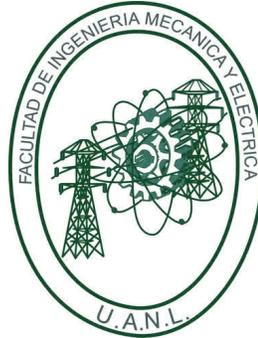
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

JUNIO 2016

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL USO DE
ESTRATEGIAS DE CLIMATIZACIÓN PASIVA EN EL
CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE
DISPOSITIVOS DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE
EN VIVIENDAS EN MONTERREY

POR

MILTON CARLOS MENDOZA CÁRDENAS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

JUNIO 2016

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Evaluación del impacto del uso de estrategias de climatización pasiva en el consumo de energía eléctrica de dispositivos de acondicionamiento de aire en viviendas en Monterrey», realizada por el alumno Milton Carlos Mendoza Cárdenas, con número de matrícula 1430239, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Energías Térmica y Renovable.

El Comité de Tesis



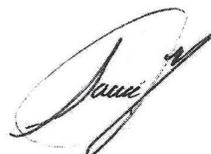
Dr. Fausto Alejandro Sánchez Cruz

Director



Dr. Simón Martínez Martínez

Revisor



M.C. Miguel García Yera

Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, junio 2016

A mis padres Francisca Esthela Cárdenas Sánchez y Jesús Antonio Mendoza Montemayor, por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida, su dedicación para darme un mejor futuro, por sus consejos, su amor y su cariño, que me han dado fortaleza para seguir adelante desde mi infancia.

A Eliana Yaneli Canela Garrido por brindarme su amor y su confianza.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi madre Francisca Esthela Cárdenas Sánchez y a mi padre Jesús Antonio Mendoza Montemayor por inculcarme desde pequeño la importancia del estudio y la superación personal.

A Eliana Yaneli Canela Garrido por sus consejos, ternura y su apoyo incondicional a cualquier proyecto que he emprendido.

A mis hermanos Cristina Mendoza Cárdenas y Jesús Antonio Mendoza Cárdenas, por sus consejos, confianza y por siempre haber cuidado de mi.

A mis primos y amigos Aderly González, Jesús Alejandro Acosta, Roberto Coronado y Eduardo Leija, que los veo como hermanos y con quienes he compartido momentos importantes y felices a lo largo de mi vida, lo cuales tengo el gusto de conocer desde mi infancia y la fortuna de seguir en contacto con ellos después de todos estos años.

Al Cuerpo Académico: Procesos Termofluidodinámicos y Sistemas Energéticos. Al Dr. Simón Martínez Martínez y al Dr. Fausto Alejandro Sánchez Cruz, por su orientación profesional y por permitirme incorporarme a la maestría y a su equipo de trabajo. A los doctores Dra. Elvira Martínez, Dr. Santos Méndez Díaz y Dr. Arturo Morales Fuentes 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, Valery Garza, Mayra Mendoza, Mirna Martínez

y Jesús Juárez.

A CONACyT por su apoyo a través del proyecto 591733.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	v
Resumen	xiv
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Eficiencia energética	1
1.1.2. Eficiencia energética en edificios y evolución del concepto . . .	2
1.1.3. Planteamiento del problema	4
1.1.4. Situación actual de la vivienda en México	5
1.2. Motivación	8
1.3. Justificación	9
1.4. Hipótesis	9
1.5. Objetivo General	11
1.6. Objetivos Específicos	11
1.7. Metodología	11

2. Estado del arte y Fundamentos Teóricos	14
2.1. Estado del arte	14
2.2. Fundamentos Teóricos	22
2.2.1. Transferencia de calor.	22
2.2.2. Acondicionamiento y confort higrotérmico humano	29
3. Simulación computacional	34
3.1. Definición del problema	35
3.1.1. Geometría	36
3.2. Zonas térmicas de México	38
3.2.1. Temperatura ambiente media anual	40
3.2.2. Información general de la ciudad de Monterrey, Nuevo León.	41
3.3. EnergyPlus	41
3.4. NOM-020-ENER-2011	44
3.5. Meteonorm	46
4. Resultados y Discusión	48
4.1. El caso de referencia	48
4.1.1. Definición del caso base	48
4.2. Orientación	50
4.3. Aislamiento	54
4.4. Sombreado	56

4.5. Ventanas	60
4.6. Caso Integral	67
5. Conclusiones y Recomendaciones	70
5.1. Conclusiones	70
5.2. Recomendaciones	73
5.3. Trabajo futuro	74
6. Apéndice	76
6.1. Apéndice A: Valores para el cálculo del flujo de calor a través de la envolvente	76

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Ventas internas de energía eléctrica en los últimos cinco años [1].	5
1.2. Prospectiva de venta de energía eléctrica al 2026 [2].	6
1.3. Crecimiento de los usuarios consumidores de energía eléctrica por sector [1].	10
2.1. Conducción de calor a través de un cuerpo. Tomada de [3].	24
3.1. Edificio residencial de referencia, a) vista frontal y b) vista posterior.	36
3.2. Mapa con las zonas térmicas de la República Mexicana [4]	39
3.3. Temperatura ambiente media anual en México [5].	40
4.1. Vivienda orientada cardinalmente hacia el a) norte, b) sur, c) este y d) oeste. Las sombras mostradas pertenecen a una aproximación de la posición del Sol a las 16:00 hrs, un 15 de julio.	51
4.2. Consumo de energía eléctrica para a) calefacción y b) refrigeración en función de la orientación de la vivienda.	52
4.3. Ganancias de calor a través de las ventanas por orientación.	53
4.4. Posición del aislante térmico en la envolvente (imagen generada y extraída del software DesignBuilder.)	55

4.5. Energía consumida dentro de la vivienda en función del espesor de aislamiento.	56
4.6. Ejemplos de estructuras que proporcionan sombreado a las ventanas de la vivienda.	57
4.7. Distintas configuraciones evaluadas del voladizo simple.	58
4.8. Consumo de energía eléctrica para a) refrigeración y b) calefacción en función del sombreado de ventanas de la vivienda.	59
4.9. Diferencia de ganancia de calor por las ventanas por la implementación de dispositivos generadores de sombra.	60
4.10. Etiqueta de eficiencia energética para ventanas.	61
4.11. Consumo de energía de a) refrigeración y b) calefacción en función del número de capas de acristalamiento en ventanas	63
4.12. Consumo de energía de a) refrigeración y b) calefacción en función del número de capas de acristalamiento en ventanas de baja emisividad	64
4.13. Ganancias de calor al interior de la vivienda a través del acristalamiento.	66
4.14. Ganancias de calor en la vivienda a lo largo de los meses del año debido a la incidencia solar.	67
4.15. Comparativa de ahorro de energía eléctrica de las estrategias implementadas en caso integral.	69
6.1. Valores para el cálculo del flujo de calor a través de la envolvente. . .	77
6.2. Valores para el cálculo del flujo de calor a través de la envolvente (continuación).	78

6.3. Valores para el cálculo del flujo de calor a través de la envolvente
 (continuación). 79

ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Descripción del edificio residencial, valores y parámetros.	37
3.2. Descripción de las aperturas de la vivienda.	38
3.3. Equivalencia de las zonas térmicas.	39
3.4. Especificaciones para los componentes de la envolvente establecidas en la NOM-020-ENER-2011 [6].	45
3.5. Comparativa de la temperatura media normal mensual SMN vs. Me- teonorm, para Monterrey, N.L.; datos generados en los años 2000-2010.	47
4.1. Factores-U para ventanas típicas	62
4.2. Ganancias de calor en la vivienda a lo largo del año.	66
4.3. Resumen de los ahorros energéticos más favorables reportados en la investigación	68

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. La eficiencia energética en edificios se ha convertido en una necesidad en las últimas décadas alrededor del mundo. Los altos consumos de energía nos obligan a buscar maneras de amortiguar el impacto climático que genera el calentamiento global mediante la implementación de procesos optimizados de ahorro de energía, buscando además, satisfacer las demandas de comodidad de las personas. Con la eficiencia energética se logran las dos cosas mencionadas anteriormente, a la vez que se cuidan los recursos económicos primarios y se reducen las emisiones de contaminantes al ambiente.

Varios 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, la orientación, etc., que afectan de manera importante los índices de consumo energético dentro de la edificación.

En el presente trabajo de tesis se pretende evaluar el consumo energético derivado de las condiciones estándar promedio de una vivienda actual, de acuerdo a las prácticas comunes de construcción, tomando como referencia el prototipo de las

edificaciones que dio lugar a la creación de las NOM 020 y NOM 008, para después presentar diversos escenarios donde se proponen mejoras para disminuir el consumo energético dentro de la vivienda.

El presente trabajo está basado en resultados obtenidos a través de simulación computacional. Para analizar de manera adecuada el consumo de energía eléctrica derivado de las distintas estrategias presentadas, se utilizó el código computacional llamado EnergyPlus con asistencia del modelado computacional que facilita Design-Builder, 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 partes de la edificación y así, poder calcular el consumo energético.

En esta investigación se emplea una metodología que nos permite evaluar la importancia de los distintos parámetros que modifican el comportamiento del consumo de energía eléctrica, generados a partir de la necesidad de contar con espacios confortables dentro de la vivienda. El objeto principal es aprovechar las condiciones bioclimáticas del lugar para plantear estrategias de climatización que promuevan el confort dentro de la edificación con un consumo bajo de energía. 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

1.1.1 EFICIENCIA ENERGÉTICA

Los problemas energéticos se vuelven cada vez de más relevancia en la actualidad debido a un posible déficit energético en el futuro, además del cambio climático. Desde que entró en vigor el protocolo de Kyoto, en diciembre de 1997, la mayoría de los gobiernos alrededor del mundo se han comprometido a reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero. El uso eficiente de la energía se ha convertido en un asunto de vital importancia para la mayor parte de las políticas energéticas. Dentro de los mayores consumidores de energía, se encuentran los edificios de uso comercial y residencial. Se ha reportado que casi la mitad de la energía generada en los países de la Unión Europea es consumida en el sector comercial y residencial y son responsables de la generación de un tercio de todas las emisiones de gases de efecto invernadero [7].

1.1.2 EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICIOS Y EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO

La eficiencia energética en edificios se ha convertido en una necesidad en las últimas décadas alrededor del mundo. Los altos consumos de energía nos obligan a buscar maneras de amortiguar el impacto climático que genera el calentamiento global mediante la implementación de procesos optimizados de ahorro de energía, buscando además, satisfacer las demandas de comodidad de las personas. Con la eficiencia energética se logran las dos cosas mencionadas anteriormente, a la vez que se cuidan los recursos económicos primarios y se reducen las emisiones al ambiente. Por esto, es importante dar un repaso a los eventos históricos más relevantes que sirvieron como punto de partida para la asimilación de las ideas o conceptos referentes a la “eficiencia energética” y el “desarrollo sustentable” de hoy en día.

Desde tiempos muy antiguos, en Dacia (Rumania \sim 5500 A.C.), se utilizaban estrategias como la construcción de casas parcialmente bajo tierra, porque de esta manera se obtenían temperaturas interiores más estables. En Persia (Irán \sim 4000 A.C.) se comenzó a aprovechar la fuerza del viento para favorecer la ventilación dentro de la vivienda [8, 9]. Los egipcios (\sim 1300 A.C.) diseñaron muros gruesos de ladrillo que facilitaban el desarrollo de condiciones de confort [10, 11, 12].

Los requerimientos definidos para los edificios actuales no son descubrimientos recientes, sino que son el resultado de la evolución de las ciencias y costumbres en la historia de la humanidad en el sentido más general, siendo a principios del siglo XIX donde estos conceptos tuvieron una notable innovación e implementación. En la última década del siglo XIX, los trabajos científicos implicaban estudios de los efectos de los aislantes térmicos sobre la transferencia de calor, formación y transporte de humedad en los muros y algunas configuraciones de ventanas con capas múltiples de cristal. Carrier inventó el equipo eléctrico de acondicionamiento de aire y después la carta psicrométrica [10].

La crisis del petróleo de 1973 preocupó a las personas de tal manera que surgió la necesidad de ampliar el concepto de eficiencia energética en edificaciones, de tal forma que ya se empezaban a estudiar temas como el efecto de las infiltraciones de aire exterior al interior de los edificios, materiales super aislantes, métodos de recuperación de calor en sistemas de ventilación, uso de ventanas de capas triples y la implementación de tecnologías pasivas que aprovecharan la radiación solar para otorgar condiciones de confort térmico. Con la implementación y agrupación de estos conceptos a la vivienda, la comunidad científica eventualmente adoptó el concepto de *desarrollo sustentable* [10].

Con los avances tecnológicos de 1980, el primer “edificio inteligente” fue creado bajo el concepto de “Ultra-Low-Energy” (que hoy en día se conoce como el estándar *Passive House*) y además, Wolfgang Feist promovió el concepto de “Low Energy House”. Más tarde en esa misma década, inspirado por los proyectos de eficiencia energética en viviendas de 1970, Wolfgang Feist en colaboración con Bo Adamson crearon el concepto de “Passive House” [13, 14].

El concepto *Passive House* funciona bajo la ideología de “maximizar ganancias, minimizar pérdidas”, de esta manera, un edificio pasivo es diseñado de acuerdo a cinco principios [15]:

- Aislamiento total de la envolvente sin puentes térmicos.
- La envolvente es extremadamente hermética, previniendo infiltraciones de aire exterior y pérdidas de aire acondicionado.
- Utilización de ventanas y puertas de alto desempeño térmico.
- Empleo de sistemas de aire acondicionado con vías de recuperación de calor y humedad.
- Aprovechamiento de radiación solar para propósitos de calefacción.

Cada innovación fue surgiendo en algún punto en particular del tiempo para

atender las necesidades más básicas que eran requeridas por las personas. Es evidente que desde tiempos antiguos, el hombre se las ha ingeniado para poder asegurar condiciones de confort dentro de lugares confinados, efectuando el mínimo esfuerzo posible.

El siglo XX sirvió de plataforma para impulsar todas estas “nuevas” prácticas de construcción de edificios mediante los medios de comunicación, estandarización y regulación y manifestando la relevancia que juega la eficiencia energética en temas de ahorro económico e impacto ambiental. Lo único que falta es la extensión de estos conceptos en la mayoría de las áreas de la ciencia y tecnología, cosa que probablemente suceda en este siglo XXI [10].

1.1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las emisiones producidas por los combustibles fósiles utilizados para satisfacer la creciente demanda de energía a nivel global, están llevando a un peligroso cambio climático en el planeta. Es por esto que en la actualidad existe una preocupación muy grande por el uso eficiente de la energía en edificaciones de cualquier tipo además de combatir el impacto negativo hacia el medio ambiente, resultando muy importante la concientización y difusión de buenas costumbres y prácticas en tales temas.

Durante los últimos cinco años, del total de ventas de energía eléctrica el sector doméstico ocupa en promedio un 26 %, siendo superado solamente por el sector de la empresa mediana en un 11 % (ver figura 1.1), representando un porcentaje significativo del total generado.

Si revisamos una prospectiva de consumo de energía eléctrica (ver figura 1.2), se puede observar que el sector residencial seguirá ocupando aproximadamente la cuarta parte del consumo total de energía eléctrica. Si no se toman acciones de mitigación para evitar emisiones de gases de efecto invernadero estos ascenderán hasta casi 2500 mega toneladas de dióxido de carbono en el 2050, un 400 % más que las emisiones

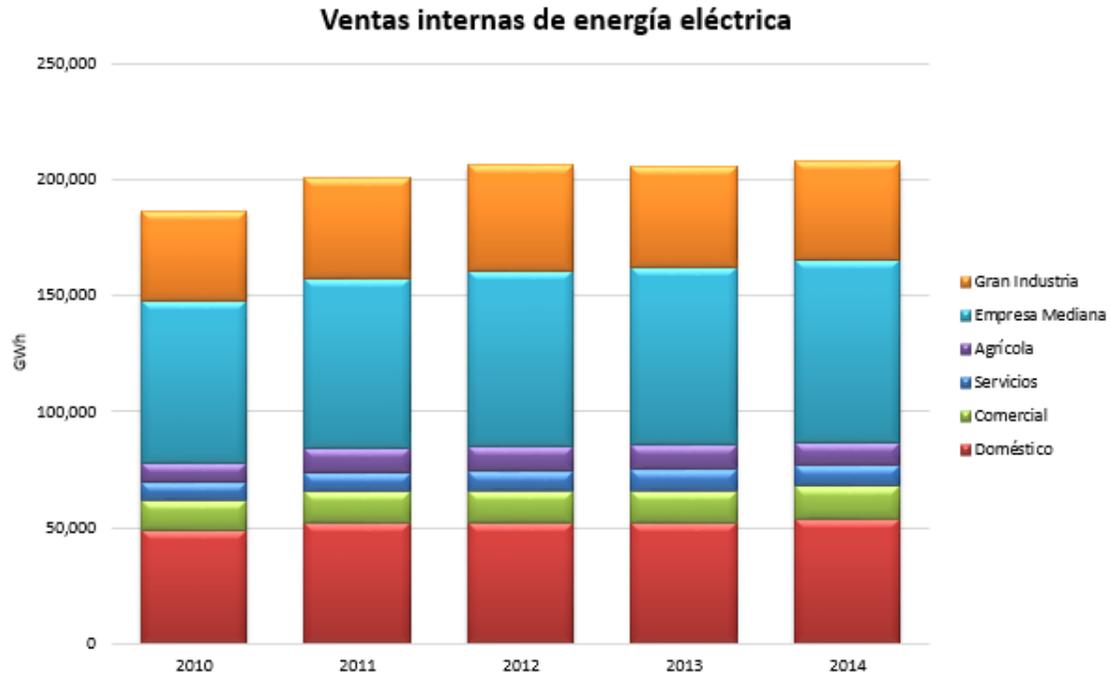


Figura 1.1: Ventas internas de energía eléctrica en los últimos cinco años [1].

generadas en el año 2010 [16]. En base a estos porcentajes y al crecimiento de los usuarios del sector doméstico, este sector resulta de vital importancia y una gran área de oportunidad para mejorar en temas de eficiencia energética, reducir consumos eléctricos y contribuir a la disminución de la contaminación ambiental.

1.1.4 SITUACIÓN ACTUAL DE LA VIVIENDA EN MÉXICO

Actualmente, el inventario habitacional asciende a 34.1 millones de viviendas habitadas en México [17], siendo éstas de diversa naturaleza. Algunas, desde su construcción, tienen espacios dedicados a habitaciones o estancias y otras van conformándose con el uso. En promedio, las viviendas tienen 3.9 cuartos, es decir, espacios de la vivienda delimitados por paredes fijas y techo de cualquier material, destinados al alojamiento de personas, en donde se desarrollan diversas actividades de la vida familiar, de los cuales 2.1 son dormitorios. Por otro lado, el país, en sus

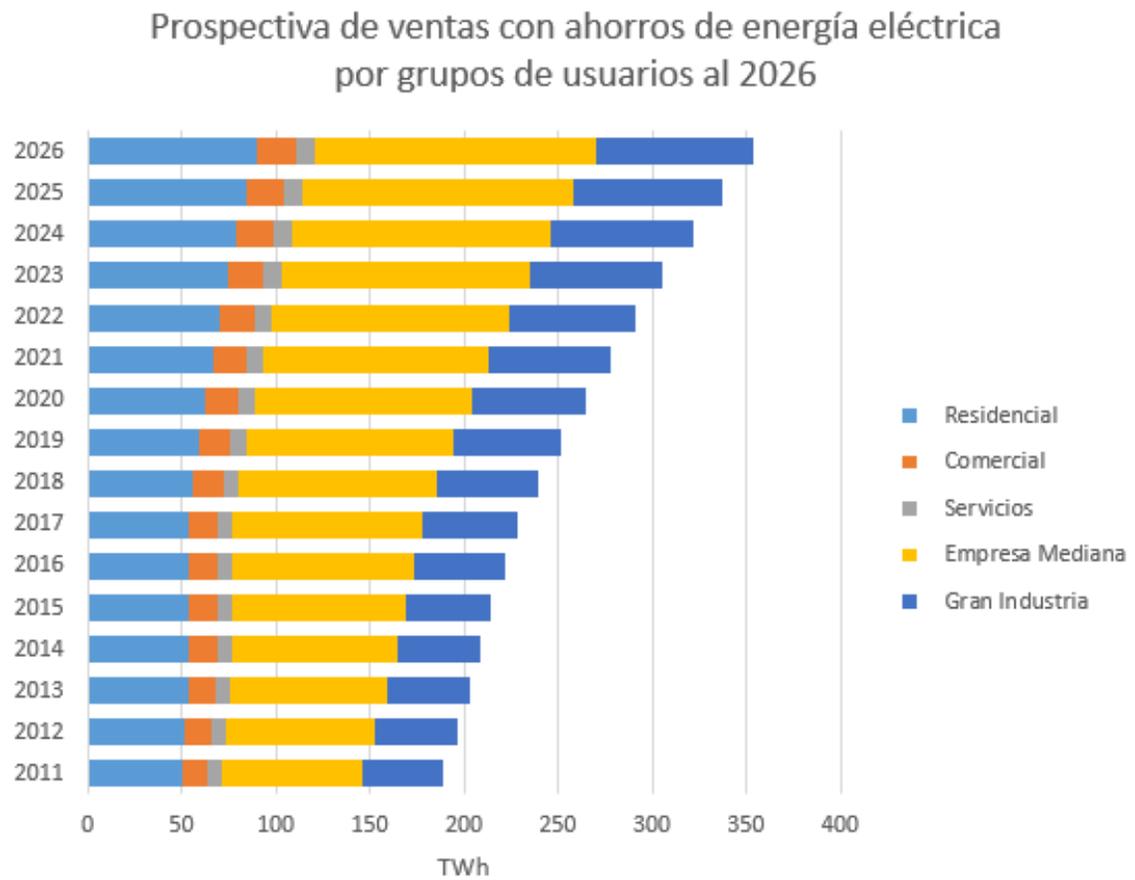


Figura 1.2: Prospección de venta de energía eléctrica al 2026 [2].

casi 2 millones de kilómetros cuadrados, alberga una gran diversidad climática, lo que permite tener tipos de vivienda disímiles de región a región. Sin embargo, en general, el uso de enseres domésticos se ha acrecentado, lo que trae como consecuencia una mayor demanda de electricidad y otros energéticos. Cabe señalar que el 67% de las viviendas son urbanas y que la antigüedad media del parque habitacional es de 20 años [18].

