



**EDUCACIÓN**

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

# Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

## Tesis de Maestría

Evaluación térmica de ventanas de vidrio triple para  
un clima cálido de México

presentada por

**Ing. Samanta López Salazar**

como requisito para la obtención del grado de

**Maestra en Ciencias en Ingeniería  
Mecánica**

Director de tesis

**Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor**

Codirector de tesis

**Dra. Ivett Zavala Guillén**

Cuernavaca, Morelos, México. Julio de 2020.



“2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria”

Cuernavaca, Mor., **30/junio/2020**

OFICIO No. DIM/134/2020  
Asunto: Aceptación de documento de tesis  
CENIDET-AC-004-M14-OFICIO

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO  
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la Ing. Samanta López Salazar con número de control M18CE057, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado “Evaluación térmica de ventanas de vidrio triple para un clima cálido de México” y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor  
Director de tesis

Dra. Ivett Zavala Guillén  
Codirector de Tesis

Dra. Yvonne Chávez Chena  
Revisor 1

Dr. Jesús Arce Landa  
Revisor 2

Dr. Efraín Simá Moo  
Revisor 3

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.  
Expediente / Estudiante

Iniciales ABO/mrsr



"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Cuernavaca, Morelos **02/julio/2020**

OFICIO No. SAC/ 206/2020

Asunto: Autorización de impresión de tesis

**SAMANTA LÓPEZ SALAZAR**  
**CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS**  
**EN INGENIERÍA MECÁNICA**  
**P R E S E N T E**

Por este conducto tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado *"Evaluación térmica de ventanas de vidrio triple para un clima cálido de México"*, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica*  
*"Conocimiento y tecnología al servicio de México"*

**DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



**CENTRO NACIONAL  
DE INVESTIGACIÓN  
Y DESARROLLO  
TECNOLÓGICO  
SUBDIRECCIÓN  
ACADÉMICA**

C.c.p. M.E. Guadalupe Garrido Rivera, Jefa del Departamento de Servicios Escolares  
Expediente  
CVGR/CHG

# Dedicatorias

Quiero dedicar este trabajo a mi familia: mis padres y mis hermanas.

A una de las partes más importantes de mi vida, a mi mamá María del Rocío Salazar Ruiz, por ser el ejemplo de vida más grande que pueda existir para mí, por ser agua para el sediento y refugio para el necesitado, por ser y estar, por darlo todo sin pedir nada, mi cariño por ti nunca tendrá comparación, te amo infinitamente. Mujer gracias por darme la vida y motivos para vivirla, mis alas son tu mejor obra de arte.

A mi padre Francisco López Aranda por ser parte del equipo, la mente está escribiendo esto y la fuerza lo está leyendo. Gracias por enseñarme a enfocar mi mente hacia el lado correcto de la vida. Somos parecidos, pero nunca seremos iguales.

A mis hermanas: Nadia y Ma. Luisa por estar para mí en todo momento, porque aún a la distancia me demostraron lo fuerte que podemos llegar a ser, las amo con todo mi corazón. Y recuerden, no tenemos la necesidad de luchar una guerra que no es nuestra y parece nunca tener fin.

A mi abuela y mi tía, quienes me han formado como persona, y me han guiado por un camino de amor y generosidad. Espero algún día ser la mitad de la persona que ustedes imaginan que seré.

A cada una de las personas que han sido parte de mi vida, siempre lo he dicho, soy un rompecabezas formado por todos ustedes.

Hasta el cielo, donde empezó la magia y donde está un pedazo de mi alma.

Perdería mi esencia si no dedicara este trabajo a mi esfuerzo y a mi voluntad inquebrantable. Hoy más que nunca estoy completamente segura que no hay más: *la distancia entre los sueños y la realidad se llama disciplina.*

# Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por el apoyo económico brindado durante mis estudios de maestría.

---

*A la vida y al destino por mantenerme en el camino correcto para volver realidad mis sueños.*

Quizá este documento lleve como protagonista mi nombre, pero detrás de todo el esfuerzo y empeño puesto en cada párrafo, hay personas, personas que día a día me brindaron su ayuda para mejorar. Siempre he deseado que mis acciones reflejen el esfuerzo que han puesto en mi educación, soy un rompecabezas formado por todos ustedes.

A mis padres y mis hermanas por su apoyo incondicional.

Uno de los mayores agradecimientos seguidos de los escritos para mi familia, es para mi asesor el Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor, por darme la oportunidad de ser parte de su equipo de trabajo. Dr. Xamán, gracias por las oportunidades, el tiempo dedicado, por los consejos y por decirme las palabras correctas para cambiar mi pensamiento y tener una visión clara hacia el futuro.

A la Dra. Ivett Zavala, Dra. Ivonne Chávez, Jesús Arce, Efraín Simá por sus comentarios y acertadas sugerencias en la revisión de este documento, fueron de gran ayuda para mejorar la calidad de este trabajo.

Al Dr. Irving Hernández, Martín Rodríguez y C. Miguel Jiménez por brindarme su apoyo para resolver las dudas que surgieron durante el desarrollo de este trabajo, gracias por tomarse el tiempo para brindarme sus conocimientos.

A Filiberto Cruz Flores por su cariño, paciencia y comprensión durante el desarrollo de este trabajo. Gracias por demostrarme tu amor incondicional a pesar del tiempo y la distancia.

A mis queridos amigos Tania, Edgar, Sandra, Mauricio y mis compañeros del área de diseño mecánico por acompañarme en una de las mejores etapas de mi vida, los momentos que vivimos son inigualables y los llevaré siempre conmigo. Amigos, nosotros somos el ejemplo de que se puede ser y hacer de todo en este mundo y aun así no hay nada que nos detenga para hacer nuestros sueños realidad.

A mis compañeros de laboratorio: Edgar, Carlos, Yessenia, Daniel, Ana, Javier, Pedro y mi querido amigo Roger por brindarme su apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

Al departamento de Ingeniería Mecánica personal docente, administrativo y de servicios, por el apoyo brindado durante este tiempo.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por permitirme realizar mis estudios de maestría.

---

## ÍNDICE GENERAL

Lista de figuras .....	i
Lista de tablas .....	iv
Nomenclatura.....	vi
Resumen .....	vii
Abstract.....	viii
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
1.1. Ubicación del problema.....	1
1.2. Revisión bibliográfica .....	4
1.2.1. Estudios desarrollados a nivel mundial .....	4
1.2.2. Estudios desarrollados en CENIDET .....	14
1.3. Conclusión de la revisión bibliográfica .....	15
1.4. Objetivos.....	16
1.4.1. Objetivo general .....	16
1.4.2. Objetivos específicos .....	16
1.5. Alcance .....	16
1.6. Estructura de la tesis .....	17
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>18</b>
2.1. Modelo físico.....	19
2.1.1. Consideraciones .....	19
2.1.2. Mecanismos de transferencia de calor .....	20
2.2. Modelo matemático .....	21
2.2.1. Modelo matemático para una ventana de vidrio simple.....	22

---

2.2.2.	Modelo matemático para una ventana de vidrio doble .....	23
2.2.3.	Modelo matemático para una ventana de vidrio triple.....	24
2.3.	Coefficiente de transferencia de calor por convección.....	27
2.4.	Modelo matemático de intercambio radiativo superficial entre placas paralelas .....	28
<b>CAPÍTULO 3</b> .....		32
3.1.	Método de balances de energía.....	32
3.2.	Familiarización con el método de balances de energía y verificación del código numérico .....	32
3.2.1.	Problema de conducción de calor en estado permanente – diferentes condiciones de frontera (lineales).....	33
3.2.2.	Problema de conducción de calor unidimensional en estado permanente; condición de frontera convectiva .....	39
3.2.3.	Problema de conducción de calor unidimensional y en estado permanente; condición de frontera convectiva y radiativa .....	42
3.3.	Problema de transferencia de calor por conducción en estado transitorio .....	44
3.4.	Intercambio radiativo superficial entre placas paralelas .....	47
3.5.	Diagrama de flujo general .....	50
3.6.	Propiedades ópticas de los vidrios.....	51
3.7.	Independencia de malla temporal .....	52
<b>CAPÍTULO 4</b> .....		60
4.1.	Parámetros de estudio.....	60
4.1.1.	Datos climatológicos .....	62
4.1.1.1.	Primavera – abril.....	63
4.1.1.2.	Verano – julio .....	65
4.1.1.3.	Otoño – octubre .....	65
4.1.1.4.	Invierno – diciembre .....	67



---

4.2.	Evaluación térmica .....	68
4.2.1.	Temperatura promedio .....	68
4.2.1.1.	Primavera – abril.....	69
4.2.1.2.	Verano – julio .....	70
4.2.1.3.	Otoño – octubre .....	70
4.2.1.4.	Invierno – diciembre.....	71
4.2.2.	Flujo de calor total al interior.....	72
4.2.2.1.	Primavera – abril.....	72
4.2.2.2.	Verano – julio .....	73
4.2.2.3.	Otoño – octubre .....	74
4.2.2.4.	Invierno – diciembre.....	75
4.2.3.	Efecto de la orientación para el día más cálido y más frío del año .....	76
4.3.	Flujos de calor mensuales.....	89
4.3.1.	Orientación sur .....	89
4.3.2.	Orientación oeste.....	89
4.3.3.	Orientación norte.....	90
4.3.4.	Orientación este.....	90
4.4.	Porcentajes de reducción .....	90
4.5.	Análisis de costos .....	94
<b>CAPÍTULO 5</b>	.....	<b>100</b>
5.1.	Conclusiones.....	100
5.2.	Recomendaciones .....	102
<b>REFERENCIAS</b>	.....	<b>103</b>
<b>ANEXOS</b>	.....	<b>109</b>
Anexo A.	Variables climáticas .....	110

