



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DEL ESTADO DE MORELOS

INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA AMBIENTAL

TÍTULO

**ESTUDIO NUMÉRICO DE LA TRANSFERENCIA DE
CALOR EN EDIFICACIONES PARA POTENCIALIZAR
EL AHORRO ENERGÉTICO EN MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO EN TECNOLOGÍA AMBIENTAL

P R E S E N T A:

ARIADNA OCAMPO ASTUDILLO

TUTORES

**TUTOR RECEPTOR: DR. GUILLERMO BARRIOS DEL
VALLE**

TUTOR INTERNO: DRA. HARUMI MORENO GARCÍA



JIUTEPEC MORELOS ABRIL 2015

Agradecimientos:

Agradecimiento al proyecto PAPIIT IA101514: Estudio numérico de la transferencia de calor dependiente del tiempo en ventanas tomando en cuenta la transferencia de calor radiativa entre el vidrio y el exterior para los diferentes climas de la República Mexicana por la beca otorgada.

Agradezco al Instituto de Energías Renovables (IER) por haberme dado la oportunidad de realizar mi tesis y el cual siempre me brindo su apoyo.

Agradezco a la Universidad Politécnica del Estado de Morelos por la oportunidad que me brindó para convertirme en una ingeniera en tecnología ambiental, formándome para un futuro competitivo, por el apoyo constante y las enseñanzas que me han hecho crecer profesionalmente y personalmente.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Guillermo Barrios del Valle por aceptarme para colaborar en su grupo de trabajo, por la orientación y ayuda durante la elaboración de esta tesis. Por la confianza que me brindo desde el comienzo, por su apoyo constante, por compartir su conocimiento, tiempo y entusiasmo que me ha ayudado en mi formación profesional.

Agradezco a la Dra. Harumi Moreno García por el apoyo que me ha brindado durante la realización de esta tesis, por el tiempo que se ha tomado en resolver mis dudas, por los consejos que me ha dado con el fin de presentar un buen trabajo y por ser una guía en la elaboración de esta tesis.

Agradezco a la Dra. Guadalupe Huelasz Lesbros por sus valiosas asesorías, por su tiempo dedicado en la revisión de esta tesis por sus observaciones y sugerencias que ayudaron a mejorar la calidad de este trabajo.

Dedicatoria:

A Dios por darme la oportunidad de llegar a esta etapa de mi vida, porque he podido cumplir todos mis objetivos, por brindarme salud a mi y a mi familia, por permitir que la paz reine en mi hogar, porque siempre tengo mucho que agradecerle y poco que pedirle.

Esta tesis es dedicada especialmente a mis padres Violeta y Luis no sólo por haberme dado el regalo más grande que es la vida, también por el amor incondicional que me han brindado en todo momento, por la educación que nos han regalado a mi hermano y a mi, por los sacrificios que han hecho para que nunca nos falte nada, por apoyar siempre mis decisiones y confiar en mí. Por los consejos y valores que me han inculcado y me han llevado a culminar esta etapa de mi vida. Ustedes son el pilar de la familia y son el mejor ejemplo de perseverancia y fortaleza que puedo tener.

A mi hermano Luis, porque me esfuerzo día a día para que veas en mí un ejemplo a seguir. Porque has sido mi cómplice y mejor amigo durante toda la vida. Gracias por tu apoyo y paciencia en mis momentos difíciles, por las risas que me sacas a diario, he aprendido muchas cosas de ti que me hacen crecer como persona. Gracias por darme un gran regalo de la vida, ser tía, te quiero.

A mis abuelos Celsito, Cleo, Felipe (QEPD) e Isaura, por el amor y cariño que sólo los abuelos saben dar, por ser un ejemplo de fortaleza y lucha constante, por enseñarnos esas ganas de vivir y recordarnos que siempre hay que disfrutar de la vida. Por su alegría que fue y es tan característica de cada uno de ustedes. He aprendido de su fuerza y entrega, espero algún día yo llegue a tener un poco de tanta sabiduría que ustedes tienen.

A Joshua por tu amor, comprensión, paciencia y apoyo incondicional, por tener siempre las palabras exactas de ánimo que me han ayudado a dar lo mejor de mí, por todos los momentos felices que hemos pasado y esas risas que sólo tengo contigo. Gracias por ser parte de mi vida y permitirme ser parte de la tuya.

A Victoria, tu presencia me llena de felicidad, gracias por ayudarme a conocer esa parte de mí que tanto disfruto, tienes mi apoyo incondicional siempre. También es dedicada al resto de mi familia que me han brindado su apoyo, cariño, consejos y buenos momentos a lo largo de mi vida.

Contenido

1. Introducción	10
1.1. Sustentabilidad y energía	10
1.2. Consumo energético a nivel mundial	11
1.3. Consumo energético en México	12
1.4. Importancia de las ventanas en edificaciones	17
1.5. Confort térmico en edificaciones	17
2. Justificación	19
3. Objetivos	20
3.1. Objetivo general	20
3.2. Objetivos particulares	20
4. Metodología	21
5. Transferencia de calor en ventanas	22
5.1. Conducción	23
5.2. Convección	24
5.3. Radiación	25
5.3.1. Factor de forma	26
5.3.2. Espectro solar	27
6. Normativas en México para el ahorro de energía	30
6.1. NOM-020-ENER-2011 y NOM-008-ENER-2001	30
6.2. Transferencia de calor a través de la envolvente	31
6.3. Transferencia de calor a través de las ventanas	33
6.3.1. NOM-024-ENER-2012.	34
6.4. Transferencia de calor en edificaciones de referencia	37
6.5. Conclusiones	38

7. EnergyPlus	39
7.1. Introducción	39
7.2. Modelo de transferencia de calor por conducción	40
7.3. Transferencia de calor en ventanas	41
8. Resultados y Discusiones	44
8.1. Características de las simulaciones	44
8.2. Parámetros a evaluar en EnergyPlus	47
8.3. Resultados de las simulaciones en EnergyPlus y discusión	50
8.3.1. Condición sin uso de aire acondicionado	50
8.3.2. Condición de uso de aire acondicionado	60
8.4. Resultados y discusión usando la NOM-020-ENER-2011	65
8.5. Análisis de resultados entre EnergyPlus y la NOM-020	70
9. Conclusiones	73
Bibliografía	77

Lista de Figuras

1.1.	Porcentaje de la oferta interna bruta por tipo de energético [9].	12
1.2.	Porcentaje del consumo energético a nivel mundial para el sector edificaciones, transporte e industria [10].	13
1.3.	Porcentaje de las emisiones de CO ₂ asociadas al consumo de combustible por sectores industrial, edificaciones, forestal, agricultura y residuos y transporte para países desarrollados para el 2013 [10].	13
1.4.	Porcentaje del consumo energético en México para el sector residencial, el industrial, de transporte, el agropecuario, el comercial y el público [9].	14
1.5.	Porcentaje de la procedencia de la energía usada en el sector residencial [9].	14
1.6.	Porcentaje de la distribución de energía en una vivienda con sistema de aire acondicionado en México [12].	15
1.7.	Porcentaje de la procedencia de las emisiones de GEI asociadas al consumo de combustible por sector [9].	16
1.8.	Evolución de las emisiones de CO ₂ eq. asociadas al consumo de combustibles por sector del 2002 al 2012 [9].	16
5.1.	Flujo de calor a través de la ventana donde intervienen los tres mecanismos de transferencia de calor; conducción (q''_{cond}), convección (q''_{conv}) y radiación (q''_{rad}), I_o es la radiación incidente, I_r es la radiación reflejada por el vidrio, I_i es la radiación transmitida directamente y I_a es la radiación absorbida por la ventana.	23
5.2.	Capa límite viscosa y capa límite térmica del fluido en la transferencia de calor por convección [23].	24
5.3.	Factor de forma asociado con el intercambio radiativo entre las superficies de área dA_i y dA_j [23].	26
5.4.	Espectro electromagnético, dividido en zonas y los colores correspondientes a zona visible [25].	27
5.5.	Espectro electromagnético de la radiación solar [26].	28

6.1. Composición del coeficiente de ganancia de calor solar, 1 representa total de la radiación solar incidente, τ_e es la transmitancia solar, r_e es la reflectancia solar, α_e es la absorptancia del vidrio, q_i y q_e son los factores de transferencia de calor secundario hacia el exterior e interior respectivamente [30].	34
6.2. Esquema de un doble vidrio hermético	36
7.1. Esquema de la transmisión, reflexión y absorción de la radiación solar dentro de un sistema de ventana con doble vidrio [32]. . . .	43
8.1. Esquema de un doble vidrio hermético con una capa de baja emisividad.	48
8.2. Temperatura al interior de la envolvente para un día de típico mayo en Temixco.	53
8.3. Temperatura al interior de la envolvente para un día típico de enero en Toluca.	53
8.4. Temperatura al interior de la envolvente para un día típico de febrero en Monterrey.	54
8.5. Temperatura al interior de la envolvente para un día típico de mayo en Monterrey.	54
8.6. Flujo de calor a través de la envolvente durante un día típico de mayo en Temixco para los cuatro módulos.	55
8.7. Flujo de calor a través de la envolvente durante un día típico de enero en Toluca para los cuatro módulos.	56
8.8. Flujo de calor a través de la envolvente durante un día típico de febrero en Monterrey para los cuatro módulos.	56
8.9. Flujo de calor a través de la edificación durante un día típico de mayo en Monterrey para los cuatro módulos.	57
8.10. comparación del flujo de calor y el comportamiento de la temperatura a través del módulo para un día típico de Temixco.	58
8.11. Transferencia de calor por radiación solar y convección más radiación de onda larga a través del vidrio claro.	61
8.12. Transferencia de calor por radiación solar y convección más radiación de onda larga a través del tintex.	61
8.13. Transferencia de calor por radiación solar y convección más radiación de onda larga a través del dvh.	62
8.14. Transferencia de calor por radiación solar y convección más radiación de onda larga a través del low-e.	62
8.15. Carga de enfriamiento (Wh) para los cuatro módulos durante el mes de mayo en Temixco.	63

8.16. Carga de calentamiento (Wh) para los cuatro módulos durante el mes de enero en Toluca.	63
8.17. Carga de enfriamiento (Wh) para los cuatro módulos durante el mes de mayo en Monterrey.	64
8.18. Carga de calentamiento (Wh) para los cuatro módulos durante el mes de febrero en Monterrey.	64

Lista de Tablas

5.1. Composición de porcentajes de energía del espectro solar y sus longitudes de onda para el ultravioleta (UV), visible e infrarrojo (IR).	28
6.1. Clasificación de los elementos de la envolvente de acuerdo a su inclinación.	31
8.1. Propiedades térmicas del CAD: conductividad térmica (k), densidad (ρ) y calor específico (c) [35].	45
8.2. Características promedio de la ventana formada por el vidrio claro y tintex [39].	46
8.3. Características promedio del dvh y el low-e [39].	47
8.4. Resultados de Temixco en mayo para los cuatro sistemas de ventanas sin aire acondicionado.	51
8.5. Resultados de Toluca en enero para los cuatro sistemas de ventanas sin aire acondicionado.	51
8.6. Resultados de Monterrey en febrero para los cuatro sistemas de ventanas sin aire acondicionado.	51
8.7. Resultados de Monterrey en mayo para los cuatro sistemas de ventanas sin aire acondicionado.	51
8.8. Flujo de calor a través de la ventana durante el mes de mayo en Temixco.	58
8.9. Flujo de calor a través de la ventana durante el mes de enero en Toluca.	59
8.10. Flujo de calor a través de la ventana durante el mes de mayo en Monterrey.	59
8.11. Flujo de calor a través de la ventana durante el mes de febrero en Monterrey.	59
8.12. Propiedades de los sistemas de ventanas calculadas usando la NOM-024-ENER-2011: coeficiente global de transferencia de calor (K), coeficiente de sombreado (CS).	66

8.13. Flujo de calor por componente para el módulo en Temixco de acuerdo a la NOM-020-ENER-2011.	67
8.14. Flujo de calor por componente para el módulo en Toluca de acuerdo a la NOM-020-ENER-2011.	67
8.15. Flujo de calor por componente para el módulo en Monterrey de acuerdo a la NOM-020-ENER-2011.	68
8.16. Desempeño térmico de los sistemas de ventanas ordenados del mejor al peor de las simulaciones EnergyPlus sin aire acondicionado.	70
8.17. Desempeño térmico de los sistemas de ventanas ordenados del mejor al peor de las simulaciones EnergyPlus con aire acondicionado.	71
8.18. Desempeño térmico de los sistemas de ventanas ordenados del mejor al peor de las evaluaciones con la NOM-020-ENER-2011.	71

Capítulo 1

Introducción

1.1. Sustentabilidad y energía

En 1987 se realizó el informe Brundtland por la Comisión Mundial para el Medio Ambiente y el Desarrollo de la organización de las naciones unidas encabezada por, en ese entonces, la primera ministra de Noruega Gro Harlem Brundtland. El fin de este informe fue reestructurar las políticas de desarrollo económico globalizador, ya que el avance tecnológico, industrial y el crecimiento poblacional habían causado un consumo desmedido de los recursos naturales [1]. Este consumo desmedido trajo como consecuencia el deterioro y desequilibrio de ecosistemas que repercuten en la sociedad con problemas alimentarios, de salud, económicos y de vulnerabilidad. En el informe Brundtland surge el concepto de desarrollo sustentable, definido como: desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer las capacidades que tienen las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades [2]. El desarrollo sustentable no se centra exclusivamente en las cuestiones ambientales. En términos generales, trata de lograr el desarrollo económico y el desarrollo social en equilibrio con la protección del medio ambiente.

Se debe reconocer que la protección del ambiente y el uso sustentable de los recursos naturales son esenciales para el progreso de la economía y para mejorar la calidad de vida de las generaciones presentes y futuras. Estos temas se han abordado en acuerdos como la Declaración de Río de 1992 sobre Medio Ambiente y Desarrollo, así como en la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo sustentable en Johannesburgo de 2002, y en América la Cumbre de las Américas [3]. La Cumbre de las Américas consiste en una serie de reuniones al más alto nivel gubernamental entre los países de América que tienen el propósito de difundir la prosperidad a través de la integración económica y el libre comercio, erradicar la pobreza y la discriminación y garantizar el desarrollo sustentable [4]. Existe una relación

entre energía y sustentabilidad que está incluida en los convenios internacionales y políticas de acción por los gobiernos que proponen un desarrollo energético más eficiente, socialmente más equitativo y ambientalmente responsable. Estos propósitos se han establecido en la Declaración de Principios y en el Plan de Acción de la Cumbre de las Américas, que en materia energética busca duplicar los esfuerzos para garantizar el uso racional de energía y mejorar el potencial de las fuentes de energía renovables en el desarrollo sustentable. La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) ha establecido una perspectiva en cuestión de energía sobre el diseño de políticas de reestructuración energética que permita enfrentar los desafíos del crecimiento económico y garantizar la protección del medio ambiente. En la actualidad se buscan estrategias para mejorar la eficiencia del sector energético así como el ahorro de energía [5].

La eficiencia energética es la obtención de los mismos productos y servicios, pero disminuyendo el uso de energía, con la misma o mayor calidad de vida, menor contaminación, a un precio inferior al actual y cuidando los recursos naturales [6]. El ahorro de energía se logra teniendo hábitos más responsables sobre el uso de la energía, es decir apagar luces y desenchufar los aparatos eléctricos cuando no se utilicen y recurrir a electrodomésticos de alta eficiencia energética. Al incorporar el desarrollo sustentable en el sector energético se logrará disminuir significativamente el consumo de energía y como resultado una reducción de las emisiones de CO₂ [7].

Los recursos energéticos basados en combustibles fósiles siguen abarcando el mayor porcentaje del consumo energético mundial, lo que origina una serie de impactos ambientales como el deterioro de la capa de ozono, el calentamiento global y el cambio climático [8]. En México el tipo de energético de mayor demanda siguen siendo los hidrocarburos. Como se observa en la Figura 1.1, en el 2012 los hidrocarburos representaron el 86 % de la oferta interna bruta, de la cual el petróleo y sus derivados aportaron 45 % de la oferta total y el gas natural y condensados contribuyeron con el 41 %, posteriormente se encuentran las energías renovables con un 7 %, representadas en su mayoría por hidroeléctricas, después se encuentran el carbón y coque con un 6 % y por último está la nucleenergía con un 1 % [9].

1.2. Consumo energético a nivel mundial

Se entiende por consumo energético al gasto total de energía para un proceso determinado, así como la que se emplea para satisfacer las necesidades energéticas de la sociedad. De acuerdo a un estudio realizado por la United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), las edificaciones consumen el 41 % de la energía producida a nivel mundial, seguido del sector transporte con un

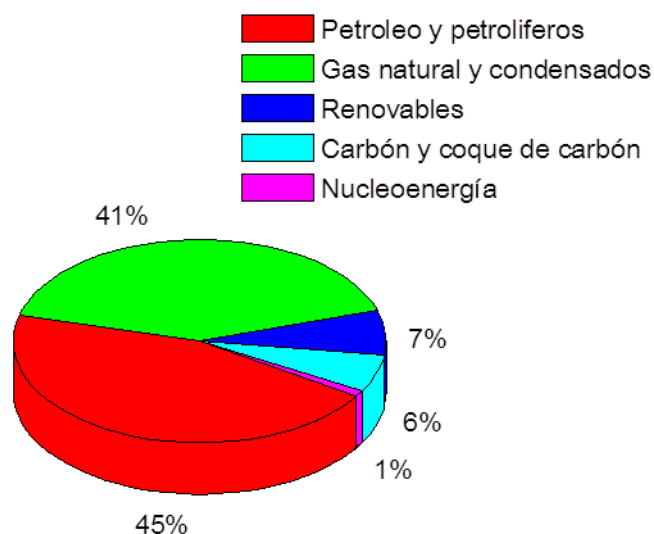


Figura 1.1: Porcentaje de la oferta interna bruta por tipo de energético [9].

31 % y por último la industria con el 28 %, como se muestra en la Figura 1.2. De la energía consumida por las edificaciones, el 50 % es utilizada en sistemas de calefacción y enfriamiento [10]. Así mismo se reporta que las emisiones de CO_2 provenientes de edificaciones suman más del 20 % de los gases de efecto invernadero en los países desarrollados [11], como se puede observar en la Figura 1.3.

1.3. Consumo energético en México

De acuerdo al Balance Nacional de Energía en el 2012, el consumo energético total en México fue de 4,902 Petajoules (PJ), del cual el 47 % corresponde al sector del transporte, el 31 % corresponde al sector industrial, seguido del sector residencial con un 16 % , seguido del sector agropecuario con 3 %, después el sector comercial con 2 % y por último el sector público con 1 %, como se muestra en la Figura 1.4 [9]. La energía consumida por el sector residencial equivale aproximadamente 771 PJ. En la Figura 1.5 se muestra la procedencia de la energía en el sector residencial. Se puede observar que el tipo de energético más consumido es la rama de los petrolíferos consumiendo 37 %, seguido de la leña con un 33.5 %, posteriormente la electricidad con 25 %, después el gas seco con 4 % y por último la energía solar con 0.5 %. En la Figura 1.6 se muestra la distribución en porcentajes del consumo promedio de energía en una vivienda con sistema de aire acondicionado en México.

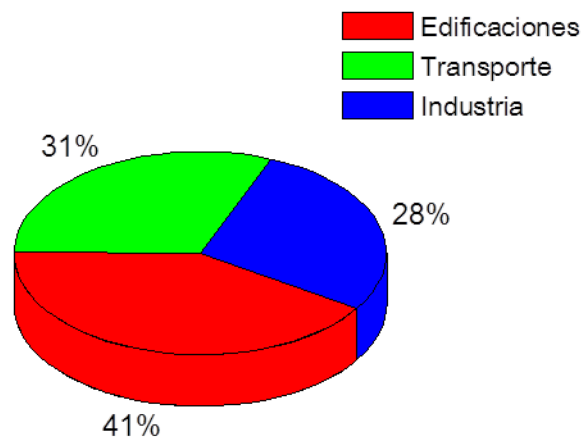


Figura 1.2: Porcentaje del consumo energético a nivel mundial para el sector edificaciones, transporte e industria [10].