Siendo la vivienda uno de los principales demandantes de energía eléctrica, al hacer modificaciones en los consumos, habrá una repercusión positiva sobre el sistema eléctrico en el país; además, el cambio en los hábitos de consumo va aunado a la disminución de emisiones al ambiente, lo que fortalece la lucha contra el cambio climático de la actualidad [19].

El problema en las viviendas modernas es doble, por un lado, los diseños no consideran ni el estado orgánico (es decir, la conjunción de la construcción con su medio) ni el estado bioclimático (sol, viento, humedad, orientación, etc.). Por otro lado, las construcciones actuales tienen que satisfacer una gran demanda y son creadas por compañías dedicadas a masificar viviendas sin considerar las necesidades particulares de los ocupantes, lo que se manifiesta como urgencia constructiva. El problema aparece porque “la vivienda se convierte en un producto de otra cadena productiva, en donde prevalecen la cantidad producida y el precio de venta, sobre la calidad y el confort. Su diseño se adecua exclusivamente a la comercialización, ignorando sus propósitos y atributos fundamentales. El proceso de producción masiva de casas, hace a un lado los costos energéticos y ecológicos implícitos en la extracción, transformación, transporte e instalación de los materiales utilizados, así como los costos para la adecuación ambiental y la conservación del inmueble” [20].

Como se mencionó, 7 de cada 10 viviendas en el país se localizan en zonas urbanas y no pertenecen a un estilo vernáculo en su diseño, estilo que sí ha evolucionado junto con el medio y su natural adaptación. Se entiende que, como un proceso lógico, los habitantes buscarán el modo de satisfacer todas sus necesidades

de vivienda, además de disminuir gastos. De ahí que el ahorro, ya sea energético o económico, resulta atractivo para los mismos. Promoviendo el desarrollo nacional para reducir al mínimo el consumo de energía eléctrica en viviendas y aumentar al máximo el confort térmico, se podrá lograr mediante el empleo masivo de técnicas bioclimáticas.

Dadas las nuevas posibilidades que ofrece la arquitectura, al poder incorporar avances técnicos al control ambiental de las viviendas, se pierden (especialmente en la arquitectura urbana) los recursos de diseño que antiguamente permitían el aprovechamiento de las energías naturales. Una de las características fundamentales de la arquitectura del siglo XX es el olvido de las técnicas naturales de control ambiental. En estas condiciones ni siquiera se plantea el problema real de integrar la energía en los edificios, esto es, la luz, el calor, el sonido, etc. Los cambios técnicos difundidos hacia la mitad del siglo son muy importantes. Las nuevas cargas ambientales que generan estos sistemas, unidas a las más estrictas demandas de comodidad, convierten rápidamente en obsoletas las soluciones ambientales conseguidas mediante estructuras fijas, y promocionan indirectamente los sistemas mecánicos de control ambiental [21].

1.2 MOTIVACIÓN

La motivación de este trabajo surge a partir de la necesidad de construir viviendas accesibles y adaptables pensando en presentes y futuras generaciones, y en que los cambios que acontecen a lo largo de la vida, conllevan implicaciones y ventajas sociales, sanitarias, económicas y medioambientales. De esta manera, es más viable responder a las necesidades de la sociedad, donde se precisan grandes ahorros de energía y además, disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera por la producción incesante de electricidad y al mal uso de las instalaciones domésticas.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Debido a la situación actual de la cultura energética y los problemas de cambio climático, surge la necesidad de implementar estrategias de climatización como la prioridad a la hora de desarrollar nuevos diseños de vivienda en lugares donde no se necesite de climatización mecánica (en algunos lugares, alcanzar condiciones de confort requiere de la implementación de estrategias de climatización activas), conservando la característica principal que las hará atractivas: la viabilidad económica. La prospectiva de emisiones de gases de efecto invernadero según la figura 1.2 es muy alarmante, prediciendo que la generación de éstas ascenderá hasta en un 400 % con respecto al año 2010 si no se toman acciones de mitigación. Además, con el constante crecimiento de usuarios de energía eléctrica (ver figura 1.3) y siendo evidente que las ventas de energía eléctrica no parecen disminuir, es necesario implementar programas y estrategias de eficiencia energética en proyectos dedicados al sector residencial.

1.4 HIPÓTESIS

La viabilidad económica de la edificación residencial industrializada precisa de la implantación de procesos alternativos a los tradicionales y además, es necesaria para garantizar alcanzar mejoras importantes en el rendimiento energético y el confort humano. Por lo tanto, la hipótesis planteada en esta tesis es: *es posible implementar soluciones constructivas sustentables que satisfagan necesidades a través de la aplicación de herramientas de simulación energética que nos permitan generar recomendaciones y argumentos útiles en la prospectiva de las viviendas que se considerarán futuros modelos de eficiencia energética.*

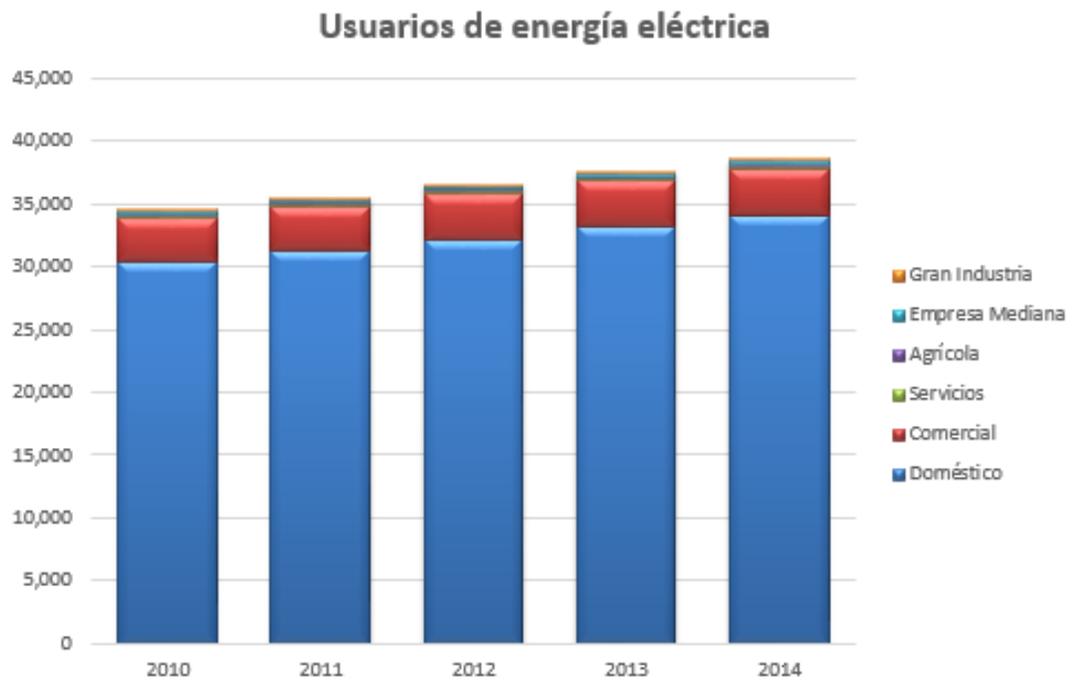


Figura 1.3: Crecimiento de los usuarios consumidores de energía eléctrica por sector [1].

1.5 OBJETIVO GENERAL

Evaluar mediante simulación computacional estrategias de climatización aplicadas en viviendas desarrolladas a partir de la normativa mexicana (NOM-020-ENER-2011) que permitan establecer criterios de mejoras constructivas enfocadas a la eficiencia energética y al confort higrotérmico humano.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir el prototipo típico de vivienda actual en México, según lineamientos de las NOM.
- Definir los parámetros que nos permitirán establecer una variedad de escenarios para poder evaluar y encontrar las configuraciones más óptimas de estrategias de ahorro energético dentro de la vivienda.
- Llevar a cabo las evaluaciones con el apoyo de herramientas de simulación energética, partiendo de un caso de referencia, para poder encontrar áreas de oportunidad para disminuir consumos de energía.
- Definir estrategias, en base a los resultados, que nos permitan implementar un diseño bioclimático adaptado a la climatología local de forma que se minimice la demanda de energía.

1.7 METODOLOGÍA

En el presente trabajo de tesis se pretende evaluar el consumo energético derivado de las condiciones estándar promedio de una vivienda actual, tomando como referencia el prototipo de las edificaciones que dio lugar a la creación de las NOM

020 y NOM 008, debido a que es la referencia típica de la vivienda que se acostumbra a construir en la actualidad en México.

Para poder llevar a cabo las evaluaciones, existen herramientas de simulación computacional con las que se puede evaluar el consumo de energía y el confort térmico de edificios. Éstas herramientas son relativamente rápidas, de bajo costo y precisas. En la simulación computacional se utilizan modelos matemáticos que representan los procesos dinámicos de transferencia de energía y masa que en determinado momento afectan a los edificios. Además, muchos programas de eficiencia energética alrededor del mundo se han dado a la tarea de elaborar metodologías que funcionan de manera similar a las herramientas de simulación computacional, con la diferencia de que, por lo general, se adaptan únicamente a las condiciones locales de clima y geografía. Un ejemplo de ellos es el programa PHPP (*Passive House Planning Package*, por sus siglas en inglés) lanzado por el *Passive House Institute*, un organismo independiente y reconocido internacionalmente por sus contribuciones y estándares en relación a la materia de energía. Se hablará de este y otro tipo de herramientas más adelante, en el capítulo 3.

Para proceder con el análisis energético de la vivienda, primeramente hay que definir un modelo representativo de las prácticas constructivas actuales. Se ha encontrado que, en base a una revisión de las prácticas de distintos organismos dedicados a la construcción, el prototipo típico de la vivienda actual se asemeja mucho al que se usó de referencia para la creación de la NOM-020-ENER-2011 [22]. Entonces se optará por elegir este prototipo. Más adelante, en el capítulo 3 se describirá a detalle el diseño.

Una vez elegido el diseño de la vivienda, hay que determinar los parámetros más relevantes que influyen en el consumo energético dentro de la misma. Varios autores han llevado a cabo numerosas investigaciones relacionadas con el desempeño energético de la envolvente, que si bien es un componente importante de la vivienda, existen otros factores que modifican significativamente el desempeño térmico y

energético del recinto. Una gran cantidad de estos trabajos no consideran la ventilación natural, la densidad ocupacional, la orientación, la configuración de las ventanas (refiriéndose a la composición), etc. Todos estos factores también afectan de manera importante a los índices de consumo energético dentro de la edificación.

Para poder llevar a cabo las evaluaciones energéticas, nos apoyaremos de un software de uso gratuito, EnergyPlus, y otro comercial, DesignBuilder. Primero se proyecta el diseño 3D de la vivienda en DesignBuilder; entonces se adecúan los parámetros del caso base y a partir de ahí, EnergyPlus se emplea para la realización de los cálculos energéticos a partir de métodos numéricos, utilizando funciones y coeficientes de transferencia. EnergyPlus es un programa de simulación diseñado para evaluar el desempeño térmico, el consumo de energía y la producción de contaminantes de un edificio. 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.

Los resultados del caso base nos servirán de referencia para poder comparar las distintas estrategias de climatización que se implementarán en la vivienda, permitiéndonos establecer recomendaciones para futuros modelos de eficiencia energética.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 ESTADO DEL ARTE

En la actualidad, la eficiencia energética en edificaciones se relaciona principalmente con dos componentes: *propiedades pasivas* como el aislamiento térmico, el uso de la radiación solar, la ventilación natural y técnicas de sombreado; y *propiedades activas* como los dispositivos de generación, almacenamiento y conversión de la energía [10]. A continuación, se presenta una serie de trabajos donde se estudió la implementación de estos componentes o estrategias, así como sus distintas ventajas y desventajas, y diversidad de escenarios, además de presentar un panorama que incluye el contexto internacional y lo que pasa en México en materia de estudios y programas de eficiencia energética en edificaciones de uso habitacional.

En el trabajo *Análisis térmico de una vivienda económica en clima cálido-seco bajo diferentes orientaciones y medidas de sombreado*, llevado a cabo por Daniel Solís [23] se presenta un estudio térmico, asistido por la herramienta de diseño DesignBuilder, de seis viviendas económicas de 30 m^2 con alta carga térmica, ubicadas en ciudades fronterizas al norte de México. El objetivo del estudio fue cuantificar

el efecto de la orientación y el sombreado. Se concluye que las viviendas no están adaptadas al clima cálido-seco, lo que provoca una necesidad forzosa de acondicionar mecánicamente el recinto. Las estrategias empleadas para las simulaciones no fueron del todo exitosas o eficientes. El sombreado general fue el único que por sí mismo presenta mejoras importantes en el confort y ahorro de energía por climatización, sin embargo, enfrenta un importante obstáculo de implementación: el costo. Y si bien el estudio profundiza de muy buena forma en las técnicas de sombreado y orientación como medidas de eficiencia energética en las viviendas, toma las propiedades termofísicas de los sistemas constructivos considerados directamente del software DesignBuilder, y esto puede resultar ambiguo. Posiblemente resulte necesario comprobar que los resultados sean los correctos o en su defecto, que los materiales y sus propiedades pertenezcan a los recursos disponibles y/o prácticas actuales en las regiones de análisis. Sería también conveniente considerar aislamiento térmico en los muros de las viviendas (en el estudio solo se consideró aislamiento térmico en el techo), ya que una envolvente aislada podría evitar la necesidad de acudir al acondicionamiento mecánico del aire interior para alcanzar sensaciones de confort humano en la vivienda. También reportan que una mala decisión respecto a la orientación de los recintos, puede afectar la necesidad energética de climatización para alcanzar condiciones de confort, pudiendo llegar hasta un 14 % más consumo si se elige de manera equivocada. Las orientaciones que se recomiendan en este estudio son las Norte y Sur y las menos adecuadas son la Este y Oeste.

En un análisis térmico, la importancia de los equipos electrodomésticos cada vez resultan más notables, sobre todo si se trata de emplear herramientas de simulación energética, tal como se reporta en *What goes up: Recent trends in Mexican residential energy use*, de Jorge Alberto Rosas [24]. En este estudio se reporta que el sector residencial en México consume 17 % de la demanda final de energía. La cocina es donde más energía se emplea (52 %), seguido del calentamiento de agua (29 %). La iluminación y los electrodomésticos son los que presentan tasas más altas de cre-

cimiento. En las zonas rurales, la leña para cocinar aún representa el combustible más importante. Por ello, sería conveniente introducir estos elementos dentro de una evaluación energética.

El objetivo general en *Evaluation of the new policy for thermal insulation standards in the residential sector in Mexico* de Albert Heinrich Beele [25] fue evaluar la aplicabilidad de la NOM-020-ENER-2011 en relación a las zonas climáticas en México; analizar la metodología empleada (ventajas y desventajas) y por último analizar los beneficios de la norma hacia las políticas de vivienda sustentable. Llegan a la conclusión de que el estándar solamente cumple sus objetivos en zonas de clima árido y húmedo y una combinación entre ambos. El estándar no cumple sus objetivos en zonas de clima templado, fríos y la combinación de estos. Por lo tanto, se deben realizar ajustes a la metodología de cálculo para estas zonas climáticas del país como por ejemplo, cambiar la forma del cálculo del valor U para edificaciones en zonas frías/húmedas y verificar los efectos de la absorptividad en los cálculos de las cargas internas.

En *Rehabilitación Térmica, Energética y Ambiental, para la Sustentabilidad de la Vivienda en México* elaborado por Gustavo Ramírez [21] se presentan los beneficios de carácter energético, térmico y ambiental, obtenidos por la rehabilitación de una vivienda ya existente en los bioclimas de México. El objetivo es mejorar las condiciones de habitabilidad, satisfaciendo necesidades de ventilación y captación térmica. Se emplean herramientas de simulación para obtener recomendaciones para la modificación actual de la vivienda. Además, se plantean alternativas que satisfacen las normativas energéticas de adecuación en el país, cumpliendo con los diversos programas de ahorro energético. Es un trabajo muy extenso y relativamente completo ya que contempla 10 ciudades de la República Mexicana, donde se representan los 4 bioclimas dominantes y se puntualiza el estado de la vivienda conforme a estudios y programas existentes. Sin embargo, no existe información suficiente que detalle la

metodología que siguieron para poder utilizar de manera eficiente las herramientas de simulación energética que emplearon.

En *Energy Consumption Optimization of low-income houses in Guadalajara, Mexico*, de Fernando et. al. [26] se establece que las edificaciones del sector residencial son las responsables del consumo de casi un 25% de la energía generada en el país, esto aunado a que el 92.5% de la energía que se produce es a partir de combustibles fósiles, emitiendo gases contaminantes y dañando la atmósfera. En este estudio se diseñaron cuatro hogares de bajo costo, a partir de datos climáticos, costos de construcción y materia prima. Para el diseño se contó con la asistencia del software de diseño BEOpt para encontrar la combinación ideal de estrategias que otorguen el menor consumo energético y mayores condiciones de confort. Se encontró que las soluciones más eficientes radican en la aplicación de aislante térmico en el techo, el reemplazo de la iluminación artificial por iluminación con LED y por último, reemplazar los típicos calentadores de agua de gas, por eléctricos. La configuración de las casas sujetas a esta metodología de optimización consistieron en una casa de 35 m^2 de una planta, una casa tipo duplex (una casa encima de otra) de 39 m^2 analizadas por separado y otra de 76 m^2 de dos plantas. Las combinaciones más eficientes en las casas consistían en sistemas constructivos que llevan ladrillo rojo en lugar de concreto, añadir poliestireno extruído con R5 en el techo, reemplazar las luces compactas fluorescentes por iluminación con LEDs y por último, la utilización de boilers eléctricos. Todos estos cambios pueden llegar a reducir el consumo energético dentro de la vivienda hasta en un 25%. Como el aire acondicionado en estas regiones no es muy común, no fue incluido en el análisis.

En *Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort* de Francisco et. al. [27] nos indican de que el sector residencial consume, mundialmente, una cantidad significativa de energía. Por tal motivo, es importante estudiar, analizar e implementar sistemas de arquitectura bioclimática que contribuyen a la reducción del consumo de energía, teniendo en cuenta las posibles soluciones cons-

tructurivas que se ofrecen tanto de manera activa y pasiva. Algunos de estos sistemas incluyen calefacción solar pasiva y activa, humidificación, enfriamiento evaporativo y enfriamiento mediante ventilación natural y mecánica.

El término “arquitectura bioclimática” se refiere a métodos alternativos de construcción de edificios donde las condiciones geográficas locales y diversas tecnologías solares pasivas son los protagonistas en el cumplimiento del aprovechamiento más eficiente de la energía. El término tecnologías solares pasivas se refiere a aquellas técnicas de acondicionamiento de aire que no requieren de mecanismos móviles y que solamente necesitan la radiación solar para funcionar [28].