---

Anexo B. Flujos de calor al interior .....	115
Anexo C. Productos y beneficios obtenidos.....	131

---

## Lista de figuras

Figura 1.1. Tipos de clima en México (Fuente: “La vivienda social en México”, 2013). .....	2
Figura 1.2. Mapa climático por regiones, uso de aire acondicionado (Fuente: INEGI, 2018).....	3
Figura 2.1. Modelo físico general: ventana de vidrio (a) doble y (b) triple. ....	19
Figura 2.2. Mecanismos de transferencia de calor presentes en una ventana de vidrio (a) doble y (b) triple.....	21
Figura 2.3. Configuración de vidrio simple. ....	22
Figura 2.4. Configuración de vidrio doble. ....	23
Figura 2.5. Configuración de vidrio triple.....	24
Figura 2.6. Intercambio radiativo superficial entre placas paralelas. ....	28
Figura 2.7. Factor de vista.....	29
Figura 3.1. Modelo físico: sistema compuesto por cinco elementos (Balances de energía). ....	33
Figura 3.2. Modelo físico: caso general de un medio compuesto sometido a diferentes condiciones de frontera.....	34
Figura 3.3. Frontera este: condiciones de frontera de a) primera, b) segunda y c) tercera clase.....	35
Figura 3.4. Diagrama de flujo general para obtener la solución. ....	38
Figura 3.5. Modelo físico: flujo de calor impuesto, pérdidas convectivas en una losa de concreto. ....	40
Figura 3.6. Comparación cualitativa del perfil obtenido mediante balances de energía y la solución analítica (pérdida convectiva).....	41
Figura 3.7. Modelo físico: flujo de calor impuesto, pérdidas convectiva y radiativa en una losa de concreto.....	42
Figura 3.8. Comparación cualitativa del perfil obtenido mediante balances de energía y la solución analítica (pérdida convectiva y radiativa).....	44
Figura 3.9. Perfil de temperatura a través de una losa de concreto en diferentes instantes de tiempo. ....	46
Figura 3.10. Diagrama de flujo general del proceso de solución. ....	48
Figura 3.11. Diagrama de flujo general para modelar la transferencia de calor en ventanas de vidrios múltiples, en estado transitorio. ....	50
Figura 3.12. Selección del horario para determinar paso de tiempo. ....	53

---

Figura 3.13. Comportamiento de la temperatura exterior durante el día más cálido del año; 25 de julio de 2018. ....	54
Figura 3.14. Radiación solar en función del tiempo, para el día más cálido del año, para diferentes orientaciones; 25 de julio 2018.....	55
Figura 3.15. Velocidad del viento durante el día cálido del año; 25 de julio 2018. ....	56
Figura 4.1. Esquema representativo de las modelaciones realizadas. ....	61
Figura 4.2. Comportamiento térmico durante el día más cálido de la (a) temperatura ambiente y (b) radiación solar del mes de abril 2018. ....	64
Figura 4.3. Comportamiento térmico durante el día más frío de la (a) temperatura ambiente y (b) radiación solar del mes de abril 2018. ....	64
Figura 4.4. Comportamiento térmico durante el día más frío de la (a) temperatura ambiente y (b) radiación solar del mes de julio 2018. ....	65
Figura 4.5. Comportamiento térmico durante el día más cálido de la (a) temperatura ambiente y (b) radiación solar del mes de octubre 2018.....	66
Figura 4.6. Comportamiento térmico durante el día más frío de la (a) temperatura ambiente y (b) radiación solar del mes de octubre 2018.....	66
Figura 4.7. Comportamiento térmico durante el día más cálido de la (a) temperatura ambiente y (b) radiación solar del mes de diciembre 2018.....	67
Figura 4.8. Comportamiento térmico durante el día más frío de la (a) temperatura ambiente y (b) radiación solar del mes de diciembre 2018.....	68
Figura 4.9. Comportamiento de la temperatura promedio a lo largo del día (a) más cálido y (b) más frío, del mes de abril 2018. ....	69
Figura 4.10. Comportamiento de la temperatura promedio a lo largo del día (a) más cálido y (b) más frío, del mes de julio 2018. ....	70
Figura 4.11. Comportamiento de la temperatura promedio a lo largo del día (a) más cálido y (b) más frío, del mes de octubre 2018. ....	71
Figura 4.12. Comportamiento de la temperatura promedio a lo largo del día (a) más cálido y (b) más frío, del mes de diciembre 2018.....	72
Figura 4.13. Flujo de calor total al interior para el día (a) más cálido y (b) más frío de abril 2018. ....	73
Figura 4.14. Flujo de calor total al interior para el día (a) más cálido y (b) más frío de julio 2018. ....	74
Figura 4.15. Flujo de calor total al interior para el día (a) más cálido y (b) más frío de octubre 2018. ....	74

---

Figura 4.16. Flujo de calor total al interior para el día (a) más cálido y (b) más frío de diciembre 2018. .....	75
Figura 4.17. Trayectoria aparente del sol durante el año. ....	76
Figura 4.18. Flujo de calor total en la orientación (a) sur, (b) oeste, (c) norte y (d) este, día más cálido del año; 25 de julio de 2018.....	78
Figura 4.19. Flujo de calor total en la orientación (a) sur, (b) oeste, (c) norte y (d) este, día más frío del año; 22 de diciembre del 2018.....	79

---

## Lista de tablas

Tabla 1.1. Revisión bibliografía a nivel mundial. ....	5
Tabla 3.1. Parámetros utilizados para los tres casos de estudio. ....	39
Tabla 3.2. Resultados obtenidos al resolver conducción de calor en un medio compuesto, sometido a diferentes condiciones de frontera. ....	39
Tabla 3.3. Comparación de la solución obtenida con balances de energía y la solución analítica: pérdida convectiva. ....	41
Tabla 3.4. Comparación de la solución obtenida con balances de energía y la solución analítica: pérdidas convectiva y radiativa. ....	43
Tabla 3.5. Parámetros para el problema. ....	45
Tabla 3.6. Parámetros de estudio para resolver el intercambio radiativo entre placas paralelas. ....	47
Tabla 3.7. Resultados obtenidos para los cuatro casos de estudio planteados. ....	49
Tabla 3.8. Propiedades ópticas de los vidrios. ....	52
Tabla 3.9. Resumen de temperatura máxima por mes. ....	53
Tabla 3.10. Valores de radiación solar máximos en diferentes orientaciones. ....	55
Tabla 3.11. Análisis de independencia de malla temporal para la configuración de vidrio simple. .	57
Tabla 3.12. Análisis de independencia de malla temporal para la configuración de vidrio doble. ...	58
Tabla 3.13. Análisis de independencia de malla temporal para la configuración de vidrio triple. ....	59
Tabla 4.1. Tiempo de cómputo para una hora de modelación, por configuración. ....	61
Tabla 4.2. Flujo de calor total al interior ( $W/m^2$ ); abril, día más cálido. ....	81
Tabla 4.3. Flujo de calor total al interior ( $W/m^2$ ); abril, día más frío. ....	82
Tabla 4.4. Flujo de calor total al interior ( $W/m^2$ ); julio, día más cálido. ....	83
Tabla 4.5. Flujo de calor total al interior ( $W/m^2$ ); julio, día más frío. ....	84
Tabla 4.6. Flujo de calor total al interior ( $W/m^2$ ); octubre, día más cálido. ....	85
Tabla 4.7. Flujo de calor total al interior ( $W/m^2$ ); octubre, día más frío. ....	86
Tabla 4.8. Flujo de calor total al interior ( $W/m^2$ ); diciembre, día más cálido. ....	87
Tabla 4.9. Flujo de calor total al interior ( $W/m^2$ ); diciembre, día más frío. ....	88
Tabla 4.10. Flujos de calor mensuales y porcentajes de reducción, días más cálidos. ....	92
Tabla 4.11. Flujos de calor mensuales y porcentajes de reducción, días más fríos. ....	93
Tabla 4.12. Costo por kW-h para diferentes meses. ....	94