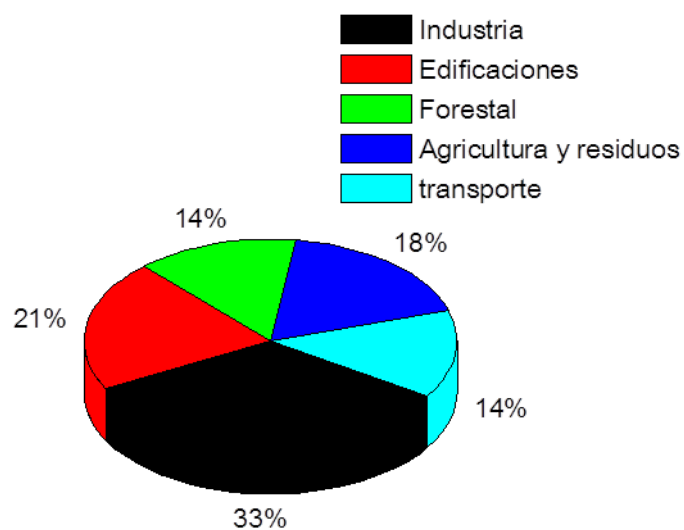


Figura 1.3: Porcentaje de las emisiones de CO₂ asociadas al consumo de combustible por sectores industrial, edificaciones, forestal, agricultura y residuos y transporte para países desarrollados para el 2013 [10].

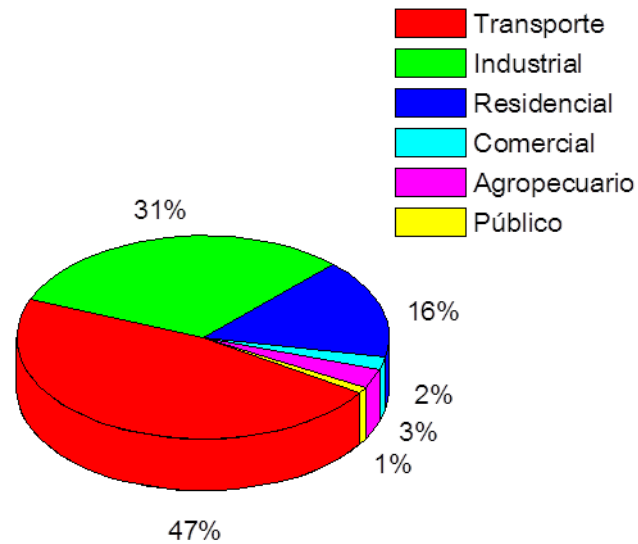


Figura 1.4: Porcentaje del consumo energético en México para el sector residencial, el industrial, de transporte, el agropecuario, el comercial y el público [9].

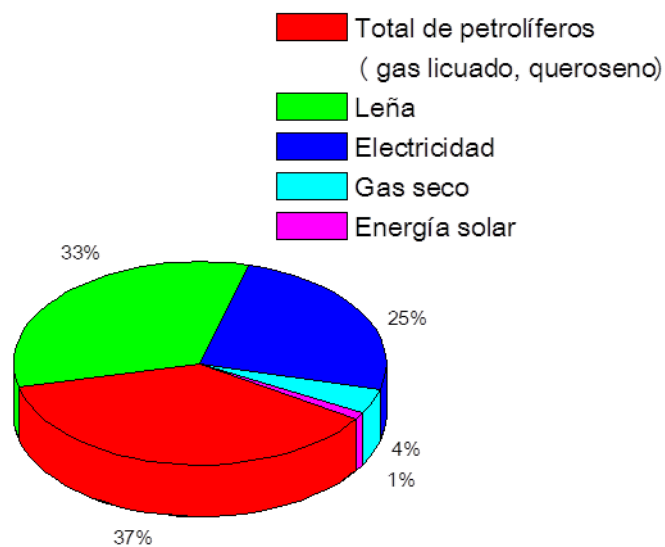


Figura 1.5: Porcentaje de la procedencia de la energía usada en el sector residencial [9].

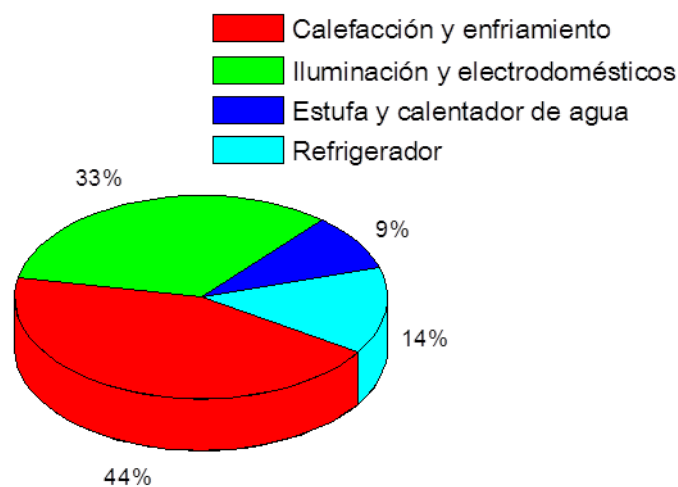


Figura 1.6: Porcentaje de la distribución de energía en una vivienda con sistema de aire acondicionado en México [12].

El 44 % del total de energía corresponde al uso de sistemas de calefacción o enfriamiento, el 33 % por iluminación y electrodomésticos, el 14 % corresponde al uso del refrigerador y el 9 % por el uso de estufa y calentador de agua [12]. En el 2010, las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) de la categoría de energía en México, alcanzaron aproximadamente 490 teragramos (Tg) de CO_2 eq. En la Figura 1.7 se pueden observar las emisiones de GEI asociadas al consumo de combustible por sector en México. La categoría de transporte es la que más emitió GEI con el 38 % del total, en segundo lugar está la generación de electricidad que aportó el 32 % de las emisiones, seguido del sector industrial que aportó el 15 % del total, el consumo propio del sector energético contribuyó con 8 % del total de emisiones, la categoría residencial emitió 4 %, el sector agropecuario aportó el 2 % y por último la categoría comercial representó el 1 % de las emisiones [9]. Como se puede apreciar en la Figura 1.8, las emisiones de GEI han aumentado gradualmente a lo largo del tiempo, por lo cual cada sector debe tomar estrategias para mitigar la contaminación. Como se ha demostrado, las edificaciones juegan un papel importante en el consumo energético mundial, y por lo tanto en la emisión de gases de efecto invernadero [13], por lo que un buen diseño de las edificaciones puede ayudar a disminuir el uso de sistemas de aire acondicionado y reducir las emisiones de CO_2 .

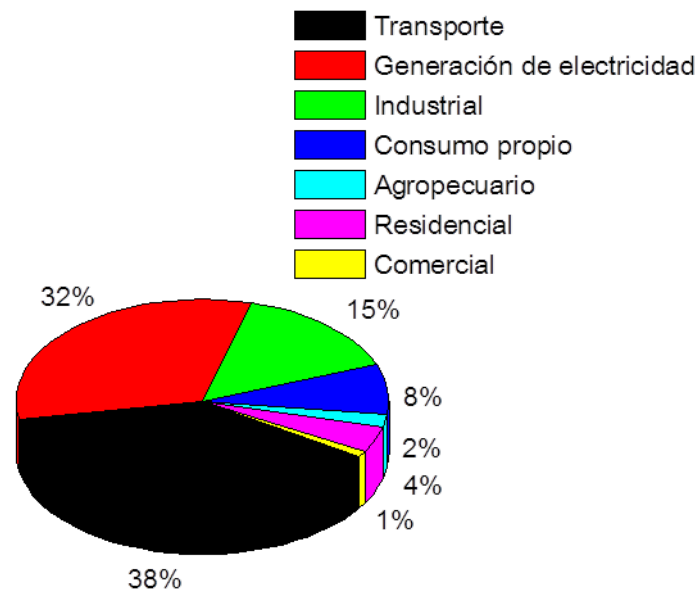


Figura 1.7: Porcentaje de la procedencia de las emisiones de GEI asociadas al consumo de combustible por sector [9].

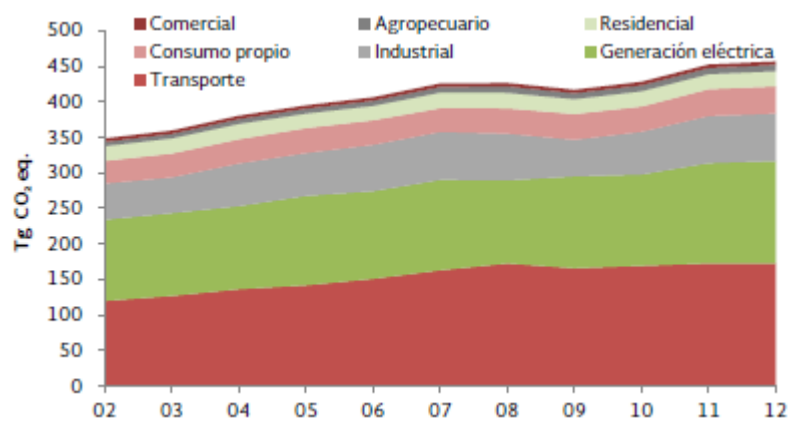


Figura 1.8: Evolución de las emisiones de CO_2 eq. asociadas al consumo de combustibles por sector del 2002 al 2012 [9].

1.4. Importancia de las ventanas en edificaciones

Como se ha visto, las edificaciones son responsables del 16 % del consumo energético total en México, en un hogar con sistemas de aire acondicionado el consumo energético principalmente es por el uso de dichos sistemas. Se define como envolvente a todos los componentes de la edificación que están en contacto con el exterior, como paredes, techo, piso y ventanas. Las ventanas son esenciales en las edificaciones, ya que proveen ganancia solar, ventilación de aire, iluminación y una vista hacia el exterior [14], brindando beneficios para sus ocupantes como un ambiente sano y confortable térmicamente. Al estar bien diseñada la envolvente, se puede reducir el consumo de energía en sistemas de aire acondicionado, disminuyendo las emisiones de GEI [15]. El consumo energético de un edificio bajo condición de uso de aire acondicionado y el confort de los habitantes bajo condición de no uso de aire acondicionado, dependen principalmente del flujo de calor a través de la ventana [16], la cual es responsable del 20-40 % del total de la energía consumida para el caso de uso de aire acondicionado de enfriamiento o calentamiento [17]. Para el caso de sin uso de aire acondicionado no hay estudios previos sobre la cuantificación total de la contribución del flujo de calor en el discomfort higrotérmico.

La selección de las ventanas es un punto muy importante a considerar en el diseño de la edificación para determinar la ganancia de energía solar, además de considerar la orientación y las protecciones solares. Las ventanas tienen tanto beneficios como inconvenientes. Bajo condición de aire acondicionado, cuando la radiación solar se transmite a través de la ventana hacia el interior de la edificación en las horas de mayor calor se requiere más energía de enfriamiento para mantener una temperatura de confort y cuando el calor se transmite hacia el exterior durante las horas de frío se requiere mayor energía para calentar el espacio con el fin de mantener el confort [18]. Se han hecho estudios sobre tipos de vidrios y el potencial que tienen para reducir las cargas de calentamiento y enfriamiento y así disminuir el consumo de energía. La tecnología en ventanas se ha desarrollado bastante para afrontar los desafíos energéticos de la actualidad, sin embargo algunos sistemas de ventanas no han alcanzado la comercialización esperada debido al alto costo que implica la implementación de los sistemas [19]. Para el caso sin uso de aire acondicionado no hay mucha información.

1.5. Confort térmico en edificaciones

Se entiende por confort higrotérmico al bienestar físico y psicológico de los humanos bajo condiciones de temperatura, humedad y corrientes de viento convenientes para realizar sus actividades [20]. El 70 % del territorio mexicano posee

climas cálidos [21] en donde se puede reducir el uso de aire acondicionado de enfriamiento, considerando el diseño bioclimático en las edificaciones, por lo cual es importante analizar los sistemas constructivos y contar con herramientas para realizar cálculos de la transferencia de calor a través de dichos sistemas.

Capítulo 2

Justificación

En México existen políticas que buscan reducir el consumo de energía, dos de las normas que regulan el consumo de energía por uso de aire acondicionado de enfriamiento en las edificaciones son la NOM-008-ENER-2001 y la NOM-020-ENER-2011.

Estas normas tienen el objetivo de limitar la ganancia de calor a través de la envolvente de la edificación para racionalizar el uso de la energía de los sistemas de enfriamiento, la NOM-008-ENER-2001 aplica en edificios no residenciales y la NOM-020-ENER-2011 aplica para edificios residenciales. Se han realizado estudios que demuestran que las normas tienen ciertas limitaciones para su aplicación por varias razones, la más importante es que incluye un modelo de transferencia de calor independiente del tiempo [22]. Esto trae como consecuencia una posible mala elección en los materiales usados en los sistemas constructivos de la envolvente que repercuten en el gasto de energía en sistemas de acondicionamiento de aire o en el confort higrotérmico de los habitantes. Dichos estudios han sido realizados en los componentes opacos de la edificación como muros y techos. También es necesario realizar estudios del modelo de flujo de calor en componentes no opacos (ventanas) de dichas normas y comparar los resultados con un programa de simulación numérica que utilice un modelo dependiente del tiempo como lo es EnergyPlus.

Capítulo 3

Objetivos

3.1. Objetivo general

Comparar la transferencia de calor en sistemas de ventanas calculada con la metodología de la norma NOM-020-ENER-2011 que usa un modelo de transferencia de calor independiente del tiempo con la calculada por un modelo de transferencia de calor dependiente del tiempo bajo condición de uso y de no uso de aire acondicionado.

3.2. Objetivos particulares

- Realizar el cálculo de la transferencia de calor de cuatro sistemas de ventanas con un modelo dependiente del tiempo bajo condición de uso y de no uso de aire acondicionado.
- Realizar el cálculo de la transferencia de calor en cuatro sistemas de ventanas usando la NOM-020-ENER-2011.
- Comparar los resultados de la transferencia de calor obtenidos con la NOM-020-ENER-2011 con los resultados de la transferencia de calor obtenidos en las simulaciones de EnergyPlus bajo condición de aire acondicionado.

Capítulo 4

Metodología

- Establecer los sistemas de ventanas que se evaluarán con la NOM-020-ENER-2011 y con EnergyPlus usando un modelo de transferencia de calor dependiente del tiempo, dichos sistemas de ventanas son escogidos de acuerdo a los más habituales en el país.
- Definir las ciudades de la República Mexicana que serán evaluadas, las cuales representarán tres climas diferentes del país.
- Realizar la evaluación de la transferencia de calor a través de la ventana de acuerdo a la NOM-020-ENER-2011.
- Evaluar los sistemas de ventanas usando EnergyPlus.
- Comparar los resultados usando la NOM-020-ENER-2011 y EnergyPlus para determinar si la NOM-020 es adecuada.

Capítulo 5

Transferencia de calor en ventanas

Como se mencionó en la sección 1.4, el flujo de calor por la ventana contribuye al consumo de energía por calefacción o enfriamiento en una edificación. El consumo de energía en una edificación o el confort higrotérmico de los habitantes dependen en parte de la ventana y por lo tanto de la ubicación de la misma, de si tiene o no protecciones solares y de las condiciones climatológicas del lugar. Entender los mecanismos de transferencia de calor implicados en ellas puede ayudar a diseñar ventanas para disminuir el flujo de calor cuando hay uso de sistemas de aire acondicionado y buscar el confort higrotérmico cuando no se use acondicionamiento de aire, especialmente el flujo de calor por radiación, debido a que la ganancia de calor por radiación solar contiene la mayor carga térmica. En este capítulo se explica el proceso del flujo de calor a través de una ventana simple, en el cual están presentes los tres mecanismos de transferencia de calor; conducción, convección y radiación, que actúan simultáneamente, como se aprecia en la Figura 5.1. El flujo de calor por convección se expresa como q''_{conv} , el flujo de calor por conducción se expresa como q''_{cond} y el flujo de calor por radiación se expresa como q''_{rad} . En la sección 5.1 se describe el mecanismo de conducción de calor dentro de una ventana, en la sección 5.2 el flujo de calor por convección y en la sección 5.3 el de radiación.

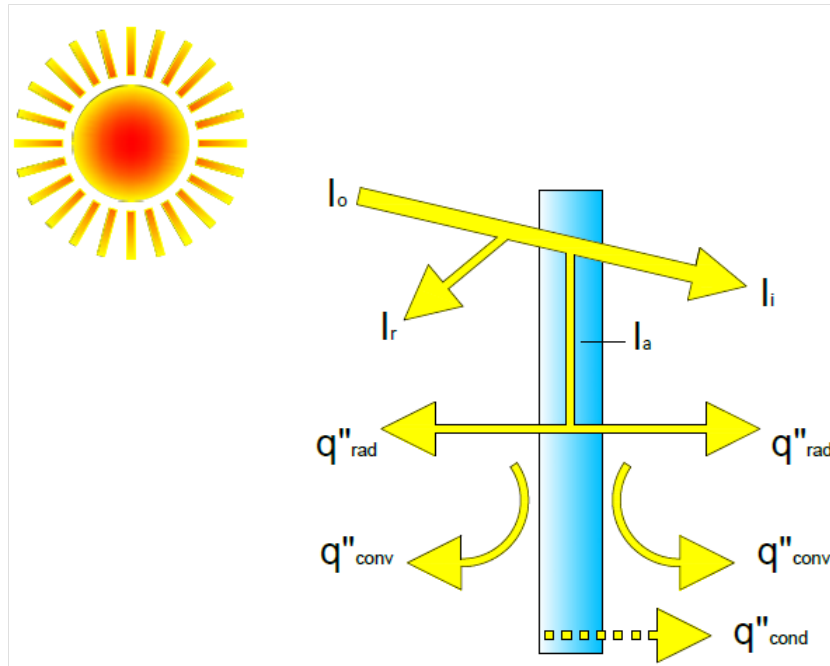


Figura 5.1: Flujo de calor a través de la ventana donde intervienen los tres mecanismos de transferencia de calor; conducción (q''_{cond}), convección (q''_{conv}) y radiación (q''_{rad}), I_o es la radiación incidente, I_r es la radiación reflejada por el vidrio, I_i es la radiación transmitida directamente y I_a es la radiación absorbida por la ventana.

5.1. Conducción

La conducción de calor es el mecanismo de transferencia de calor basado en el contacto directo entre los cuerpos, donde el calor fluye desde el cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura. En una ventana, la ecuación de conducción de calor dependiente del tiempo asumiendo propiedades constantes y que el flujo de calor es unidimensional es

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0, \quad (5.1)$$

donde ρ es la densidad del vidrio (Kg/m^3), λ la conductividad térmica del vidrio (W/mK), c es el calor específico (J/kg K), T es la temperatura (K), x es la posición y t es el tiempo

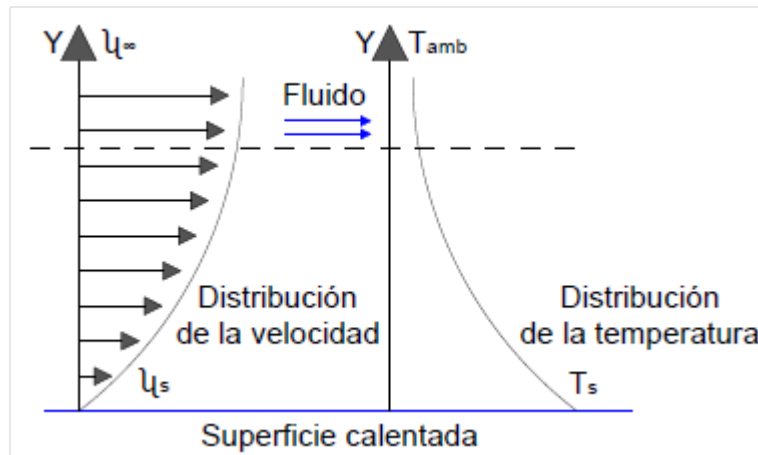


Figura 5.2: Capa límite viscosa y capa límite térmica del fluido en la transferencia de calor por convección [23].