La revisión extensa descrita en dicho trabajo les permite concluir que ciertas estrategias bioclimáticas de arquitectura que han sido adoptadas en determinados países podrían exportarse a otras zonas con climas similares en vista de que demostraron ser buenas estrategias de diseño funcionales, resultando en grandes medidas de ahorro energético.

En *Estudio de Optimización de la Eficiencia Energética en Viviendas de Interés Social*, llevado a cabo por el INFONAVIT y la agencia del Gobierno Federal Alemán GIZ [29], acordaron llevar a cabo un análisis de las condiciones actuales de las viviendas y definir medidas de mejoramiento de la eficiencia energética. Estas medidas se centraron principalmente en mejoras a la envolvente existente, la incorporación de algunos elementos arquitectónicos (dispositivos de sombra o celosías en algunas regiones) y en algunos casos, soluciones constructivas diferentes a las del caso base, dependiendo de la zona climática. En base a los resultados reportados en el estudio, la mayoría de las recomendaciones “económicas” consisten en agregar aislamiento térmico en muros para evitar las pérdidas o ganancias de calor, ya que es este fenómeno el que tiene más impacto en la carga térmica de la vivienda. Además, se sugiere utilizar mecanismos de sombreado en ventanas así como agregar acristalamiento térmico a las mismas. Esto deja en evidencia que muchas de las empresas del

sector de la construcción solamente toman a la vivienda como un 'producto' de producción en masa, en otras palabras, no consideran factores bioclimáticos que afectan el bienestar del propietario de la vivienda, obligándolo a recurrir a los sistemas de acondicionamiento de aire convencionales, aumentando el consumo de energía, las emisiones de gases de efecto invernadero y afectando su bolsillo. Algunas de estas empresas no toman en cuenta factores bioclimáticos en el proceso de diseño de las viviendas, tales como la orientación, aislamiento en muros, acristalamiento de ventanas y algunas técnicas de sombreado para disminuir la carga térmica dentro de la vivienda. En cambio, algunas otras emplean prácticas más eficientes y ecológicas respecto a sistemas constructivos y estrategias de climatización pasiva, que si logran su propósito, disminuir el consumo energético en la vivienda al disminuir la carga térmica interna, evitando que se recurra a equipos que consumen cantidades relativamente grandes de energía para conseguir condiciones de confort térmico, disminuyendo la necesidad de la producción incesante de electricidad. Sería conveniente profundizar en más alternativas de sistemas constructivos para poder tener disponible alguna especie de base de datos que nos ayude a determinar qué es lo más adecuado para los distintos tipos de proyectos, en base a requerimientos del cliente, y a la zona bioclimática donde se aplicará.

Hurtado [30] en su trabajo *Efecto de la masa térmica de la envolvente sobre la climatización de edificaciones habitacionales*, 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. El trabajo está basado en resultados obtenidos a través de simulación computacional. Para analizar de manera adecuada el efecto de la inercia térmica, utilizó el código computacional Energy Plus. Los resultados obtenidos mostraron que los elementos de sombreado se deben considerar en toda evaluación energética de edificaciones con el fin de obtener conclusiones aplicables a problemas reales. 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. 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 reducir la transferencia de calor, reduciendo la cantidad de calor que ingresa al recinto, para posteriormente liberar esta energía hacia el exterior en el periodo nocturno. El autor presenta resultados muy generales y recomienda seguir el trabajo con un estudio similar para otras zonas bioclimáticas del país, particularmente al sur, donde los climas húmedos y fríos predominan. Valdría la pena profundizar en el análisis de sistemas constructivos y su desempeño en base a la condiciones bajo las que operan, estudiando materiales con distintas propiedades como la transmitancia térmica, el retardo y amortiguamiento de las cargas térmicas, absortividad, conducción de calor, etc. Se podrá entonces proponer alternativas que nos puedan servir para una selección adecuada.

En un esfuerzo de integración y desarrollo de una política homologada en materia de vivienda sustentable, la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) ha desarrollado programas transversales que son presentados durante la Conferencia de las Partes número 17 en Durban. Con el objetivo de fomentar el crecimiento de un mercado de vivienda verde en conjuntos urbanos sustentables, así como promover la densificación de las ciudades aprovechando de manera óptima la infraestructura urbana existente, la CONAVI ha desarrollado programas en conjunto con los tres niveles de gobierno y las instituciones que financian la adquisición de vivienda. En el 2013, la CONAVI, apoyada por la GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit) y el INFONAVIT emitieron un documento titulado “NAMA Apoyada para la Vivienda Sustentable en México, Acciones de Mitigación y Paquetes Financieros” [31] donde se describen algunas medidas de eficiencia energética. Se definieron tres estándares de eficiencia: EcoCasa 1, EcoCasa 2, y EcoCasa Max. La NAMA (Nationally Appropriate Mitigation Actions), Acciones Nacionales Apropriadas de Mitigación, por su traducción al español, fomenta la reducción de emisiones en

el sector de la vivienda al proveer financiamiento adicional para mejorar la eficiencia energética y disminuir el consumo de combustibles fósiles y del agua. Lo cual se logra a través de la implementación de eco-tecnologías, mejoras en el diseño arquitectónico y la utilización de materiales constructivos eficientes. La NAMA aborda la eficiencia energética en la construcción basándose en el desempeño integral de la vivienda. Se fijan los estándares para la demanda total de energía primaria basada en el prototipo y la zona bioclimática. De ese modo, tanto los desarrolladores de vivienda como los propietarios de las mismas pueden elegir cualquier combinación de intervenciones que logren el nivel de eficiencia buscado. El objetivo de la NAMA es el de promover modelos de edificación costo-efectivos, energéticamente eficientes a través de todo el sector de la vivienda, con un enfoque particular en la vivienda de interés social, donde se espera el mayor crecimiento. A través de la NAMA de Vivienda se tiene como meta el reducir, aún más, las emisiones GEI, tomando como base los programas de “Hipoteca Verde” y “Ésta es tu casa”. El primer concepto de vivienda, EcoCasa 1, incorpora todas las medidas del actual esquema de Hipoteca Verde. Además, se consideraron varios aspectos domésticos eficientes, tales como una iluminación eficiente y buenas instalaciones en las cocinas. El segundo concepto, EcoCasa 2, representa una mayor optimización, a través del uso de aislamiento, ventanas mejor aisladas y electrodomésticos altamente eficientes. Finalmente, la EcoCasa Max, prevé la optimización de todas las medidas, logrando el estándar más ambicioso. Si bien este proyecto aún se encuentra en fase de implementación, sería interesante evaluar los lineamientos que siguen para determinar cómo una vivienda es considerada eficiente, con el objetivo de discutir los tres estándares de eficiencia energética que han definido y si son realmente aplicables o factibles en cualquier zona bioclimática del país. La NAMA es un instrumento clave que el gobierno mexicano está desarrollando para ampliar y mejorar las iniciativas existentes, tanto en lo referente a la penetración de mercado como al nivel de eficiencia.

2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR.

La transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperatura entre cuerpos o medios diferentes, la cual se puede llevar a cabo mediante diferentes procesos. Cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estacionario, que puede ser sólido o un fluido, se utiliza el término conducción para referirnos a la transferencia de calor que se producirá a través del medio. En cambio, el término convección se refiere a la transferencia de calor que ocurrirá entre una superficie y un fluido en movimiento cuando están a diferentes temperaturas. Otro modo de transferencia de calor se denomina radiación térmica. Todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas. Por tanto en ausencia de un medio, existe una transferencia neta de calor por radiación entre dos superficies a diferentes temperaturas [3].

2.2.1 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

A continuación se hace una revisión de algunos aspectos del fenómeno de transferencia de calor que tienen un papel importante en el funcionamiento de sistemas eco-tecnológicos y en el aprovechamiento pasivo de la energía solar en una edificación.

2.2.1.1 CONDUCCIÓN

La transferencia de calor por conducción, es la transferencia debida a la actividad molecular que ocurre básicamente a través de sólidos. Cuando las primeras moléculas se calientan, su energía en forma de calor se transfiere a las moléculas

vecinas. Cuando se aplica calor, por ejemplo, en un punto extremo de una barra metálica, aumenta la actividad molecular y la temperatura en el lugar de aplicación de calor, difundiéndose a través de éstas hasta que no se pueda transmitir más energía (en este caso, calor), llegando al equilibrio térmico.

El grado con el cual se transmite calor a través de un material depende de la diferencia de temperatura entre la fuente de calor y el material que es afectado por esta energía térmica, o entre uno y otros puntos de un mismo cuerpo o material, además de la conductividad térmica de éste, de su espesor y del área expuesta.

Cuando otro objeto es puesto en contacto físico con un material caliente el calor se transfiere directamente al objeto por conducción, mientras el flujo de calor se detiene cuando ambos objetos o cuerpos alcanzan la misma temperatura interna. A esto se le conoce como equilibrio térmico.

Esto se expresó en forma diferencial por la ley de Fourier de la conducción de calor en forma unidimensional, como

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (W) \quad (2.1)$$

donde k es la conductividad térmica del material, que es una medida de la capacidad del material para conducir el calor y dT/dx es el gradiente de temperatura, es decir, la pendiente de la curva de temperatura sobre un diagrama $T - x$ (ver figura 2.1). En general, la conductividad térmica de un material varía con la temperatura, pero se pueden obtener resultados suficientemente exactos al usar un valor constante para la conductividad térmica a la temperatura promedio del medio.

El calor es conducido en la dirección de la temperatura decreciente y, por lo tanto, el gradiente de temperatura es negativo cuando el calor es conducido en la dirección positiva de x . La razón del signo negativo en la ecuación 2.1 es para darle un sentido físico y para garantizar que la transferencia de calor en la dirección positiva de x sea una cantidad positiva [3].

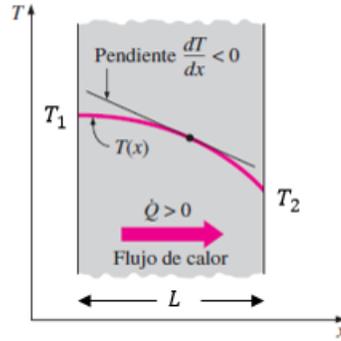


Figura 2.1: Conducción de calor a través de un cuerpo. Tomada de [3].

2.2.1.2 CONCEPTO DE RESISTENCIA TÉRMICA

Consideramos una pared plana de espesor L y conductividad térmica promedio k . Las dos superficies de la pared se mantienen a temperaturas constantes de T_1 y T_2 (como en la figura 2.1). Para la conducción unidimensional de calor en estado estacionario a través de la pared, tenemos $T(x)$. Entonces, la ley de Fourier de la conducción de calor para la pared se puede expresar como

$$\dot{Q}_{cond,pared} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (W) \quad (2.2)$$

donde la razón de la transferencia de calor por conducción $\dot{Q}_{cond,pared}$ y el área A de la pared serán constantes. Por lo tanto, dT/dx constante, lo cual significa que la temperatura a través de la pared varía linealmente con x . Es decir, la distribución de temperatura en la pared, en condiciones estacionarias, es una línea recta.

Al separar la variable en la ecuación anterior e integrar desde $x = 0$, donde $T(0) = T_1$, hasta $x = L$, donde $T(L) = T_2$, se obtiene

$$\int_{x=0}^L \dot{Q}_{cond,pared} dx = - \int_{T=T_1}^{T_2} kAdT$$

Al realizar integraciones y acomodando resulta

$$\dot{Q}_{cond,pared} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (W) \quad (2.3)$$

que es idéntica a la ecuación 2.2. La ecuación anterior se puede reacomodar para tener

$$\dot{Q}_{cond,pared} = \frac{T_1 - T_2}{R_{pared}} \quad (W) \quad (2.4)$$

donde:

$$R_{pared} = \frac{L}{kA} \quad (^\circ C/W) \quad (2.5)$$

es la resistencia térmica de la pared en contra de la conducción de calor o simplemente la **resistencia a la conducción** de la pared. La resistencia térmica de un medio depende de su configuración geométrica y de sus propiedades térmicas.

La ecuación antes dada para la transferencia de calor es análoga a la relación para el *flujo de corriente eléctrica* I , expresada como

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R_e} \quad (A) \quad (2.6)$$

donde $R_e = L/\sigma_e A$ es la resistencia eléctrica y $V_1 - V_2$ es la caída de voltaje a lo largo de la resistencia (σ_e es la conductividad eléctrica). Por lo tanto, la razón de la transferencia de calor a través de una capa corresponde a la corriente eléctrica, la resistencia térmica a la resistencia eléctrica y la diferencia de temperatura a la caída de voltaje en la capa.

2.2.1.3 CONVECCIÓN

La transferencia de calor a través de un fluido es por convección cuando se tiene un movimiento masivo de este último y por conducción cuando no existe dicho movimiento [3]. Cuando se aplica calor a un recipiente con agua, la porción de agua que se halla en contacto con el fondo del recipiente es calentada por conducción, se expande y se vuelve menos densa que el agua superior, por lo cual tiende a subir.

El movimiento del fluido favorece la transferencia de calor, ya que pone en contacto porciones más calientes y más frías de ese fluido, iniciando índices más altos de conducción en un gran número de sitios. Por lo tanto, la rapidez de la transferencia de calor a través de un fluido es mucho más alta por convección que por conducción. De hecho, entre más alta es la velocidad del fluido, mayor es la rapidez de la transferencia de calor.

La transferencia de calor por convección depende con intensidad de las propiedades viscosidad dinámica μ , conductividad térmica k , densidad ρ y calor específico c_p del fluido, así como de la velocidad del fluido V . También depende de la configuración geométrica y aspereza de la superficie sólida, además del tipo de flujo del fluido (laminar o turbulento)[3].

Es evidente que el fenómeno de la convección es complicado, sin embargo, la razón de transferencia de calor por este mecanismo es proporcional a una diferencia de temperatura y puede ser expresada de manera muy conveniente por la ley de Newton de enfriamiento como

$$\dot{q}_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad (W/m^2) \quad (2.7)$$

o bien,

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (W) \quad (2.8)$$

donde

h : coeficiente de transferencia de calor por convección, $W/m^2 \cdot ^\circ C$

A_s : área superficial de transferencia de calor, m^2

T_s : temperatura de la superficie, $^\circ C$

T_∞ : temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie, $^\circ C$

El coeficiente de transferencia de calor por convección h se puede definir como *la razón de transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido por unidad de área superficial, por unidad de diferencia en la temperatura.*

Estrictamente hablando, la convección existe en dos formas: natural y forzada. En la convección natural la velocidad de un fluido no es relevante para que se lleve a cabo la transferencia de calor, si no que la fuerza motriz de este fenómeno son los gradientes de densidad actuantes sobre un cuerpo, que originan flotabilidad y esto provoca corrientes “naturales”. Por otro lado, cuando la velocidad si es un factor importante en la transferencia de calor de un medio a otro, y ésta es originada por algo externo al medio, se le llama convección forzada [32].

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 [30].

2.2.1.4 RADIACIÓN

La transferencia de calor por radiación, es la transferencia de energía a través de ondas electromagnéticas. Este proceso, a diferencia de la convección, no requiere la presencia o intervención de un medio de transporte. Dado que la transferencia de energía por radiación ocurre dentro de un amplio espectro de longitud de onda,

se hará referencia a la radiación térmica como aquella que es emitida por cualquier cuerpo cuyas moléculas han sido excitadas por energía térmica [33].

La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica T_s (en *Kelvin* o *Rankine*) es expresada por la ley de Stefan-Boltzmann como

$$\dot{Q}_{emitida,máx} = \sigma A_s T_s^4 \quad (W) \quad (2.9)$$

donde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, o bien, $0.1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{R}^4$ es la constante de Stefan-Boltzmann.

La superficie idealizada que emite radiación a esta razón máxima se llama cuerpo negro y la radiación emitida por éste es la radiación del cuerpo negro. La radiación emitida por todas las superficies reales es menor que la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa como

$$\dot{Q}_{emitida} = \epsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (W) \quad (2.10)$$

en donde ϵ es la emisividad de la superficie. La emisividad cuyo valor está en el intervalo $0 \leq \epsilon \leq 1$, es una medida de cuán próxima está una superficie de ser un cuerpo negro, para el cual $\epsilon = 1$ [3].

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 [30].

2.2.2 ACONDICIONAMIENTO Y CONFORT HIGROTÉRMICO HUMANO

Los seres humanos tienen una debilidad inherente: necesitan sentirse cómodos. Quieren vivir en un ambiente que no sea ni caliente ni frío, ni muy húmedo ni muy seco. Sin embargo, la comodidad no se obtiene de manera sencilla dado que las necesidades del cuerpo humano y el clima no suelen ser muy compatibles. Para alcanzar comodidad es necesario luchar constantemente contra los factores que causan descontento, como temperaturas mayores o menores y humedades, altas o bajas. La tarea del ingeniero es ayudar a la gente a sentirse cómoda.

No es difícil que la gente descubra que no puede cambiar el clima en una región. Todo lo que puede hacer es cambiarlo en un espacio confinado, como una casa o un lugar de trabajo. En el pasado, esto se logró parcialmente mediante fuego y sencillos sistemas de calefacción interiores. Hoy día, los modernos sistemas de acondicionamiento de aire pueden calentar, enfriar, humidificar, deshumidificar, limpiar e incluso desodorizar el aire; en otras palabras, acondicionar el aire según las necesidades de las personas. Los sistemas de acondicionamiento de aire están diseñados para satisfacer las necesidades del cuerpo humano; en consecuencia, es fundamental comprender los aspectos termodinámicos del cuerpo.

Como cualquier otra máquina térmica, el cuerpo humano genera calor de desecho, que debe liberarse hacia el ambiente si el cuerpo va a continuar en operación. La tasa de generación de calor depende del nivel de la actividad. Para un hombre adulto promedio, es cercana a 87 W cuando duerme, 115 W cuando descansa o realiza trabajo de oficina, 230 W , cuando juega boliche y 440 W cuando realiza trabajo físico intenso. Los números correspondientes para una mujer adulta son casi 15% menores (debido al tamaño del cuerpo, no a su temperatura). Un cuerpo se sentirá cómodo en un ambiente en el cual pueda disipar este calor de desecho.

La transferencia de calor es proporcional a la diferencia de temperatura. En

consecuencia, en ambientes fríos un cuerpo perderá más calor del que normalmente genera, lo que produce una sensación de incomodidad. El organismo trata de disminuir el déficit de energía y para ello reduce la circulación de la sangre cerca de la piel (por eso se ve pálida), esto reduce la temperatura de la piel, que es de aproximadamente 34°C para una persona promedio y, por lo tanto, también la tasa de transferencia de calor. Una baja temperatura de la piel causa molestias. Las manos, por ejemplo, sienten dolor cuando la temperatura de la piel llega 10°C . Es posible reducir la pérdida de calor del cuerpo si se ponen barreras (ropa adicional, mantas, etc.) en la trayectoria del calor o si aumenta la relación de generación de calor dentro del cuerpo mediante ejercicio. Por ejemplo, la comodidad de una persona en reposo, vestida con ropa de invierno en un cuarto a 10°C , es más o menos igual al nivel de comodidad de una persona idéntica que hace trabajo moderado en un cuarto cuya temperatura se acerca a -23°C . O puede enconcharse y poner sus manos entre las piernas para reducir la superficie por la que escapa el calor [34].

En ambientes cálidos existe el problema opuesto: parece que no se disipa el suficiente calor del cuerpo, y se experimenta la sensación de estar dentro de un asador. La gente vestirá ropa ligera para facilitar que el calor salga del cuerpo y reducirá el nivel de actividad para disminuir la tasa de generación de calor de desecho en el cuerpo. También se enciende el ventilador para sustituir continuamente la capa de aire caliente que se forma alrededor del cuerpo como consecuencia del calor corporal por el aire más frío de las otras partes del cuarto. Cuando se hace trabajo ligero o se camina despacio, cerca de la mitad del calor producido por el cuerpo se disipa mediante la sudoración como calor latente, mientras que la otra mitad se disipa por convección, y la radiación como calor sensible. Cuando se descansa o se realiza trabajo de oficina, la mayor parte del calor (casi 70 %) se disipa en la forma de calor sensible, en tanto que cuando se hace trabajo físico intenso, la mayor parte del calor (cerca del 60 %) se disipa en forma de calor latente. El cuerpo ayuda sudando más. Cuando este sudor se evapora, absorbe calor latente del cuerpo y se enfría. Sin embargo, la transpiración no es muy útil si la humedad relativa del

ambiente es cercana al 100 %. La sudoración prolongada sin ninguna ingestión de fluidos producirá deshidratación y reducirá el sudor, lo que conduce a un aumento en la temperatura del cuerpo y a la insolación.