---

Tabla 4.13. Costos de consumo eléctrico para la configuración C1. ....	96
Tabla 4.14. Costos de consumo eléctrico para la configuración C2. ....	97
Tabla 4.15. Costos de consumo eléctrico para la configuración C3. ....	98
Tabla B. 1. Flujo de calor total al interior (W/m <sup>2</sup> ); enero, día más cálido. ....	115
Tabla B. 2. Flujo de calor total al interior (W/m <sup>2</sup> ); enero, día más frío. ....	116
Tabla B. 3. Flujo de calor total al interior (W/m <sup>2</sup> ); febrero, día más cálido.....	117
Tabla B. 4. Flujo de calor total al interior (W/m <sup>2</sup> ); febrero, día más frío.....	118
Tabla B. 5. Flujo de calor total al interior (W/m <sup>2</sup> ); marzo, día más cálido. ....	119
Tabla B. 6. Flujo de calor total al interior (W/m <sup>2</sup> ); marzo, día más frío. ....	120
Tabla B. 7. Flujo de calor total al interior (W/m <sup>2</sup> ); mayo, día más cálido. ....	121
Tabla B. 8. Flujo de calor total al interior (W/m <sup>2</sup> ); mayo, día más frío. ....	122
Tabla B. 9. Flujo de calor total al interior (W/m <sup>2</sup> ); junio, día más cálido.....	123
Tabla B. 10. Flujo de calor total al interior (W/m <sup>2</sup> ); junio, día más frío.....	124
Tabla B. 11. Flujo de calor total al interior (W/m <sup>2</sup> ); agosto, día más cálido.....	125
Tabla B. 12. Flujo de calor total al interior (W/m <sup>2</sup> ); agosto, día más frío.....	126
Tabla B. 13. Flujo de calor total al interior (W/m <sup>2</sup> ); septiembre, día más cálido.....	127
Tabla B. 14. Flujo de calor total al interior (W/m <sup>2</sup> ); septiembre, día más frío.....	128
Tabla B. 15. Flujo de calor total al interior (W/m <sup>2</sup> ); noviembre, día más más cálido.....	129
Tabla B. 16. Flujo de calor total al interior (W/m <sup>2</sup> ); noviembre, día más frío. ....	130

---

## Nomenclatura

### Símbolos

$C_p$	Calor específico, (J/kgK)
$F$	Factor de vista
$G$	Irradiación solar, (W/m <sup>2</sup> )
$Gr$	Número de Grashof
$h$	Coefficiente de transferencia de calor convectivo, (W/m <sup>2</sup> K)
$H_x$ y $H_y$	Dimensiones con respecto a $x$ y $y$ , (m)
$Nu$	Número de Nusselt
$Pr$	Número de Prandtl
$q$	Flujo de calor, (W/m <sup>2</sup> )
$Ra$	Número de Rayleigh
$T$	Temperatura, (°C)
$t$	Tiempo, (s)

### Símbolos griegos

$\lambda$	Conductividad térmica, (W/mK)
$\rho$	Densidad, (kg/m <sup>3</sup> )
$\beta$	Coefficiente de expansión térmica
$\varepsilon$	Emisividad
$\tau^*$	Transmitancia
$\alpha^*$	Absortancia
$\rho^*$	Reflectancia
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann, (W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )

### Subíndices

$g$	Glass/Vidrio
$int (i)$	Interior
$ext (o)$	Exterior
$cond$	Conductivo
$conv$	Convectivo
$rad$	Radiativo



---

## Resumen

En este trabajo se presenta el estudio transitorio de la transferencia de calor conjugada en ventanas de vidrios múltiples. Estos sistemas están conformados por dos o más hojas de vidrio separadas por una cámara herméticamente sellada en donde se encapsula aire. Para las consideraciones del modelo físico de las ventanas de vidrios múltiples (doble y triple), se establece un sistema bidimensional, en donde ocurre transferencia de calor por conducción, convección e intercambio radiativo entre las superficies de los vidrios que encapsulan el fluido. Para llevar a cabo la evaluación térmica de las ventanas de vidrios múltiples y el caso de referencia, una ventana de vidrio simple, se consideró un clima cálido de la República Mexicana.

Para analizar el desempeño térmico de las configuraciones de ventana utilizando vidrios múltiples, se compararon tres diferentes configuraciones: una ventana de vidrio simple (C1, referencia), vidrio doble (C2) y vidrio triple (C3), bajo las condiciones climáticas de la ciudad de Mérida, Yucatán, durante las 24 horas de los días con mayor y menor temperatura de cada mes para todo el año. Las ventanas se consideraron orientadas al sur, oeste, norte y este. Para llevar a cabo la modelación de las tres configuraciones de ventana, se desarrolló un código numérico basado en el método de balances de energía.

Los resultados mostraron que la configuración C3 puede reducir el flujo de calor al interior hasta un 26%, con respecto a la configuración C2 y de hasta 36% con respecto a la configuración C1. Esta reducción se transforma en un ahorro de aproximadamente \$300 MXN en el gasto por consumo de energía eléctrica anual. Por otra parte, la orientación que mostró ser un parámetro clave para mejorar el desempeño térmico de las ventanas fue la orientación sur, debido a que, durante el día para todos los meses, los valores de radiación solar en esta orientación no sufren cambios bruscos a medida que el sol sigue su trayectoria. Para esta orientación se obtuvieron los mejores valores mínimo, máximo y promedio de reducción del flujo de calor anual, para los días con mayor y menor temperatura.

---

## Abstract

This work presents the transient study of conjugated heat transfer in multiple glass windows. These systems are made up of two or more sheets of glass separated by a hermetically sealed chamber where air is encapsulated. For the considerations of the physical model of the windows of multiple glasses (double and triple), a two-dimensional system is established, where heat transfer by conduction, convection and radiative exchange occurs between the surfaces of the glasses that encapsulate the fluid. To carry out the thermal evaluation of the multiple glass windows and the reference case, a single glass window, a warm climate of the Mexican Republic was considered.

In order to analyze the thermal performance of window configurations using multiple glasses, three different configurations were compared: a single glass window (C1, reference), double glass (C2) and triple glass (C3), under the climatic conditions of Mérida, Yucatán, during the 24 hours of the days with the highest and lowest temperatures of each month for the whole year. Windows were considered south, west, north and east facing. To carry out the modeling of the three window configurations, a numerical code was developed based on the energy balance method.

The results showed that the C3 configuration can reduce the heat flow to the interior by up to 26%, compared to the C2 configuration, and up to 36% concerning the C1 configuration. This reduction is transformed into a savings of approximately \$300 MXN in annual electricity consumption expenses. On the other hand, the orientation that showed to be a key parameter to improve the thermal performance of the windows was the southern orientation, because, during the day for all months, the values of solar radiation in this orientation do not suffer abrupt changes as the sun follows its path. For this orientation, the best minimum, maximum and average annual heat flux reduction values were obtained for the days with the highest and lowest temperatures.

---

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los aspectos generales del trabajo de investigación, el planteamiento del problema, la revisión bibliográfica, los objetivos y el alcance del tema. En la primera parte del capítulo, se describen las causas principales que han orillado a la comunidad científica a desarrollar nuevas tecnologías o procesos que mejoren la calidad de vida de los seres humanos, sin dejar de lado el efecto que estos puedan tener hacia el medio ambiente. Posteriormente, se presenta la revisión bibliográfica la cual fue dividida en dos secciones, donde se presentan los trabajos desarrollados a nivel mundial y los trabajos desarrollados en CENIDET (México), todos ellos enfocados a la utilización de ventanas con distintas configuraciones. Al final del capítulo, se presenta el objetivo general y los objetivos específicos, así como también el alcance del presente proyecto.

### 1.1. Ubicación del problema

El ser humano busca su comodidad ante cualquier situación, por esta razón se ha esforzado por crear un ambiente cómodo que le permita desarrollar sus actividades de manera satisfactoria. La búsqueda por lograr este objetivo involucra disponer de los recursos necesarios para construir edificaciones que les brinden comodidad y seguridad a sus habitantes. No obstante, cuando no se cuenta con los recursos suficientes para construir viviendas que consideren aspectos de diseño y ahorro energético, las personas se ven en la necesidad de recurrir a su ingenio para solventar de alguna manera sus carencias, construyendo refugios que los protejan del ambiente exterior y los peligros a su alrededor.

Sin embargo, no se puede desviar la vista del tema y creer que las acciones u omisiones de diseño no tienen impacto en el medio ambiente, debido a esto, cuando se diseña y se construye una edificación se debe abordar la solución desde una perspectiva de ahorro energético, aminorando el efecto que la creación de nuevas edificaciones pudiera tener sobre el medio ambiente. Es claro que para lograr edificaciones que brinden confort térmico a sus habitantes sin perjudicar el medio ambiente, se deben considerar varios aspectos, uno de los aspectos más relevantes es el clima que prevalece en el lugar donde se desea construir la edificación. Se debe diseñar una vivienda que tome en cuenta los diferentes climas existentes,

de este modo si se considera uno en forma general, se logrará una edificación que se adapte y aproveche al máximo los recursos de cada región climática, y de esta manera lograr un mayor nivel de confort, disminuir el consumo energético y hacer uso óptimo de los recursos naturales de los que se dispone.

La vivienda que toma en cuenta aspectos de sustentabilidad, como diseño bioclimático y eficiencia energética, se le nombra vivienda sustentable. Los habitantes de viviendas sustentables están más tiempo en su zona de confort gracias a estrategias bioclimáticas y a la correcta consideración de las condiciones climáticas del lugar. Para construir viviendas sustentables y mejorar la calidad de vida de los usuarios, es fundamental comprender y entender que cada región cuenta con diferentes tipos de clima y cada uno de ellos presenta características distintas.



Figura 1.1. Tipos de clima en México (Fuente: “La vivienda social en México”, 2013).