5.2. Convección

La transferencia de calor por convección se da entre la superficie de un sólido y un fluido en movimiento, debido a la difusión de las moléculas y al movimiento del fluido que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. Una consecuencia de la interacción fluido-superficie es una región en el fluido llamada *capa límite hidrodinámica o de velocidad*, donde la velocidad del fluido va desde cero en la superficie a un valor finito u_∞ asociado con el flujo a través del cual la temperatura varía de temperatura superficial T_s en $y = 0$ a una temperatura finita T_∞ en el flujo exterior [23], como lo muestra la Figura 5.2. En una ventana, el flujo de calor por convección se da en la superficie de la ventana que está al exterior de la edificación debido al contacto directo que tiene con el aire del ambiente y en la superficie del vidrio al interior de la edificación que está en contacto con el aire al interior. La transferencia de calor por unidad de área (W/m^2) debida a la convección usando la *ley de enfriamiento de Newton* aplicada a la superficie del vidrio interior es

$$q''_{conv} = h(T_s - T_{amb}), \quad (5.2)$$

donde T_s es la temperatura de la superficie interior de la ventana (K), T_{amb} es la temperatura del aire al interior (K), h es el coeficiente convectivo ($\text{W/m}^2\text{K}$) que expresa la capacidad del fluido para transferir calor por convección por kelvin y por unidad de área de la superficie, depende de las condiciones de la capa límite en las que influye el movimiento del fluido.

5.3. Radiación

La radiación es la transmisión de calor través de ondas electromagnéticas emitidas por un cuerpo a una temperatura mayor a 0 K, siendo el único mecanismo que puede transmitir el calor a través del vacío. Cuando la radiación solar incide sobre la ventana un porcentaje se refleja directamente, como se ve en la Figura 5.1 indicado por I_r . La reflectancia de la ventana, r , es la medida adimensional que representa la fracción de radiación incidente reflejada por una superficie. Para el caso de ventanas depende del tipo de vidrio, calidad de la superficie del vidrio, presencia de revestimientos y ángulo de incidencia de luz,. La radiación reflejada (W/m^2) se calcula como

$$I_r = I_o \cdot r, \quad (5.3)$$

donde I_o es la radiación incidente. Un porcentaje de la radiación incidente es transmitida directamente a través el vidrio. La transmitancia, τ , es la medida adimensional que representa la fracción de la radiación incidente que se transmite, la radiación transmitida (W/m^2) se calcula como

$$I_i = I_o \cdot \tau. \quad (5.4)$$

El porcentaje restante de la radiación incidente es absorbida por la superficie del vidrio, la cual se calcula con la siguiente ecuación

$$I_a = I_o \cdot \alpha, \quad (5.5)$$

donde I_a es la radiación absorbida (W/m^2) y α es la absorptancia del vidrio, que es una medida adimensional y representa la fracción de radiación incidente absorbida por la superficie. Una vez que el vidrio ha absorbido la energía, ésta se transforma en energía térmica elevando la temperatura del vidrio. La radiación absorbida también puede expresarse en función de la transmitancia y reflectancia como

$$I_a = I_o \cdot (1 - r - \tau). \quad (5.6)$$

Un cuerpo al tener una temperatura mayor a 0 K, emite energía radiativa (W/m^2), que para el caso de la ventana, considerándola como un cuerpo gris se calcula mediante la *ley de Stefan-Boltzmann* [24]

$$q''_{rad} = \sigma \varepsilon T_s^4, \quad (5.7)$$

donde ε es la emisividad del material con el que esté hecha la ventana, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ es la constante de Stefan-Boltzmann y T_s es la temperatura absoluta de la superficie de la ventana (K). Los cálculos de transferencia de calor

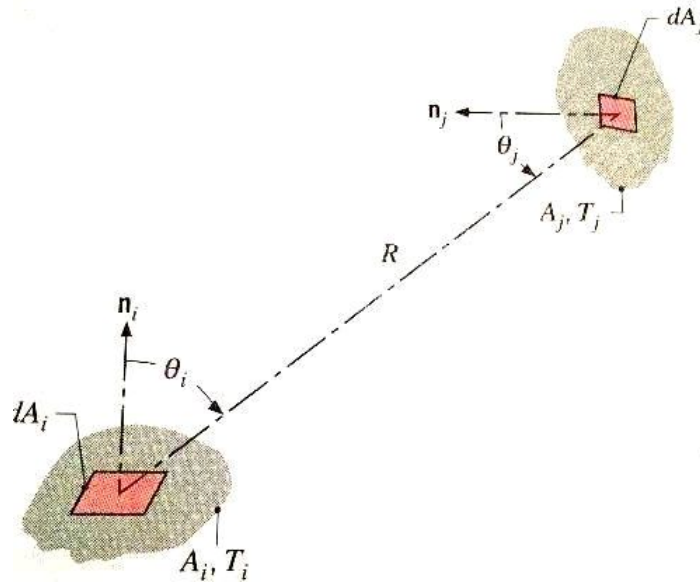


Figura 5.3: Factor de forma asociado con el intercambio radiativo entre las superficies de área dA_i y dA_j [23].

por radiación pueden ser muy complejos debido a la dependencia no lineal de las propiedades con la temperatura de la superficie y la capacidad de los materiales de absorber, transmitir y emitir radiación térmica. Considérese el flujo de calor entre la ventana y las superficies que están alrededor cuando éstos se calientan y emiten radiación [24], el flujo de transferencia de calor por radiación (W/m^2) está dado por la siguiente ecuación

$$q''_{rad} = \varepsilon \sigma F_{ij} (T_s^4 - T_{alr}^4), \quad (5.8)$$

donde T_{alr} es la temperatura de las superficies que están alrededor y F_{ij} es el factor de forma.

5.3.1. Factor de forma

El factor de forma F_{ij} se define como la fracción de la radiación que irradia la superficie i y es interceptada por la superficie j . En la Figura 5.3 se puede observar una expresión general del F_{ij} , considérese las superficies orientadas de forma arbitraria A_i y A_j , los elementos de área sobre cada superficie, dA_i y dA_j , están conectados por una línea de longitud R que forma los ángulos polares θ_i y θ_j con las normales de la superficie n_i y n_j . [23]

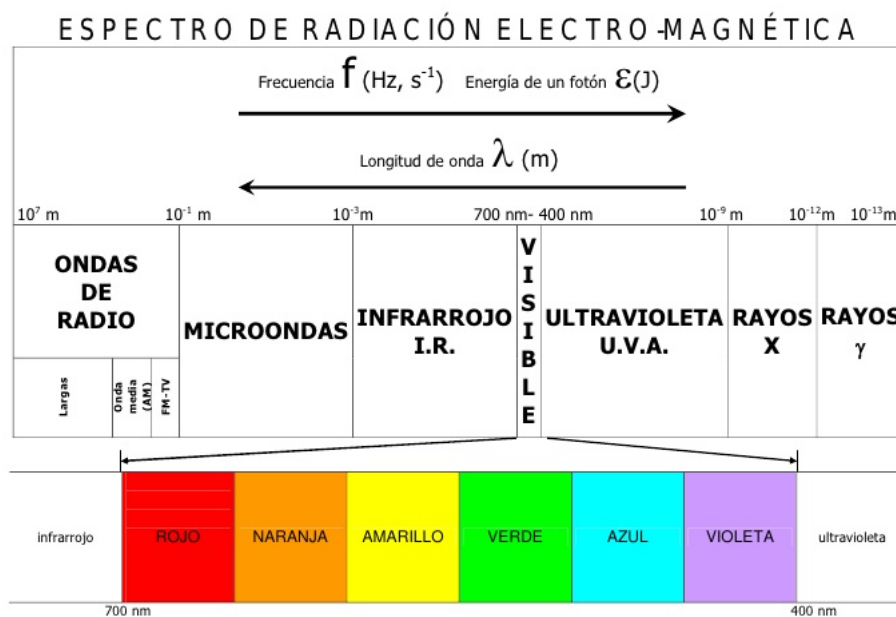


Figura 5.4: Espectro electromagnético, dividido en zonas y los colores correspondientes a zona visible [25].

5.3.2. Espectro solar

El espectro electromagnético es el conjunto de todas las radiaciones electromagnéticas ordenadas según su longitud de onda λ o su frecuencia f [25], contiene longitudes de onda menores a 10^{-12} m hasta longitudes de onda mayores a 10^3 m y se divide en zonas de acuerdo al intervalo entre longitudes de onda como se muestra en la Figura 5.4, aunque no hay una separación clara entre cada zona. El conjunto de las longitudes de onda emitidas por el sol se denomina espectro solar, contiene longitudes de onda que van de las 0.20 a las 3.0 micras [26] como se muestra en la Figura 5.5. La radiación solar se clasifica en tres tipos, de acuerdo a su longitud de onda; radiación ultravioleta (UV), radiación visible y radiación infrarroja (IR). La radiación UV cubre un intervalo de longitud de onda entre 0.20 micras a 0.36 micras aproximadamente, el intervalo de longitudes de onda de la luz visible va del violeta en 0.36 micras al rojo en 0.72 micras y la radiación IR es mayor a 0.72 micras [27].

De la energía proveniente del sol que incide en la superficie terrestre, el mayor porcentaje corresponde a la luz visible con un 50 %, el 45 % a la infrarroja y un 5 % a la ultravioleta como lo muestra la Tabla 5.1.

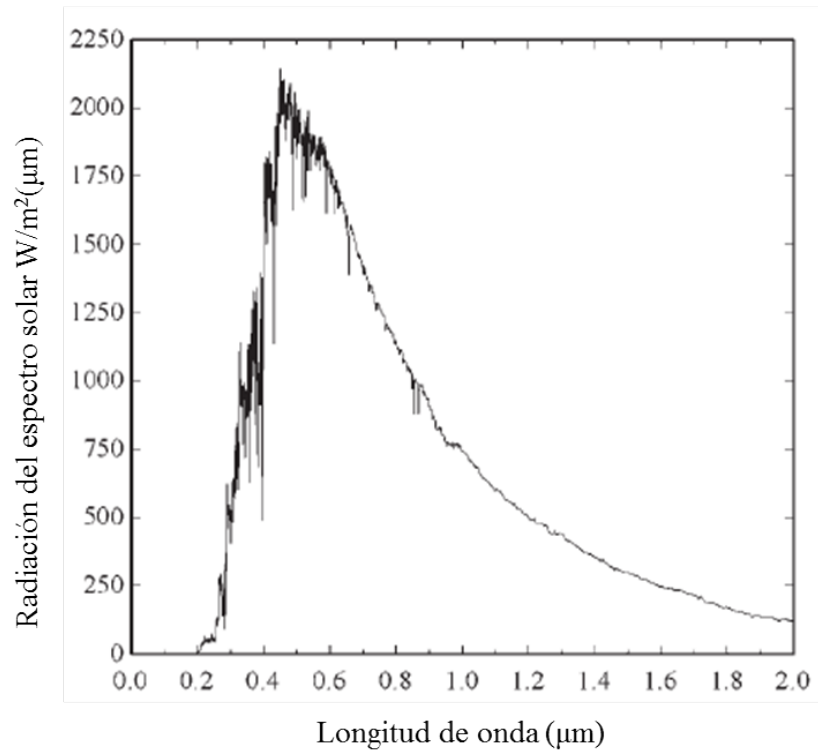


Figura 5.5: Espectro electromagnético de la radiación solar [26].

Tipo de radiación	Longitud de onda (nm)	Porcentaje de la energía
UV	200 a 360	aprox. 5 %
Visible	360 a 720	aprox 50 %
IR	720 a 3000	aprox 45 %

Tabla 5.1: Composición de porcentajes de energía del espectro solar y sus longitudes de onda para el ultravioleta (UV), visible e infrarrojo (IR).

Debido a la gran cantidad de radiación solar que puede ingresar por una ventana es deseable reducir la ganancia de calor en las zonas cálidas, dado que de la radiación solar total, el 45 % es infrarroja y se percibe como calor lo cual genera consumo de energía por los sistemas de enfriamiento o un discomfort cálido; sin embargo en zonas frías es necesario aprovechar esta energía y evitar pérdidas de calor desde el interior para disminuir el uso de calefacción o evitar el discomfort frío.

Capítulo 6

Normativas en México para el ahorro de energía

En México se han establecido normas que buscan disminuir el consumo de energía así como promover la eficiencia del sector energético en las edificaciones, entre ellas están la NOM-008-ENER-2001 y la NOM-020-ENER-2011. Dichas normas evalúan el flujo de calor a través de la envolvente en edificios residenciales y no residenciales y tienen el propósito de racionalizar el uso de la energía de los sistemas de enfriamiento. En México las principales zonas que requieren del acondicionamiento térmico en edificaciones son las zonas norte y costeras, en donde es más común el uso de sistemas de enfriamiento que de calefacción [28, 29]. En este capítulo se explica el cálculo de la transferencia de calor en una edificación de acuerdo a las normas oficiales mexicanas. Es importante mencionar que en este capítulo se usa la nomenclatura de las normas para no causar confusión a un lector de la norma que consulte esta tesis.

6.1. NOM-020-ENER-2011 y NOM-008-ENER-2001

La norma oficial mexicana NOM-008-ENER-2001, (NOM-008) Eficiencia energética en edificaciones, envolventes de edificios no residenciales y la norma oficial mexicana NOM-020-ENER-2011, (NOM-020) Eficiencia energética en edificaciones.- Envolvente de edificios para uso habitacional, mejoran la selección de materiales de la envolvente considerando el comportamiento térmico, con el fin de obtener un ahorro de energía. Estas normas tienen por objetivo limitar la ganancia de calor a través de la envolvente de la edificación, para racionalizar el uso de la energía de los sistemas de enfriamiento. A pesar de que ambas normas tienen el mismo objetivo, lo que las diferencia es su campo de aplicación, la NOM-008

Nombre de la componente y ángulo de la normal a la superficie exterior con respecto a la vertical		Partes
Techo	Desde 0° y hasta 45°	Opaco No opaco (domo y tragaluz)
Pared	Mayor a 45° y hasta 135°	Opaca (muro) No opaca (vidrio, acrílico)
Superficie inferior	Mayor a 135° y hasta 180°	Opaca No opaca (vidrio, acrílico)
Piso	Generalmente 180°: también se deben considerar los pisos inclinados	Opaco No opaco (vidrio, acrílico)

Tabla 6.1: Clasificación de los elementos de la envolvente de acuerdo a su inclinación.

aplica en cualquier edificación nueva y ampliaciones quedando excluidos los edificios cuyo uso primordial sea industrial y habitacional y la NOM-020 aplica a todos los edificios nuevos para uso habitacional y las ampliaciones de los edificios para uso habitacional existentes. En esta tesis se realizarán los cálculos usando la NOM-020.

6.2. Transferencia de calor a través de la envolvente

La norma considera dos edificaciones:

1. Edificio para uso habitacional proyectado, que es el que se pretende construir.
2. Edificio para uso habitacional de referencia, es aquel que conservando la misma orientación, las mismas condiciones de colindancia y las mismas dimensiones en planta y elevación del edificio proyectado, es utilizado para determinar un presupuesto energético máximo, con características de la envolvente definidas en la norma.

El presupuesto energético es la comparación de la ganancia de calor a través de la envolvente del edificio para uso habitacional proyectado y el de referencia. Para cumplir con las normas, la ganancia de calor del edificio proyectado debe ser menor o igual a la ganancia de calor del edificio de referencia. La clasificación de techo, paredes, superficie inferior y piso se muestran en la Tabla 6.1. La ganancia de calor a través de la envolvente del edificio proyectado es la suma de la ganancia de calor por conducción a través del sistema, considerando la

convección al exterior y al interior, más la ganancia de calor por radiación solar a través de los elementos no opacos (ventanas),

$$\phi_p = \phi_{pc} + \phi_{ps}, \quad (6.1)$$

donde ϕ_p es la ganancia total de calor a través de la envolvente del edificio (W), ϕ_{pc} es la ganancia por conducción (W) a través de las partes opacas y no opacas de la envolvente, ϕ_{ps} es la ganancia de calor por radiación solar (W) a través de los elementos no opacos de la envolvente.

A continuación se presenta el cálculo del flujo de calor por conducción a través de cada una de las componentes de la edificación proyectada. La norma no considera la ganancia de calor a través del piso, a menos que el edificio tenga uno o más pisos de estacionamiento por encima del suelo se considera el flujo de calor a través de ellos. La ganancia total de calor por conducción es

$$\phi_{pc} = \sum_{i=1}^6 \phi_{pci}, \quad (6.2)$$

donde i son las diferentes orientaciones: 1 es techo, 2 muro norte, 3 muro este, 4 muro sur, 5 muro oeste y 6 piso. A su vez, la ganancia de calor por conducción a través de la componente con orientación i , es

$$\phi_{pci} = \sum_{j=1}^i [K_j \cdot A_{ij} \cdot (t_{ei} - t)], \quad (6.3)$$

donde j son las diferentes porciones que forman la componente i -ésima de la envolvente, K_j es el coeficiente global de transferencia de calor de cada porción ($\text{W/m}^2 \text{K}$) que está en función de los materiales que lo constituyen, A_{ij} es el área de la porción j (m^2), t_{ei} es el valor de la temperatura equivalente promedio del exterior que está en función del clima de cada región ($^{\circ}\text{C}$), determinado según la tabla 1 de la NOM-020 o NOM-008, t es el valor de la temperatura al interior ($^{\circ}\text{C}$), determinado según la tabla 1 de la norma para la localidad correspondiente.

El coeficiente global de transferencia de calor se expresa como

$$K = \frac{1}{M}, \quad (6.4)$$

donde M es el aislamiento térmico total de una porción de la envolvente del edificio ($\text{m}^2\text{K/W}$) para cada capa.

El aislamiento térmico total de las porciones de la envolvente de un edificio formado con capas térmicamente homogéneas y perpendiculares al flujo de calor es

$$M = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{\ell_1}{\lambda} + \frac{\ell_2}{\lambda} + \dots \frac{\ell_n}{\lambda_n}, \quad (6.5)$$

donde h_i es la conductancia superficial interior ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$), que tiene un valor de $8.1 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$ para superficies verticales, $9.4 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$ para superficies horizontales con flujo de calor hacia arriba y $6.6 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$ para superficies horizontales con flujo de calor hacia abajo, h_e es la conductancia superficial exterior y es igual a $13 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$ tanto para superficies verticales como horizontales, n es el número de capas que forman la porción de la envolvente del edificio, ℓ es el espesor de cada una de las capas que componen la porción de la envolvente del edificio (m), λ es el coeficiente de conductividad térmica de cada uno de los materiales que componen la porción de la envolvente del edificio ($\text{W}/\text{m K}$).

La norma también es capaz de considerar sistemas constructivos opacos formados por capas no homogéneas paralelas a la superficie, sin embargo no se presenta en esta tesis porque los módulos evaluados con la NOM-020 están formados de sistemas constructivos con capas homogéneas.

6.3. Transferencia de calor a través de las ventanas

Las ventanas también presentan transferencia de calor por conducción, que se calcula de igual manera que en las partes opacas, como se mostró en la sección 6.2. El cálculo de la ganancia de calor por radiación para cada una de las partes no opacas (ventanas) del edificio proyectado es

$$\phi_{ps} = \sum_{i=1}^5 \phi_{psi}, \quad (6.6)$$

donde i son las diferentes orientaciones: 1 el techo, 2 pared norte, 3 pared este, 4 pared sur, 5 pared oeste, La ganancia de calor por radiación solar (W) a través de la componente con orientación i , se calcula con la siguiente ecuación:

$$\phi_{psi} = \sum_{j=1}^m [A_{ij} \cdot CS_j \cdot FG_i \cdot SE_{ij}], \quad (6.7)$$

donde j son las diferentes porciones transparentes del edificio proyectado, A_{ij} es el área de la porción transparente j con orientación i (m^2), CS_j es el coeficiente de sombreado del vidrio de cada porción transparente, con valor adimensional entre cero y uno, que a su vez se calcula con la NOM-024-ENER-2012 o se toma de acuerdo a las especificaciones del fabricante de la ventana, FG_i es el factor de la ganancia solar por orientación (W/m^2), que lo determina según la tabla 1 del apéndice A de la NOM-020-ENER-2011, SE_{ij} es el factor de corrección por sombreado exterior para cada porción transparente con valor adimensional entre cero y uno.