Otro factor importante que influye en la sensación de comodidad es la transferencia de calor por radiación entre el cuerpo y las superficies circundantes como paredes y ventanas. Los rayos del sol viajan por el espacio por radiación. En algunas partes del planeta se suelen utilizar hogueras como fuente de calor, incluso si el aire que hay por intermedio es bastante frío. De la misma manera, en un cuarto caliente puede notarse la sensación de incomodidad que causa el efecto del frío por las paredes y techos que se encuentran a una temperatura considerablemente menor. Esto se debe a la transferencia térmica directa entre el cuerpo y las superficies circundantes mediante radiación [35].

La comodidad del cuerpo humano depende de tres factores: la temperatura (bulbo seco), la humedad relativa y el movimiento del aire. La temperatura del ambiente es el indicio más importante de la comodidad. La mayor parte de la gente se siente cómoda cuando la temperatura del ambiente está entre 22 y 27°C. La humedad relativa también tiene un efecto considerable en el bienestar, pues influye en la cantidad de calor que un cuerpo puede disipar por evaporación. La humedad relativa es una medida de la capacidad del aire para absorber más humedad. La humedad relativa alta retarda el rechazo de calor por evaporación, y la humedad relativa baja lo acelera. La mayoría de la gente prefiere una humedad relativa de 40 a 60 por ciento.

El movimiento del aire también desempeña un papel importante en la comodidad humana. Elimina el aire caliente y húmedo que se forma alrededor del cuerpo y lo sustituye con aire fresco. En consecuencia, el movimiento del aire mejora el rechazo de calor tanto por convección como por evaporación. El movimiento del aire debe ser suficientemente intenso para eliminar el calor y humedad de la vecindad del cuerpo, pero al mismo tiempo debe ser apacible para no sentirlo. La mayoría de

la gente se siente bien si la velocidad del aire es de aproximadamente 15 m/min. El movimiento del aire a muy alta velocidad ocasiona incomodidad. Por ejemplo, un ambiente a 10°C con vientos de 48 km/h se siente tan frío como un ambiente a -7°C con vientos de 3 km/h debido al efecto de enfriamiento del cuerpo por el movimiento del aire. Otros factores que influyen en la sensación de comodidad son la limpieza del aire, el olor, el ruido y el efecto de radiación [34].

En resumen, se describe brevemente a continuación cada uno de los factores que intervienen en la sensación de bienestar del cuerpo humano:

- **Temperatura:** Principal indicio de comodidad para la mayor parte de las personas. El cuerpo humano tiene internamente una temperatura que varía entre 36.5 y 37°C. El equilibrio térmico del cuerpo consiste en mantener la temperatura dentro de esos rangos: si la temperatura aumenta o disminuye puede provocar lesiones graves, de tal modo que entre 40 y 45 grados se producen complicaciones de circulación y por encima de 41–42 puede llegar al estado de coma o colapso total.
- **Humedad:** La humedad regula la evaporación, por lo que desempeña un importante papel en las altas temperaturas, en las que la sudoración es uno de los mecanismos más importantes de enfriamiento. Sin embargo, existen límites extremos que pueden ser negativos: por debajo del 20 % de humedad, aumenta el peligro de infección por la sequedad de las mucosas; con temperaturas bajas, el aire muy seco aumenta el disconfort y en situaciones cálidas, cuando la humedad sobrepasa el 60 % y, sobre todo, el 80 %, la sensación de calor aumenta, ya que se produce el sudor, pero no evaporación, dando lugar al clásico bochorno o calor húmedo, bastante más inconfortable que el calor seco [35].
- **Velocidad del viento:** El movimiento del aire aumenta la disipación de energía por evaporación o convección, siempre que la temperatura de la piel sea inferior a la del aire. No obstante, cuando las temperaturas son superiores a 40°C, el viento aumenta la sensación de calor. La velocidad del aire más

confortable para el cuerpo humano oscila entre los 0.25 a 0.5 m/s en recintos acondicionados [36] y tal variación depende de la actividad que se lleve a cabo.

- **Radiación:** La temperatura corporal también se ve afectada en gran medida por el calor irradiado directamente por el sol y por objetos o superficies cercanos a temperaturas muy diferentes al cuerpo humano.

CAPÍTULO 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.

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

- **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 por ejemplo, considerar la densidad del aire en un cuarto como constante y considerar una superficie como adiabática.

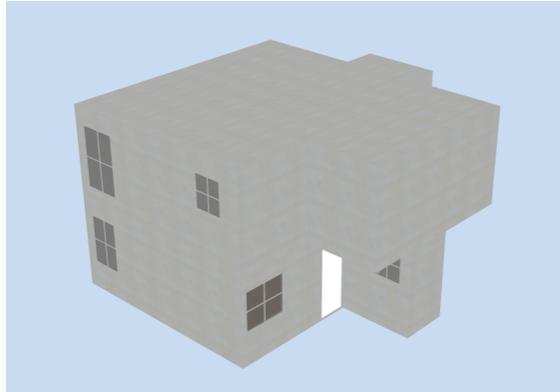
Debido a las ventajas antes mencionadas, en el presente estudio se utilizó la simulación computacional para evaluar el desempeño térmico y el ahorro de energía de una vivienda.

3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

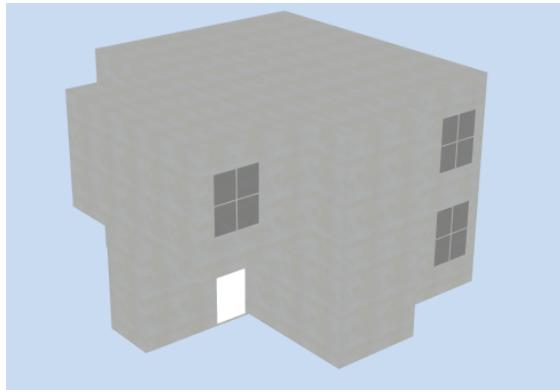
El presente estudio tiene como finalidad analizar el impacto que tienen distintas estrategias de eficiencia energética sobre el consumo de energía eléctrica de dispositivos de acondicionamiento de aire, pretendiendo mejorar las condiciones interiores de confort higrotérmico de un edificio habitacional, y al mismo tiempo, buscar disminuir el consumo de energía eléctrica derivado del uso de dispositivos de aire acondicionado. Para llevar a cabo dicho estudio se utilizó un software de diseño asistido por computadora, DesignBuilder, en conjunción con 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, el sombreado 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.

3.1.1 GEOMETRÍA

El edificio residencial de referencia utilizado es el que se tomó en cuenta para desarrollar la NOM-020-ENER-2011 [22]. Este edificio es una típica casa de dos pisos que pertenece a un conjunto horizontal. La figura 3.1 muestra la vista frontal y trasera de este edificio. La fachada principal está orientada al norte.



(a) Vista frontal.



(b) Vista posterior.

Figura 3.1: Edificio residencial de referencia, a) vista frontal y b) vista posterior.

El área superficial total es de 89.2 m^2 . La temperatura de set point para los equipos HVAC es de 25°C para refrigeración y 18°C para la calefacción. En la vivienda se considera que viven 4 personas. Las ganancias de calor derivadas de electrodomésticos son despreciadas, puesto que éstas serían constantes y no se verán afectadas por las estrategias que se buscarán aplicar en la vivienda. Los sistemas

de aire acondicionado operan todo el año, de lunes a viernes de 01:00–8:00 h y de 15:00–24:00 h, y sábados y domingos de 01:00–24:00 h. En este edificio, los muros pueden tener más de 1 ventana, y las dimensiones de éstas pueden variar. En la tabla 3.1 se muestra un resumen general de las características del edificio de referencia, así como los parámetros y sus valores.

Descripción	Valor
Número de plantas	2
Ciudad	Monterrey
Área total	89.2 m ²
Altura entre plantas	2.5 m
Proporción ventana-pared	Diferente para cada muro
Índice de ventilación	–
Índice de infiltración	2 renov/h
Horas de operación	Definidas
Set-point Refrigeración	25°C
Set-point Calefacción	18°C
Número de personas	4
Cargas de aire acondicionado	Lun-Vier (1-8) y (15-24)hrs; Sáb y Dom (1-24) hrs
Acristalamiento	Vidrio claro, 4 mm

Tabla 3.1: Descripción del edificio residencial, valores y parámetros.

La edificación no posee una relación de ventana-muro definida (WWR, por su traducción en inglés, *Window-Wall Ratio*). Cada orientación tiene un diseño diferente de ventana. La tabla 3.2 describe la distribución de las aperturas y sus dimensiones. La fachada frontal tiene cuatro ventanas; la fachada posterior tiene tres ventanas y una puerta de madera. El lado derecho de la vivienda tiene una ventana, junto a la puerta principal. Ambas puertas están hechas de madera.

Fachada	Descripción	Material	Área [m ²]	k [W/m ² K]
Frontal	Puerta principal	Madera	1.785	2.04
	Ventana 1	Vidrio	2.16	5.95
	Ventana 2	Vidrio	0.90	5.95
	Ventana 3	Vidrio	1.545	5.95
	Ventana 4	Vidrio	0.90	5.95
Posterior	Puerta posterior	Madera	1.785	2.04
	Ventana 5	Vidrio	1.68	5.95
	Ventana 6	Vidrio	1.68	5.95
	Ventana 7	Vidrio	1.80	5.95
Laterales	Ventana 8	Vidrio	1.62	5.95
	Ventana 9	Vidrio	0.62	5.95

Tabla 3.2: Descripción de las aperturas de la vivienda.

3.2 ZONAS TÉRMICAS DE MÉXICO

Las *zonas térmicas*, que comúnmente se les refiere como “clima”, se definen como el promedio de las condiciones atmosféricas durante un período prolongado de tiempo sobre una región relativamente grande. El clima en México es muy variado, más del 50 % de las regiones se consideran cálidas, y es en donde existen los consumos más altos de energía eléctrica, debido a la operación de dispositivos de acondicionamiento de aire. Los climas de México son diversos. De acuerdo con el INEGI, los climas en México se pueden clasificar por la temperatura (frío y templado) y humedad (húmedo, subhúmedo, seco y muy seco) [37].

En la figura 3.2 se muestra el mapa de la República Mexicana con la distribución de las diferentes zonas térmicas.

Esta clasificación de zonas térmicas tiene equivalencias con respecto a la clasificación con base a Grados-Día y la clasificación internacional (Clasificación Köppen),

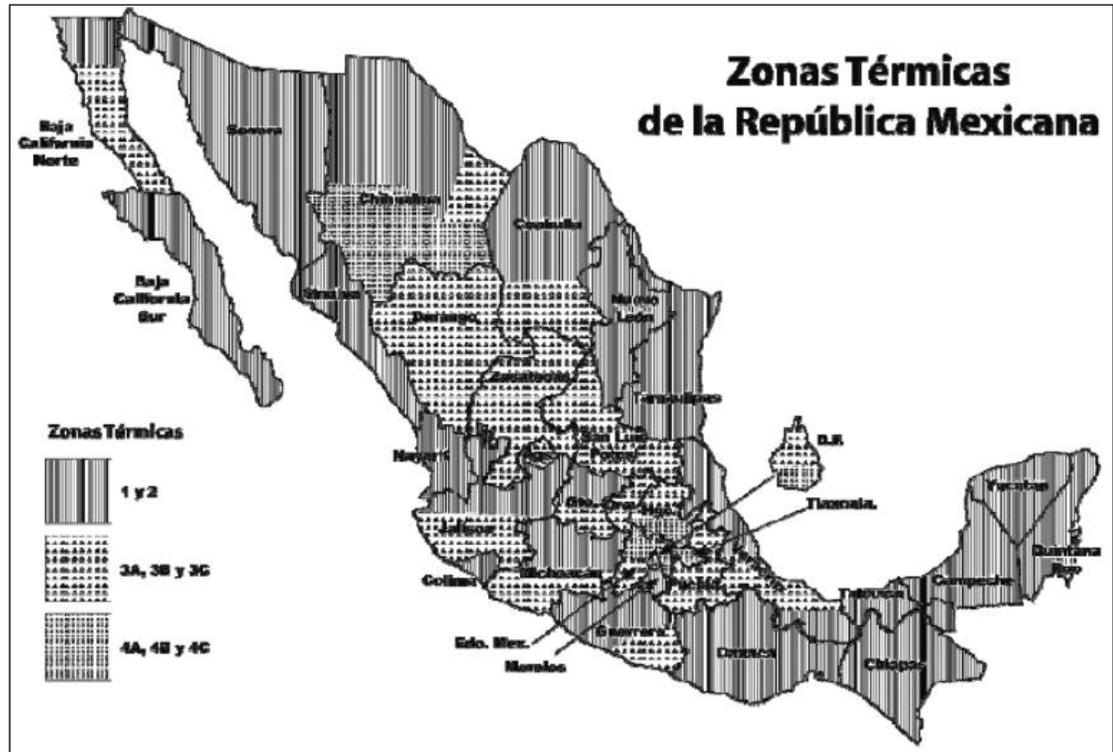


Figura 3.2: Mapa con las zonas térmicas de la República Mexicana [4]

según se muestra en la tabla 3.3.

Zona térmica	Clasificación con base en Grados-Día	Clasificación climática Internacional (Clasificación Köppen)
1	$5\,000 < \text{GDR } 10^{\circ}\text{C}$	Aw, BWh
2	$3\,500 < \text{GDR } 10^{\circ}\text{C}$	Cfa, BWh
3A y 3B	$2,500 < \text{GDR } 10^{\circ}\text{C} \leq 3,500$ $\text{GDC } 18^{\circ}\text{C} \leq 3,000$	Cfa, BSk / BWh / H
3C	$\text{GDC } 18^{\circ}\text{C} \leq 2,000$	Cs
4A y 4B	$\text{GDR } 10^{\circ}\text{C} \leq 2,500$ $\text{GDC } 18^{\circ}\text{C} \leq 3,000$	Cfa / Dfa, BSk / BWh / H
4C	$2,000 \text{ GDC } 18^{\circ}\text{C} \leq 3,000$	Cfb

Tabla 3.3: Equivalencia de las zonas térmicas.

Los grados días se definen, según la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de

la Energía [38], como la diferencia entre la temperatura exterior en un intervalo de tiempo y una temperatura de referencia. Bajo esta definición se indica la necesidad de climatizar el ambiente en una localidad, ya sea calefacción y/o refrigeración. Según el intervalo de tiempo usado da por resultado la definición de grados día para un mes o un año. Para propósitos de definir la zona climática, se manejan los grados días de calefacción referidos a 65°F (18°C) y de refrigeración a 50°F (10°C).

3.2.1 TEMPERATURA AMBIENTE MEDIA ANUAL

La figura 3.3 presenta la gama de temperatura ambiente. El ambiente promedio anual de temperaturas en el país es de entre 5°C (azul) a 35°C (rojo). Los estados con altas temperaturas anuales desde 23 a 26°C o superior a 26°C se encuentran en las costas del noreste, este y sureste. Los estados con temperaturas medias anuales entre 14 a 20°C se encuentran en el centro del país y los estados con temperaturas más bajas que los 14°C se encuentran también en el centro del país (Ciudad de México, Estado de México, Puebla, Hidalgo).

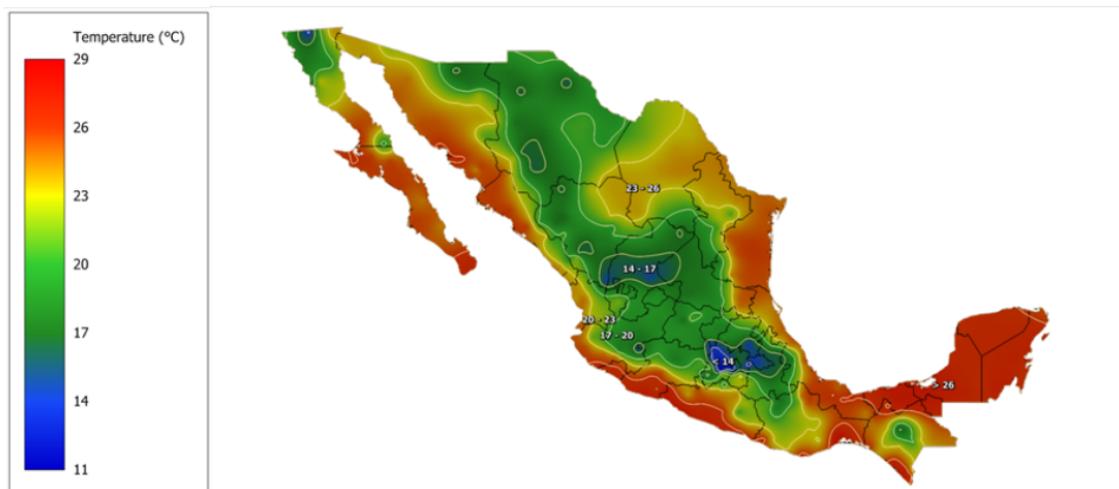


Figura 3.3: Temperatura ambiente media anual en México [5].

3.2.2 INFORMACIÓN GENERAL DE LA CIUDAD DE MONTERREY, NUEVO LEÓN.

Monterrey es la capital y la ciudad más grande del estado de Nuevo León. La ciudad es una densa y extensa zona urbana. El área metropolitana de Monterrey cuenta con 1,135,512 habitantes, con una agrupación regional de cerca de 9 municipios con una población aproximada de 4,150,000 habitantes en un área de 6.680 km². Monterrey es la tercera ciudad más poblada de México. Se encuentra en 25.7°Norte 100.3°Oeste y una elevación de 550 metros. Monterrey tiene un clima semi-árido. Su clima en primavera y otoño es templado y caliente en el verano. El promedio más alto en agosto es de 35°C y la mínima media es de 23°C. Los inviernos son suaves, la temperatura media más alta en enero es de 20°C y la mínima media es de 8°C. Las temperaturas bajo cero son raras. La humedad relativa promedio es de 62%. Las precipitaciones son escasas, pero más prominentes durante el verano.

3.3 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. 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, considerando ventilación, iluminación, y sistemas de refrigeración y calefacción.

La formulación de la solución comienza con un balance de calor por zona del edificio, como lo establece la ecuación (3.1). 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.

$$c_a \frac{dT_a}{dt} = \sum_{i=1}^N \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superf.}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zona}} \dot{m}_i c_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} c_p (T_\infty - T_z) + \dot{Q}_{sis} \quad (3.1)$$

donde:

$c_a \frac{dT_a}{dt}$: 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_a : $\rho_a c_p c_T$,

c_p : Calor específico del aire en la zona,

c_T : Multiplicador de capacidad calorífica sensible.

De manera análoga al balance de calor por zona, EnergyPlus utiliza el balance de masa establecido por la ecuación (3.2) con la finalidad de calcular el intercambio de humedad que existe en cada zona del edificio.

$$\rho_a V_z C_w \frac{dW_z}{dt} = \sum_{i=1}^N k g_{agua} + \sum_{i=1}^{N_{superf.}} A_i h_{mi} \rho_{az} (W_{si} - W_z^t) + \sum_{i=1}^{N_{zona}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z^t) + \dot{m}_{inf} (W_\infty - W_z^t) + \dot{m}_{sis} (W_{sup} - W_z^t) \quad (3.2)$$

donde:

$\rho_a V_z C_w \frac{dW_z}{dt}$: Tasa de cambio de la 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 diversos 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 [29, 30, 39, 40].

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 [30].

En conducción de calor, las funciones de transferencia son un método eficiente para calcular los flujos de calor de la superficie ya que eliminan la necesidad de conocer las temperaturas y los flujos dentro de la superficie. Sin embargo, la serie de la función de transferencia se vuelve progresivamente más inestable conforme el paso de tiempo disminuye.

$$q''_{ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ki,t-j\delta} \quad (3.3a)$$

$$q''_{ko}(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ko,t-j\delta} \quad (3.3b)$$

Las ecuaciones (3.3a) y (3.3b) estipulan que el flujo de calor en cualquiera de las caras de la superficie de cualquier elemento genérico del edificio está linealmente relacionado con las temperaturas en pasos de tiempo anteriores y actuales, tanto en la superficie interior y exterior, así como algunos de los valores de flujo anteriores en la superficie interior.

3.4 NOM-020-ENER-2011

La NOM-020-ENER-2011 representa el estándar de eficiencia energética en edificaciones, particularmente en la envolvente de edificios para uso habitacional. Mediante su aplicación se promueve reducir las ganancias de calor en edificaciones y así disminuir la carga térmica para los sistemas de acondicionamiento de aire.