En México existe una gran demanda de vivienda, por lo tanto, el potencial para mejorar las condiciones de los usuarios y tener un impacto positivo en el ambiente es enorme. El potencial de ahorro de energía en los edificios, se define a partir del consumo que representan los diversos usos finales energéticos, en el norte y costas del país el mayor consumo de energía se presenta por el uso de aire acondicionado. Los sistemas de aire acondicionado son muy recurrentes en México, por lo tanto, intervenir en mejorar la envolvente de los edificios y reducir las pérdidas o ganancias de energía es importante. Con el fin de reducir el consumo

energético y de alguna manera frenar la contaminación ambiental, causada por la quema de combustibles fósiles utilizados en la producción de energía, se han desarrollado diversas investigaciones enfocadas al estudio de los elementos de la envolvente de la edificación y su relación con el aprovechamiento de la energía solar. Dentro de estas investigaciones existe un grupo denominado sistemas pasivos.

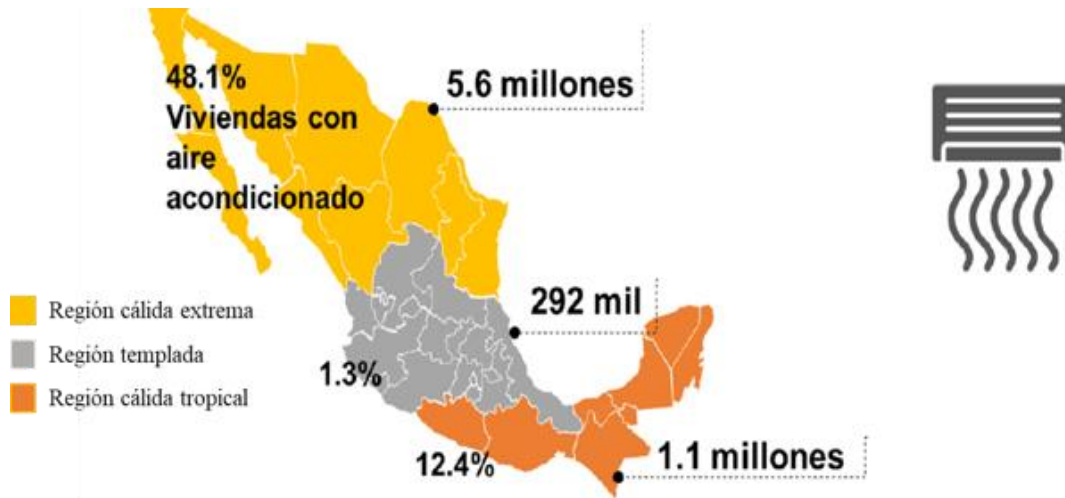


Figura 1.2. Mapa climático por regiones, uso de aire acondicionado (Fuente: INEGI, 2018).

Los sistemas pasivos captan, transforman y distribuyen la energía proveniente del sol, sin hacer uso de una fuente alterna de energía. Estos sistemas están integrados en la arquitectura bioclimática, cuyo principal objetivo es lograr el acondicionamiento al interior de una edificación haciendo uso de los recursos naturales a su disposición y las variables de diseño arquitectónico: orientación, ubicación (condiciones climáticas) y los materiales de construcción de su envolvente. Los estudios enfocados al uso de sistemas pasivos aplicados a la arquitectura, se han desarrollado para distintos componentes de la envolvente de la edificación como son: el techo, los muros y las ventanas.

Las ventanas tienen la finalidad de proporcionar luz y ventilación al interior de una edificación, sin embargo, por las propiedades ópticas de los vidrios, estos elementos también son responsables de pérdidas y ganancias de energía. De acuerdo a las necesidades térmicas de la edificación es recomendable elegir una configuración de ventana adecuada, debido a que la elección del área y la proporción de las ventanas es parte fundamental y principal en la etapa de diseño de la edificación. Sin embargo, al construir o remodelar una edificación pocas veces el diseñador se detiene a pensar cual es la mejor opción en cuanto a ventanas y

---

tipos de vidrio, no obstante, siempre se pueden considerar alternativas que permitan lograr el objetivo deseado, para este caso las configuraciones de ventana de parámetros variables son la mejor opción. Al considerar configuraciones de ventanas con parámetros variables como el número y el tipo de vidrios, recubrimientos, accesorios etc. todo aquello que mejore su desempeño térmico, se puede reducir significativamente el consumo energético en la edificación.

De acuerdo a los estudios realizados a nivel mundial y en México, se ha demostrado que las configuraciones de ventanas de vidrios múltiples reducen las pérdidas o ganancias de energía al interior de la edificación. Debido a lo anterior, en el presente proyecto se pretende evaluar el desempeño térmico de ventanas de vidrios múltiples (doble y triple) y comparar sus resultados con la configuración de ventana más utilizada en el país, vidrio simple, para las condiciones de clima cálido pertenecientes a la República Mexicana.

## 1.2. Revisión bibliográfica


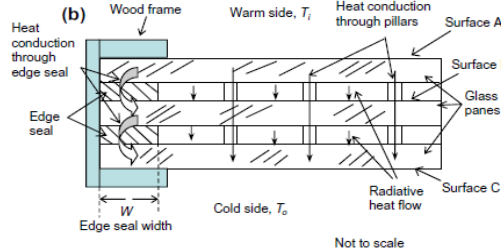

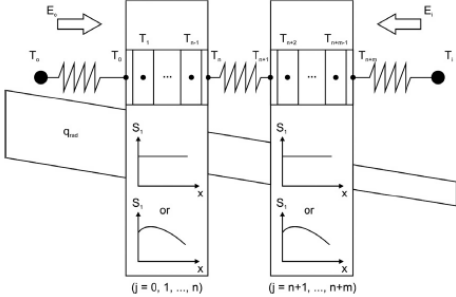

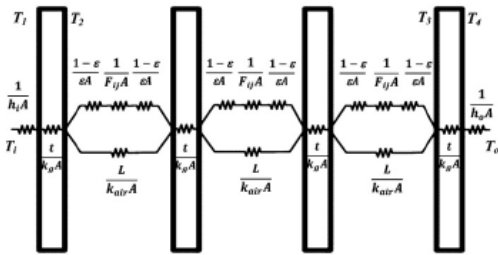
Para establecer el contexto general de los trabajos enfocados al uso de ventanas de parámetros variables, se llevó a cabo la revisión bibliográfica de los trabajos desarrollados a nivel nacional e internación, los cuales se presentan en las secciones posteriores.

### 1.2.1. Estudios desarrollados a nivel mundial

En la Tabla 1.1 se presenta un resumen a nivel mundial, de los trabajos que fueron considerados para sentar las bases para el presente proyecto de tesis. De forma breve se presentan los autores, el año de publicación, el país donde se realizó el estudio, el modelo físico correspondiente a las configuraciones de ventana, los parámetros de estudio, los resultados más relevantes, las conclusiones y las recomendaciones obtenidas por los autores.

Posteriormente, se presenta un resumen de los trabajos de investigación desarrollados en CENIDET, en los cuales se evalúa térmicamente diferentes configuraciones de ventana, considerando las condiciones climáticas que prevalecen en México, tanto para clima cálido como para regiones templadas.

Tabla 1.1. Revisión bibliografía a nivel mundial.

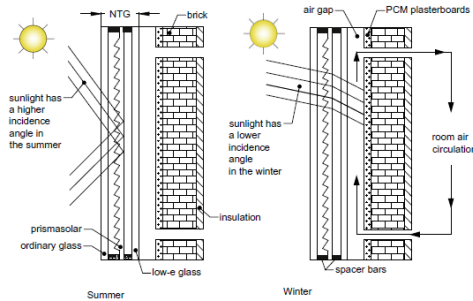
Autores (año) -País Descripción general	Modelo físico	Metodología de solución	Resultados y/o Conclusiones
<p><b>Fang et al. (2010)</b> Estudio teórico de ventanas de vidrio triple al vacío.</p>  <p>Irlanda</p>	<p>Tres vidrios de 4mm de espesor, y dos espacios de vacío de 12.24mm.</p> 	<p>Se empleó la técnica de volumen finito, para resolver la transferencia de calor por conducción en tres dimensiones, además de emplear modelos de resistencias térmicas para considerar pérdidas convectivas y radiativas, al interior, exterior y entre los vidrios, todo en estado transitorio.</p>	<p>Durante el estudio, se analizaron ventanas con distintas áreas de proporción, obteniendo una disminución en la transferencia de energía hacia el interior del 24.6%, al utilizar una ventana de 1m<sup>2</sup>.</p>
<p><b>Zanetti Freire et al. (2011)</b> Estudio teórico-experimental de ventanas de vidrio simple y doble.</p>  <p>Brasil</p>	<p>Dos hojas de vidrio de 6mm separados por una capa de aire de espesor no especificado.</p> 	<p>Se compararon dos métodos de solución, el primero un modelo resistivo simplificado, donde resolvieron transferencia de calor conjugada (conducción, convección y radiación) en estado permanente; el segundo un modelo resuelto por el método de volumen finito donde se consideró únicamente conducción en una dimensión en estado transitorio. Para ambos análisis utilizaron el software PowerDomus.</p>	<p>Los resultados mostraron que con el análisis basado en volumen finito se pueden evitar errores de hasta 50%, con respecto a los resultados obtenidos al utilizar el modelo resistivo simplificado, debido a las consideraciones hechas para formular los modelos matemáticos.</p>
<p><b>Karabay y Arıcı (2012)</b> Estudio teórico de ventanas de vidrios múltiples (doble, triple y cuádruple).</p>  <p>Turquía</p>	<p>Hojas de vidrio de 4mm de espesor con un espacio de aire entre ellos de 12mm.</p> 	<p>Se utilizó un modelo de resistencias térmicas para resolver la transferencia de calor conjugada (conducción, convección e intercambio radiativo superficial) en estado transitorio. Para la evaluación térmica de la componente, se varió únicamente la temperatura al exterior, la cual se consideró la correspondiente a ocho diferentes ciudades de Turquía.</p>	<p>Se realizó un análisis de costos, donde se comparó el costo generado por adquirir ventanas de vidrios múltiples, en comparación al costo generado por el uso de diferentes fuentes de energía (energía eléctrica, gas natural, carbón y gas licuado). Los resultados mostraron que las configuraciones de vidrios múltiples tienen un mayor efecto en la reducción del consumo de energía eléctrica y gas licuado.</p>

**Kara y Kurnuç (2012)**  
Estudio experimental de un muro Trombe con material de cambio de fase (PCM) y vidrio triple.



Turquía

Hojas de vidrio claro-primasolar-de baja emisividad, separados por capas de aire de 9mm.