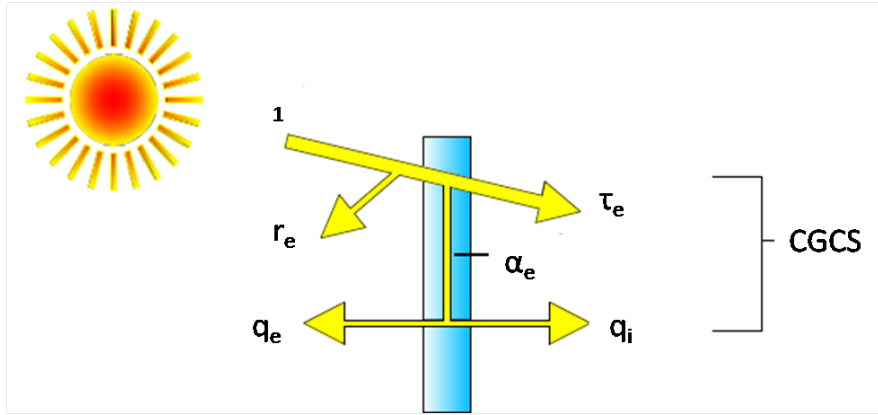


Figura 6.1: Composición del coeficiente de ganancia de calor solar, 1 representa total de la radiación solar incidente, τ_e es la transmitancia solar, r_e es la reflectancia solar, α_e es la absortancia del vidrio, q_i y q_e son los factores de transferencia de calor secundario hacia el exterior e interior respectivamente [30].

6.3.1. NOM-024-ENER-2012.

La Norma Oficial Mexicana NOM-024-ENER-2012, Características térmicas y ópticas del vidrio y sistemas vidriados para edificaciones. Etiquetado y métodos de prueba, establece la obligación de certificar las características ópticas y térmicas de los vidrios y sistemas vidriados, así como, los métodos de prueba para su verificación con el fin de asegurar un buen cálculo de la transferencia de calor a través de las ventanas [30]. El coeficiente de sombreado se define como la razón entre el calor por radiación solar que se gana a través de un vidrio específico y el calor por radiación solar que se gana a través de un vidrio claro de 3 mm de espesor, bajo idénticas condiciones

$$CS = \frac{CGCS}{0.87}, \quad (6.8)$$

donde $CGCS$ es el coeficiente de ganancia de calor solar, que es la proporción de la ganancia de calor que entra a través de un sistema vidriado por la radiación solar incidente. La ganancia de calor solar incluye la radiación solar transmitida directamente y la fracción de la radiación solar absorbida, que se transfiere por radiación o convección hacia el espacio interior, como se muestra en la Figura 6.1.

La norma describe el cálculo para determinar el $CGCS$ como

$$CGCS = \tau_e + q_i, \quad (6.9)$$

donde τ_e es la transmitancia solar, q_i es el factor de transferencia de calor secundario hacia el interior. Para un vidrio monolítico el factor de transferencia de

calor secundario hacia el interior, q_i se calcula con la siguiente expresión

$$q_i = \alpha_e \frac{h_i}{h_e + h_i}, \quad (6.10)$$

donde α_e es la absortancia solar del vidrio, h_e y h_i son los coeficientes de transferencia de calor de la superficie exterior e interior del vidrio ($\text{W/m}^2 \text{ K}$) respectivamente.

La absortancia solar α_e de una muestra monolítica se obtiene a partir de la siguiente relación

$$\alpha_e = 1 - (r_e + \tau_e), \quad (6.11)$$

donde τ_e es la transmitancia solar, r_e es la reflectancia solar.

El coeficiente de transferencia de calor interno h_i se calcula como

$$h_i = h_r + h_c, \quad (6.12)$$

donde h_r es la conductancia radiativa, h_c es la conductancia convectiva (para convección natural = $3.6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$).

La conductancia radiativa para superficies de vidrio normalmente es de $4.4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Si la superficie interna del vidrio tiene alguna capa que modifique la emisividad, entonces la conductancia radiativa estará dada por la siguiente fórmula

$$h_r = \frac{4.4\varepsilon}{0.837}, \quad (6.13)$$

donde ε es la emisividad corregida de la cubierta de la superficie (para un vidrio verde claro, $\varepsilon = 0.837$). Las normas han considerado condiciones convencionales para simplificar los cálculos como: posición del sistema de ventana vertical, velocidad aproximada del viento en la superficie exterior de 0.73 m/s , emisividad corregida 0.83 , convección natural en la superficie exterior, emisividad opcional y espacios de aire sin ventilación. Bajo estas condiciones, los valores respectivos de h_e y h_i son:

$$\begin{aligned} h_e &= 13 \text{ W/m}^2 \text{ K} \\ h_i &= 8 \text{ W/m}^2 \text{ K}. \end{aligned}$$

El factor de transferencia de calor secundario hacia el interior q_i para un doble vidrio hermético como el mostrado en la Figura 6.2, se calcula utilizando la siguiente ecuación

$$q_i = \frac{\frac{\alpha_{e1} + \alpha_{e2}}{h_e} + \frac{\alpha_{e2}}{H}}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{H}}, \quad (6.14)$$

donde α_{e1} es la absortancia solar directa del vidrio 1 en el doble vidriado, α_{e2} es la absortancia solar directa del vidrio 2 y H es la conductancia térmica ($\text{W/m}^2 \text{ K}$)

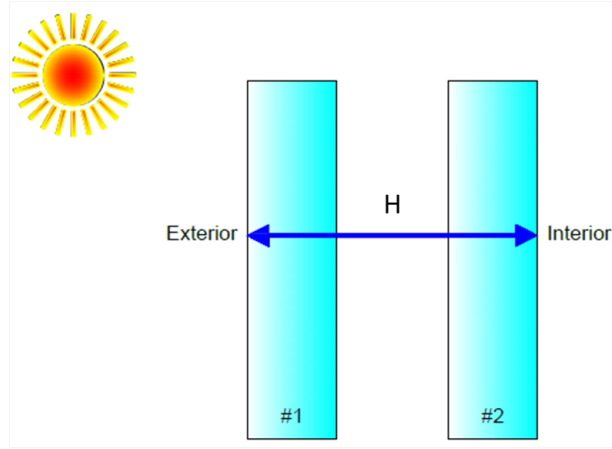


Figura 6.2: Esquema de un doble vidrio hermético

entre la superficie externa del vidrio exterior y la superficie interna del vidrio al interior.

Para calcular la conductancia térmica total de un sistema de ventana de doble vidrio se utiliza la siguiente fórmula:

$$\frac{1}{H} = \sum_1^n \frac{1}{h_s} + \sum_1^o d_j \cdot r_j, \quad (6.15)$$

donde h_s es la conductancia térmica de cada capa de gas ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), n es el número de capas de gas, d_j es el espesor de cada vidrio del sistema, r_j es la resistividad térmica de cada material (para el vidrio $r = 1 \text{ m K/W}$) y o es el número de vidrios del sistema.

La conductancia térmica de la capa de gas se calcula con la siguiente fórmula

$$h_s = h_r + h_g, \quad (6.16)$$

donde h_r es la conductancia térmica radiativa de la capa de gas, h_g es la conductancia térmica del gas.

La conductancia térmica radiativa se expresa como

$$h_r = 4\sigma \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} \cdot T_m^3, \quad (6.17)$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann, T_m es la temperatura media absoluta de la capa de gas (283 K), ε_1 y ε_2 son las emisividades corregidas a la temperatura T_m que se obtienen en el apéndice D de la NOM-024.

La conductancia del gas h_g está dada por la siguiente ecuación

$$h_g = Nu \frac{\lambda}{s}, \quad (6.18)$$

donde s es el espesor de la capa de gas (m), λ es la conductividad térmica del gas (W/m K) y Nu es el número de Nusselt.

El número de Nusselt es una medida de la transferencia de calor convectiva en la superficie comparada con la transferencia de calor por conducción. Para el caso de los vidrios, el Nu se calcula como

$$Nu = A(GrPr)^n, \quad (6.19)$$

donde A es una constante que para un vidrio vertical $A = 0.035$, vidrio horizontal $A = 0.16$ y vidrio inclinado 45° $A = 0.10$, n es un exponente, que para vidrios verticales $n = 0.38$, vidrio horizontal $n = 0.28$ y vidrio inclinado $n = 0.31$, Gr es el número de Grashof y Pr es el número de Prandtl.

El número de Grashof es proporcional al cociente entre las fuerzas de flotación y las fuerzas de viscosidad y se calcula como

$$Gr = \frac{gs^3\Delta T\rho^2}{T_m\mu^2}, \quad (6.20)$$

donde g es la aceleración gravitacional, ΔT es la diferencia de temperaturas entre las superficies vidriadas situadas a ambos lados de la cámara de gas y la norma asume 15 K para todos los climas, ρ es la densidad del gas (kg/m^3), μ es la viscosidad dinámica del gas (kg/m s), T_m es la temperatura media absoluta del gas (K). El número de Prandtl Pr , es la relación entre la difusividad de momento y la difusividad térmica y se expresa con la siguiente fórmula

$$Pr = \frac{\mu c}{\lambda}, \quad (6.21)$$

donde c es el calor específico (J/kg K). Una vez calculada la conductancia térmica se puede obtener el coeficiente global de transferencia de calor K para ventanas. La resistencia térmica total de un sistema vidriado formado con capas térmicamente homogéneas y perpendiculares al flujo de calor está dada por la siguiente ecuación

$$M = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{H} + \frac{1}{h_e}. \quad (6.22)$$

6.4. Transferencia de calor en edificaciones de referencia

La ganancia de calor a través de la envolvente en edificaciones de referencia, es la suma de la ganancia de calor por conducción, más la ganancia de calor por radiación solar como se mostró anteriormente. Sin embargo las normas especifican ciertas características de la envolvente, que se muestran a continuación:

- El área total de cada una de las componentes para cada orientación debe ser igual para ambas edificaciones (proyectado y referencia).
- Las fracciones de las componentes en el edificio de referencia para edificaciones residenciales de la NOM-020- ENER-2011, están definidas como: techo 100 %, tragaluz y domo 0 %, muros 90 %, y ventanas 10 %.
- Las fracciones de las componentes en el edificio de referencia para edificaciones no residenciales de la NOM-008-ENER-2001, están definidas como: techo 95 % opaco y 5 % transparente, muros 60 %, y ventanas 40 %.
- El coeficiente global de transferencia de calor de referencia K para muros, se determina de acuerdo a valores estándares que tiene la norma en la tabla 1, para las partes transparentes en los techos supone un valor de $K = 5.952 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ y para las ventanas supone un vidrio simple que tiene un valor de $K = 5.319 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.
- El coeficiente de sombreado es igual a 1 para ventanas, lo que representa un vidrio claro de 3mm de espesor.
- No se considera factor de corrección por sombreado en las ventanas.

6.5. Conclusiones

En este capítulo se presentó la metodología de las normas oficiales para el cálculo de la transferencia de calor a través de componentes opacos y no opacos. Las normas se basan en un modelo de transferencia de calor independiente del tiempo, por lo que el flujo de calor por conducción en componentes opacos no distingue el orden de las capas de los materiales en un sistema constructivo, sólo se requiere el valor de la conductividad térmica y el espesor de cada capa. Por último se distingue que las normas sugieren uso de aire acondicionado de enfriamiento en todas las regiones del país.

Capítulo 7

EnergyPlus

7.1. Introducción

EnergyPlus es un programa de simulación térmica y análisis de energía en edificaciones, creado por the United States Department of Energy (DOE). Es usado por ingenieros, arquitectos e investigadores que al simular el comportamiento de un edificio pueden mejorar el diseño para disminuir el uso de energía, agua, mejorar la iluminación, ventilación y el confort higrotérmico. Basándose en la descripción del edificio que genera el usuario se puede calcular las cargas de calentamiento y enfriamiento necesarias para mantener una temperatura establecida, las condiciones de un sistema secundario de climatización, la energía consumida por los equipos, el consumo del agua, la iluminación y ventilación necesaria. Algunas de las funciones y características principales de EnergyPlus son [31]:

- Otorga una solución simultánea de la transferencia de calor, en la que acopla la respuesta del edificio y de los sistemas integrados.
- Emplea sub-horas e intervalos de tiempo definidos por el usuario, para calcular la interacción entre zonas térmicas y el entorno ó zonas térmicas y los sistemas de climatización.
- Utiliza texto ASCII para archivos de tiempo, de entrada y salida que incluyen condiciones ambientales por hora o sub-hora e informes definidos por el usuario.
- La solución está basada en el balance de calor de la carga térmica de la edificación que toma en cuenta la carga radiativa, conductiva y convectiva tanto en la superficies exteriores como interiores, así como cargas térmicas internas.

- Tiene dos modelos de cálculo de transferencia de calor por conducción a través de toda la envolvente, el modelo de flujo de calor dependiente del tiempo y el modelo del flujo de calor independiente del tiempo.
- Considera modelos de transferencia de masa, por lo que toma en cuenta la transferencia de humedad por ventilación.
- Usa modelos de confort térmico basados en la actividad del usuario, vestimenta, temperatura del aire al interior y humedad.
- Incluye un modelo anisotrópico del cielo para mejorar el cálculo de radiación difusa en superficies inclinadas.
- Realiza cálculos avanzados de transferencia de calor a través de las ventanas que puede incluir balances de calor capa por capa, persianas controlables y ventanas electrocrómicas.
- Incluye cálculos de la iluminación al interior, de la carga térmica por iluminación artificial, control de iluminación natural, control de deslumbramiento y control de luminarias.
- Elabora cálculos de la contaminación atmosférica por CO_2 , SO_x y NO_x , que produce la edificación por la conversión de energía.

Además EnergyPlus incluye muchas funciones de simulación innovadoras como: la integración de sistemas modulares y de equipamiento, que permiten análisis de calefacción por zonas, flujo de aire multizona y los sistemas fotovoltaicos; sin embargo carece de una interfaz amigable, por lo que requiere de otro programa. Muchas interfaces gráficas están disponibles para facilitar el uso de EnergyPlus, algunas son de licencia gratuita como es OpenStudio; el cual es un programa de herramientas para apoyar la simulación de energía en toda la edificación con EnergyPlus, funciona en Windows y Mac, es de código abierto para facilitar el desarrollo comunitario, la extensión y la adopción del sector privado. En esta tesis se utiliza OpenStudio versión 1.4 y el Plug-in para SketchUp.

7.2. Modelo de transferencia de calor por conducción

El cálculo de la transferencia de calor por conducción puede ser por dos modelos como se mencionó en la sección 7.1, dependiente del tiempo o independiente del tiempo. El flujo de calor dependiente del tiempo como se mostró en la ecuación 5.1 toma en cuenta la inercia térmica de los materiales, que se define

como la capacidad que tiene la masa de conservar la energía térmica recibida e ir liberándola progresivamente, depende de la densidad y del calor específico. La inercia térmica puede conllevar al retardo del flujo de calor transferido al interior. El flujo de calor independiente del tiempo sólo toma en cuenta la resistencia térmica de los materiales.

7.3. Transferencia de calor en ventanas

EnergyPlus tiene dos modelos para realizar el cálculo de transferencia de calor en ventanas. El primero se denomina modelo simple, el segundo es llamado modelo avanzado o capa por capa. El modelo de ventana simple realiza los cálculos del flujo de calor utilizando sólo el factor U , (también llamado coeficiente global de transferencia de calor) y el coeficiente de ganancia de calor solar (CGCS). El modelo avanzado realiza un cálculo más complejo que toma en cuenta tanto propiedades térmicas como ópticas del vidrio que están en función de la longitud de onda o los valores promedio de dichas propiedades.

Modelo de ventana simple

El modelo de ventana simple es un modelo alternativo que permite a los usuarios la entrada de una ventana simplificada, a través del módulo WindowMaterial:SimpleGlazing que utiliza los índices simples de una sola capa equivalente. El modelo de ventana simplificado acepta el factor U y el coeficiente de ganancia de calor solar (CGCS) siendo útil por diversas razones [32]:

1. A veces las únicas características que se saben de la ventana son los valores U y CGCS.
2. Algunos modelos y programas son desarrollados en estos términos.
3. El cálculo de una capa de vidrio es más rápido que el cálculo de una multicapa.

Sin embargo, sólo es apropiado utilizar el factor U y CGCS para ventanas simples, pues los resultados serán simplemente una aproximación porque:

1. El CGCS combina directamente transmitancia de radiación solar y radiación absorbida por el vidrio que fluye hacia el interior. Esto tiene diferentes implicaciones para espacios de enfriamiento y calentamiento, debido a que diferentes ventanas que tienen el mismo CGCS, pueden tener diferentes relaciones de transmitancia y absorptancia.

2. El CGCS es usado a incidencia normal, las propiedades angulares de los vidrios varían con el número de capas, tintes y recubrimientos. Así que los productos que tiene el mismo CGCS, pueden tener propiedades angulares diferentes.
3. El factor U de las ventanas varía con la temperatura.

Modelo avanzado de ventana

El modelo de cálculo avanzado de ventana está basado en el trabajo de Finlayson [33] y considera que la ventana está compuesta por los siguientes elementos:

- Varios vidrios, separados por espacios.
- El espacio entre dos vidrios puede estar lleno de aire o de gas inerte.
- El marco de la ventana.
- El perfil separador, que consiste en elementos horizontales o verticales que dividen el vidrio.
- Los dispositivos de sombreado, que son capas externas que reducen la ganancia de calor solar, o para controlar la luz del día.

EnergyPlus requiere las características ópticas y térmicas del vidrio para realizar el cálculo de transferencia de calor a través de la ventana. Para el desarrollo de esta tesis los cálculos ópticos y térmicos del vidrio se basan en datos del programa WINDOW [32]. WINDOW es un programa desarrollado en el Lawrence Berkeley National Laboratory que es el Laboratorio Nacional del Departamento de Energía de los Estados Unidos, fue desarrollado para el uso de fabricantes, ingenieros, educadores, estudiantes y arquitectos que buscan determinar las propiedades ópticas y térmicas de sistemas de ventanas. Las versiones más recientes de WINDOW (6 y 7) tienen la capacidad para modelar las propiedades de sistemas complejos, tales como ventanas con sistemas de protección.

Las propiedades ópticas y térmicas a incidencia normal de cada vidrio del sistema de ventana requeridas por el modelo avanzado de ventanas son: Transmitancia solar, T_i , que es la fracción de radiación solar incidente transmitida directamente través del vidrio i , reflectancia solar frontal, R_i^f , que es la fracción de radiación solar incidente reflejada por el vidrio hacia el exterior, reflectancia solar posterior, R_i^b , es la fracción de radiación solar incidente reflejada por el vidrio hacia el interior, absorptancia del vidrio i que es la fracción de radiación incidente absorbida por la superficie del vidrio.

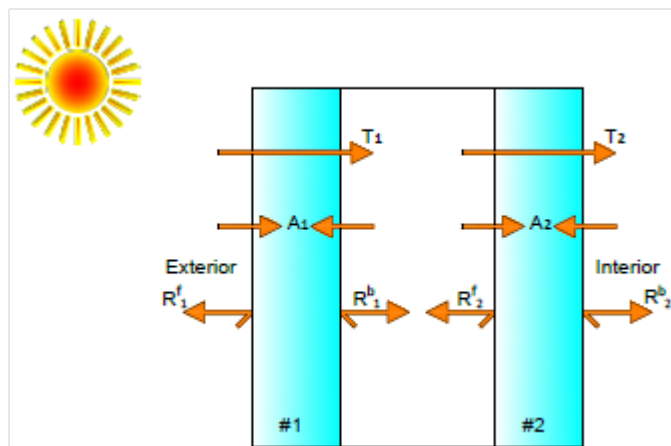


Figura 7.1: Esquema de la transmisión, reflexión y absorción de la radiación solar dentro de un sistema de ventana con doble vidrio [32].