Techo			
Parte	Porcentaje del área total (%)	Coefficiente Global de Transferencia de Calor K (W/m^2K)	Coefficiente de Sombreado CS
Opaca	100	Apéndice	—
Transparente	0	—	—
Paredes			
Fachada opaca	90	Apéndice	—
Fachada transparente	10	5.319	1
Colindancia opaca	100	Apéndice	—

Tabla 3.4: Especificaciones para los componentes de la envolvente establecidas en la NOM-020-ENER-2011 [6].

3.4.0 CARACTERÍSTICAS DEL EDIFICIO HABITACIONAL DE REFERENCIA DE LA NOM-020-ENER-2011

Se entiende por edificio para uso habitacional de referencia a aquel que considera las especificaciones para las componentes de la envolvente mostradas en la tabla 3.4, conservando la misma orientación, las mismas condiciones de colindancia y las mismas dimensiones en planta y elevación del edificio para uso habitacional proyectado (el edificio para uso habitacional que se pretende construir).

Según la norma, el techo debe ser 100 % opaco, el coeficiente de global transferencia de calor varía según la ubicación geográfica del recinto (consultar apéndice 6).

Por otro lado, en las paredes, la parte opaca debe ocupar un 90% del área total, mientras que la parte transparente un 10%, esto último refiriéndose al área

que ocupan las ventanas. El valor de K de la fachada transparente ($5.319 W/m^2K$) está predeterminado por la norma. Además, no se toma en cuenta la ganancia de calor a través del piso, debido a que se supone que se encuentra sobre el suelo [6].

Lo anterior y los valores de los coeficientes globales de transferencia de calor son los que se utilizarán para construir el escenario de la norma, siendo introducidos en EnergyPlus con el fin de establecer puntos de comparación y discutir resultados.

3.5 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 inter-

polación de los valores de radiación mensuales es del 9%, y para la temperatura se han encontrado desviaciones de 1.5°C [41].

En la tabla 3.5 se muestra un comparativo entre las temperaturas medias normales proporcionadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) [42] y las obtenidas mediante el software Meteonorm para la ciudad de Monterrey. La diferencia porcentual promedio que resulta de dicha comparación es de 0.54%.

Período	Temperatura media normal	Temperatura media normal
	Datos del SMN	Datos de Meteonorm
	[°C]	[°C]
Enero	15.9	15.8
Febrero	17.5	17.9
Marzo	20.9	21.5
Abril	24.4	24.8
Mayo	27.2	27.5
Junio	28.9	29.2
Julio	28.8	29.0
Agosto	29.3	29.1
Septiembre	26.4	26.4
Octubre	23.4	23.2
Noviembre	19.0	19.0
Diciembre	15.3	15.2
Anual	23.1	23.2

Tabla 3.5: Comparativa de la temperatura media normal mensual SMN vs. Meteonorm, para Monterrey, N.L.; datos generados en los años 2000-2010.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 EL CASO DE REFERENCIA

Un experimento es un cambio en las condiciones de operación de un sistema o proceso, que se hace con el objetivo de medir el efecto del cambio sobre una o varias propiedades del producto o resultado [43]. 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 cualquier implementación realizada en nuestro fenómeno de interés [30].

4.1.1 DEFINICIÓN DEL CASO BASE

En el presente trabajo se definió una vivienda de referencia con la finalidad de analizar el efecto que presentan diversas estrategias empleadas para mejorar la eficiencia energética 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 muestran a continuación:

1. **Lugar:** La ubicación elegida para el desarrollo de este trabajo fue Monterrey, Nuevo León. Los datos geográficos de dicha ciudad fueron introducidos al software DesignBuilder para poder obtener resultados en función de la trayectoria que sigue el Sol en tales lugares.
2. **Orientación:** Se evaluaron distintas orientaciones de la vivienda para determinar la ubicación de la fachada donde el consumo de energía eléctrica es el menor. La orientación consiste en ubicar la fachada principal de la vivienda perpendicularmente hacia cada uno de los puntos cardinales: norte, sur, este y oeste. En base a los resultados que más adelante se discutirán, se concluye que la mejor orientación para tales propósitos es hacia el sur y, a partir de ahí, las demás estrategias de climatización serán implementadas con esta orientación.
3. **Materiales:** Se consideró una envolvente conformada por sistemas tradicionales definidos como muros y losas, conteniendo al exterior estuco, enseguida concreto y al interior yeso.
4. **Aislamiento:** No se considera el uso de aislamiento térmico en el caso de referencia puesto que es una de las estrategias que se pensó evaluar.
5. **Ocupación:** Se considera la presencia de cuatro personas dentro de la vivienda, con una programación de ocupación similar a un perfil de día laboral, es decir, tomando en cuenta que las personas duermen, comen y conviven en ciertos horarios tanto entre semana, como los fines de semana.
6. **Sombreado:** No se considera ninguna tipo de sombreado en la vivienda, ya sea sombreado proveniente por alguna configuración adosada de la vivienda o que las ventanas posean persianas o aleros.
7. **Acristalamiento:** No se considera que las ventanas posean alguna especie de configuración térmicamente eficiente. Son ventanas sencillas transparentes y

cuentan con 4 mm de espesor, de áreas y tamaños variables en cada fachada de la vivienda.

8. **Ventilación:** Se considera que los sistemas de aire acondicionado funcionan en base a la programación de ocupación de las personas dentro de la vivienda con el propósito de evaluar cómo se modifica el consumo de energía con cada modificación estratégica implementada en la vivienda. En algunos casos, estos sistemas se desprecian en la simulación con el objetivo de explorar el efecto de la ventilación natural y sus efectos sobre el consumo energético.
9. **Enseres domésticos:** Tampoco se considera el impacto del consumo de energía de estas aplicaciones domésticas puesto que no se verán afectadas por las estrategias de climatización implementadas, convirtiéndolas en un factor irrelevante para la evaluación del desempeño del consumo de energía eléctrica (valor constante).

4.2 ORIENTACIÓN

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. La elección de una orientación adecuada depende de factores como el clima del lugar, de la trayectoria del Sol y la posición y tamaño de las ventanas. Por ejemplo, en climas muy fríos lo que se buscaría es colocar la vivienda de manera que la radiación del Sol penetre la vivienda con mayor facilidad a través de las ventanas, disminuyendo la carga térmica que tienen que combatir los equipos de calefacción. Por otra parte, en climas cálidos, la opción más recomendable sería tratar de colocar ventanas en las fachadas con menor exposición a la radiación solar, de esta forma

disminuiría significativamente el consumo de energía eléctrica por el uso de sistemas aire acondicionado en la vivienda.

Los resultados de las distintas orientaciones de la vivienda del caso base se pueden observar a continuación en la figura 4.1.

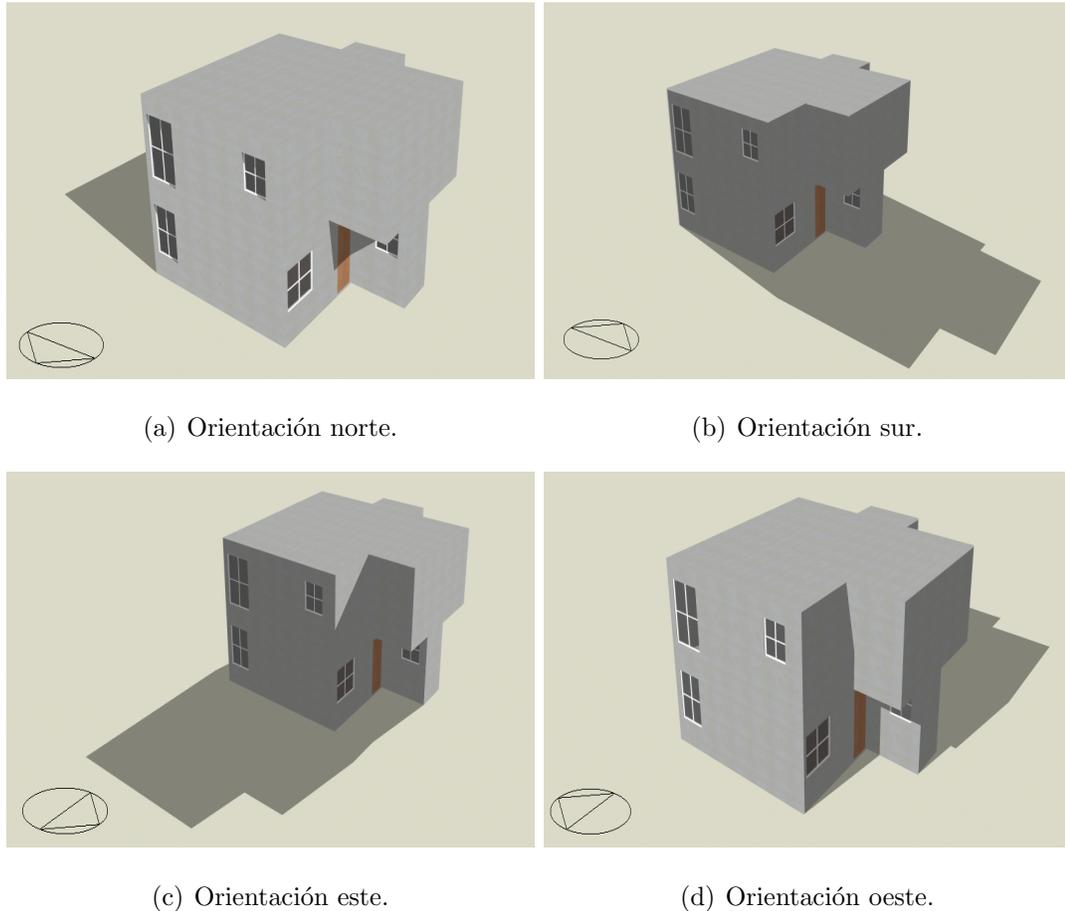
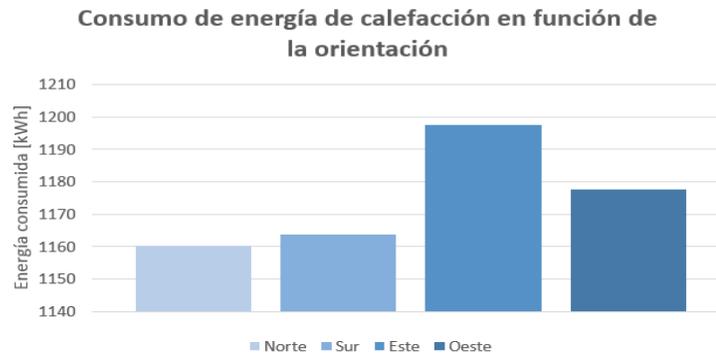
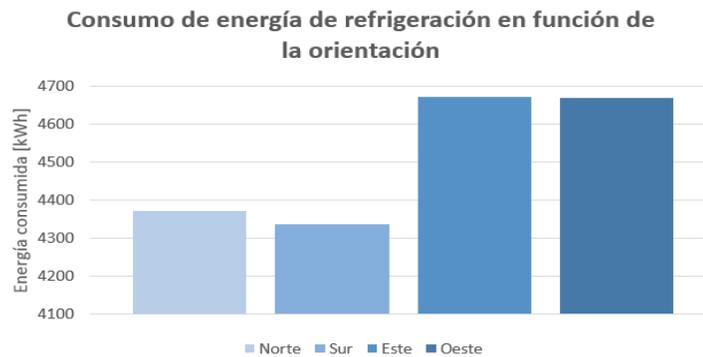


Figura 4.1: Vivienda orientada cardinalmente hacia el a) norte, b) sur, c) este y d) oeste. Las sombras mostradas pertenecen a una aproximación de la posición del Sol a las 16:00 hrs, un 15 de julio.

Según los resultados para la ciudad de Monterrey, Nuevo León, mostrados en la figura 4.2, las orientaciones que reportan el menor consumo de energía, tanto para el uso de calefacción y refrigeración, son las orientaciones norte y sur, reduciendo el consumo un 8% respecto a las orientaciones este y oeste. Los resultados reportados concuerdan con la literatura, como por ejemplo en el trabajo de Daniel Solís



(a) Resultados de Calefacción.



(b) Resultados de Refrigeración.

Figura 4.2: Consumo de energía eléctrica para a) calefacción y b) refrigeración en función de la orientación de la vivienda.

[23], donde analizan distintas posiciones de la vivienda y además estudian diferentes técnicas de sombreado y se llegó a la conclusión de que los ahorros de energía más favorables generados en la vivienda provenían a partir de las orientaciones norte y sur. Tener la vivienda orientada de esta manera, en conjunto con otras estrategias de climatización, favorece significativamente el ahorro de energía eléctrica consumida dentro de la vivienda. Cabe recalcar que una orientación adecuada va de la mano con el tipo de clima, la trayectoria del Sol respecto a la vivienda y la razón ventana–muro en cada fachada.

Hablando del acristalamiento, la posición de las ventanas en la vivienda es clave para desarrollar estrategias de ahorro de energía. En este caso, se puede observar en la figura 4.3 que la ganancia de calor a través de las ventanas es significativa-

mente mayor cuando la vivienda está orientada perpendicularmente hacia los puntos cardinales este y oeste, puesto que están expuestas a la radiación del sol. Con esto se justifica relativamente el incremento de carga térmica generada dentro de la vivienda en un 20 %, causando que los equipos de acondicionamiento de aire operen por lapsos de tiempo más prolongados para cubrir las necesidades de confort higrotérmico de las personas. Esto no quiere decir que se tenga que evitar colocar ventanas en las orientaciones mencionadas a toda cosa, ya que, como ya se ha mencionado, hay casos donde lo que se busca es disminuir el tiempo de operación de los equipos de calefacción (en regiones de climas fríos por ejemplo) y así contar con otra estrategia más para ahorrar energía.

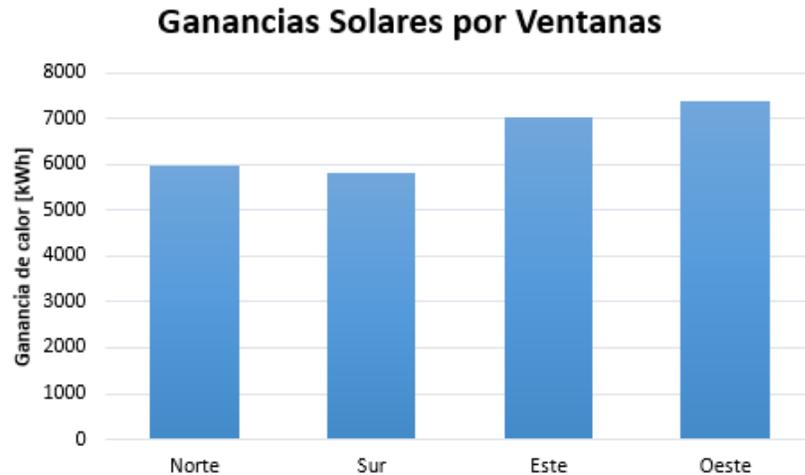


Figura 4.3: Ganancias de calor a través de las ventanas por orientación.

A partir de aquí, los resultados de las estrategias que se reportarán estarán implementadas en la orientación sur, con el fin de reducir la cantidad de simulaciones, tomando en cuenta que ya se ha demostrado que la vivienda consume menos energía cuando está orientada hacia el sur.

4.3 AISLAMIENTO

El uso de aislamiento térmico es una de las estrategias más comunes si no es que la mejor de todas para combatir el incremento de carga térmica dentro de un recinto, debido a que se adapta fácilmente a cualquier sistema constructivo y es relativamente sencilla su instalación, convirtiéndola en una solución extremadamente rentable y al mismo tiempo, genera condiciones de confort dentro de la vivienda con relativa facilidad. Sin embargo, en el mercado existen muchas configuraciones, presentaciones, materiales y espesores, obligando a elegir de manera adecuada aquellos cuyo funcionamiento sea el óptimo para el desempeño térmico de la vivienda. De esta forma, en esta sección se analizará qué tanto espesor realmente se necesita en una vivienda para ahorrar energía de la manera más eficiente y rentable posible.

Los diferentes espesores que se evaluaron van de cero hasta cinco pulgadas, con variaciones de una pulgada. En las evaluaciones, el aislante se colocó en todos los muros de la vivienda, como puede observarse en la imagen 4.4, para poder determinar el máximo ahorro energético. En la práctica esto no sucede. Por lo general se aíslan las zonas donde se acondiciona el aire, puesto que por lo general, invertir en aislamiento térmico resulta relativamente costoso.

Se posicionó el aislante de esa manera ya que se ha encontrado que de esta forma se prolongan los periodos de confort derivados del acondicionamiento de aire, retrasando la difusión de calor del exterior hacia la vivienda y por ende, se alcanzan las temperaturas consigna de confort con más rapidez [30].

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones se observan en la figura 4.5. En base a lo que se puede extraer de la gráfica, podría decirse que la recomendación general para un ahorro significativo y rentable se obtiene al instalar tan solo 1 pulgada de aislante térmico en todos los muros, reportando un 22 % menos consumo de energía para refrigeración y un 32 % menos energía para calefacción.

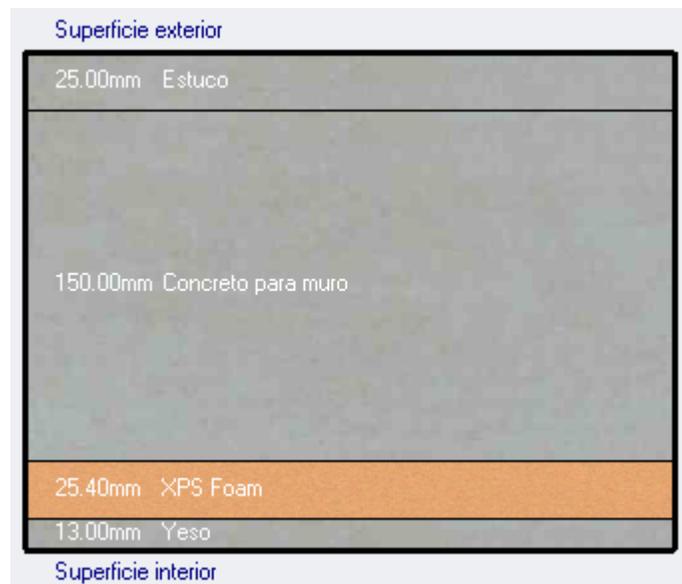


Figura 4.4: Posición del aislante térmico en la envolvente (imagen generada y extraída del software DesignBuilder.)

Siendo técnicamente estrictos, se puede observar que entre más espesor de aislante se tenga más serán los ahorros de energía. Sin embargo, emplear 5 pulgadas de aislamiento térmico no resulta rentable en lo absoluto si consideramos la inversión y el retorno de inversión derivado por el uso y aplicación del mismo. Incrementar el espesor de aislante en 1 pulgada a partir de la recomendación anterior solamente produce un ahorro de energía aproximado del 3% en promedio, justificando lo dicho anteriormente acerca de la rentabilidad de la implementación de esta estrategia, ya que el costo de aplicación se eleva considerablemente y dificultaría mucho la inversión para llevar a cabo el proyecto. Ahora bien, podría darse la excepción donde aplicar dos pulgadas de aislante sea también un escenario beneficioso económicamente; todo depende de la ubicación del proyecto (climas áridos extremos como la zona noroeste de la República Mexicana).

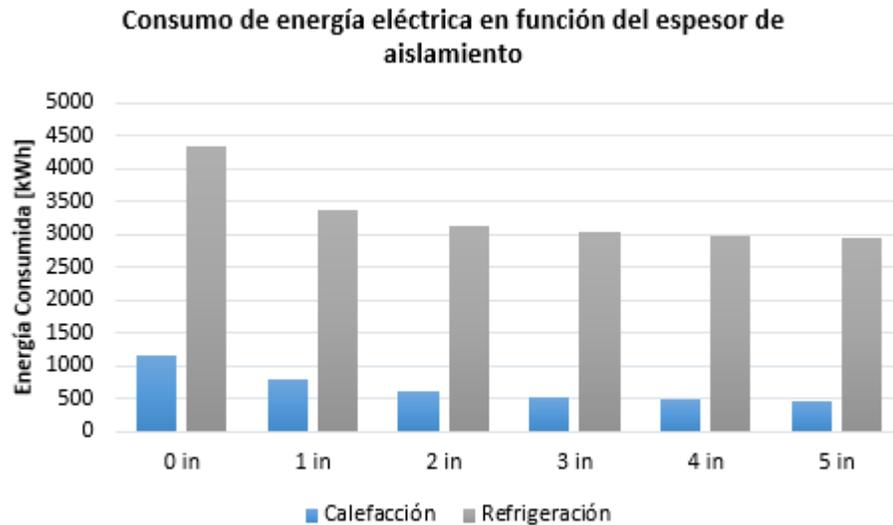


Figura 4.5: Energía consumida dentro de la vivienda en función del espesor de aislamiento.