Se colocaron dos muros Trombe en la fachada sur de una habitación, considerando para ambas pruebas dos diferentes tipos de PCM (GR41 y GR35), todo esto bajo las condiciones climáticas reales de Erzurum, Turquía.

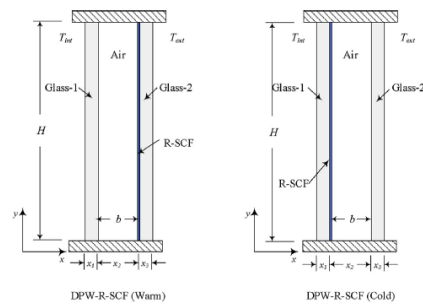
Los resultados mostraron que acoplar un vidrio triple al muro Trombe, ayuda a disminuir la transmitancia solar del sistema hasta un 100%, para la época de verano, esto debido al uso del vidrio Primasolar el cual refleja la mayor parte de radiación solar incidente. Además, con el uso de un vidrio triple y un material de cambio de fase (GR35) el muro Trombe permite que la temperatura interior se mantenga en un intervalo de confort de 22-24°C.

**Aguilar et al. (2015)**  
Estudio teórico de ventanas de vidrio doble.



México

Ventana de vidrio doble reversible, considerando vidrio claro, absorbente y vidrio reflectivo de 6mm con una capa de aire de espesor variable (5- 80mm).



Se utilizó el método de volumen finito y la dinámica de fluidos computacional para resolver la transferencia de calor conjugada (conducción, convección e intercambio radiativo superficial) en dos dimensiones y en estado permanente, en ventanas de vidrio doble, con distintas configuraciones. Para la evaluación térmica se consideraron las condiciones de clima cálido y frío de la República Mexicana.

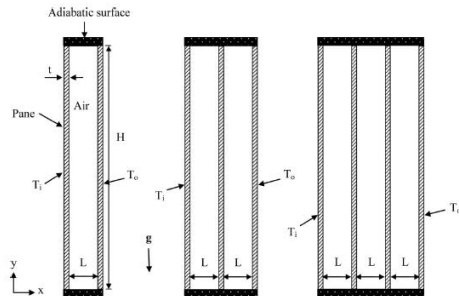
Los resultados mostraron que, tanto para clima cálido como para clima frío, para las tres configuraciones de ventana analizadas, las ganancias o pérdidas de calor al interior permanecen casi constantes para una capa de aire de 20mm. Por otra parte, la configuración que presentó un mejor desempeño térmico, para ambas condiciones climáticas, fue por el uso de vidrio claro y reflectivo.

**Arıcı et al. (2015)**  
Estudio teórico de ventanas de vidrios múltiples (doble, triple y cuádruple).



Turquía

Ventanas de vidrios múltiples, compuestas por vidrios de 4mm de espesor, con una variación de la capa de aire de 6-21mm.



Se resolvió la transferencia de calor conjugada (conducción, convección, con o sin radiación) en estado transitorio, utilizando el software Ansys Fluent. Para el estudio se consideró que la temperatura interior (20°C) y exterior (5-25°C) permanecía constante.

Los resultados mostraron que las pérdidas de energía, se deben principalmente a la diferencia de temperatura y al número de vidrios utilizados, independientemente del espacio de la capa de aire. Por otra parte, los autores observaron que, al reemplazar la ventana de vidrio doble por una ventana de vidrio triple, la transferencia de calor se reduce hasta un 50%.

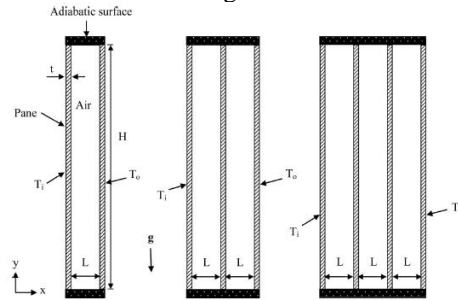


**Arıcı y Kan (2015)**  
Estudio teórico de ventanas de vidrios múltiples (doble, triple y cuádruple).



Turquía

Ventanas de vidrios múltiples de  $1\text{m}^2$ , con vidrios de 6mm de espesor y recubrimientos de baja emisividad, con una capa de espesor variable (6-18mm) de aire y argón.



Se utilizó el software Ansys Fluent para resolver la transferencia de calor conjugada (conducción, convección y radiación), en dos dimensiones y en estado transitorio. Para el estudio únicamente se consideró un valor constante de temperatura interior y exterior ( $20$  y  $-15^\circ\text{C}$ , respectivamente).

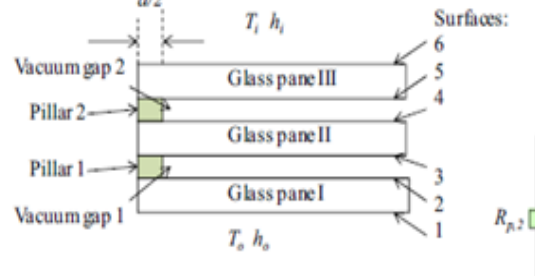
Los resultados mostraron que el coeficiente global de transferencia de calor ( $U$ ), al utilizar una ventana de vidrio doble con recubrimientos de baja emisividad y aire como fluido encapsulado, se puede obtener también si se reemplaza esa configuración, por una ventana de vidrio triple, considerando únicamente vidrios claros. Por otra parte, los autores concluyeron que el espacio óptimo de separación entre los vidrios es de 12mm.

**Fang et al. (2015)**  
Estudio teórico-experimental de ventanas de vidrio triple al vacío con recubrimientos de baja emisividad.



Irlanda

Ventana de vidrio triple al vacío compuesta por vidrios de 4mm de espesor, separados por un espacio de 12mm.



Se implementó la técnica de volumen finito, para resolver la transferencia de calor conjugada (conducción y radiación) en dos dimensiones y en estado permanente. Para evaluar y validar el desempeño térmico de la ventana con cuatro configuraciones distintas, la temperatura interior y exterior se fijó en  $20$  y  $0^\circ\text{C}$ . Para las cuatro configuraciones de ventana, se varió la posición, el número de vidrios y el valor de la emisividad para los recubrimientos (0.18 y 0.03).

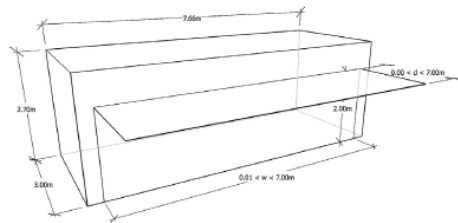
Los resultados mostraron que al utilizar tres recubrimientos con un valor de emisividad de 0.03, se obtiene un coeficiente de transferencia de calor más bajo. Esto se debe a que los recubrimientos de baja emisividad en las superficies con mayor temperatura pueden aumentar la resistencia térmica del sistema.

**Amaral et al. (2016)**  
Estudio teórico de ventanas de vidrio simple, doble y triple.



Portugal

Habitación con ventanas de multiples vidrios, modelada en EnergyPlus.



Las tres configuraciones de ventana fueron acopladas a una habitación para determinar el tipo, tamaño, orientación y efecto de sombra que presente el mejor desempeño en términos de confort térmico y ahorro de energía.

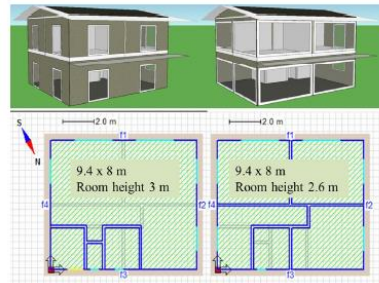
Los resultados mostraron que el mejor desempeño térmico se obtuvo por el uso de una ventana de vidrio triple orientada hacia el norte. Por otra parte, los autores concluyeron que la orientación este y oeste disminuyen el desempeño térmico de los tres tipos de ventana, debido a las ganancias de energía por causa de la radiación solar.

**Thalfeldt et al. (2016)**  
Estudio teórico de ventanas de vidrio triple y cuádruple con recubrimientos de baja emisividad.



Estonia

Casa habitación con ventanas de vidrio doble y triple con recubrimientos de baja emisividad, desarrollado en el software IDA-ICE.