El modelo avanzado de ventana es un modelo más complejo que consiste en determinar el flujo de calor a través de cada vidrio del sistema de ventana. Se calcula usando las propiedades ópticas que están dadas a una incidencia normal en función de la longitud de onda de la radiación solar que incide en los vidrios y con las propiedades térmicas de cada vidrio, que se introducen en el módulo Material:WindowGlass y MaterialProperty:GlazingSpectralData. Las propiedades ópticas de los vidrios están dadas por el programa Window para el rango del espectro solar, con un intervalo de longitud de onda de 0.005, 0.01 y 0.05 micras.

A continuación se explica el mecanismo de la transferencia de calor por transmisión, reflexión y absorción de la radiación solar incidente de acuerdo al modelo avanzado para un sistema de ventana de dos vidrios como se muestra en la Figura 7.1. El vidrio # 1 está en contacto con el exterior y vidrio # 2 está en contacto con el interior de la habitación. De la radiación solar que incide sobre el vidrio # 1, una parte se transmite directamente hacia el interior del sistema, otra parte de la radiación se absorbe por el vidrio y una parte más se refleja hacia el exterior. De la radiación que incide en el vidrio # 2 una parte se transmite hacia el interior de la habitación, otra parte se absorbe por el vidrio y otra parte es reflejada hacia el vidrio # 1 que a su vez, una parte es reflejada, otra parte es transmitida y el resto es absorbida. La radiación emitida desde el interior de la habitación incide en el vidrio # 2 donde una parte es reflejada, otra parte es transmitida y el resto es absorbida. Cada vidrio emite radiación de acuerdo a su temperatura y para el caso de las superficies que están en contacto con la cámara de aire, esta radiación pasa por el mismo proceso de transmisión, reflexión y absorción. Para sistemas de ventanas con más vidrios EnergyPlus realiza el proceso descrito de transmisión, reflexión y absorción para cada vidrio del sistema.

Capítulo 8

Resultados y Discusiones

En este capítulo se establecen las características de las simulaciones realizadas en EnergyPlus y los parámetros utilizados para analizar el desempeño térmico de cuatro módulos con diferentes sistemas de ventanas bajo condición de sin uso de aire acondicionado y con uso de aire acondicionado. Se presentan los resultados de las simulaciones y su análisis para cada condición y el análisis de las evaluaciones de la NOM-020, ambos para las ciudades de Temixco, Toluca y Monterrey.

8.1. Características de las simulaciones

Se simulan cuatros módulos de base cuadrada de 2.7m y de altura 2.4m. La orientación de cada muro es normal a sus puntos cardinales. Los muros, el piso y el techo están formados por un sistema constructivo de una capa homogénea de concreto de alta densidad (CAD) con un espesor de 0.10m y la capa de CAD tiene una absorptancia solar de 0.4. No se consideran cargas térmicas internas, ni infiltración y se define al módulo como una sola zona térmica. El cálculo del flujo de calor a través de las ventanas se realiza con el modelo avanzado de ventanas de EnergyPlus. La temperatura del piso se establece con la siguiente fórmula [34]

$$T_{piso} = \overline{T_a} - 2^{\circ}C, \quad (8.1)$$

donde $\overline{T_a}$ es la temperatura ambiente promedio mensual.

En la Tabla 8.1 se muestran las propiedades térmicas del concreto de alta densidad. Al módulo se le asigna una ventana en el muro este, con un 10 % del área, que representa una ventana de 0.80m de ancho y 0.80m de largo, además no se consideran dispositivos de sombreado, no se toma en cuenta el marco de la ventana y se considera que la ventana siempre está cerrada.

Material	k (W/mK)	ρ (Kg/m ³)	c (J/kgK)
CAD	2	2400	1000

Tabla 8.1: Propiedades térmicas del CAD: conductividad térmica (k), densidad (ρ) y calor específico (c) [35].

Climas

La simulaciones se realizan durante un mes, en Temixco se simula el mes más cálido; en Toluca que es una zona fría se simula el mes más frío y en la ciudad de Monterrey que se presenta una temporada fría y una cálida se simularon los meses más representativos de cada temporada. Los cuatros módulos se evalúan en Temixco durante el mes de mayo, en Toluca durante el mes de enero y en Monterrey durante los meses de febrero y mayo. El archivo de clima EPW se obtiene del programa Meteonorm, el cual tiene una base de datos que interpola información de estaciones meteorológicas cercanas [36].

La temperatura ambiente promedio mensual para Temixco en mayo es 28°C, para Toluca en enero es 9°C, para Monterrey en febrero es 18°C y para Monterrey en mayo es 29°C. Para las simulaciones de Temixco en mayo la temperatura del piso es 26°C, para Toluca en enero es 7°C, para Monterrey en febrero es 16°C y para Monterrey en mayo es 27°C.

La temperatura de neutralidad T_n definida por Humphrey y Nicols [37], se calcula como

$$T_n = 13.5^\circ\text{C} + 0.54\overline{T_a}, \quad (8.2)$$

donde $\overline{T_a}$ es la temperatura ambiente promedio mensual (°C). La temperatura de neutralidad para Temixco en mayo es 28°C, para Toluca en enero es 18°C, para Monterrey en febrero es 23°C y para Monterrey en mayo es 29°C.

En condiciones de aire acondicionado, la temperatura del termostato se ajusta a 23.5°C para todas las ciudades y climas, porque el modelo de la temperatura de neutralidad en algunos casos como en los climas de México sobrestima la temperatura a la cual debe ser ajustado el termostato, por lo cual en esta tesis se sugiere una sola temperatura. Para la evaluación de climas fríos como en la ciudad de Toluca durante enero y en Monterrey durante febrero sólo se utiliza sistema de calefacción y para climas cálidos como Temixco y Monterrey en mayo, sólo se utilizan sistemas de enfriamiento. Esto quiere decir que para Monterrey en febrero, si la temperatura al interior aumenta de los 23.5°C, el termostato apaga la calefacción y la vuelve a prender cuando la temperatura interior baja de los 23.5°C.

Características \ Ventana	vidrio claro	tintex
Número de vidrios	1	1
Espesor (mm)	6	6
Conductividad (W/m K)	1	1
Transmitancia solar (-)	0.771	0.447
Reflectancia frontal solar (-)	0.070	0.053
Reflectancia posterior solar (-)	0.070	0.056
Transmitancia visible (-)	0.884	0.755
Reflectancia frontal visible (-)	0.080	0.071
Reflectancia posterior visible (-)	0.080	0.073
Emisividad frontal (-)	0.84	0.84
Emisividad posterior (-)	0.84	0.84

Tabla 8.2: Características promedio de la ventana formada por el vidrio claro y tintex [39].

Características de los sistemas de ventanas

Se evalúan cuatro sistemas de ventanas que representan los más comercializados en México [38]. Se escogieron dos ventanas con un vidrio y dos ventanas con doble vidrio. En la tabla 8.2 se presentan las características de las ventanas con un vidrio: vidrio claro y tintex. En la Tabla 8.3 se presentan las características del vidrio y de la ventana completa (Total) para los sistemas de ventanas con doble vidrio: doble vidrio hermético (dvh) y doble vidrio hermético con una superficie de baja emisividad (low-e).

El vidrio claro es una lámina de vidrio flotado de aproximadamente 6mm de espesor que debido a su transparencia, permite el paso de un gran porcentaje de luz. El vidrio tintex tiene un color verde oscuro que lo caracteriza, tiene un espesor de aproximadamente 6mm y por ser un cristal de color disminuye la transmisión de radiación solar visible.

El doble vidrio hermético (dvh) está compuesto por dos láminas de vidrio simple, con un espesor de 6mm cada una, selladas en los bordes y separadas por una cámara de aire. La cámara está herméticamente sellada al paso de humedad, lo que permite obtener un mejor aislamiento térmico. Para que sea efectiva la cámara de aire debe tener un espesor entre 5mm y 20mm. Para esta tesis se utiliza un espesor de 12mm de aire, dado que, son los que se comercializan en México. La transferencia por conducción y convección puede disminuir si se sustituye al aire que se encuentra entre los dos vidrios, por un gas que tenga una conductividad térmica más baja que el aire (generalmente se utiliza argón). El doble vidrio hermético con una capa de baja emisividad (low-e), está compuesto

Ventana Características	dvh			low-e		
Número de vidrios	1	2	Total	1	2	Total
Espesor (mm)	6	6	-	6	6	-
Conductividad (W/m K)	1	1	1	1	1	1
Transmitancia solar (-)	0.771	0.771	0.607	0.642	0.771	0.512
Reflectancia frontal solar (-)	0.070	0.070	0.114	0.143	0.070	0.178
Reflectancia posterior solar (-)	0.070	0.070	0.114	0.186	0.070	0.179
Transmitancia visible (-)	0.884	0.884	0.786	0.857	0.884	0.762
Reflectancia frontal visible (-)	0.080	0.080	0.144	0.090	0.080	0.149
Reflectancia posterior visible (-)	0.080	0.080	0.144	0.077	0.080	0.141
Emisividad frontal (-)	0.84	0.84	-	0.84	0.84	-
Emisividad posterior (-)	0.84	0.84	-	0.068	0.84	-

Tabla 8.3: Características promedio del dvh y el low-e [39].

por dos capas de vidrio separadas por una cámara de aire de 12mm y tiene en una de sus caras un revestimiento de baja emisividad en infrarrojo (onda larga). Dicho revestimiento cambia la emisividad de 0.84 a 0.068, y como efecto secundario disminuye la transmitancia solar y aumenta la reflectancia de esa superficie, como se puede observar en la Tabla 8.3. El recubrimiento de baja emisividad suele ser una capa débil que no soporta las agresiones del medio ambiente o de la limpieza de los vidrios, por lo que debe colocarse hacia el interior de la cámara de aire. En este trabajo se coloca la capa de baja emisividad en el vidrio # 1 en la cara que está hacia el interior de la cámara de aire, que corresponde a la emisividad de la cara posterior del vidrio, como se muestra en la Figura 8.1, ésta es la forma más comercializada en México.

8.2. Parámetros a evaluar en EnergyPlus

Evaluación sin aire acondicionado

Los parámetros utilizados para evaluar el comportamiento térmico de los módulos con los diferentes sistemas de ventanas, en las simulaciones con Energy-Plus bajo condición de sin uso de aire acondicionado son:

- Temperatura interior máxima promedio mensual (°C) $\overline{T_{max}}$ y temperatura interior mínima promedio mensual (°C) $\overline{T_{min}}$. La temperatura del aire al interior se obtiene con la variable de salida THERMAL ZONE 1:Zone Mean Air Temperature (°C)(TimeStep) que es la temperatura del aire dentro de la zona correspondiente para el tiempo reportado.

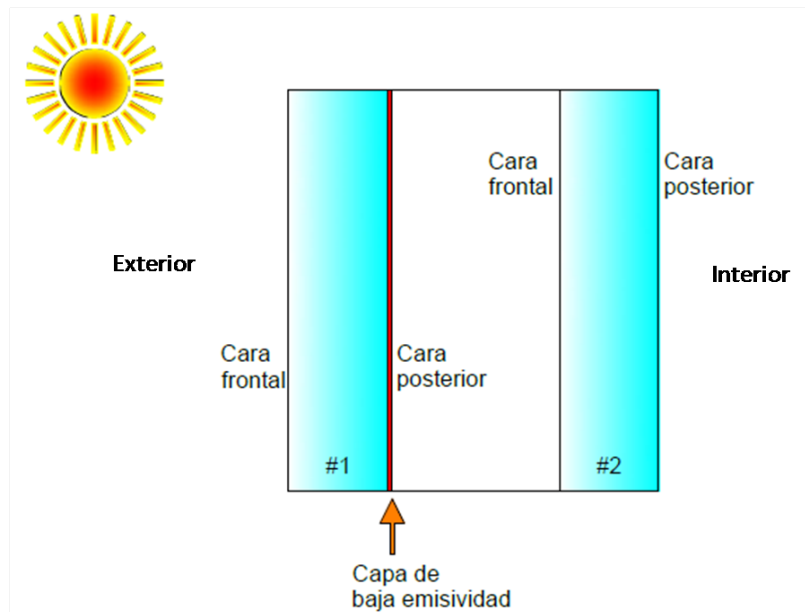


Figura 8.1: Esquema de un doble vidrio hermético con una capa de baja emisividad.

- Calor total transferido (W) a través de la envolvente, es la suma del flujo de calor a través de cada componente de la envolvente, que son paredes, ventanas, techo y piso. El calor total transferido a través de la envolvente se calcula con la siguiente ecuación

$$q_{env} = q_{techo} + q_{piso} + q_{este} + q_{norte} + q_{oeste} + q_{sur} + q_{ventana}, \quad (8.3)$$

donde el flujo de calor para los muros, el techo y el piso se calcula con la variable de salida Surface Inside Face Conduction Heat Transfer Rate (W)(TimeStep) que describe el flujo de calor por conducción hacia el interior de la superficie opaca. Para calcular el flujo de calor a través de la ventana se utilizan las siguientes variables de salida: SUB SURFACE 1:Surface Window Heat Gain Rate (W)(TimeStep) que es la ganancia total de calor que ingresa a la zona por una ventana. Para una ventana sin dispositivos de sombreado, el flujo de calor incluye la radiación solar transmitida por la superficie de la ventana, más el flujo de calor convectivo entre la zona y la superficie de la ventana, la radiación de onda corta a través de la ventana. También se utiliza SUB SURFACE 1:Surface Window Heat Loss Rate (W)(TimeStep) que es parecido al anterior, sin embargo representa la pérdida de energía que sale de la zona a través de la ventana.

- Discomfort cálido (°Ch) mide por cuantos grados centígrados está la tempe-

ratura interior arriba de la temperatura de neutralidad durante un intervalo de tiempo. Se mide con la integral de la temperatura al interior cuando ésta es superior a la temperatura de neutralidad durante un mes. Se utiliza sólo para climas cálidos y se calcula como

$$D_c = \sum (T_{int} - T_n) \cdot dt \quad \text{sí} \quad T_{int} > T_n, \quad (8.4)$$

donde T_{int} es la temperatura del aire al interior del módulo y dt es el intervalo de tiempo.

- Discomfort frío (°Ch) mide por cuantos grados centígrados está la temperatura interior abajo de la temperatura de neutralidad durante un intervalo de tiempo. Se mide con la integral de la temperatura al interior cuando ésta es inferior a la temperatura de neutralidad durante un mes. Se utiliza sólo para climas fríos y se calcula como

$$D_f = \sum (T_n - T_{int}) \cdot dt \quad \text{sí} \quad T_{int} < T_n. \quad (8.5)$$

- Energía que ingresa a la envolvente (Wh) es el calor transferido hacia el interior de la edificación, durante el mes en análisis, se calcula como

$$E_{entra} = \int q_{env} \cdot dt \quad \text{sí} \quad T_{si} > T_{int}, \quad (8.6)$$

donde T_{si} es la temperatura superficial interior.

- Energía que sale de la envolvente (Wh) es el calor transferido hacia el exterior de la edificación, durante el mes en análisis, se calcula con la siguiente ecuación

$$E_{sale} = \int q_{env} \cdot dt \quad \text{sí} \quad T_{si} < T_{int}. \quad (8.7)$$

- Energía total (Wh) es la energía total transferida a través de la edificación durante un mes, se calcula como

$$E_{total} = E_{entra} + E_{sale}. \quad (8.8)$$

Evaluación con aire acondicionado

Los parámetros para evaluar el desempeño térmico de las ventanas en condición de uso de aire acondicionado son:

- Carga de enfriamiento (Wh) es la energía de enfriamiento suministrada por el sistema de climatización para mantener la temperatura del aire al interior abajo de la temperatura del termostato. Se puede calcular mediante la siguiente expresión

$$C_{enfriamiento} = \int q_{env} \cdot dt \quad \text{sí} \quad q_{env} > 0 \quad \text{y} \quad T_{int} > 23.5^\circ, \quad (8.9)$$

La carga de enfriamiento se obtiene con la variable THERMAL ZONE 1:Zone Air System Sensible Cooling Energy [J](TimeStep), que reporta los resultados en Joules, y en esta tesis se convierten a Wh.

- Carga de calentamiento (Wh) es la energía de calentamiento suministrada por el sistema de climatización para mantener la temperatura del aire al interior arriba de la temperatura del termostato. Se calcula con la siguiente ecuación

$$C_{calentamiento} = \int q_{env} \cdot dt \quad \text{sí} \quad q_{env} < 0 \quad \text{y} \quad T_{int} < 23.5^\circ, \quad (8.10)$$

La carga de calentamiento se obtiene con la variable THERMAL ZONE 1:Zone Air System Sensible Heating Energy [J](TimeStep), que reporta los resultados en Joules, y en esta tesis se convierten a Wh.

8.3. Resultados de las simulaciones en Energy-Plus y discusión

8.3.1. Condición sin uso de aire acondicionado

A continuación se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones del módulo en las tres ciudades con los cuatro sistemas de ventanas.

En las tablas 8.4, 8.5, 8.6 y 8.7 correspondientes a Temixco en mayo, Toluca en enero, Monterrey en febrero y Monterrey en mayo respectivamente bajo condición de no uso de aire acondicionado, se puede observar que las temperaturas máximas y mínimas promedio mensual al interior de la edificación son casi iguales entre los cuatro módulos evaluados en cada ciudad. Esto quiere decir que los diferentes sistemas de ventanas no afectan en los valores de las temperaturas máximas promedio mensual y temperaturas mínimas promedio mensual al interior de la edificación bajo esta condición, por lo cual estos parámetros no son adecuado para evaluar el desempeño térmico de la ventana.

Se puede determinar cuál de los sistemas de ventanas tiene el mejor desempeño térmico, usando el desconfort cálido o frío mensual dependiendo del clima

Parámetros	vidrio claro	tintex	dvh	low-e
$\overline{T_{max}}$ (°C)	32.3	32.3	32.3	32.3
$\overline{T_{min}}$ (°C)	24.2	24.2	24.3	24.3
D_c (°Ch)	833	836	834	829
E_{entra} total (Wh)	85,964	71,444	72,862	62,942
E_{sale} total (Wh)	7,259	7,302	3,591	1,409
E_{total} (Wh)	78,705	64,142	69,271	61,533

Tabla 8.4: Resultados de Temixco en mayo para los cuatro sistemas de ventanas sin aire acondicionado.

Parámetros	vidrio claro	tintex	dvh	low-e
$\overline{T_{max}}$ (°C)	15.6	15.6	15.6	15.6
$\overline{T_{min}}$ (°C)	5.8	5.9	5.9	5.9
D_f (°Ch)	6,032	6,003	6,012	6,016
E_{entra} total (Wh)	71,552	58,580	59,327	50,800
E_{sale} total (Wh)	8,540	8,568	3,931	1,525
E_{total} (Wh)	63,012	50,012	55,396	49,275

Tabla 8.5: Resultados de Toluca en enero para los cuatro sistemas de ventanas sin aire acondicionado.

Parámetros	vidrio claro	tintex	dvh	low-e
$\overline{T_{max}}$ (°C)	22.8	22.8	22.9	22.8
$\overline{T_{min}}$ (°C)	14.9	14.9	14.9	14.9
D_f (°Ch)	3,584	3,564	3,570	3,572
E_{entra} total (Wh)	53,484	42,890	44,508	38,378
E_{sale} total (Wh)	4,843	4,864	1,971	639
E_{total} (Wh)	48,641	38,026	42,537	37,739

Tabla 8.6: Resultados de Monterrey en febrero para los cuatro sistemas de ventanas sin aire acondicionado.