4.4 SOMBREADO

Con sombreado nos referimos al uso de alguna especie de estructura que proporcione sombra a la ventana de la vivienda. Los distintos tipos de estructuras utilizadas para el sombreado se muestran en la figura 4.6.

Se utilizaron algunas modificaciones aparte de las mostradas en la figura 4.6 que consisten en aumentar el largo de la proyección de éstas para aumentar el área sombreada sobre la vivienda (por ejemplo, el “voladizo simple” mide 50 cm, pero también se evaluaron con 1 y 2 metros de longitud; ver figura 4.7).

Los resultados del uso de este tipo de dispositivos se muestran a continuación.

Según la figura 4.8, en cuanto a temas de refrigeración, aplicar voladizos o lamas a las ventanas tiene un ahorro similar al que proporciona una buena orientación, alrededor del 7% en su caso más favorable (*lamas con aletas laterales 0.5 m*) con respecto al caso base. Sin embargo, considerando que las simulaciones se hicieron

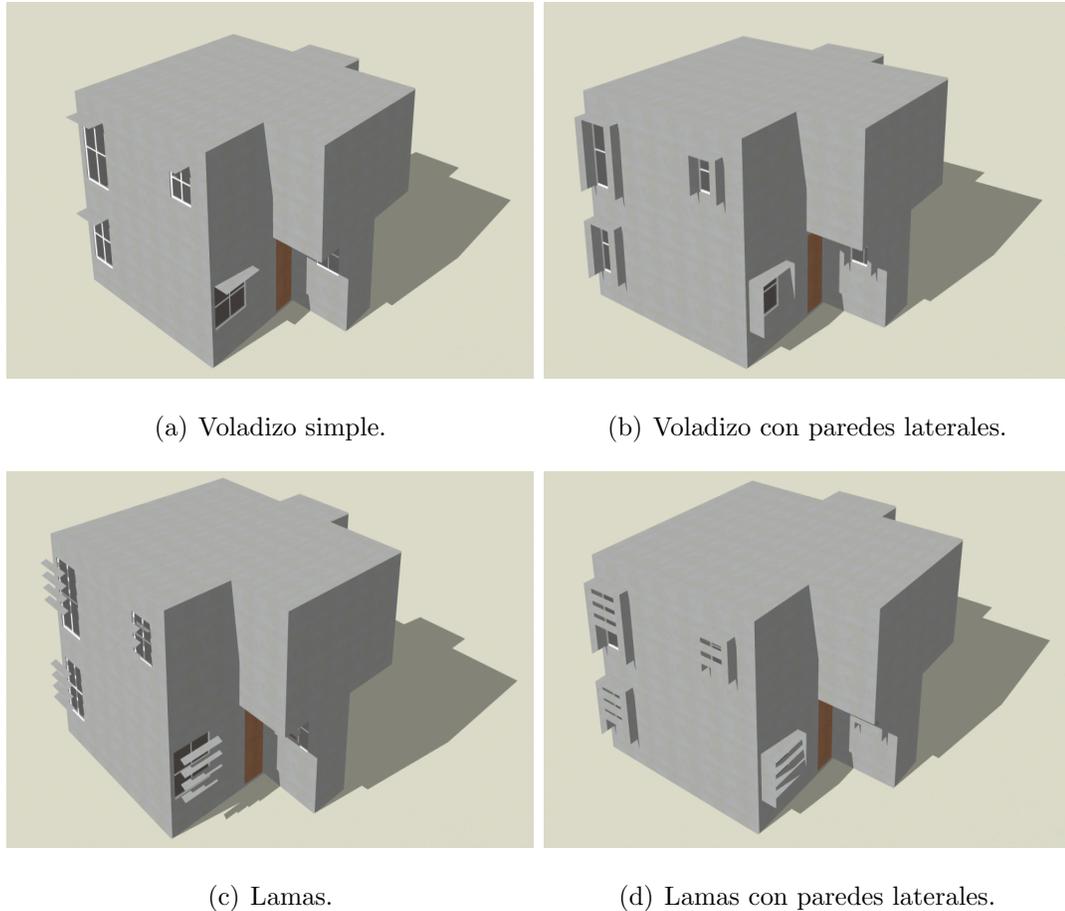


Figura 4.6: Ejemplos de estructuras que proporcionan sombreado a las ventanas de la vivienda.

sobre la orientación que más ahorro energético reportó, el beneficio real asciende hasta casi un 15 %, que, tomando en cuenta que el clima que predomina en Monterrey es cálido-seco con altas temperaturas durante el verano, representa una cifra significativa puesto que el uso de aparatos de aire acondicionado es muy común en éstas zonas climáticas.

Por otro lado, en cuanto a la calefacción, implementar éstas estrategias no tiene beneficios en Monterrey (o en climas cálidos-secos); el consumo de energía aumenta en promedio un 100 %. Esto se debe a que en invierno la principal fuente de calor proviene directamente de la radiación solar y su trayectoria se ve obstaculizada por la instalación de estos dispositivos generadores de sombra. Esto puede observarse

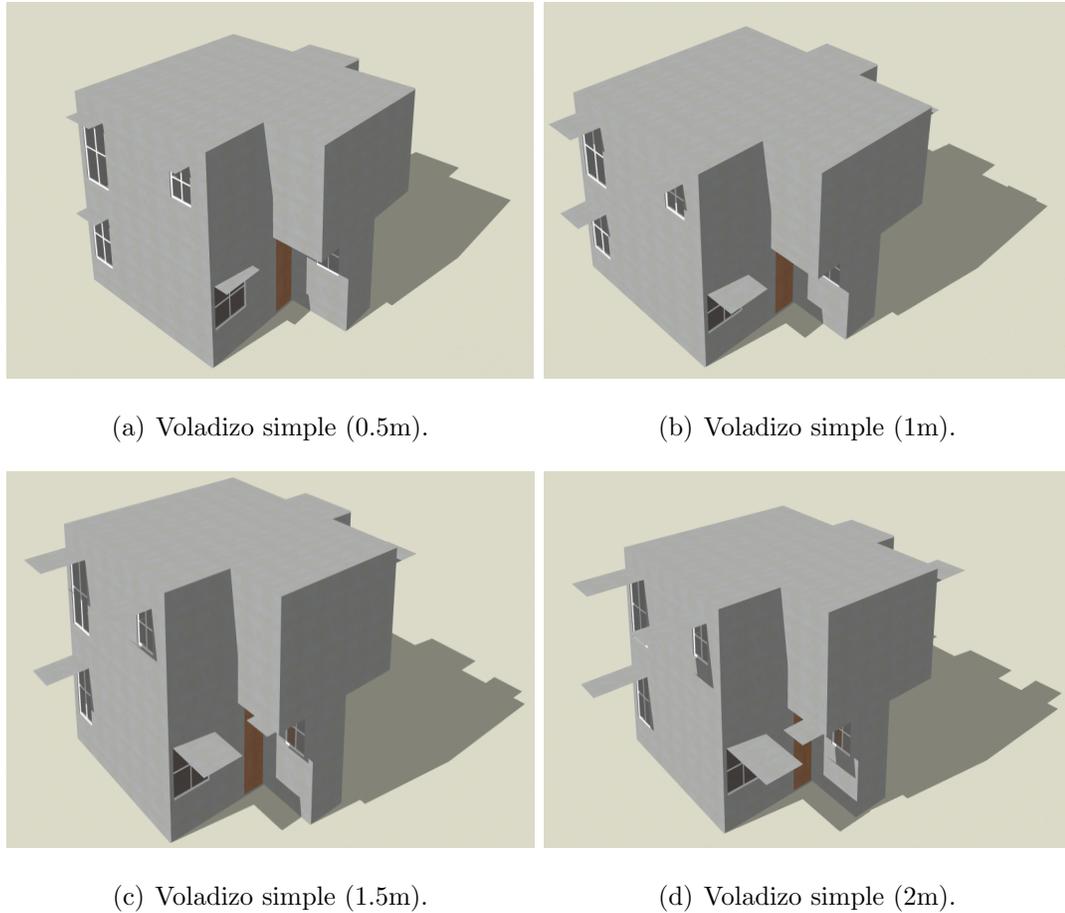
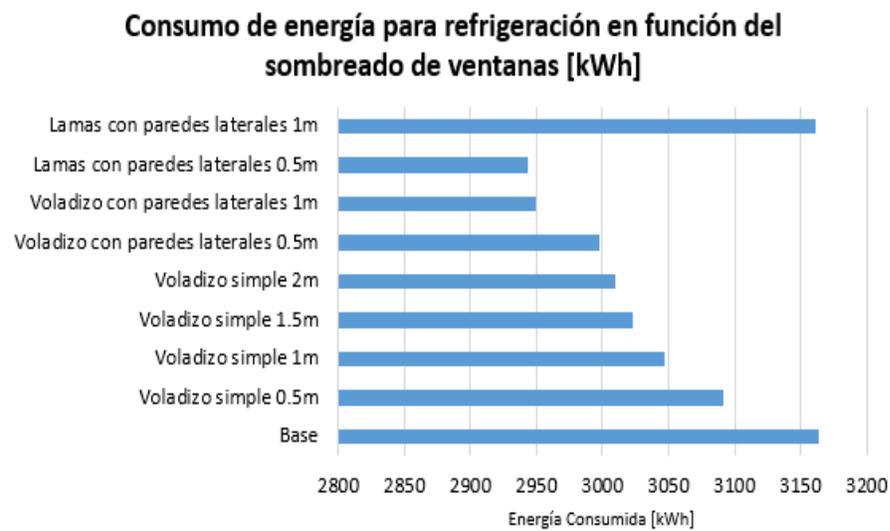


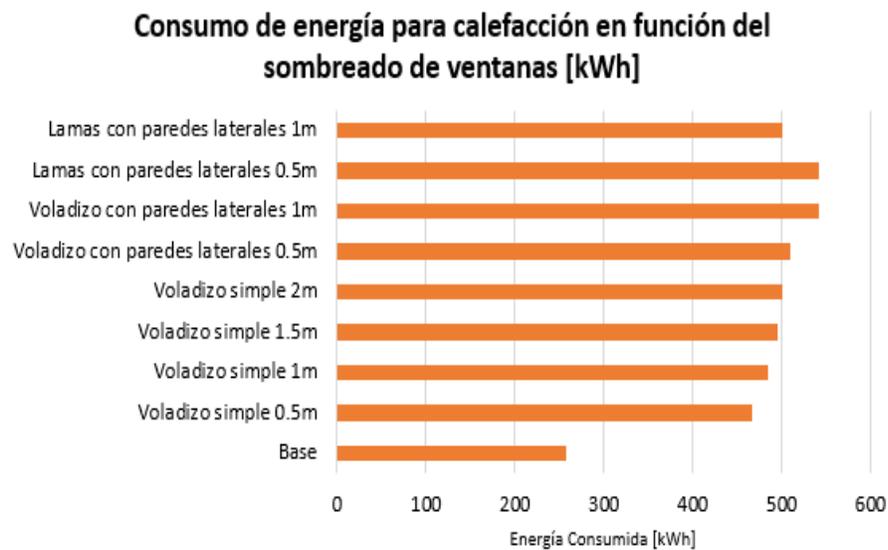
Figura 4.7: Distintas configuraciones evaluadas del voladizo simple.

en la gráfica 4.9, donde las adecuaciones como los voladizos y las lamas para la generación de sombra en las ventanas disminuye la ganancia de calor en un 20 y 48 % respectivamente.

Sin embargo, puesto que la energía empleada para usos de calefacción es aproximadamente tres veces menor a la de refrigeración (según los resultados obtenidos hasta ahora) y poco común el uso de estos equipos, resulta relativamente aconsejable el uso de voladizos y lamas. Por supuesto, repitiendo, estos resultados solamente son válidos para zonas de clima cálido-seco, como Monterrey, Nuevo León y demás zonas al norte del país.



(a) Consumo de energía eléctrica para refrigeración.



(b) Consumo de energía eléctrica para calefacción.

Figura 4.8: Consumo de energía eléctrica para a) refrigeración y b) calefacción en función del sombreado de ventanas de la vivienda.

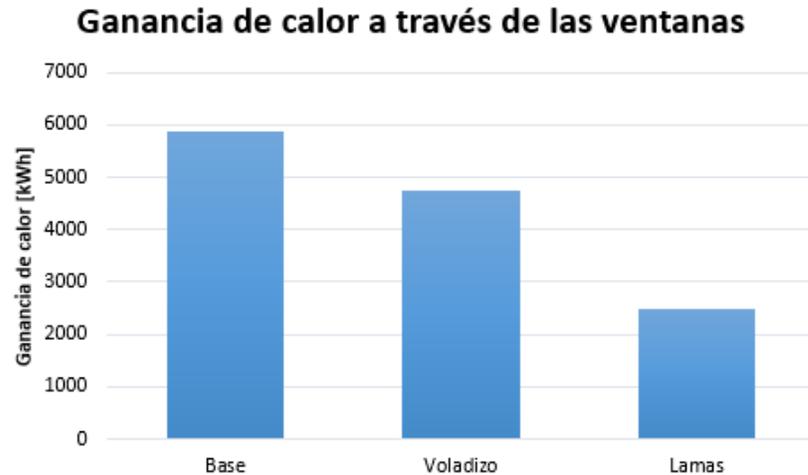


Figura 4.9: Diferencia de ganancia de calor por las ventanas por la implementación de dispositivos generadores de sombra.

4.5 VENTANAS

La parte energética más importante en las ventanas es la radiación solar, la cual es ventajosa en invierno e indeseable en verano. Se requiere importante atención en esta sección de la envoltura del recinto debido a que los vidrios tienen el menor valor-R de todos los componentes que forman la fachada. Otras características que son aprovechables por parte de las ventanas son la iluminación y la ventilación natural. Entre las partes que conforman una ventana el vidrio es la principal. La cantidad de iluminación, calidad de la luz y la cantidad de calor solar que entra al recinto, son propiedades que están totalmente ligadas con las características del vidrio que se utiliza y que se reflejan en el confort térmico y visual.

Existen diversos indicadores que muestran el rendimiento de una ventana como pueden ser: el factor-U (transmitancia térmica) que mide el rendimiento de la ventana completa comprendida por vidrios y perfiles. Otro indicador enfocado únicamente en el vidrio es el SHGC (coeficiente de ganancia de calor) y su valor inverso el SC (coeficiente de sombreado). El factor-U es utilizado principalmente por la Unión

 National Fenestration Rating Council® CERTIFIED	World's Best Window Co. Series "2000" Casement Vinyl Clad Wood Frame Double Glazing•Argon Fill•Low E ABC-X-1-00001-00001	
	ENERGY PERFORMANCE RATINGS	
U-Factor (U.S. / I-P)	Solar Heat Gain Coefficient	
0.35	0.32	
ADDITIONAL PERFORMANCE RATINGS		
Visible Transmittance	Air Leakage (U.S. / I-P)	
0.51	0.2	
<small>Manufacturer stipulates that these ratings conform to applicable NFRC procedures for determining whole product performance. NFRC ratings are determined for a fixed set of environmental conditions and a specific product size. NFRC does not recommend any product and does not warrant the suitability of any product for any specific use. Consult manufacturer's literature for other product performance information. www.nfrc.org</small>		

Figura 4.10: Etiqueta de eficiencia energética para ventanas.

Europea mientras que el SHGC y SC en los Estados Unidos como prueba de calidad para clasificar los productos de las diversas compañías productoras de ventanas. Una etiqueta de verificación de producto típica se presenta en la figura 4.10, en la que se muestran los valores del factor-U, SHGC y otros adicionales como el factor de infiltración de aire y la visibilidad a través del vidrio. En específico esta etiqueta de aprobación es entregada por el National Fenestration Rating Council (NFRC) en los Estados Unidos.

El factor-U, que mide la conductividad térmica, indica cuánto calor pasa a través de la ventana. Un valor bajo significa que la ventana esta mejor aislada. Valores típicos reportados para el factor-U dentro de las reglamentaciones del Reino Unido se presentan en la tabla 4.1.

El SHGC mide cuanto calor solar es transmitido a través del vidrio. Un valor menor significa menor calor transferido. Se mide en rangos de valor de 0 a 1, donde un valor de 0 indica que la ventana funciona como una pared, previniendo el paso de la energía solar hacia el edificio [44].

En las simulaciones se pusieron a prueba sistemas de ventanas sencillas de

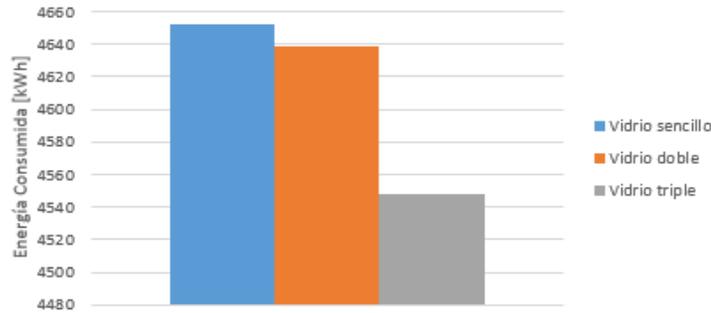
Tipos de Ventana	Espacio entre ventanas		
	6 mm	12 mm	16 mm
	Factor-U ($W/m^2 \cdot K$)		
Vidrio sencillo	4.8		
Doble vidrio (relleno de aire)	3.1	2.8	2.7
Doble vidrio (relleno de argón)	2.9	2.7	2.6

Tabla 4.1: Factores-U para ventanas típicas

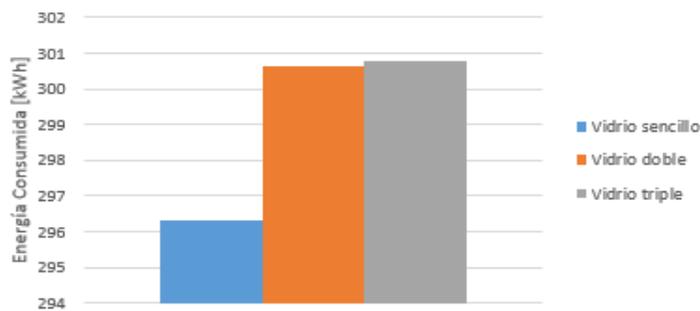
vidrio de 4 milímetros de espesor; ventanas con vidrio doble de 4 milímetros cada uno, utilizando 13 milímetros de aire y argón como gases aislantes con y sin baja emisividad (low-e); ventanas triples con vidrios de 4 milímetros de espesor cada uno, utilizando los mismos gases mencionados como aislantes y los resultados se ilustran a continuación.

Un sistema constructivo de ventanas que conste de varias capas de cristal por si mismo no producirá grandes ahorros de energía, como son los casos donde se utilizan ventanas con cristales dobles y triples. Los ahorros vienen al implementar cristales que cuentan con propiedades como la baja emisividad (low-e, mencionada anteriormente). Además de utilizar propiedades como la baja emisividad, suelen utilizarse gases cuya función es actuar como una resistencia térmica, es decir, como aislantes térmicos, los más comunes son el aire y el argón pero también hay casos donde pueden utilizarse el dióxido de carbono, el criptón, el SF₆ y el xenón [45]. Los primeros resultados obtenidos incluyen el consumo de energía cuando se utilizan solamente cristales sencillos, dobles y triples (ver figura 4.11); donde queda justificado que, por si mismos, no generarán algún ahorro de energía notable en la vivienda.

Los resultados del consumo de energía del aire acondicionado en función del acristalamiento por si solas disminuyen el consumo de energía eléctrica para refrigeración en 0.3 y 2% para los vidrios dobles y triples, respectivamente. Respecto a la calefacción, el consumo de energía se ve incrementado en 1 y 2% con la im-



(a) Consumo de energía eléctrica para refrigeración.

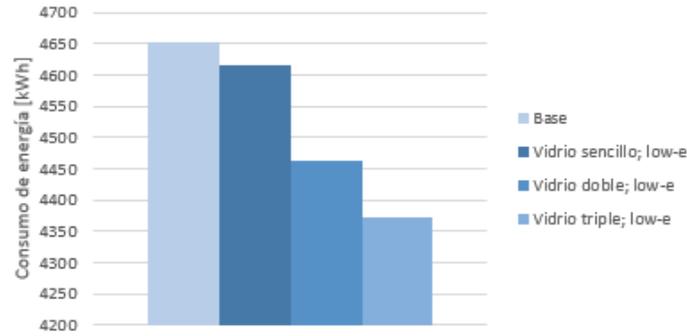


(b) Consumo de energía eléctrica para calefacción.