Se realizó un modelo tridimensional para evaluar el desempeño térmico de ventanas con doble y triple vidrio. Se utilizó el software IDA-ICE para realizar un modelo tridimensional de una casa habitación, a la que se le incorporaron las ventanas en la orientación sur y oeste. Se realizaron dos análisis, uno simplificado (parámetros constantes) y uno detallado (parámetros variables).

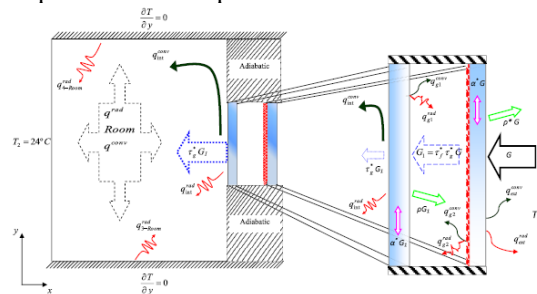
Los resultados mostraron que, al realizar un análisis detallado, donde al usuario se le permite cambiar los parámetros de sus configuraciones, la demanda de energía por el uso de vidrios de baja emisividad y ventanas con una mayor área de proporción. De este análisis, los resultados mostraron que la orientación sur permite un mejor desempeño térmico de la ventana, para ambas configuraciones.

**Xamán et al. (2016a)**  
Estudio teórico de una habitación con una ventana de vidrio doble.



México

Habitación con una ventana de vidrio doble con y sin una película de control solar, vidrios claros de 6mm de espesor con una capa de aire entre ellos de 20mm.



Se consideró la transferencia de calor conjugada (conducción, convección e intercambio radiativo superficial), para evaluar el desempeño térmico de la habitación con la ventana. Los autores aplicaron el concepto de ventana reversible para condiciones de clima cálido y frío de la República Mexicana.

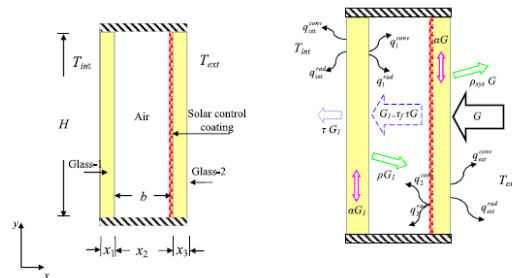
Los resultados mostraron que, para clima cálido, el uso de una ventana con una película de control solar proporciona una reducción del flujo de calor de hasta un 67%.

**Xamán et al. (2016b)**  
Estudio teórico de ventanas de vidrio doble con películas de control solar.



México

Ventana de vidrio doble, con vidrios claros de 6mm de espesor y una capa de aire entre ellos, concepto de ventana reversible.



Se evaluó el comportamiento térmico de una ventana de vidrio doble, con y sin una película de control solar, bajo las condiciones de clima cálido de México. El análisis se llevó a cabo usando la técnica de volumen finito y el método multimallas, para resolver la transferencia de calor conjugada en estado permanente.

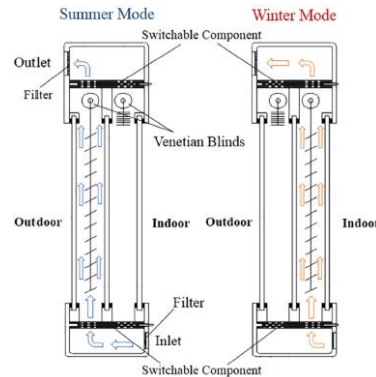
Los resultados mostraron que añadir una película de control solar a una ventana de vidrio doble permite reducir los flujos de calor al interior hasta un 57%.

**Zhang et al. (2016)**  
Estudio teórico de ventanas de vidrio triple con persianas venecianas.



República Popular China

Ventana de vidrio triple con persianas venecianas, para condiciones de invierno y verano. Se consideran vidrios claros de 6mm, separados por dos capas de aire de 15mm.



Se resolvió la transferencia de calor por conducción, convección y radiación en estado transitorio, mediante la técnica de balances de energía. Para el estudio, se evaluó el desempeño térmico de la ventana para las condiciones climáticas de Wuhan, China.

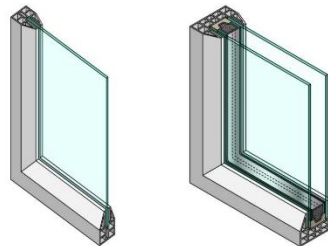
Para un día de verano e invierno las ganancias de energía al interior se pueden reducir aproximadamente 74%, con respecto a una ventana de vidrio doble. Por otra parte, el porcentaje más alto de reducción de energía transmitida, se obtiene al orientar la ventana hacia el norte.

**Kalinović et al. (2017)**  
Estudio teórico de ventanas de vidrio simple y doble.



Serbia

Ventanas de vidrio simple y doble.



Se estudió los parámetros que influyen en el cálculo del coeficiente de transferencia de calor  $U$ , para ventanas de vidrio simple y doble.

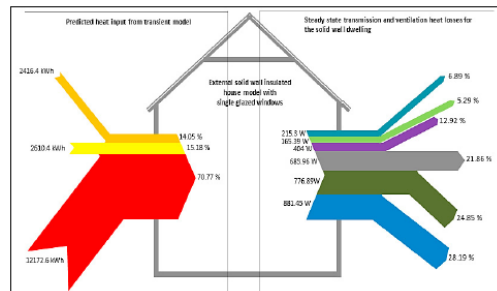
Los resultados mostraron que los parámetros que terminan el desempeño térmico de la ventana son: sus características estructurales, el número de vidrios, el espacio de separación entre ellos, el fluido encapsulado y la orientación de la ventana. Es por ello, que los autores recomiendan el uso de ventanas de vidrios múltiples, utilizando aire o argón como fluido encapsulado.

**Memon y Eamen (2017)**  
Estudio teórico de casas unifamiliares con ventanas de vidrio triple al vacío.



Reino Unido

Casa habitación con ventanas de vidrio triple al vacío.



Se analizó la ganancia de energía solar, en comparación con la energía requerida, por el uso de equipos de calefacción durante el invierno en Londres, Inglaterra.

Tras analizar tres configuraciones de ventana: vidrio simple, doble y triple, los resultados mostraron que hubo una disminución del 10% en las pérdidas de energía, al reemplazar la ventana de vidrio simple por una ventana de vidrio triple.

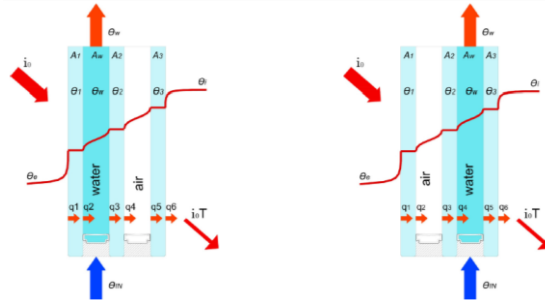
**Sierra y Hernández (2017)**

Estudio teórico de ventanas de vidrio doble y triple, utilizando agua y aire como fluido encapsulado.



España

Ventanas de vidrio triple, utilizando agua y aire como fluido encapsulado. Configuración compuesta por tres hojas de vidrio de 6mm, separadas por un espacio de 10mm.



Se realizó un estudio para determinar el coeficiente global de transferencia de calor  $U$  y el coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC). Para ello, resolvieron la transferencia de calor conjugada por conducción, convección y radiación, en estado permanente, mediante la técnica de balances de energía.

Los resultados mostraron que las ventanas que utilizan agua como fluido encapsulado, absorben una mayor cantidad de energía, lo que permite que al interior de la edificación existan condiciones de confort en un intervalo de temperaturas de 21-25°C. Por otra parte, los autores comentan que, para elegir una configuración de ventana adecuada, es necesario considerar la orientación y la ubicación de la edificación.

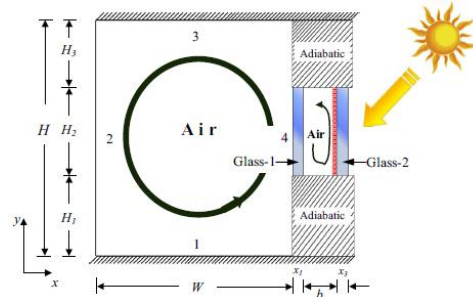
**Xamán et al. (2017)**

Estudio teórico de una habitación con una ventana de vidrio doble.



México

Ventana de vidrio doble acoplada a una habitación. Vidrios claros de 6mm con un espacio de aire entre ellos de 20mm.



Se resolvió la transferencia de calor conjugada por conducción, convección y radiación mediante la técnica de volumen finito. La ventana fue evaluada para las condiciones de un clima extremo de México, aplicando el concepto de ventana reversible y el uso de una película de control solar.

Los resultados mostraron que las ganancias de energía hacia el interior se pueden reducir hasta un 62%, cuando se utiliza una ventana de vidrio doble con una película de control solar en el vidrio en contacto con el ambiente exterior.

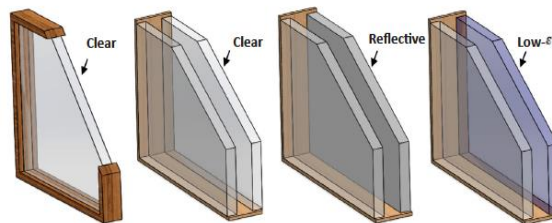
**González-Julián et al. (2018)**

Estudio teórico de ventanas de vidrio doble con diferentes configuraciones.