Parámetros	vidrio claro	tintex	dvh	low-e
$\overline{T_{max}}$ (°C)	33.7	33.7	33.7	33.7
$\overline{T_{min}}$ (°C)	25.5	25.6	25.6	25.6
D_c (°Ch)	1,381	1,391	1,386	1,380
E_{entra} total (Wh)	104,344	83,632	88,138	76,173
E_{sale} total (Wh)	6,390	6,431	2,657	704
E_{total} (Wh)	97,954	77,201	85,481	75,469

Tabla 8.7: Resultados de Monterrey en mayo para los cuatro sistemas de ventanas sin aire acondicionado.

en el cual se evalúe el módulo. El módulo que presenta el menor valor de discomfort térmico mensual, es definido como el mejor sistema de ventana. El orden del mejor al peor, del desempeño térmico acuerdo al discomfort cálido para Temixco en el mes de mayo es: low-e, vidrio claro, dvh y por último el tintex. La diferencia porcentual entre el mejor y el peor sistema de ventana tomando como referencia al mejor es de 0.83 %. Para Toluca en el mes de enero el orden del desempeño térmico del mejor al peor es: tintex , dvh, low-e y por último el vidrio claro. La diferencia porcentual entre el mejor y el peor sistema de ventana es de 0.48 %. Los resultados de Monterrey para el mes de mayo siguen el mismo orden de desempeño térmico que en Temixco, debido a que ambos resultados son en clima cálido. La diferencia porcentual entre el mejor y el peor sistema de ventana es de 0.80 %. Los resultados de Monterrey en febrero siguen el mismo orden que en Toluca debido a que ambos son en clima frío lo cual quiere decir que el desempeño térmico de la ventana dependerá del tipo de clima. La diferencia porcentual entre el mejor y el peor sistema de ventana es de 0.56 %.

También se puede observar la energía que ingresa y sale del módulo. Así como la energía neta mensual transferida a través de cada módulo. Las cuatro evaluaciones (Temixco en mayo, Toluca en enero y Monterrey en mayo y febrero) tienen el mismo orden de la energía que ingresa, que sale y la total. De acuerdo a la energía que ingresa se clasifica del mejor al peor desempeño térmico de sistema de ventana: low-e, tintex, dvh, vidrio claro. La diferencia porcentual promedio entre el mejor y el peor de la energía que ingresa es de 38 %. De acuerdo a la energía que sale, el orden del mejor al peor desempeño térmico de sistema de ventana es: low-e, dvh, vidrio claro y tintex. La diferencia porcentual promedio entre el mejor y el peor de la energía que sale es de 580 %. De acuerdo a la energía transferida, se clasifica del mejor al peor desempeño térmico de sistema de ventana: low-e, tintex, dvh, vidrio claro. La diferencia porcentual promedio entre el mejor y el peor de la energía transferida es de 28 %. Este parámetro tampoco es adecuado para evaluar el mejor sistema de ventana porque la energía que ingresa, que sale y la transferida total, no coinciden con el orden establecido por el discomfort térmico.

Para entender mejor los fenómenos del flujo de calor en cada módulo para las diferentes ciudades y con los cuatro sistemas de ventanas, se presenta el comportamiento térmico del módulo durante un día típico del mes evaluado en Temixco, Toluca y Monterrey.

En las figuras 8.2, 8.3, 8.4 y 8.5, se presentan las temperaturas al interior del módulo durante un día típico para Temixco en mayo, Toluca en febrero y Monterrey en mayo y en febrero, respectivamente. De manera general, se observa que a partir de media noche en adelante la temperatura desciende hasta poco después del amanecer, cuando comienza a subir la temperatura de nuevo a causa de la ganancia de radiación solar que recibe. Los cuatro módulos

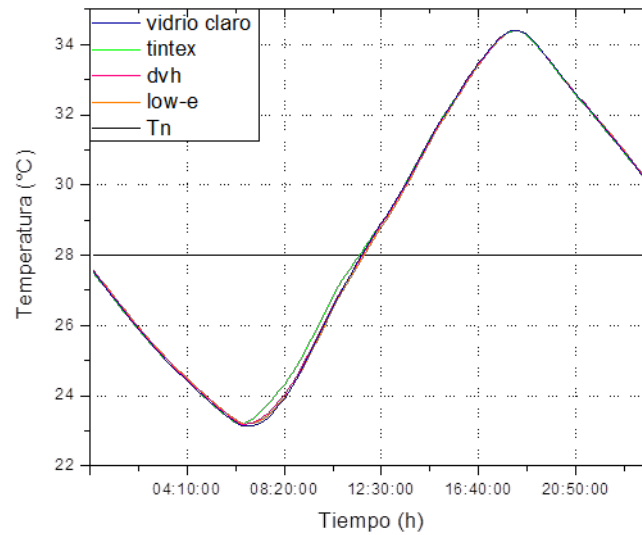


Figura 8.2: Temperatura al interior de la envolvente para un día de típico mayo en Temixco.

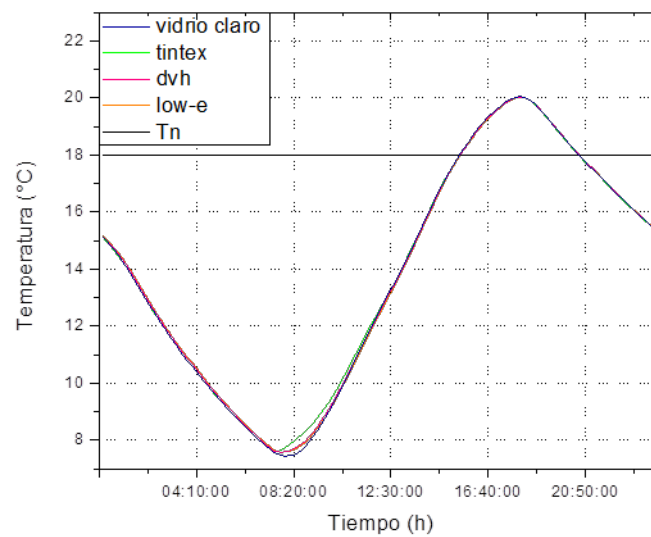


Figura 8.3: Temperatura al interior de la envolvente para un día típico de enero en Toluca.

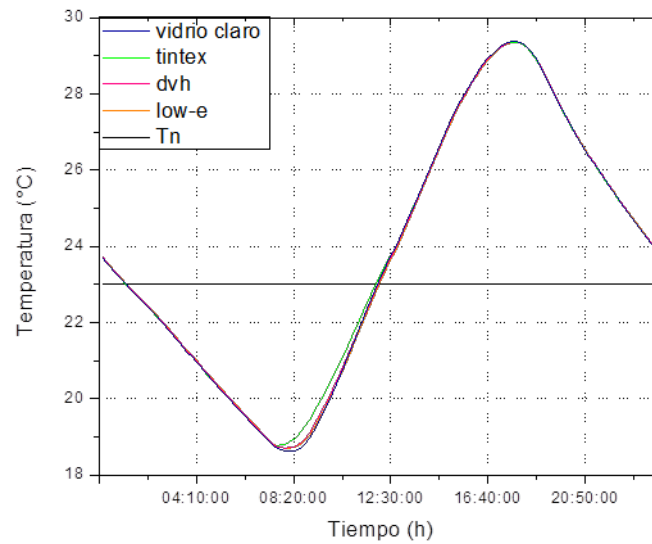


Figura 8.4: Temperatura al interior de la envolvente para un día típico de febrero en Monterrey.

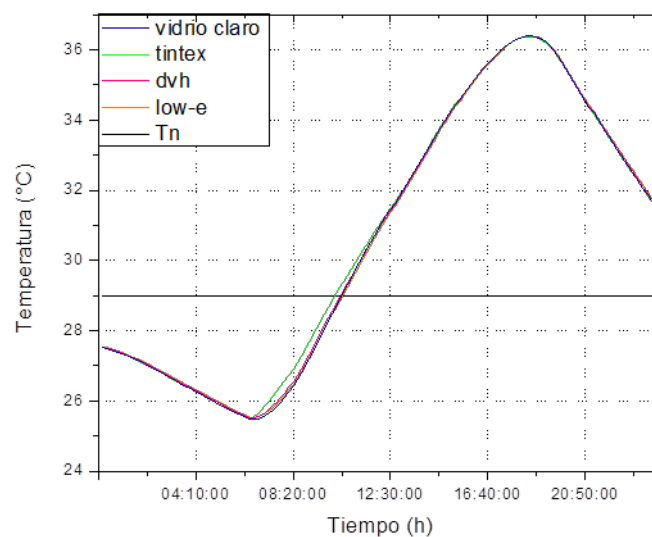


Figura 8.5: Temperatura al interior de la envolvente para un día típico de mayo en Monterrey.

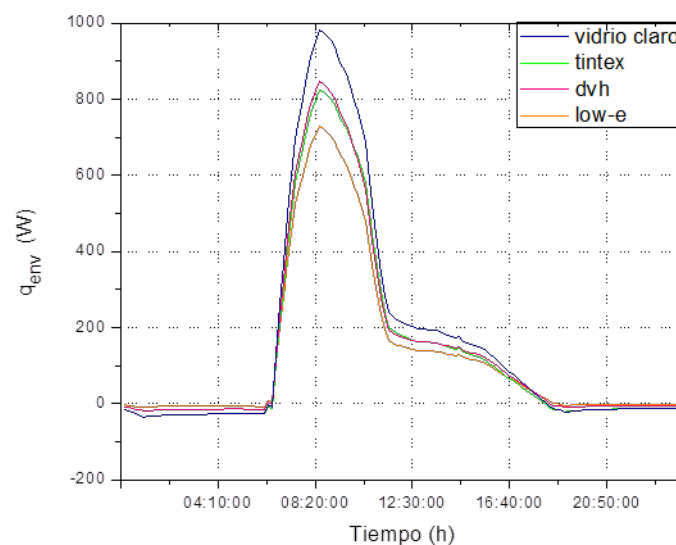


Figura 8.6: Flujo de calor a través de la envolvente durante un día típico de mayo en Temixco para los cuatro módulos.

alcanzan su temperatura máxima alrededor de la misma hora que es las 18:00 horas aproximadamente, después comienza a descender la temperatura de nuevo, debido a que el módulo cede energía hacia el ambiente exterior que tiene una temperatura menor. Se puede apreciar que el módulo con la ventana tintex es el que aumenta su temperatura más rápido entre las 6:30 horas y las 10:30 horas aproximadamente, seguido del dvh, aún así los cuatro sistemas alcanzan la misma temperatura máxima.

En las figuras 8.6, 8.7, 8.8 y 8.9, se muestran los flujos de calor a través de la envolvente de cada módulo durante un día típico para Temixco en mayo, Toluca en febrero y Monterrey en mayo y febrero respectivamente. Se puede observar que a partir de media noche en adelante el módulo pierde energía hasta las 06:00 horas aproximadamente que comienza a salir el sol, a partir de esa hora y hasta las 9:00 horas la ventana recibe la mayor cantidad de radiación directa y es cuando la ventana tintex se calienta más rápido que las otras. Después la intensidad de radiación solar directa que incide sobre la ventana va disminuyendo hasta las 12:00 horas aproximadamente, a partir de ese momento la ventana recibe solamente radiación difusa hasta las 18:00 horas, después los módulos ceden energía hacia el exterior, por lo que el flujo de calor es negativo.

Como se puede observar en las figuras anteriores, el módulo por el que ingresa más energía es el que contiene el vidrio claro debido a que tiene el valor más alto de transmitancia solar 0.771, el segundo módulo por el que ingresa más energía es el que contiene el doble vidrio hermético que tiene una transmitancia solar de

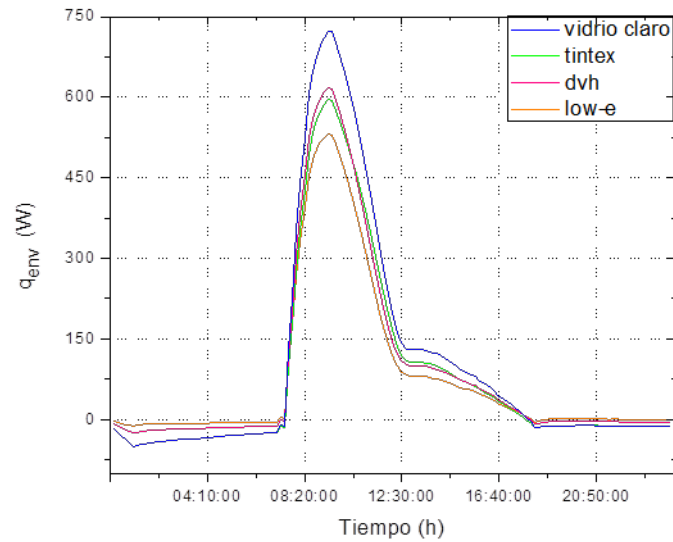


Figura 8.7: Flujo de calor a través de la envolvente durante un día típico de enero en Toluca para los cuatro módulos.

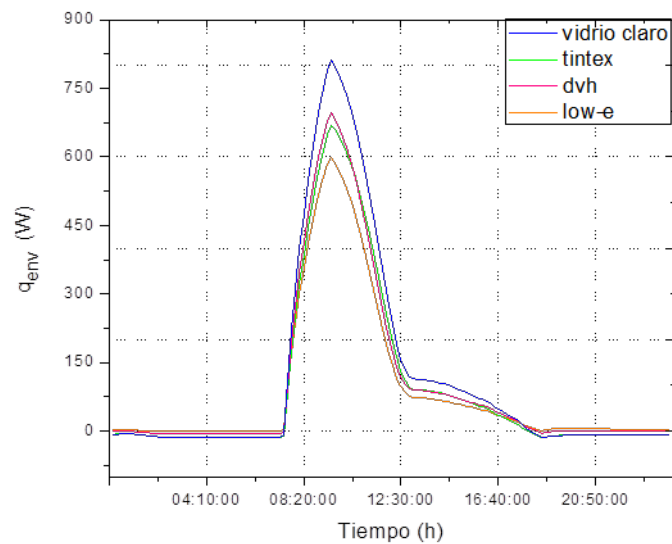


Figura 8.8: Flujo de calor a través de la envolvente durante un día típico de febrero en Monterrey para los cuatro módulos.

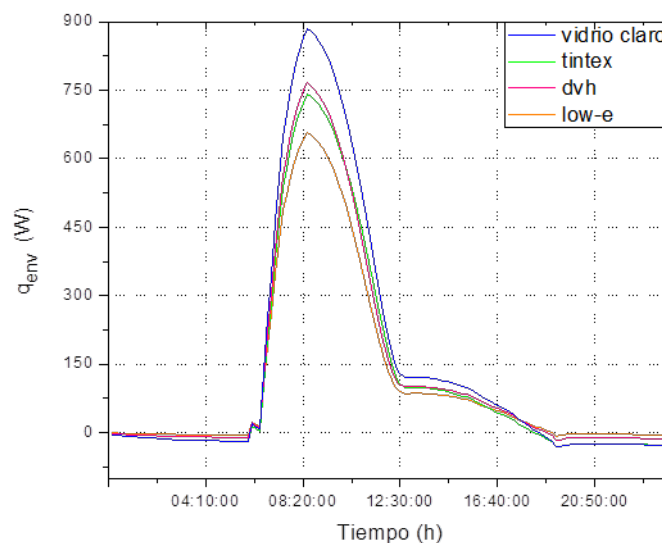


Figura 8.9: Flujo de calor a través de la edificación durante un día típico de mayo en Monterrey para los cuatro módulos.

0.607, después el vidrio tintex que tiene una transmitancia solar de 0.447, por último, está la ventana low-e, que a pesar de que tiene una transmitancia solar de 0.512 mayor a la del vidrio tintex, posee una reflectancia frontal mayor y una absorptancia menor. El flujo de calor hacia el exterior ocurre por conducción y radiación de onda larga que emite el vidrio. Como se puede observar el módulo por el que sale más energía es el que contiene el vidrio tintex porque al tener el valor más alto de absorptancia es que emite más calor y al ser una ventana de un solo vidrio permite más el flujo de calor por conducción, así como el vidrio claro, que es la segunda ventana por la que sale más energía, seguido del dvh que al ser un sistema de doble vidrio aumenta la resistencia térmica por conducción, por último está la ventana low-e que disminuye el flujo de energía más que el dvh por su capa de baja emisividad.

Como se mencionó anteriormente, los diferentes tipos de ventanas no influyen en la temperatura máxima promedio mensual y la temperatura mínima promedio mensual del módulo bajo condición de sin aire acondicionado. Esto es debido al efecto de inercia térmica que tienen los componentes opacos de la envolvente. Para entender mejor este efecto, se puede observar en la Figura 8.10 la comparación del flujo de calor y el comportamiento de la temperatura a través del módulo con los diferentes sistemas de ventanas, ambos para un día típico de Temixco. Como se puede observar en la figura, la energía máxima ingresa al módulo a las 8:30 horas aproximadamente y se aprecia cual sistema de ventanas permite ingresar más energía, en ese momento la temperatura comienza a incrementar.

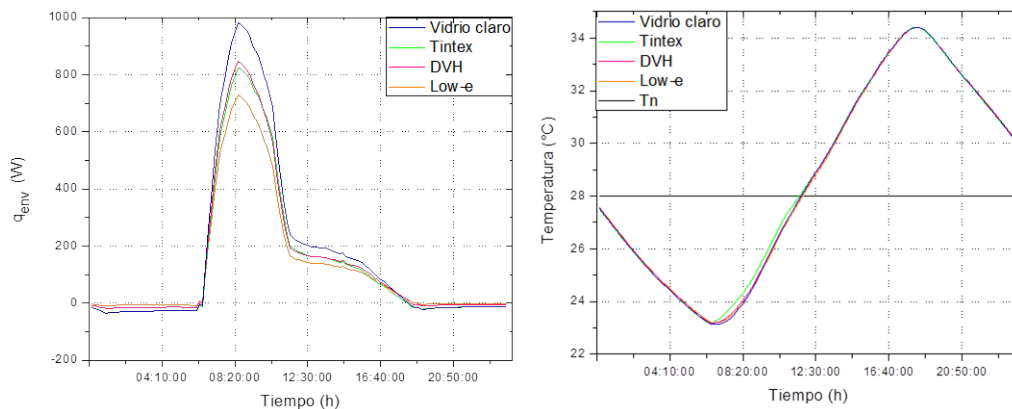


Figura 8.10: comparación del flujo de calor y el comportamiento de la temperatura a través del módulo para un día típico de Temixco.

Ventana \ Energía	Energía		
	E_{entra} total (Wh)	E_{sale} total (Wh)	E_{total} (Wh)
vidrio claro	44,381	4,919	39,462
tintex	37,199	4,944	32,255
dvh	37,835	3,053	34,782
low-e	32,836	1,926	30,910

Tabla 8.8: Flujo de calor a través de la ventana durante el mes de mayo en Temixco.

Sin embargo la temperatura máxima se alcanza horas después, aproximadamente a las 17:00 horas en ese momento la ganancia de energía es menor porque sólo se recibe radiación difusa, por lo cual el efecto de la energía que ingresa por la ventana ya no afecta a la temperatura máxima. Además influye la orientación de la ventana, que al estar colocada en el muro este la ganancia de calor a través ella no tiene efecto en la temperatura máxima. Sin embargo si se cambia la orientación hacia el muro oeste se espera ver que después del medio día el módulo recibe la mayor energía (principalmente por radiación solar) a través de la ventana, lo cual tendría efecto en el valor de la temperatura máxima.

Transferencia de calor a través de los sistemas de ventanas

A continuación se presenta sólo el flujo de calor a través de la ventana para los cuatro sistemas de ventanas en las tres ciudades

En las tablas 8.8, 8.9, 8.10 y 8.11 se muestra el flujo de calor que ingresa, sale y el transferido total sólo por la ventana. Las cuatro evaluaciones (Temixco

Ventana \ Energía	E_{entra} total (Wh)	E_{sale} total (Wh)	E_{total} (Wh)
vidrio claro	37,529	5,856	31,673
tintex	31,095	5,868	25,227
dvh	31,426	3,533	27,894
low-e	27,135	2,302	24,833

Tabla 8.9: Flujo de calor a través de la ventana durante el mes de enero en Toluca.

Ventana \ Energía	E_{entra} total (Wh)	E_{sale} total (Wh)	E_{total} (Wh)
vidrio claro	53,651	4,524	49,127
tintex	43,398	4,552	38,846
dvh	45,563	2,629	42,934
low-e	39,527	1,604	37,923

Tabla 8.10: Flujo de calor a través de la ventana durante el mes de mayo en Monterrey.