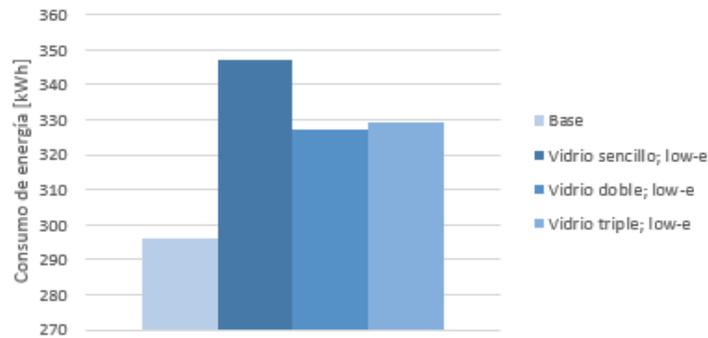
Figura 4.11: Consumo de energía de a) refrigeración y b) calefacción en función del número de capas de acristalamiento en ventanas

plementación de vidrios dobles y triples con respecto al caso del vidrio sencillo, respectivamente.

Cuando hablamos de cristales con low-e nos referimos a productos de control solar que permiten, gracias a su transparencia, el paso de un amplio porcentaje de luz natural al mismo tiempo que proporcionan un importante ahorro en el consumo de energía eléctrica. Este tipo de vidrios bloquean la entrada de los rayos ultravioletas protegiendo del envejecimiento y la decoloración los muebles, cortinas, alfombras, pintura y otros acabados. Para hacer eficiente su uso es indispensable instalarlos en unidades de doble acristalamiento, pero se evaluará el efecto de ésta propiedad en otros tipos de configuración. Los resultados se muestran en la figura 4.12



(a) Consumo de energía eléctrica para refrigeración con ventanas de baja emisividad.



(b) Consumo de energía eléctrica para calefacción con ventanas de baja emisividad.

Figura 4.12: Consumo de energía de a) refrigeración y b) calefacción en función del número de capas de acristalamiento en ventanas de baja emisividad

Los ahorros reportados para el consumo de energía para refrigeración en función del número de capas de acristalamiento de baja emisividad en relación al caso base (que consta de acristalamiento sencillo, con propiedades solares estándar) son de 1%, 4% y 6% para un ventanal sencillo, doble y triple con baja emisividad, respectivamente. Parece ser que el caso más favorable, considerando el costo de implementación de tales sistemas, es el vidrio doble con baja emisividad, con 4% de ahorro. Hablando estrictamente, el vidrio triple supera los ahorros reportados de los demás casos, pero no sería del todo rentable pagar por un sistema constructivo relativamente más caro solamente por obtener esos dos puntos porcentuales extras;

es cuestión de situación.

En el caso del consumo de energía para calefacción en función del número de capas de acristalamiento de baja emisividad en relación al caso base no se reportaron ahorros, al contrario, el consumo de energía se vio incrementado en 17 %, 10 % y 11 % para los ventanales sencillos, dobles y triples, respectivamente. En este caso nos interesa la opción que menos incremento en el consumo de energía reporte y nuevamente se trata del acristalamiento doble con baja emisividad. Si bien el consumo de energía de los dispositivos de calefacción se incrementa con la implementación de este tipo de estrategia, de todas maneras resulta atractivo la instalación de la misma debido a que en relación con lo que se ahorra con este sistema para el consumo de refrigeración, siendo 325.6 kWh incrementales para la calefacción y 188 kWh de ahorro para la refrigeración. Recordemos que en zonas como Monterrey, Nuevo León, predominan los climas cálidos y por ende se utilizan con mucho más frecuencia los equipos de aire acondicionado para la refrigeración. Es por esto que esta medida sigue siendo atractiva a pesar de que la energía de calefacción se vea incrementada un 10 %.

Otro punto interesante que vale la pena mencionar es la ganancia de calor hacia el interior de la vivienda con la implementación de este tipo de ventanas y los resultados se muestran en la figura 4.13.

Para el caso del vidrio sencillo, se observa como la aplicación de una película de baja emisividad causa que las ganancias de calor se conviertan en pérdidas, es decir, la vivienda presentará un déficit de comodidad al incrementar la cantidad de calor que se pierde a través de las ventanas y por lo tanto, los dispositivos de calefacción funcionarán por más tiempo. Si observamos la tabla 4.2 para dar una justificación de los resultados reportados del vidrio sencillo con baja emisividad es debido a que la vivienda pierde la mayor parte de la energía generada a través del acristalamiento durante la época de invierno por que la principal fuente natural de energía proviene de la radiación solar. Al aplicar una película de baja emisividad al



Figura 4.13: Ganancias de calor al interior de la vivienda a través del acristalamiento.

Fecha	Acristalamiento	
	Sencillo [kWh]	Low-e [kWh]
Enero	-16.96	-118.38
Febrero	-3.99	-90.55
Marzo	12.29	-62.49
Abril	25.64	-27.73
Mayo	49.52	13.47
Junio	57.06	25.70
Julio	67.95	45.68
Septiembre	66.99	42.30
Octubre	28.37	-42.96
Noviembre	-7.13	-86.29
Diciembre	-10.65	-109.30
Total	318.00	-400.60

Tabla 4.2: Ganancias de calor en la vivienda a lo largo del año.

acristalamiento cuya función es obstruir gran parte del espectro solar ultravioleta, se evitan relativamente grandes entradas de calor hacia la vivienda.

El acristalamiento con película de baja emisividad sí cumple con su propósito, es decir, disminuye la cantidad de energía proveniente del sol al interior de la vivienda y como resultado se evita prolongar el uso de dispositivos de aire acondicionado durante el verano, como puede observarse en la figura 4.14.

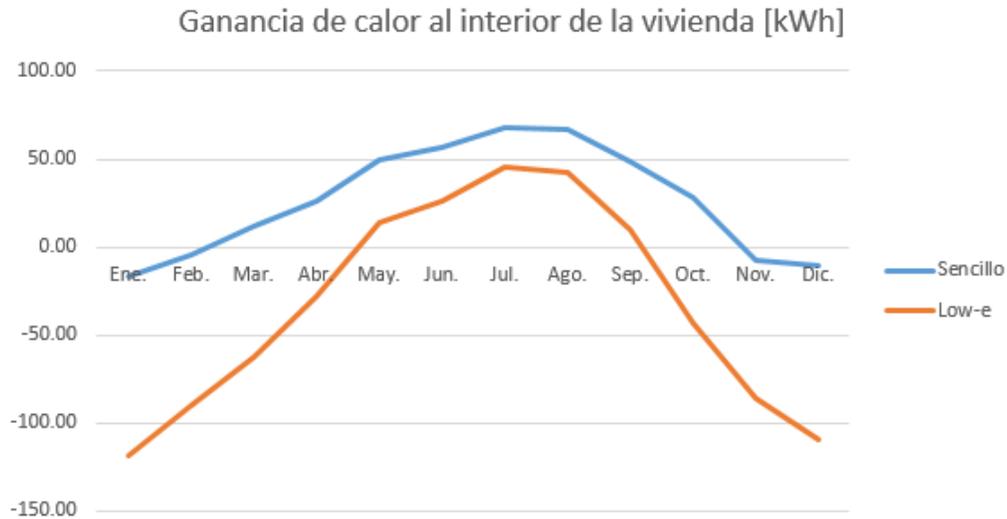


Figura 4.14: Ganancias de calor en la vivienda a lo largo de los meses del año debido a la incidencia solar.

Por otra parte, las ganancias de calor reportadas en las configuraciones de vidrios dobles y triples en comparación con sus versiones de baja emisividad son de 127 % y 26 % respectivamente. Esto se traduce en menos tiempo de funcionamiento de los aparatos de aire acondicionado para la calefacción de la vivienda.

4.6 CASO INTEGRAL

Hasta ahora, los casos más favorables de cada una de las estrategias estudiadas se presentan a continuación, en la tabla 4.3, donde el signo negativo y positivo indican un ahorro y un incremento energético en comparación al caso base, respectivamente.

A continuación se reporta el consumo de energía de la vivienda cuando todas

Estrategia	Caso más favorable (Ahorro de energía [%])	
	Refrigeración	Calefacción
Orientación	Sur [-7 %]	Sur [-3 %]
Aislamiento	1 pulgada [-22 %]	1 pulgada [-32 %]
Sombreado	Voladizo paredes laterales 0.5 m [-7 %]	N/A
Ventanas	Vidrio doble low-e [-4 %]	Vidrio doble low-e [+10 %]

Tabla 4.3: Resumen de los ahorros energéticos más favorables reportados en la investigación

estas estrategias están presentes.

Según los resultados mostrados por DesignBuilder y EnergyPlus, aplicar de manera íntegra las mejores configuraciones de las estrategias propuestas, el ahorro de energía eléctrica tanto para refrigeración como para calefacción es de aproximadamente del 32 %, tal y como se aprecia en la figura 4.15, donde son mostrados los parámetros principales modificados debido a los cambios generados a partir de las estrategias implementadas.

Uno de los principales inconvenientes del uso de aparatos de calefacción en las épocas de invierno era que se perdía una cantidad significativa de calor a través de los muros y otra parte a través del acristalamiento. Con la implementación de un aislante térmico y una película de baja emisividad en las ventanas, se logran reducir tales pérdidas por más de un 140 %. Siguiendo con el tema de las ventanas, gracias a la película de baja emisividad aplicada se logran reducir las ganancias de calor a través de las ventanas que son indeseables durante los largos periodos de calor que predominan en la ciudad de Monterrey, al disminuir estas cantidades un 70 %, conservando una tendencia relativamente constante en el transcurso del año. Como ya se mencionó anteriormente, el consumo de energía de calefacción y refrigeración se ve reducido un 32 % para ambos casos, notándose el mayor ahorro durante los periodos de invierno y verano, respectivamente.

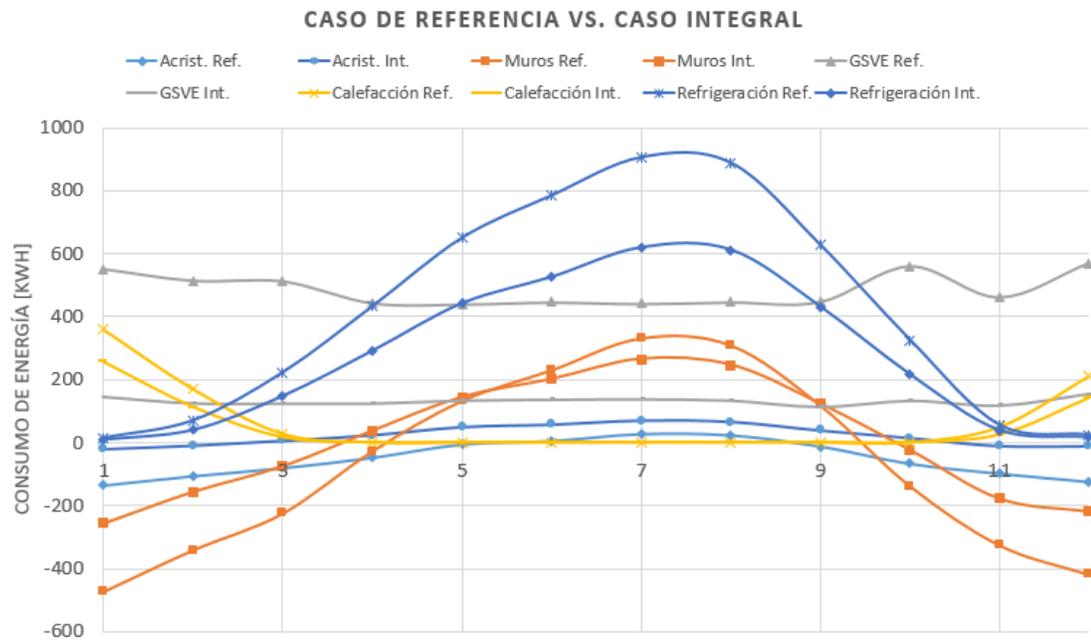


Figura 4.15: Comparativa de ahorro de energía eléctrica de las estrategias implementadas en caso integral.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

En este trabajo de tesis se evaluó mediante simulación energética computacional, distintas estrategias de climatización aplicadas en viviendas que son desarrolladas con base a lineamientos de la NOM-020-ENER-2011, permitiéndonos proponer mejoras constructivas enfocadas a la eficiencia energética y al confort humano. Se definió el prototipo típico de vivienda actual en México, que no difiere mucho del diseño base de la norma mencionada arriba, que establece criterios y lineamientos para el uso eficiente de dispositivos de aire acondicionado en edificios de uso habitacional.

La definición de los parámetros que juegan un papel relevante en el consumo de energía eléctrica para satisfacer necesidades de confort dentro de la vivienda nos permitieron establecer una variedad de escenarios, que nos ayudan a identificar cuál de estos es el más viable a la hora de la toma de decisiones en cuanto a temas de disminución de consumos de energía eléctrica, tanto al inicio, durante y después de la realización de una vivienda.

La creación de un caso base nos permitió encontrar áreas de oportunidad, con ayuda de las herramientas de simulación energética, buscando disminuir la carga térmica inherente a la trayectoria del Sol, y por ende, disminuyendo el tiempo que

se necesitan encender los equipos de aire acondicionado. Así mismo, se evaluaron distintas configuraciones de los parámetros seleccionados con el objetivo de estudiar sus efectos y la magnitud de los mismos, permitiéndonos establecer recomendaciones con bases más robustas en cuanto a temas de economía y ahorro de energía.

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 el crecimiento de usuarios y la 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 en el sector residencial de clase social media. Está bien documentada la importancia que este nivel social tiene en el consumo de energía eléctrica para la climatización y el potencial uso de aislamientos térmicos, el sombreado de ventanas y el aprovechamiento de la ventilación natural.

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 utilizaron los softwares DesignBuilder y EnergyPlus para poner en práctica una metodología enfocada a analizar el comportamiento de distintas estrategias que nos permiten obtener ahorros de energía eléctrica derivadas del uso de sistemas de acondicionamiento de aire en una vivienda para así cubrir con las demandas de confort. A diferencia de estudios que han sido reportados en la literatura, el presente trabajo se enfoca al análisis del desempeño de los sistemas de refrigeración y calefacción 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 energético.

Los resultados obtenidos muestran que generalmente en zonas de clima árido-

seco, las orientaciones más recomendadas para ubicar la fachada de la vivienda son la norte y la sur, siendo la orientación sur la que más consistente fue en cada caso, con casi 8 % de ahorro con respecto a las demás orientaciones. Por supuesto que hay que recalcar que para que tal estrategia sea del todo eficaz, hay que tomar en cuenta la posición de las ventanas en la vivienda. Sin embargo, en la actualidad cuando se encuentran casos donde las ventanas reciben gran parte del espectro solar, esto se hace con la intención de combatir el déficit de calor que puede llegar a alcanzarse en zonas de climas más fríos, ya que presenta una buena medida para poder disminuir los costos de energía de calefacción.

Los resultados obtenidos del aislamiento térmico muestran que, para este tipo de zonas de clima árido-seco, resulta como la mejor de las estrategias a utilizar para combatir los consumos de energía de los dispositivos de aire acondicionado y a sí mismo, facilitar mejores condiciones de confort térmico, siendo suficiente una pulgada de aislamiento térmico reportando un 22 % menos consumo de energía para refrigeración y un 32 % menos energía para calefacción.

También, los resultados obtenidos para los elementos de sombreado reportan que son relativamente eficaces para disminuir el consumo de energía de refrigeración, aportando casi 7 puntos porcentuales más de ahorro a la suma, siendo los casos más favorables cuando se utilizan lamas o voladizos de aproximadamente 50 cm con paredes laterales.

Una manera eficiente de ahorra energía al limitar la cantidad de energía que entra a la vivienda a través de las ventanas, fue con la aplicación de una película de baja emisividad, cuyos efectos producen un ahorro aproximadamente de 4 %, que, en conjunto con otras estrategias como el aislante térmico y algunas medidas de sombreado, las ganancias de calor a través de las ventanas fueron casi 150 % menores que el caso de referencia.

Por último, una solución integral en la vivienda, aplicando las configuraciones óptimas para nuestro caso de estudio de todas las estrategias antes mencionadas

otorga un ahorro de energía eléctrica para calefacción y refrigeración aproximado de un 32%, cifra significativa si tomamos en cuenta que casi de la mitad de la energía eléctrica consumida en la vivienda en tiempos incómodos proviene del uso de dispositivos de aire acondicionado.

5.2 RECOMENDACIONES

Tomando como base el estudio realizado y los efectos de los parámetros que afectan el consumo de energía eléctrica de los dispositivos de acondicionamiento de aire en edificios habitacionales, resulta pertinente emitir las siguientes recomendaciones:

- Considerar primeramente, en el estudio previo a la construcción de recintos habitacionales, todos los factores que pudieran afectar el desempeño térmico de la vivienda como la orientación de los edificios, la posición de las ventanas, la cantidad de personas que habitan o habitarán en la vivienda, el sistema constructivo que se utilizará, tanto para muros y techos como para ventanas.
- La estrategia que más impacto tiene en el ahorro de energía es el aislamiento térmico y, con los resultados reportados, es conveniente colocar de 1 a 2 pulgadas de aislamiento térmico en el sistema constructivo, por supuesto, por la parte interior de la vivienda.
- Se deben considerar los elementos de sombreado de ventanas en el edificio cuando estos no se encuentran en colindancia con otras viviendas, ya que estos aportan una cifra relativamente significativa de ahorro de energía, además de que impiden la entrada de grandes cantidades de energía térmica proveniente de la radiación solar.
- Utilizar materiales de construcción con valores moderados de capacidad calorífica y conductividad térmica (materiales de construcción “pesados”), 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.

5.3 TRABAJO FUTURO

El presente trabajo de tesis se centró en el estudio de los parámetros que modifican el consumo de energía eléctrica en los dispositivos de aire acondicionado de un edificio habitacional mediante el uso de simulación computacional.

En vista de que el análisis se realizó únicamente para Monterrey, cuyo clima predominante es cálido-seco, 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, en ocasiones resulta difícil que las viviendas de cuenten con aislamiento térmico, en especial las de bajos recursos económicos, como son las de interés social. Adicionalmente, en nuestro país aún existe una pobre cultura del ahorro de energía. Entonces, para atender mejor estas necesidades energéticas, 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 deshumidificación y disipación de energía por medio de vegetación en cercanías de la vivienda, ya que se ha encontrado que la implementación de tales estrategias pasi-

vas ayudan a minorar la carga térmica excesiva dentro de las viviendas debido a la proyección de la radiación solar sobre las mismas, reduciendo aun más el tiempo de operación de dispositivos de aire acondicionado.

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 y DesignBuilder.