México

Ventanas de vidrio doble, utilizando vidrios de 6mm, con un espacio de aire de 20mm, con vidrio claro.



Se resolvió la transferencia de calor conjugada (conducción, convección y radiación superficial) en ventanas de vidrio doble, para evaluar térmicamente el desempeño de la ventana bajo condiciones de clima cálido de México (Chetumal Quintana Roo), durante todo un año.

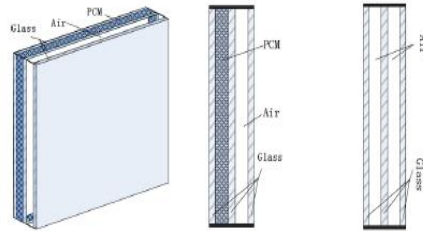
Los resultados mostraron que, la utilización de ventanas de vidrio doble considerando únicamente vidrios claros, trae consigo una reducción de los flujos de calor al interior hasta de un 12%. Además de que el uso de otro tipo de vidrios como el vidrio reflectivo reduce los flujos de calor hasta un 72%.

**Li et al. (2018a)**  
 Estudio teórico-experimental de ventanas de vidrio triple con PCM.



República Popular China

Ventana de vidrio triple con PCM (Parafina MG29), con vidrios de 5mm y dos espacios de separación entre ellos de 14mm. (TWP+PCM)



Se resolvió la transferencia de calor por conducción unidimensional en estado transitorio, mediante el software Ansys Fluent. El modelo desarrollado fue validado para las condiciones climáticas de Nanjing, China, durante un día de verano e invierno.

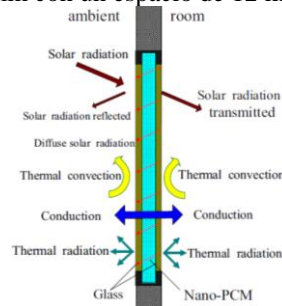
Los resultados mostraron que el uso de TW+PCM puede reducir el consumo de energía 21.3 y 32.8% con respecto al uso de vidrio doble con PCM y vidrio triple sin PCM.

**Li et al. (2018b)**  
 Estudio teórico-experimental de ventanas de vidrio doble con PCM y nanopartículas.



República Popular China

Ventana de vidrio doble con PCM y nanopartículas de cobre, óxido de cobre y óxido de aluminio. Vidrios claros de 6mm con un espacio de 12 mm entre ellos.



Para evaluar el desempeño térmico de la ventana, únicamente se consideró la transferencia de calor por conducción en una dimensión y en estado transitorio. Este modelo fue validado bajo condiciones climáticas de Daqing, China.

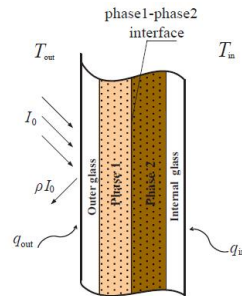
Los resultados mostraron que el uso de un PCM mejora el rendimiento óptico de la ventana, disminuyendo la transmisión de energía al interior. Con respecto al uso de nanopartículas, los tres materiales utilizados presentaron un desempeño térmico y óptico similar. Sin embargo, los autores recomiendan una fracción de volumen por debajo del 1% de nanopartículas de cobre de 15nm.

**Li et al. (2018c)**  
 Estudio teórico-experimental de ventanas de vidrio doble con PCM y nanopartículas.



República Popular China

Modelo físico de una ventana de vidrio doble con PCM y nanopartículas de óxido de aluminio.



Se consideró la transferencia de calor por conducción unidimensional, en estado transitorio, además de considerar pérdidas convectivas y radiativas, al interior y exterior de la ventana. Los cálculos se realizaron para tres estaciones del año: verano, otoño e invierno de Daqing, China, la temperatura interior fue fijada dependiendo la estación (26, 22 y 18°C, respectivamente).

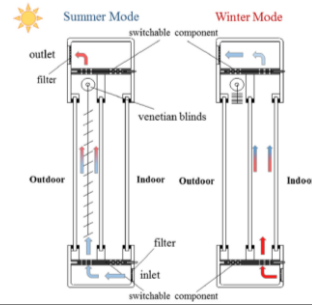
Los resultados mostraron que la temperatura interior incrementa al aumentar el tamaño de las nanopartículas y disminuye al incrementar la concentración de estas. El menor consumo de energía se obtuvo al utilizar nanopartículas de 100nm y una fracción de volumen de 1%.

**Zhang et al. (2018)**  
Estudio teórico-experimental de ventanas de vidrio triple con persianas venecianas.



República Popular China

Ventana de vidrio doble de 0.85m de altura, compuesta por vidrios claros de 5mm y un espacio de separación entre ellos de 40mm.



Para el estudio teórico, los autores consideraron transferencia de calor conjugada (conducción, convección y radiación), en dos dimensiones en estado transitorio. Los modelos matemáticos fueron resueltos mediante balances de energía.

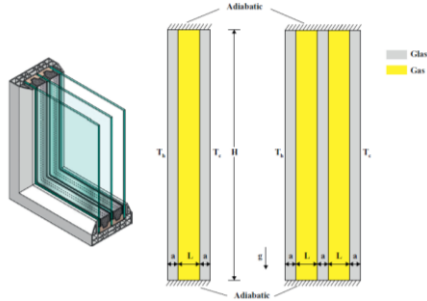
Los resultados mostraron que la temperatura en la cavidad ventilada depende de la radiación solar, la velocidad del aire y la temperatura exterior, a medida que la velocidad del aire aumenta en la cavidad ventilada a causa de la inclinación de las persianas, el valor del coeficiente de transferencia de calor ( $U$ ) se reduce hasta un 96.9% para un día de verano.

**Foruzan Nia et al. (2019)**  
Estudio teórico de ventanas de vidrio doble y triple.



Irán

Ventanas de vidrio doble y triple.



Se estudió el efecto de considerar el fluido encapsulado entre los vidrios como un medio radiativamente participante, para ventanas de vidrio doble y triple. Para el estudio se consideró transferencia de calor por convección natural y radiación, los modelos matemáticos fueron resueltos utilizando la función de corriente y vorticidad y el método de ordenadas discretas, respectivamente.

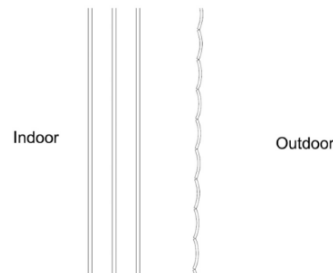
Los resultados mostraron que al considerar el fluido encapsulado como medio radiativamente participante, el flujo de calor aumenta hasta un 20% con respecto a considerarlo como no-participante. Por otra parte, los autores concluyeron que, al aumentar el número de vidrios en la ventana, el efecto de convección natural se reduce más en comparación con el efecto de aumentar el espesor de la capa de fluido.

**Liu et al. (2019)**  
Estudio teórico de ventanas de techo con triple acristalamiento.



Dinamarca

Ventana de techo compuesta por tres hojas de vidrio separadas por un espacio de 12mm donde se encapsula argón, con persianas externas.



Para evaluar el desempeño térmico de la ventana, se resolvió la transferencia de calor conjugada por conducción, convección y radiación, en estado transitorio, mediante balances de energía. Para el estudio los autores consideraron el ángulo de inclinación de la ventana (vertical, horizontal y 45°), el espacio entre la ventana y la persiana, la posición de las persianas, etc.

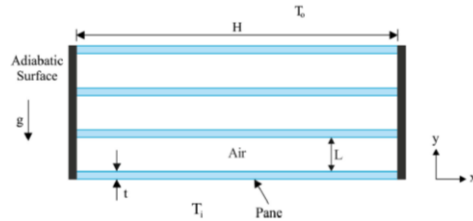
Los resultados mostraron que el coeficiente de transferencia de calor ( $U$ ) más bajo, se obtiene al colocar la ventana en posición vertical con una persiana colocada a 20mm de distancia. Los autores concluyeron que el triple acristalamiento de la ventana, más el uso de persianas externas, puede reducir las pérdidas de energía durante el invierno, y mantener un ambiente de confort durante el verano.

**Tükel et al. (2019)**  
Estudio teórico de ventanas de vidrios múltiples para techos.



Turquía

Ventana de vidrios múltiples para techo de 0.8m, compuesta por hojas de vidrio de 4mm y un espacio de separación variable de (6-18mm)



Se evaluó el efecto del número de vidrios, emisividad en la superficie y el espacio de separación entre estos. Para ello, se consideró la transferencia de calor conjugada en estado transitorio, donde se despreció el efecto de la radiación solar incidente y el marco, la temperatura interior y exterior se fijó en un valor constante de 20 y -15°C, respectivamente.

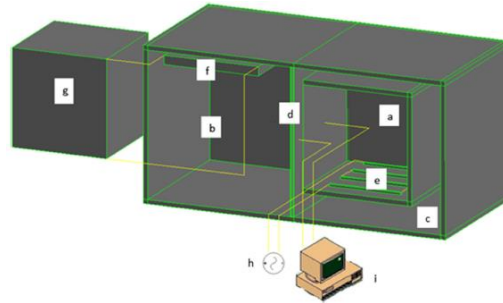
Los resultados mostraron que la máxima reducción del coeficiente de transferencia de calor ( $U$ ), se obtiene al utilizar un ancho de separación de 12mm. Por otro lado, los autores concluyeron que el ancho de separación entre los vidrios tiene un mayor efecto en el coeficiente  $U$ , en comparación al efecto de los recubrimientos de baja emisividad, en el caso de ventanas colocadas verticalmente.