Ventana \ Energía	E_{entra} total (Wh)	E_{sale} total (Wh)	E_{total} (Wh)
vidrio claro	27,908	3,543	24,365
tintex	22,657	3,555	19,102
dvh	23,391	2,059	21,333
low-e	20,221	1,290	18,932

Tabla 8.11: Flujo de calor a través de la ventana durante el mes de febrero en Monterrey.

en mayo, Toluca en enero y Monterrey en mayo y febrero) tienen el mismo orden de la energía que ingresa, que sale y la total, como en la evaluación del módulo completo. Esto se debe a que la principal carga de energía que tiene el módulo es a través de la ventana. De acuerdo a la energía que ingresa se clasifica del mejor al peor desempeño térmico de sistema de ventana: low-e, tintex, dvh, vidrio claro. La diferencia porcentual promedio entre el mejor y el peor de la energía que ingresa es de 36 %. De acuerdo a la energía que sale, el orden del mejor al peor desempeño térmico de sistema de ventana es: low-e, dvh, vidrio claro y tintex. La diferencia porcentual promedio entre el mejor y el peor de la energía que sale es de 168 %. De acuerdo a la energía transferida, se clasifica del mejor al peor desempeño térmico de sistema de ventana: low-e, tintex, dvh, vidrio claro. La diferencia porcentual promedio entre el mejor y el peor de la energía transferida es de 28 %, igual que la diferencia porcentual para la energía transferida a través de todo el módulo. Se puede observar que las diferencias porcentuales entre el mejor y el peor sistema de ventana de acuerdo del flujo de energía a través de todo el módulo y sólo de la ventana no varían mucho, porque el flujo de energía a través del módulo se da principalmente por la ventana.

El flujo de calor a través de una ventana ocurre por transmisión de radiación solar que va desde el exterior hacia el interior, por conducción a través de la capa de vidrio, por convección entre la superficie del vidrio y el aire del exterior e interior y la radiación de onda larga que emite la ventana hacia el exterior e interior. Para observar los diferentes mecanismos de transferencia de calor que ocurren sólo por la ventana a continuación se presentan el flujo de calor a través de los cuatro sistemas de ventanas durante un día típico de Temixco en Mayo.

En las figuras 8.11, 8.12, 8.13 y 8.14 se muestra el flujo de calor por radiación solar y convección más radiación de onda larga a través de los cuatro sistemas de ventanas, se puede observar que el sistema que permite la mayor transmisión de radiación solar es el vidrio claro y el que permite la mayor transferencia de calor por radiación de onda larga más convección es el vidrio tintex, que debido al valor de su absorptancia se puede deducir que principalmente es por la radiación de onda larga emitida.

8.3.2. Condición de uso de aire acondicionado

A continuación se presentan los resultados al simular los módulos bajo condición de uso de aire acondicionado, reportando la carga de enfriamiento en climas cálidos y carga de calentamiento en climas fríos necesarias durante un mes para mantener la temperatura por arriba o abajo de lo establecido por el termostato, recordando que en climas fríos sólo se utiliza carga de calentamiento y en climas cálidos sólo se utiliza carga de enfriamiento.

En las figuras 8.15, 8.16, 8.17 y 8.18, se muestran las cargas de calenta-

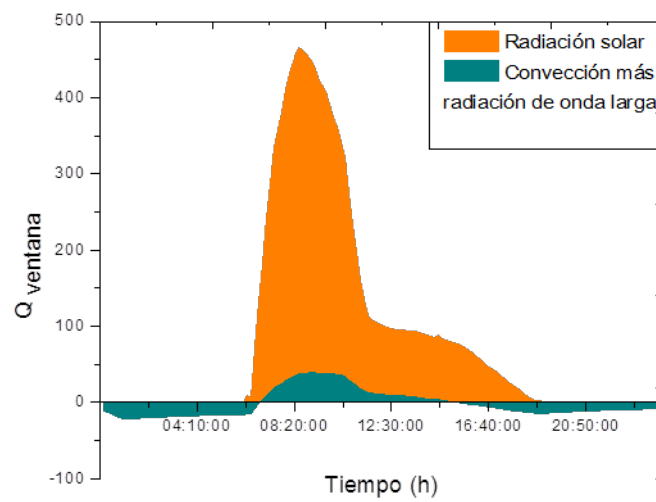


Figura 8.11: Transferencia de calor por radiación solar y convección más radiación de onda larga a través del vidrio claro.

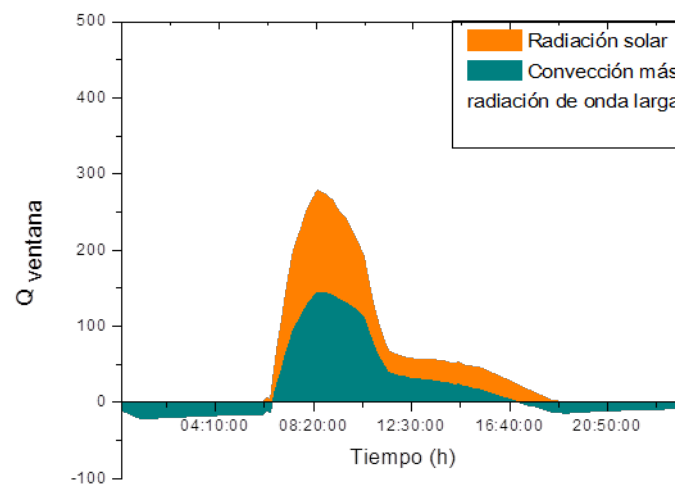


Figura 8.12: Transferencia de calor por radiación solar y convección más radiación de onda larga a través del tintex.

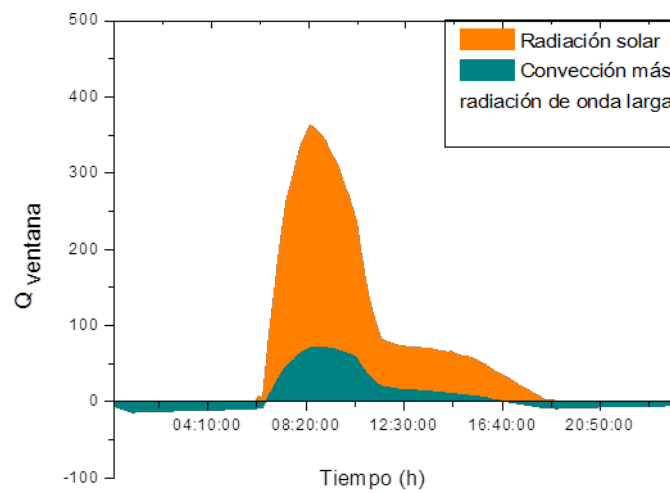


Figura 8.13: Transferencia de calor por radiación solar y convección más radiación de onda larga a través del dvh.

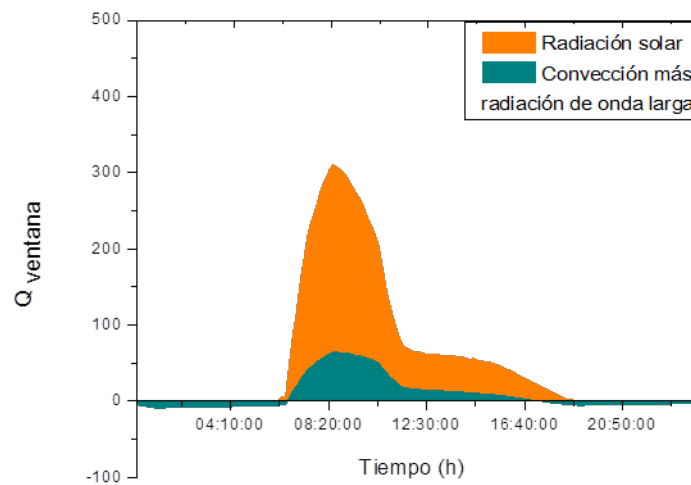


Figura 8.14: Transferencia de calor por radiación solar y convección más radiación de onda larga a través del low-e.

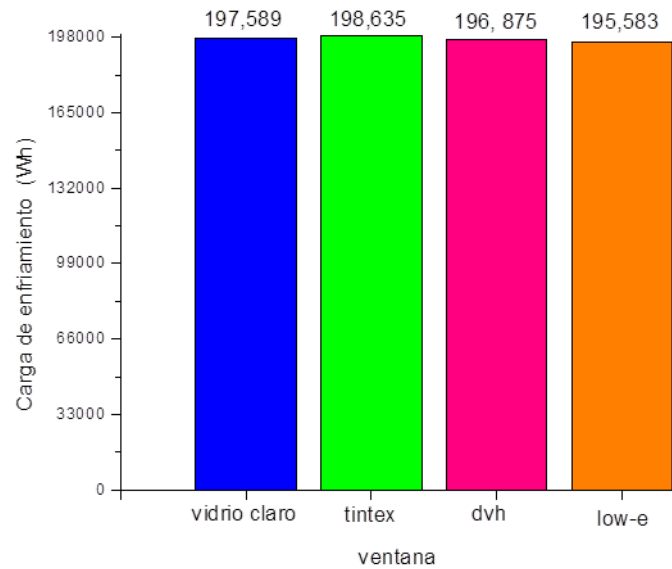


Figura 8.15: Carga de enfriamiento (Wh) para los cuatro módulos durante el mes de mayo en Temixco.

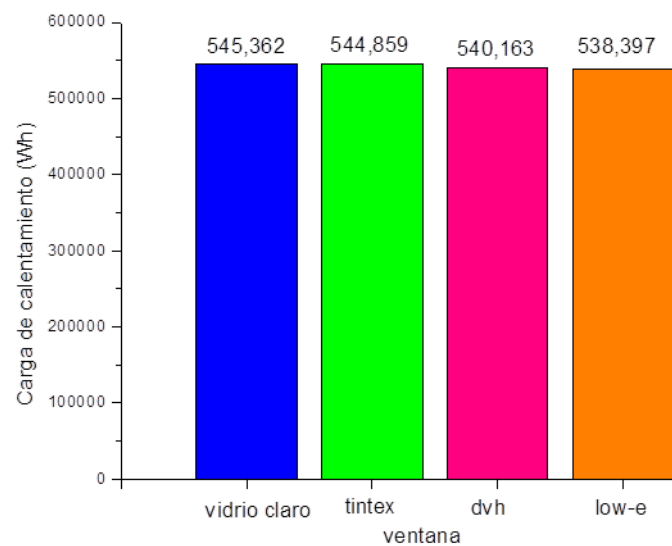


Figura 8.16: Carga de calentamiento (Wh) para los cuatro módulos durante el mes de enero en Toluca.

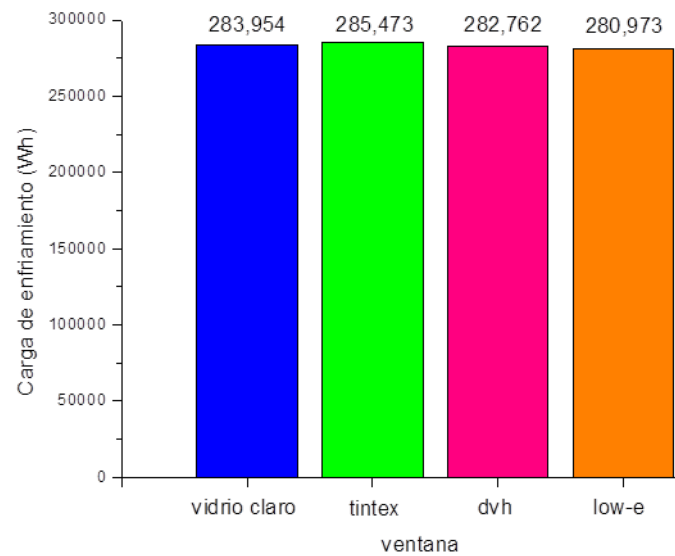


Figura 8.17: Carga de enfriamiento (Wh) para los cuatro módulos durante el mes de mayo en Monterrey.

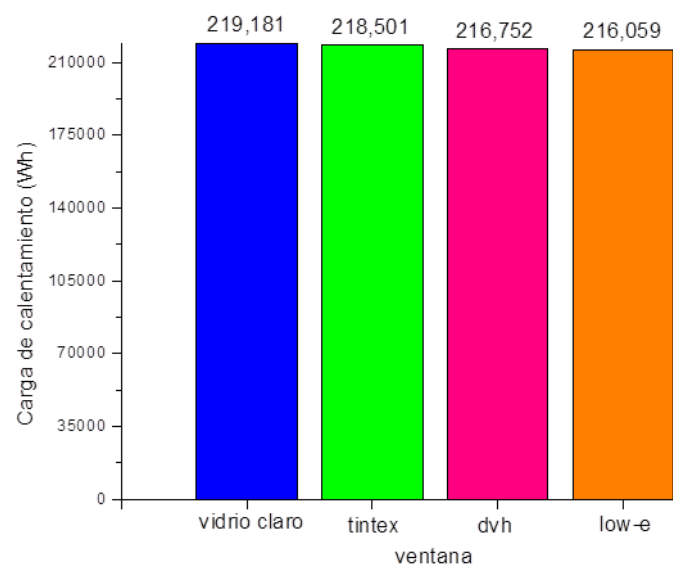


Figura 8.18: Carga de calentamiento (Wh) para los cuatro módulos durante el mes de febrero en Monterrey.

miento o enfriamiento en cada módulo para Temixco en mayo, Toluca en enero y Monterrey en mayo y febrero respectivamente. Se puede observar que los resultados de Temixco y Monterrey en mayo tienen el mismo orden de desempeño térmico debido a que ambos presentan un clima cálido. El orden de mejor a peor es: low-e, dvh, vidrio claro y tintex. En los resultados de Temixco, la diferencia porcentual entre el mejor y el peor es de 1.56 % y en Monterrey durante mayo, la diferencia porcentual entre el mejor y el peor es de 1.60 %. En los resultados de Toluca en enero y Monterrey en febrero el orden del desempeño térmico es el mismo, porque ambos tienen clima frío. El orden de mejor a peor es: low-e, dvh, tintex y vidrio claro. En los resultados de Toluca, la diferencia porcentual entre el mejor y el peor es de 1.29 % y en Monterrey durante febrero, la diferencia porcentual entre el mejor y el peor es de 1.45 %.

Se puede observar que para climas tanto cálidos como fríos, tienen mejor desempeño térmico los sistemas de ventanas con doble vidrio hermético debido a que presentan una mayor resistencia térmica, sin embargo el mejor de los cuatro sistemas constructivos de ventanas es el que tiene la capa de baja emisividad haciendo más efectiva la resistencia al flujo de calor entre el exterior e interior. La diferencia de los resultados entre el vidrio claro y tintex, es porque el vidrio tintex tiene una absorción mayor al vidrio claro por lo cual se calienta más rápido y requiere más carga de enfriamiento en climas cálidos y menos carga de calentamiento en climas fríos.

8.4. Resultados y discusión usando la NOM-020-ENER-2011

Se evalúan los cuatro módulos con las ventanas de vidrio claro, tintex, dvh y low-e utilizando la NOM-020, que aplica para edificaciones de uso habitacional. Antes de presentar los resultados, es necesario mencionar que las características de los sistemas de ventanas son calculadas con la NOM-024 y se muestran en la Tabla 8.12.

Como se mencionó en el Capítulo 6, el flujo de calor en una edificación de acuerdo a la NOM-020 se realiza calculando la transferencia de calor a través de los componentes opacos y las ventanas, por lo que se presentan tablas con la transferencia de calor por conducción en cada muro, en el techo y en la ventana y la transferencia de calor por radiación en la ventana, así como el total de estos flujos de calor de cada módulo para cada ciudad.

Ventana	Propiedades	K (W/m ² K)	CS (-)
	vidrio claro	4.85	0.96
	tintex	4.85	0.74
	dvh	4.64	0.84
	low-e	4.63	0.63

Tabla 8.12: Propiedades de los sistemas de ventanas calculadas usando la NOM-024-ENER-2011: coeficiente global de transferencia de calor (K), coeficiente de sombreado (CS).

Tipo de ventana	Conducción (W)						Radiación (W)	Total ventana (W)	Total (W)
	Techo	Muro Norte	Muro Este	Muro Sur	Muro Oeste	Ventana			
vidrio claro	367	26	70	52	52	0	85	85	652
tintex	367	26	70	52	52	0	66	66	633
dvh	367	26	70	52	52	0	75	75	642
low-e	367	26	70	52	52	0	56	56	623

Tabla 8.13: Flujo de calor por componente para el módulo en Temixco de acuerdo a la NOM-020-ENER-2011.

Tipo de ventana	Conducción (W)						Radiación (W)	Total ventana (W)	Total (W)
	Techo	Muro Norte	Muro Este	Muro Sur	Muro Oeste	Ventana			
vidrio claro	183	-129	-93	-104	-104	-13	85	72	-175
tintex	183	-129	-93	-104	-104	-13	66	53	-194
dvh	183	-129	-93	-104	-104	-12	75	63	-184
low-e	183	-129	-93	-104	-104	-12	56	44	-202

Tabla 8.14: Flujo de calor por componente para el módulo en Toluca de acuerdo a la NOM-020-ENER-2011.

Tipo de ventana	Conducción (W)						Radiación (W)		Total ventana (W)	Total (W)
	Techo	Muro Norte	Muro Este	Muro Sur	Muro Oeste	Ventana	Ventana			
vidrio claro	497	129	186	155	181	9		85	95	1244
tintex	497	129	186	155	181	9		66	75	1223
dvh	497	129	186	155	181	9		75	84	1232
low-e	497	129	186	155	181	9		56	65	1216

Tabla 8.15: Flujo de calor por componente para el módulo en Monterrey de acuerdo a la NOM-020-ENER-2011.

En la Tabla 8.13 se muestra el flujo de calor por conducción y radiación en cada parte de la envolvente de los cuatro módulos evaluados en Temixco. Como todas las partes opacas de los módulos son del mismo material, tienen el mismo flujo de calor por conducción. Se puede observar que en Temixco ninguna de las ventanas presenta flujo de calor por conducción, ya que la temperatura equivalente de la ventana y la temperatura interior son iguales, lo que muestra una inconsistencia con los valores de las temperaturas equivalentes de las ventanas de acuerdo a su orientación. El orden del desempeño térmico del mejor al peor es: low-e, tintex, dvh y por último el vidrio claro. La diferencia porcentual entre el mejor y el peor es de 4.65 %.

Como se puede observar, la norma considera al tintex como la segunda ventana con el mejor desempeño térmico y al vidrio claro con el peor desempeño térmico. Sin embargo se mostró anteriormente al realizar las evaluaciones con EnergyPlus que el tintex es el que tiene el peor desempeño térmico debido al efecto que tiene de la absorción, ya que se calienta más rápido y requiere de más carga de enfriamiento.

En la tabla 8.14 se muestra el flujo de calor por conducción y radiación en cada parte de la envolvente de los cuatro módulos evaluados en Toluca. Los valores negativos calculados por la NOM-020 se consideran como energía de calentamiento. Como todas las partes opacas de los módulos son del mismo material, tienen el mismo flujo de calor por conducción. En Toluca, los módulos con las ventanas vidrio claro y tintex presentan la misma ganancia de calor por conducción, debido a que tienen el mismo valor del coeficiente global de transferencia de calor. A su vez las ventanas dvh y low-e presentan la misma ganancia de calor por conducción debido a que el valor del coeficiente global de transferencia de calor es aproximadamente el mismo. El orden del desempeño térmico de los sistemas de ventanas, del mejor al peor es: vidrio claro, dvh, tintex y por último low-e. La diferencia porcentual entre el mejor y el peor es de 16.00 %.

Como se puede observar, la norma considera que en climas fríos es mejor utilizar vidrios claros ya que presentan el valor más alto de CS y por lo tanto mayor ganancia solar, sin embargo como se mostró anteriormente con EnergyPlus, se demuestra lo contrario bajo condición de uso de aire acondicionado. Ya que las ventanas que presentan el mejor desempeño térmico son las que tienen mayor capacidad de aislamiento térmico como el dvh y el low-e debido a la cámara de aire entre los vidrios y la capa de baja emisividad en low-e. Por lo tanto, al tener menos flujo de calor con el exterior requieren menos energía de calentamiento a comparación del vidrio claro, que al ser un vidrio simple permite un mayor flujo de calor entre el exterior e interior. También se demostró en EnergyPlus que en climas fríos la ventana que tiene el peor desempeño térmico es el vidrio claro porque es el que requiere mayor carga de calentamiento.