CAPÍTULO 6

APÉNDICE

6.1 APÉNDICE A: VALORES PARA EL CÁLCULO DEL FLUJO DE CALOR A TRAVÉS DE LA ENVOLVENTE

ESTADO	Ciudad	K de referencia (W/m ² ·K)		CONDUCCIÓN												TRANSPARENTE												RADIACIÓN												Barra para vapor
		K de referencia (W/m ² ·K)		Temperatura equivalente promedio (°C)												TRANSPARENTE												RADIACIÓN												
		Hasta tres niveles y conjunto horizontal con muros combinados	Más de tres niveles	Muro masivo			Muro ligero			Ventanas			Paredes y divisiones			Paredes y divisiones			Paredes y divisiones																					
Techo y muro	Techo	Muro	T _{exterior}	Superficie interior	T _{exterior}	N	E	S	O	N	E	S	O	N	E	S	O	N	E	S	O	N	E	S	O															
JALISCO	Guadalupe (G)	0.714	0.714	0.909	25	26	38	25	27	26	26	30	34	32	33	22	23	24	24	24	24	274	91	137	118	146														
		0.833	0.714	0.909	24	26	38	25	27	26	26	30	34	32	33	22	23	24	24	24	24	274	91	137	118	146														
		0.833	0.833	0.909	23	26	37	24	25	25	25	29	33	32	32	21	23	23	24	24	24	274	91	137	118	146														
		0.714	0.714	0.909	25	27	38	25	28	26	26	30	34	33	33	22	24	24	24	24	24	274	91	137	118	146														
MÉXICO	Pueblo Vieja	0.526	0.526	0.625	25	31	45	31	35	33	37	41	39	40	26	28	29	29	29	29	274	91	137	118	146	SI														
		0.833	0.833	0.909	23	23	29	20	22	22	21	26	29	28	28	19	21	21	21	21	21	274	91	137	118	146														
		0.909	0.909	0.909	22	21	29	17	18	18	18	23	25	25	24	17	18	18	19	19	19	274	91	137	118	146														
		0.909	0.909	0.909	22	21	29	23	23	24	24	26	31	30	30	21	22	23	23	23	23	274	91	137	118	146														
MICHOCÁN	Morelia	0.526	0.526	0.625	25	31	46	32	35	33	37	41	39	40	26	28	29	29	29	29	274	91	137	118	146	SI														
		0.833	0.833	0.909	24	25	35	23	25	24	24	28	31	30	30	21	22	23	23	23	274	91	137	118	146															
		0.714	0.714	0.909	25	27	39	26	28	27	27	31	34	33	34	22	24	25	25	25	274	91	137	118	146															
		0.526	0.526	0.625	25	29	41	28	31	29	29	33	37	35	36	24	25	25	26	27	274	91	137	118	146															
MORELOS	Cuernavaca	0.714	0.714	0.909	25	27	39	26	28	27	27	31	34	33	34	22	24	25	25	25	274	91	137	118	146															
		0.526	0.526	0.625	25	29	41	28	31	29	29	33	37	35	36	24	25	25	26	27	274	91	137	118	146															
		0.714	0.714	0.909	24	27	39	26	28	27	27	31	34	33	33	22	24	25	25	25	274	91	137	118	146															
		0.526	0.526	0.625	25	31	46	32	35	33	34	37	41	39	41	26	28	29	29	29	274	91	137	118	146	SI														
NAHUATLÁN	Tehuacan	0.714	0.714	0.909	24	25	35	23	25	24	24	28	31	30	30	21	22	23	23	23	274	91	137	118	146															
		0.526	0.526	0.625	25	31	46	32	35	33	34	37	41	39	41	26	28	29	29	29	274	91	137	118	146	SI														
		0.714	0.714	0.909	24	24	34	22	24	23	23	27	30	29	29	20	21	22	22	22	274	91	137	118	146															
		0.526	0.526	0.625	25	29	41	28	31	29	29	33	37	35	36	24	25	25	26	27	274	91	137	118	146															
OAXACA	Salina Cruz	0.526	0.526	0.625	25	31	46	32	35	33	34	37	41	39	41	26	28	29	29	29	274	91	137	118	146	SI														
		0.833	0.833	0.909	24	24	34	22	24	23	23	27	30	29	29	20	21	22	22	22	274	91	137	118	146															
		0.714	0.714	0.909	25	25	35	23	25	24	24	28	31	30	30	21	22	23	23	23	274	91	137	118	146															
		0.526	0.526	0.625	25	31	46	32	35	33	34	37	41	39	41	26	28	29	29	29	274	91	137	118	146	SI														
PUEBLA	Puebla	0.526	0.526	0.625	25	31	46	32	35	33	34	37	41	39	41	26	28	29	29	29	274	91	137	118	146	SI														
		0.833	0.833	0.909	24	24	34	22	24	23	23	27	30	29	29	20	21	22	22	22	274	91	137	118	146															
		0.714	0.714	0.909	25	25	35	23	25	24	24	28	31	30	30	21	22	23	23	23	274	91	137	118	146															
		0.526	0.526	0.625	25	31	46	32	35	33	34	37	41	39	41	26	28	29	29	29	274	91	137	118	146	SI														
QUERÉTARO	Queretaro	0.714	0.714	0.909	24	25	35	23	25	24	24	28	31	31	21	22	23	23	23	23	274	91	137	118	146															
		0.833	0.833	0.909	24	26	37	24	27	26	25	30	33	32	32	22	23	24	24	24	274	91	137	118	146															
		0.526	0.526	0.625	25	31	46	32	35	33	34	37	41	39	40	26	28	29	29	29	274	91	137	118	146	SI														
		0.833	0.833	0.909	24	24	34	22	24	23	23	27	30	29	29	20	21	22	22	22	274	91	137	118	146															
QUINTANA ROO	Cancun	0.526	0.526	0.625	25	31	45	31	35	33	37	41	39	40	26	28	29	29	29	29	274	91	137	118	146	SI														
		0.833	0.833	0.909	24	24	34	22	24	23	23	27	30	29	29	20	21	22	22	22	274	91	137	118	146															
		0.526	0.526	0.625	25	31	45	31	35	33	33	36	41	39	40	26	28	29	29	29	274	91	137	118	146	SI														
		0.833	0.833	0.909	24	24	34	22	24	23	23	27	30	29	29	20	21	22	22	22	274	91	137	118	146															
SAN LUIS POTOSÍ	San Luis Potosí	0.526	0.526	0.625	25	31	45	31	35	33	37	41	39	40	26	28	29	29	29	29	274	91	137	118	146	SI														
		0.833	0.833	0.909	24	24	34	22	24	23	23	27	30	29	29	20	21	22	22	22	274	91	137	118	146															
		0.526	0.526	0.625	25	31	45	31	35	33	33	36	41	39	40	26	28	29	29	29	274	91	137	118	146	SI														
		0.833	0.833	0.909	24	24	34	22	24	23	23	27	30	29	29	20	21	22	22	22	274	91	137	118	146															
SINALOA	Culiacan	0.526	0.526	0.625	25	31	45	31	35	33	37	41	39	40	26	28	29	29	29	29	274	91	137	118	146	SI														
		0.833	0.833	0.909	24	24	34	22	24	23	23	27	30	29	29	20	21	22	22	22	274	91	137	118	146															
		0.526	0.526	0.625	25	31	45	31	35	33	33	36	41	39	40	26	28	29	29	29	274	91	137	118	146	SI														
		0.833	0.833	0.909	24	24	34	22	24	23	23	27	30	29	29	20	21	22	22	22	274	91	137	118	146															

Figura 6.2: Valores para el cálculo del flujo de calor a través de la envolvente (continuación).

ESTADO	Ciudad	K de referencia (W/mK)		CONDUCCIÓN												TRANSPARENTE						RADIACIÓN						Barrera para VAPOR
		K de referencia (W/mK)		Temperatura equivalente promedio (t _e (°C))												TRANSPARENTE						RADIACIÓN						
		Hasta tres niveles y conjunto horizontal con muros compartidos	Más de tres niveles	OPACA		Muro masivo		Muro ligero		Ventanas		Factor de ganancia solar promedio		TRANSPARENTE		RADIACIÓN												
Techo y muro	Techo	Muro	T _{interior}	Superficie interior	Techo	N	E	S	O	N	E	S	O	T _{exterior} y demás	N	E	S	O	T _{exterior} y demás	N	E	S	O					
SONORA	Guaymas	0.476	0.476	0.556	23	32	47	33	37	34	35	38	42	40	42	27	29	30	30	30	302	70	159	131	154	SI		
	Hermosillo	0.476	0.476	0.526	23	33	48	34	38	36	36	39	43	41	43	28	29	30	31	31	322	70	159	131	154	SI		
	Chihuahua	0.536	0.526	0.625	25	31	46	31	36	33	33	37	41	39	40	26	28	29	29	29	322	70	159	131	154	SI		
	Nogales	0.536	0.526	0.526	25	31	45	31	35	33	33	37	41	39	40	26	28	29	29	29	322	70	159	131	154	SI		
	Nogales	0.714	0.714	0.509	25	28	40	27	30	28	28	32	36	35	35	23	25	25	26	26	322	70	159	131	154	SI		
TABASCO	Villahermosa	0.536	0.526	0.556	25	32	46	32	36	34	34	38	42	40	41	27	28	29	30	30	272	102	140	114	134	SI		
	Comalcalco	0.536	0.526	0.625	25	31	46	32	35	33	33	37	41	39	40	26	28	29	29	29	272	102	140	114	134	SI		
	Cd. Victoria	0.536	0.526	0.625	25	31	45	31	35	33	33	36	40	38	40	26	27	29	29	29	272	102	140	114	134	SI		
	Tampico	0.536	0.526	0.625	25	30	44	30	34	32	32	36	40	38	39	26	27	28	28	28	272	102	140	114	134	SI		
	Matamoros	0.536	0.556	0.633	25	31	45	31	34	32	32	36	40	38	39	26	27	28	29	29	272	102	140	114	134	SI		
TAMAULIPAS	Reynosa	0.536	0.556	0.625	25	31	46	32	35	33	34	37	41	39	40	26	28	29	29	29	272	102	140	114	134	SI		
	Nuevo Laredo	0.536	0.526	0.556	25	32	46	32	36	34	34	37	42	40	41	27	28	29	30	30	272	102	140	114	134	SI		
	Tancitaro	0.909	0.909	0.909	23	24	33	21	23	22	22	27	29	29	29	20	21	21	21	21	272	102	140	114	134	SI		
	Tancitaro	0.536	0.526	0.625	25	31	45	31	34	32	32	36	40	38	39	26	27	28	29	29	272	102	140	114	134	SI		
	Caldwell	0.714	0.714	0.509	24	27	38	23	25	24	24	29	32	31	31	21	22	23	23	23	272	102	140	114	134	SI		
TLAXCALA	Jalapa	0.714	0.714	0.509	23	25	36	23	25	24	24	29	32	31	31	21	22	23	23	23	272	102	140	114	134	SI		
	Orizaba	0.714	0.714	0.509	24	26	37	24	26	25	25	29	33	32	32	21	23	23	24	24	272	102	140	114	134	SI		
	Tehuacan	0.536	0.526	0.526	23	30	43	30	33	31	31	35	39	37	38	23	27	28	28	28	272	102	140	114	134	SI		
	Puebla	0.536	0.526	0.625	25	31	46	31	35	32	32	36	40	38	40	26	27	29	29	29	272	102	140	114	134	SI		
	Venustauca	0.536	0.526	0.625	25	31	44	31	34	32	32	36	40	38	39	26	27	28	28	28	272	102	140	114	134	SI		
YUCATÁN	Merida	0.536	0.526	0.625	25	31	44	31	34	32	32	36	40	38	39	26	27	28	28	28	284	95	152	119	133	SI		
	Progreso	0.536	0.526	0.714	25	30	44	30	34	31	32	35	39	38	39	25	27	28	28	28	284	95	152	119	133	SI		
	Valdovinos	0.536	0.526	0.714	23	30	43	30	33	31	31	35	39	37	38	23	27	28	28	28	284	95	152	119	133	SI		
	Frederico	0.833	0.833	0.609	23	24	34	21	23	23	23	27	30	29	29	20	21	22	22	22	274	91	137	108	145	SI		
	Zacatecas	0.909	0.909	0.609	22	24	34	21	23	23	23	27	30	29	29	20	21	22	22	22	274	91	137	108	145	SI		

- (a) Utilizar los mismos valores para los municipios conurbados del Estado de México que forman la zona metropolitana.
- (b) Utilizar los mismos valores para las ciudades de Cd. de Celaya, Irapuato, Salamanca y Silao.
- (c) Utilizar los mismos valores para los municipios de Tlaxiaco, Tlaxiaco, Tlaxiaco y Zozocolandero.
- (d) Utilizar los mismos valores para los municipios de Apodaca, Santa Gertrudis, Guadalupe, San Nicolás de los Garza y Santa Catarina.

Figura 6.3: Valores para el cálculo del flujo de calor a través de la envolvente (continuación).

NOMENCLATURA

Capítulo 1

A.C.	—	Antes de Cristo
$MtCO_2$	—	Mega Toneladas de Dióxido de Carbono
NOM	—	Norma Oficial Mexicana
PHPP	—	Passive House Planning Package

Capítulo 2

INFONAVIT	—	Instituto del Fondo Nacional para la Vivienda de los Trabajadores
GIZ	—	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional
CONAVI	—	Comisión Nacional de Vivienda
NAMA	—	Nationally Appropriate Mitigation Actions. Acciones Nacionales Apropriadadas de Mitigación
GEI	—	Gases de Efecto Invernadero
\dot{Q}_{cond}	—	Tasa de transferencia de calor por conducción [W]
k	—	Conductividad térmica [$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$]
A	—	Área de transferencia de calor [m^2]
dT	—	Diferencial de Temperatura [$^\circ C$]

dx	—	Espesor de material [m]
W	—	Watts
R_T	—	Resistencia Térmica [$^{\circ}C/W$]
I	—	Corriente Eléctrica [A]
V	—	Voltaje [V]
R_e	—	Resistencia Eléctrica [Ohm]
σ_e	—	Conductividad Eléctrica [V/A]
μ	—	Viscosidad Dinámica [$\frac{N-s}{m^2}$]
C_p	—	Calor específico a presión constante [$\frac{kJ}{kg-K}$]
T	—	Temperatura [$^{\circ}C$]
\dot{q}_{conv}	—	Tasa de transferencia de calor por convección [$\frac{W}{m^2}$]
T_s	—	Temperatura de superficie [$^{\circ}C$]
T_{∞}	—	Temperatura del fluido [$^{\circ}C$]
h	—	Coefficiente de transferencia de calor [$\frac{W}{m^2^{\circ}C}$]
v	—	Velocidad del fluido [m/s]
ρ	—	Densidad [kg/m^3]
Δ	—	Razón de cambio
ν	—	Viscosidad cinemática [$\frac{m^2}{s}$]
K	—	Kelvin, unidad de temperatura absoluta en el Sistema Internacional de Unidades.
R	—	Rankine, unidad de temperatura absoluta en el Sistema Inglés.
$\dot{Q}_{emitida,máx}$	—	Tasa de transferencia de calor por radiación.
σ	—	Constante de Stefan-Boltzmann [$5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$], [$0.1714 \times 10^{-8} Btu/h \cdot ft^2 \cdot R^4$]
ϵ	—	Emisividad

Capítulo 3

HVAC	— Heating, Ventilating and Air Conditioning. Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado.
WWR	— Window–Wall Ratio. Razón Ventana–Muro.
INEGI	— Instituto Nacional de Estadística y Geografía
GDR	— Grados-Día de Refrigeración
GDC	— Grados-Día de Calefacción
W	— Humedad absoluta
CS, SC	— Coeficiente de sombreado, Shadow Coefficient
SMN	— Servicio Meteorológico Nacional
$SHGC$	— Sensitive Heat Gain Coefficient (Coeficiente de Ganancia de Calor Sensible)
$NFRC$	— National Fenestration Rating Council
kWh	— Killowatt-hora

BIBLIOGRAFÍA

- [1] SENER, “Ventas Internas de Energía Eléctrica.” 2015.
- [2] SENER, “Sistema de Información Energética. Estimación de las ventas con ahorros de energía por grupos de usuarios al 2026,” 2015.
- [3] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, *Transferencia de calor y masa*. 2011.
- [4] ONNCCE, “NORMA MEXICANA NMX-460-ONNCCE-2009,” tech. rep., 2009.
- [5] G. D. S. Alvarez, B. Shah, F. Rubin, H. Gilbert, I. M. Domínguez, and K. Shickman, “Assessing energy savings from Cool Roofs.ºn residential and non-residential buildings in Mexico,” no. 01, pp. 1–71, 2014.
- [6] Diario Oficial de la Nación, “NOM-020-ENER-2011,” 2011.
- [7] 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.,” vol. 39, pp. 306–316, 2007.
- [8] AIVC, INIVE, ISES, UIA, and ARES, “1 st International Conference on Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment (Palenc 2005),” No. Palenc, 2005.
- [9] A. Sayigh and A. H. Marafia, “—thermal comfort and the development of bioclimatic concept in building design,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 2, no. 1, pp. 3–24, 1998.

-
- [10] C. Ionescu, T. Baracu, G.-E. Vlad, H. Necula, and A. Badea, “The historical evolution of the energy efficient buildings,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 243–253, 2015.
- [11] T. C. S. of Japan, *Advanced Ceramic Technologies & Products*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [12] W. A. Laska, “Masonry insulated board with integral drainage,” Jan. 19 1999. US Patent 5,860,259.
- [13] W. Feist, J. Schnieders, V. Dorer, and A. Haas, “Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the passive house concept,” *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 11, pp. 1186–1203, 2005.
- [14] Feist W., “It is profitable to build a Passive House?,” 2007.
- [15] Passive House Alliance, “The Principles: Passive House Institute U.S.,” 2015.
- [16] SEMARNAT, “Estrategia Nacional de Cambio Climático,” p. 62, 2013.
- [17] SHF and CIDOC, “Estado Actual de la Vivienda en México 2014,” 2014.
- [18] INEGI, “Encuesta nacional de ingresos y gastos de los hogares 2010 cuestionario para negocios del hogar,” 2010.
- [19] SENER, “Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2009-2012,” vol. 2012, 2009.
- [20] J. A. Triana Espinosa and J. C. Montes Jimenez, “Habitability, Energy and Environment: a Holistic Proposal for Housing in Mexico,” Dec. 1997.
- [21] G. A. S. Ramírez, *Rehabilitación Térmica, Energética y Ambiental, para la Sustentabilidad de la Vivienda en México*. PhD thesis, 2011.
- [22] C. Heard, “Notes on the typical house description as used with SUNCODE.,” tech. rep., 1993.

- [23] D. Solís, “Análisis térmico de una vivienda económica en clima cálido-seco bajo diferentes orientaciones y medidas de sombreado,” 2010.
- [24] J. A. Rosas-Flores and D. M. Gálvez, “What goes up: Recent trends in Mexican residential energy use,” *Energy*, vol. 35, no. 6, pp. 2596–2602, 2010.
- [25] A. H. Beele, *Evaluation of the new policy for thermal insulation standards in the residential sector in Mexico. Applicability of the standard NOM-020-ENER-2011*. PhD thesis, 2011.
- [26] J. Fernando, A. Lango, and P. C. Tabares-velasco, “Energy Consumption Optimization of low-income houses in Guadalajara, México,” no. 2009, 2014.
- [27] F. Manzano-agugliaro, F. G. Montoya, A. Sabio-ortega, and A. García-cruz, “Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 736–755, 2015.
- [28] M. K. Singh, S. Mahapatra, and S. Atreya, “Thermal performance study and evaluation of comfort temperatures in vernacular buildings of north-east india,” *Building and environment*, vol. 45, no. 2, pp. 320–329, 2010.
- [29] INFONAVIT and GIZ, “Estudio de Optimización de la Eficiencia Energética en Viviendas de Interés Social.,” tech. rep., 2011.
- [30] J. E. F. HURTADO, *Efecto de la masa térmica de la envolvente sobre la climatización de edificaciones habitacionales*. PhD thesis, 2012.
- [31] CONAVI, GIZ, and INFONAVIT, “NAMA Apoyada para la Vivienda Sustentable en México – Acciones de Mitigación y Paquetes Financieros,” 2013.
- [32] F. P. Incropera and D. P. Dewitt, *Fundamentals of heat and mass transfer*. 2011.
- [33] L. J. V. Sánchez, *Estudio Térmico de un Edificio Vidriado Ubicado en la Ciudad de México y Evaluación de su Habitabilidad para el Confort*. PhD thesis, 2012.

-
- [34] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Termodinámica*. 2009.
- [35] F.ández García@, “Clima Y Confortabilidad Humana. Aspectos Metodológicos,” vol. 4, pp. 109–125, 1994.
- [36] J. L. Threlkeld, J. W. Ramsey, and T. H. Kuehn, *Thermal Environmental Engineering*. third edit ed., 1998.
- [37] INEGI, “Climatología,” 2011.
- [38] CONUEE, “Herramienta de Grados día Contenido,” 2014.
- [39] C. Di Perna, F. Stazi, a. U. Casalena, and 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*, vol. 43, no. 1, pp. 200–206, 2011.
- [40] C. D. Pereira and E. Ghisi, “The influence of the envelope on the thermal performance of ventilated and occupied houses,” *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 12, pp. 3391–3399, 2011.
- [41] C. Bern, J. Remund, S. Müller, and S. Kunz, “Handbook Part I : Software,” no. July, 2015.
- [42] Servicio Meteorológico Nacional, “Normales Climatológicas.”
- [43] H. Gutiérrez Pulido and R. de la Vara Salazar, “Análisis y diseño de experimentos,” *México: McGraw-Hill*, vol. 1111130671, p. 9789701065266, 2012.
- [44] Diario de la Federación, “Norma oficial mexicana NOM-024-ENER-2012: Características térmicas y ópticas del vidrio y sistemas vidriados para edificaciones,” 2012.
- [45] EnergyPlus, “Engineering Reference,” tech. rep., 2012.