Orden \ Ciudad	Temixco	Toluca	Monterrey	
			Febrero	Mayo
1	low-e	tintex	tintex	low-e
2	vidrio claro	dvh	dvh	vidrio claro
3	dvh	low-e	low-e	dvh
4	tintex	vidrio claro	vidrio claro	tintex

Tabla 8.16: Desempeño térmico de los sistemas de ventanas ordenados del mejor al peor de las simulaciones EnergyPlus sin aire acondicionado.

En la Tabla 8.15 se muestra el flujo de calor por conducción y radiación en cada parte de la envolvente de los cuatro módulos evaluados en Monterrey. Como todas las partes opacas de los módulos son del mismo material, tienen el mismo flujo de calor por conducción. En la ciudad de Monterrey las cuatro ventanas presentan el mismo flujo de calor por conducción porque el valor del coeficiente global de transferencia de calor de los cuatro sistemas de ventanas es muy parecido. El orden del desempeño térmico del mejor al peor es: low-e, tintex, dvh y por último el vidrio claro. La diferencia porcentual entre el mejor y el peor es de 2.14 %.

Como se puede observar, el orden de resultados es igual al de Temixco porque ambos presentan climas cálidos. Como se mencionó anteriormente, la norma considera al tintex como la segunda ventana con el mejor desempeño térmico, sin embargo se mostró anteriormente al realizar las evaluaciones con EnergyPlus que el tintex es el que tiene el peor desempeño térmico ya que la ventana tintex requiere más energía de enfriamiento y es la que tiene el peor desempeño térmico de las cuatro ventanas.

8.5. Análisis de resultados entre EnergyPlus y la NOM-020

A continuación se presenta el orden de los resultados de mejor a peor usando EnergyPlus para condición de no uso de aire acondicionado y la comparación de los resultados de EnergyPlus para aire acondicionado y la NOM-020, ordenados del mejor al peor sistema de ventana siendo 1 el mejor y 4 el peor. El orden es determinado de acuerdo al desempeño térmico evaluado con el discomfort cálido/frío para condición de sin uso de aire acondicionado, carga de enfriamiento/calentamiento para condición de uso de aire acondicionado con EnergyPlus y flujo de calor para la NOM-020.

En la Tabla 8.16 se muestra el orden de los resultados de las simulaciones

Orden \ Ciudad	Temixco	Toluca	Monterrey	
			Febrero	Mayo
1	low-e	low-e	low-e	low-e
2	dvh	dvh	dvh	dvh
3	vidrio claro	tintex	tintex	vidrio claro
4	tintex	vidrio claro	vidrio claro	tintex

Tabla 8.17: Desempeño térmico de los sistemas de ventanas ordenados del mejor al peor de las simulaciones EnergyPlus con aire acondicionado.

Orden \ Ciudad	Temixco	Toluca	Monterrey
1	low-e	vidrio claro	low-e
2	tintex	dvh	tintex
3	dvh	tintex	dvh
4	vidrio claro	low-e	vidrio claro

Tabla 8.18: Desempeño térmico de los sistemas de ventanas ordenados del mejor al peor de las evaluaciones con la NOM-020-ENER-2011.

de EnergyPlus bajo condición de sin uso de aire acondicionado para Temixco en mayo, Toluca en febrero y Monterrey en mayo y febrero. Se puede observar que el orden es igual para Temixco y Monterrey en mayo porque ambos presentan climas cálidos y el orden de los resultados es igual para Toluca y Monterrey en febrero porque ambos presentan climas fríos. En climas cálidos el módulo que tiene el mejor desempeño térmico es el que tiene la ventana low-e, seguido del vidrio claro, dvh y tintex. Para climas fríos el módulo que tiene el mejor desempeño térmico es el que tiene la ventana tintex, seguido del dvh, low-e y vidrio claro.

En la Tabla 8.17 se muestra el orden de los resultados de las simulaciones de EnergyPlus bajo condición de uso de aire acondicionado, se puede observar que para climas tanto cálidos como fríos el modulo que presenta el mejor desempeño térmico es el que tiene la ventana low-e, después el dvh, para climas cálidos sigue el vidrio claro y por último el tintex y para climas fríos sigue el tintex y el vidrio claro.

En la Tabla 8.18 se muestra el orden de los resultados de las evaluaciones de la NOM-020, se puede observar que Temixco y Monterrey tienen el mismo orden de desempeño térmico, como mejor sistema de ventana es el low-e, seguido del tintex, dvh y por último el vidrio claro. Para Toluca el orden del mejor al peor desempeño térmico es: vidrio claro, dvh, tintex y low-e.

La NOM-020 que sólo considera la condición de uso de aire acondicionado de enfriamiento, no presenta el mismo orden que EnergyPlus bajo la misma

condición, ya que la norma clasifica como mejor módulo al que tiene la ventana low-e seguido del tintex, cuando EnergyPlus muestra que la ventana tintex es la que tiene el peor desempeño térmico en climas cálidos porque es el que requiere mayor carga de enfriamiento. En los resultados de la evaluación del flujo de calor en Toluca con la NOM-020 se obtienen valores negativos, por lo que se sugiere como la energía que sale y por lo tanto es considerada como carga de calentamiento. En esta condición la norma clasifica como mejor sistema de ventana al vidrio claro, cuando EnergyPlus muestra que el vidrio claro presenta el peor desempeño térmico y al low-e con el mejor desempeño térmico.

Capítulo 9

Conclusiones

En esta tesis se realizó la evaluación del desempeño térmico de cuatro módulos cada uno con un sistema de ventanas usando EnergyPlus con un modelo de transferencia de calor dependiente del tiempo y usando el modelo avanzado de ventanas bajo condición de uso y no uso de aire acondicionado. También se realizó la evaluación usando la NOM-020 que utiliza un modelo de transferencia de calor independiente del tiempo y un modelo de ventanas simplificado. Las evaluaciones se realizaron para tres ciudades de la República Mexicana durante un mes que represente la problemática del clima del lugar: Temixco para el mes de mayo, Toluca para el mes de enero y Monterrey para el mes de febrero y mayo que representan la temporada fría y cálida, respectivamente. Se evaluó un módulo de base cuadrada formado por muros y techos de un solo sistema constructivo de concreto de alta densidad (CAD) con una ventana en la pared este del 10 % del área del muro. Los tipos de ventanas que se evaluaron son dos ventanas con un vidrio: vidrio claro y tintex y dos ventanas con doble vidrio: doble vidrio hermético (dvh) y doble vidrio hermético con una capa de baja emisividad (low-e).

Para las simulaciones en EnergyPlus no se consideraron cargas térmicas interiores ni infiltración, tampoco se consideraron los marcos de las ventanas y se consideró que la ventana siempre estaba cerrada. Las características de las ventanas, tanto ópticas como función de la longitud de onda y térmicas usadas en EnergyPlus se obtuvieron del programa Window 4.0. La evaluación de ventanas se realizó con el modelo avanzado de ventanas que presenta el programa EnergyPlus. En las simulaciones bajo condición de sin uso de aire acondicionado se establecieron como parámetros de evaluación la temperatura máxima promedio mensual y la temperatura mínima promedio mensual, el desconfort cálido o frío y la energía que entra, la que sale y la total, todas integradas sobre el mes especificado. En las simulaciones bajo condición de uso de aire acondicionado se estableció como parámetro de evaluación la carga de calentamiento para climas fríos cuando la temperatura interior es inferior a la temperatura establecida por el

termostato y carga de enfriamiento para climas cálidos cuando la temperatura interior es superior a la temperatura establecida por el termostato. La temperatura del termostato se ajustó a 23.5°C.

Para las evaluaciones con la norma NOM-020, se determinó el coeficiente global de transferencia de calor (K) y el coeficiente de sombreado (CS) utilizando la metodología de la norma NOM-024. En las evaluaciones de la norma NOM-020 se calcula el flujo de calor por conducción en cada componente de la envolvente, el flujo de calor por radiación en las ventanas y el total de estos flujos de calor.

Los resultados de EnergyPlus bajo condición de sin aire acondicionado muestran que los diferentes tipos de ventanas no influyen en la temperatura máxima promedio mensual y la temperatura mínima promedio mensual del módulo. Esto es debido al efecto de inercia térmica que tienen los componentes opacos de la envolvente, así como la orientación de la ventana y su porcentaje con respecto al muro debido a que es muy pequeño. Por lo tanto los parámetros de la temperatura máxima y mínima promedio mensual no son considerados adecuados para evaluar el desempeño térmico.

Se utilizó el parámetro de discomfort cálido/frío dependiendo del clima que es evaluado. Los resultados del mejor al peor sistema de ventanas de acuerdo al discomfort cálido para Temixco y Monterrey en mayo son los mismos y el orden es: low-e, vidrio claro, dvh y tintex. La diferencia porcentual entre el mejor y el peor sistema de ventana para temixco es de 0.83 % y para monterrey en mayo es de 0.80 %. Los resultados del mejor al peor sistema de ventanas de acuerdo al discomfort frío, para Toluca en enero y Monterrey en febrero también coinciden y son: tintex, dvh, low-e y vidrio claro. La diferencia porcentual entre el mejor y el peor sistema de ventana para Toluca es de 0.48 % y para Monterrey en febrero es de 0.56 %. Los porcentajes de diferencia entre el mejor y el peor varían muy poco entre ellos debido el tamaño de la ventana es muy pequeña y el flujo de calor a través de ella no afecta significativamente en la temperatura del aire al interior.

Los resultados del flujo de energía a través de la envolvente con los diferentes sistemas de ventanas muestran que para todos los casos, el vidrio claro es el que permite el mayor flujo de calor entre el exterior e interior, seguido del dvh, tintex y por último el low-e, sin embargo tampoco es un buen parámetro porque al ordenar de menor a mayor por valor de la energía que ingresa, que sale y la energía total transferida no coinciden con el orden establecido por el discomfort térmico. Los resultados muestran que el sistema de ventana que permite la mayor transmisión de radiación solar es el vidrio claro y el que permite la mayor transferencia de calor por radiación de onda larga más convección es el vidrio tintex, que debido al valor de su absorptancia se puede deducir que principalmente es por la radiación de onda larga emitida.

Los resultados de EnergyPlus bajo condición de aire acondicionado ordenados

del mejor al peor son iguales para climas cálidos como en Temixco y Monterrey en mayo: low-e, dvh, vidrio claro y tintex. Para climas fríos como Toluca en enero y Monterrey en febrero también coinciden el orden de los resultados: low-e, dvh, tintex y vidrio claro. Las diferencias porcentuales del mejor y el peor sistema de ventana para Temixco es de 1.56 % y en Monterrey durante mayo es de 1.60 %. Las diferencias porcentuales del mejor y el peor sistema de ventana para Toluca es de 1.29 % y en Monterrey durante mayo es de 1.45 %.

Los resultados de la evaluación de los módulos utilizando la NOM-020 ordenados del mejor al peor para climas cálidos como Temixco y Monterrey son los siguientes: low-e, tintex, dvh y vidrio claro. Los valores negativos obtenidos en los resultados de la norma NOM-020 para climas fríos como Toluca se consideran como carga de calentamiento. El orden del mejor al peor para Toluca son: vidrio claro, dvh, tintex y low-e. La diferencia porcentual entre el mejor y el peor para Temixco es de 4.65 %, para Monterrey es de 2.14 % y para Toluca es de 16.00 %.

Los resultados obtenidos con EnergyPlus muestran que bajo condición de uso de aire acondicionado para los climas tanto cálidos como fríos los mejores sistemas de ventanas son los que presentan doble vidrio por su capacidad de aislamiento térmico con el exterior, de los cuales, el mejor sistema de ventanas es el que tiene la capa de baja emisividad (low-e), ya que disminuye la transferencia de calor entre la superficie exterior y la interior. Sin embargo no coinciden con los resultados de la NOM-020 para climas cálidos que clasifica al tintex como la segunda ventana con el mejor desempeño térmico. Los resultados de EnergyPlus muestran que efectivamente low-e presenta el mejor desempeño térmico pero el Tintex es el que requiere la mayor carga de enfriamiento, por lo cual es el que tiene el peor desempeño térmico. Los resultados obtenidos con EnergyPlus tampoco coinciden con los resultados de la NOM-020 en Toluca ya que la norma clasifica como mejor sistema de ventana al vidrio simple, porque posee el valor más alto de coeficiente de sombreado, lo cual supone mayor ganancia por radiación solar, pero en EnergyPlus se comprobó que la ventana con vidrio es la que tiene el peor desempeño térmico.

EnergyPlus puede utilizar el modelo de cálculo simple o avanzado para la transferencia de calor a través de ventanas, sin embargo el programa recomienda utilizar el modelo de cálculo avanzado para obtener mejores resultados al usar ventanas compuestas por dos o más vidrios. La norma NOM-020 utiliza el modelo de cálculo simple y sólo considera la condición de uso de aire acondicionado de enfriamiento.

Se puede concluir que el modelo de cálculo de ventana simple sólo es apropiado para ventanas simples de un vidrio. Para sistemas más complejos como el doble vidrio hermético y con vidrios de baja emisividad es necesario utilizar modelos que consideren las propiedades térmicas y ópticas de cada capa del sistema de ventanas, ya que las propiedades ópticas están en función de la longitud de

onda de la radiación incidente además considera la interacción entre las capas de la ventana. Además se recomienda utilizar herramientas de simulación térmica como EnergyPlus para realizar el cálculo de flujo de calor en condición de uso de sistemas de aire acondicionado que ayuden a reducir las cargas de calentamiento y enfriamiento y cuando no hay sistemas de aire acondicionado que ayuden a mejorar el confort higrotérmico al interior de la edificación.

Bibliografía

- [1] F. Kramer. *Educación ambiental para el desarrollo sostenible*. Los Libros de la Catarata, 2003.
- [2] Paul Allen Tipler. *Física para la ciencia y la tecnología*, volumen 1. Reverte, 1999.
- [3] Organización de los Estados Americanos-Cumbres de las Américas. Plan de acción, III cumbre de las américas quebec city, Canada 2001. <http://.summit-americas.org/III-summit/III-summit-poa-sp.pdf>, Consultado el 23 de enero del 2015.
- [4] Organización de los Estados Americanos-Cumbres de las Américas. El proceso de cumbres interamericanas, <http://www.summit-americas.org/esp/procumbres.htm>, Consultado el 23 de enero del 2015.
- [5] Food and Agriculture Organization (FAO) y Dirección de productos forestales. Memoria - reunión regional sobre generación de electricidad a partir de biomasa. *Depositos de documentación de la FAO*, Santiago, Chile 1996.
- [6] Asociación Ecologista de Defensa de la Naturaleza (AEDENAT). Ante el cambio climático, menos CO_2 , 1998. <http://www.ambiente-ecologico.com/revist51/cclima51.htm>, Consultado el 23 de enero del 2015.
- [7] Comisión Nacional de Fomento a la Vivienda (CONAFOVI). Uso eficiente de la energía en la vivienda. <http://www.conafovi.gob.mx>, Consultado el 26 de enero del 2015.
- [8] E. Cuce y P. Cuce. A comprehensive review on solar cookers. *Applied Energy*, 102:1399–1421, 2013.
- [9] Subsecretaría de Planeación y Transición Energética. Balance nacional de energía 2012. *Secretaría de Energía*, 2013.
- [10] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). Simple & cost effective solutions to increase energy efficiency in buildings, 2013.

- [11] R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, y S. Grynning. Gas-filled panels for build-ing applications: a state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 42:1969–1975, 2010.
- [12] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. Aparatos y espacios que consumen más energía, México, 2009. <http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/espacio-aparatos>, Consultado el 26 de enero del 2015.
- [13] R. Baetens, B.P. Jelle, y A. Gustavsen. Aerogel insulation for building applications:a state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 43:761–769, 2011.
- [14] G. Baldinelli, F. Asdrubali, C. Baldassari, F. Bianchi, F. D'Alessandro, S. Schi-avoni, y C. Basilicata. Energy and environmental performance optimization ofa wooden window: a holistic approach. *Energy and Buildings*, 79:114–131, 2014.
- [15] G.F. Menzies y J.R. Wherrett. Windows in the workplace: examining issues of environmental sustainability and occupant comfort in the selection of multi-glazed windows. *Energy and Buildings*, 37(6):623–630, 2005.
- [16] J.W. Lee, H.J. Jung, J.Y. Park, J.B. Lee, y Y. Yoon. Optimization of building window system in asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements. *Renew Energy*, 50:522–31, 2013.
- [17] R. Baetens, B.P. Jelle, y A. Gustavsen. Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: a state-of-the-art review. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 94:87–105, 2010.
- [18] J. Samar y A. Salman. Thermal and ecoomic windows design for different climate zones. *Energy and Buildings*, 43:3208–3215, 2011.
- [19] E. Cuce, C. H. Young, y S. B. Riffat. Thermal performance investigation of heat insulation solar glass: A comparative experimental study. *Energy and Buidings*, 86:596–600, 2015.
- [20] G. Huelsz. Notas del curso sistemas pasivos de climatización. IER- Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2012.
- [21] I. Marincic, G. Huelsz, J.M. Ochoa, M.G. Alpuche, A. Duarte, L. Vargas, I. González, y I. Barrera. La construcción actual de viviendas en hermosillo y su adecuación al clima por medios pasivos. *Memorias del XXXV Congreso Nacional de Energía Solar, ANES, Chihuahua chi.*, ABC-34:189–193, 2011.

- [22] G. Huelsz, G. Barrios, y J. Rojas. Differences on results from steady-state and time-dependent wall/roof heat transfer models in mexican climates. *Energy Procedia*, 57:1825–1833, 2014.
- [23] F.P. Incropera y D.P. Dewitt. *Fundamentos de Transferencia de calor*. PEARSON Prentice Hall, 1999.
- [24] K. Wark y E. Richards. *Termodinámica*. Mc Graw Hill, 2001.
- [25] D. Cabrerizo, J. Barrio, y J. Antón. Física y química. *Editex*, 2008.
- [26] J.A. Duffie y W.A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013.
- [27] D.K. Cheng. *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*. Pearson educación, 1998.
- [28] Secretaría de Energía. Norma Oficial Mexicana. NOM-020-ENER-2012, eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios de uso habitacional. *Diario Oficial de la Federación*, México, 2012.
- [29] Secretaría de Energía. Norma Oficial Mexicana. NOM-008-ENER-2001, eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales. *Diario Oficial de la Federación*, México, 2001.
- [30] Secretaría de Energía. Norma Oficial Mexicana. NOM-024-ENER-2012, características térmicas y ópticas del vidrio y sistemas vidriados para edificaciones. etiquetado y métodos de prueba. *Diario Oficial de la Federación*, México, 2012.
- [31] Sitio web de EnergyPlus. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>, Consultado el 23 de marzo del 2015.
- [32] Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley. Energyplus engineering reference. *EnergyPlus*, 2013.
- [33] E.U Finlayson, D.K. Arasteh, C. Huizenga, M.D. Rubin, y M.S. Reilly. Window 4.0:documentation of calculation procedures. *Lawrence Berkeley National Laboratory report no. LBL-33943*, 1993.
- [34] Sitio web de Designbuilder. <http://www.designbuilder.com>, consultado el 27 de marzo del 2015.
- [35] Sitio web de Ener-Habitat. <http://www.enerhabitat.unam.mx/>, Consultado el 23 de marzo del 2015.

- [36] Sitio web de METEONORM. <http://www.meteonorm.com/>, Consultado el 05 de marzo del 2015.
- [37] G. Barrios, P. Elías, G. Huelsz, y J. Rojas. Selección de los materiales de muros y techos para mejorar el confort térmico en edificaciones no climatizadas. *Estudios sobre arquitectura y urbanismo del desierto*, 3(3):69–84, 2010.
- [38] Luz Elena Moreyra. Evaluación térmica de sistemas de acristalamiento sin aa y con aa intermitente. Posgrado en Diseño, Línea Arquitectura Bioclimática, UAM, tesis de maestría en proceso.
- [39] Lawrence Berkeley National Laboratory. Window, 2008. Berkeley, California.