**Bitaab et al. (2019)**  
Estudio teórico-experimental de una ventana de vidrio doble con una cortina.



Irán

Habitación con una ventana de vidrio doble.



Se investigó el efecto de variar el tamaño de la capa de aire, la colocación de una cortina, la distancia entre la cortina y el vidrio exterior, y el ángulo de inclinación de una ventana de vidrio doble. La ventana fue colocada entre dos cajas a temperatura constante, sin considerar la radiación solar y la velocidad del viento. Para determinar los parámetros óptimos de la ventana, los autores complementaron su trabajo realizando simulaciones numéricas.

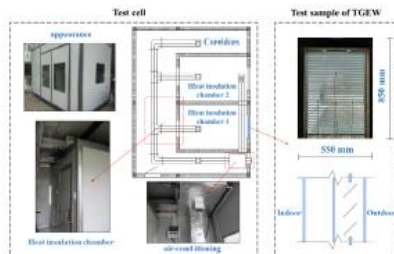
Los resultados mostraron que las máximas reducciones de transferencia de calor se obtienen al utilizar una capa de aire de 12mm (30.9%), una cortina a 40mm del vidrio (33.9%) y un ángulo de inclinación de 10° (6.5%).

**Zhang et al. (2019)**  
Estudio teórico-experimental de ventanas de vidrio triple con persianas venecianas.



República Popular China

Habitación con una ventana de vidrio triple y persianas venecianas. Vidrios de 5mm con espacios de aire entre ellos de 40mm.



Se resolvió la transferencia de calor conjugada por conducción, convección y radiación, en dos dimensiones y en estado transitorio, mediante balances de energía. Y se compararon los resultados obtenidos numéricamente, con los obtenidos tras realizar pruebas experimentales bajo condiciones climáticas reales.

El sistema de ventana con escape de aire reduce aproximadamente un 25.3 y 50.1% anualmente las cargas de enfriamiento y calentamiento, respectivamente. Los autores concluyeron que el uso de ventanas con escape de aire, pueden ser usadas ampliamente en edificios donde se requiera disminuir las cargas de enfriamiento y calentamiento a causa de equipos de aire acondicionado.

### 1.2.2. Estudios desarrollados en CENIDET

En CENIDET los estudios enfocados a ventanas tienen sus inicios en el año 1995, con **Jiménez-Antonio** quién realizó un estudio teórico-experimental de vidrios con y sin un controlador óptico solar (COS), obteniendo como resultado que un vidrio con un COS puede impedir el paso de la energía hasta un 56%. Posteriormente, un trabajo similar lo presentó **Palacios-Gallegos** en 1997, quién analizó cuatro vidrios distintos, vidrios claros de 3 y 6mm de espesor, vidrio reflectasol y vidrio filtrasol, obteniendo como resultado que el vidrio reflectasol reduce hasta un 29% la energía solar incidente, sin embargo, debido a las propiedades ópticas del vidrio, este presenta ciertas desventajas en cuanto a confort lumínico y eficiencia térmica. Continuando con el análisis de vidrios con filtros solares, para ventanas de vidrio doble, **Cortina-Leyva** en el año 2000 realizó un estudio teórico-experimental, considerando únicamente transferencia de calor por conducción y convección unidimensional en estado transitorio, utilizando vidrios claros de 6mm de espesor y un espacio de separación entre ellos de 12mm, parámetros con los que se obtuvo una eficiencia térmica de 46 – 55%. Posteriormente, en 2009 **Medina- Agreda** realizó un estudio teórico para evaluar el efecto del marco de la ventana, cuyos resultados muestran que un marco de PVC presenta una reducción en el flujo de calor, mejorando el desempeño térmico de la ventana. En el mismo año **Vicente-López** realizó un estudio similar, pero de manera experimental mostrando que sus resultados concuerdan con los obtenidos por Medina-Agreda de forma teórica, en esta ocasión proporcionando un porcentaje de reducción del 64% al evaluar la ventana con marco de PVC en comparación al evaluar una ventana con marco de aluminio, para ambos estudios se utilizó una ventana de vidrio simple. En 2012, **Jiménez-García** realizó un estudio experimental similar al realizado por Vicente-López, cuyos resultados muestran mucha similitud en cuanto al porcentaje de reducción y el tipo de material del marco, dentro de las recomendaciones la autora comenta que los elementos principales para evaluar la transferencia de calor en esta componente son: los vidrios, el marco y en dado caso el tipo de fluido encapsulado o dispositivos de sombreado. Por otra parte, **Pérez-Nucamendi** en 2012 realizó un estudio teórico de ventanas de vidrio doble con películas de control solar, variando el espacio de separación de los vidrios, encontrando para este estudio que el espacio de separación óptimo era de 6cm. Hasta el 2015 únicamente se había evaluado la ventana, fue hasta entonces que **Olazo-Gómez** realizó un estudio de una



habitación a la que se le acopla una ventana de vidrio doble con una película de control solar, bajo condiciones de clima cálido y frío, los resultados obtenidos de este acople mostraron que se puede reducir la transferencia de calor al interior de la habitación hasta un 62%, al utilizar vidrios con una película de control solar. Haciendo uso nuevamente de ventanas de vidrio doble con y sin película de control solar, **Jiménez-Xamán** en 2015 implementó un algoritmo multimallas para reducir el tiempo de cómputo, para resolver la transferencia de calor en una ventana de vidrio doble con y sin película de control solar, obteniendo como resultado que el uso de una película de control solar adherida a una ventana de vidrio doble, reduce hasta un 57% los flujos de calor al interior. Con base en estos resultados se muestra que usar vidrios alternos al convencional, puede reducir la transferencia de calor al interior de la habitación, dicho esto, en 2017 **González-Julián** realizó un estudio de la transferencia de calor en ventanas de vidrio doble, considerando el vidriado disponible en el mercado mexicano (claro, reflectivo y de baja emisividad). Para la evaluación térmica se consideraron las condiciones climáticas de Chetumal, Quintana Roo, para lo cual la ventana de vidrio doble mostró que es posible reducir hasta un 12% la transferencia de calor hacia el interior. La búsqueda por mejorar el desempeño térmico de las ventanas ha llevado a buscar nuevas alternativas que permitan lograr este objetivo, muestra de ello es el uso de materiales de cambio de fase incorporados a distintas configuraciones de ventana. Recientemente, en 2019 **Ché-Pan** realizó un estudio de la transferencia de calor conjugada en ventanas con un material de cambio de fase, para clima cálido y frío, los resultados obtenidos mostraron que es posible reducir hasta un 71% el flujo de calor al interior (para clima cálido) haciendo uso de sistemas de sombreado acoplados a las ventanas, los cuales muestran ser una opción viable para reducir las ganancias de energía y por ende reducir el consumo energético.

### 1.3. Conclusión de la revisión bibliográfica

Con base en la revisión de los trabajos realizados enfocados a ventanas con distintas configuraciones, a nivel nacional e internacional, se pueden rescatar algunos aspectos importantes tales como: los mecanismos de transferencia de calor analizados, el método de solución utilizado y claro, las condiciones climáticas a las cuales fue sometida la ventana, debido a que según sea la ubicación geográfica de la edificación, se recomienda una configuración de ventana adecuada, con el propósito de disminuir pérdidas o ganancias de energía. Asimismo, se pudieron obtener datos significativos que ayudan a mejorar el

desempeño térmico de la ventana, como el tipo y número de vidrios, el fluido encapsulado, el espacio de separación entre los vidrios, la orientación y su inclinación, además del uso de accesorios. Sin embargo, los datos obtenidos hasta la fecha se reportan para evaluaciones térmicas realizadas para climas fríos o en su defecto condiciones de laboratorio o supuestas, para México los estudios realizados consideran sus condiciones climáticas, tanto para clima cálido como frío, sin embargo, las configuraciones de ventana evaluadas aun no consideran el uso de vidrio triple. Finalmente, con el presente trabajo se pretende evaluar la transferencia de calor en una ventana de vidrio triple bajo condiciones de clima cálido de México, con el objetivo de proporcionar una configuración de ventana que ayude a disminuir las ganancias de energía al interior de la edificación, así como han mostrado los trabajos anteriores disminuir la transferencia de calor hacia el ambiente interior, para las condiciones climáticas que se presentan en nuestro país.

#### 1.4. Objetivos

En esta sección se presentan el objetivo general y los objetivos específicos que se llevaron a cabo en este trabajo de tesis.

##### 1.4.1. Objetivo general

- ✓ Evaluar el comportamiento térmico de una ventana de vidrio triple para un clima cálido de México.

##### 1.4.2. Objetivos específicos

- ✓ Aprender la técnica de volúmenes finitos y balances de energía.
- ✓ Implementar un código numérico para simular la transferencia de calor conjugada, en una ventana de vidrio triple con vidriado del mercado mexicano.
- ✓ Seleccionar una condición de clima cálido de la República Mexicana.
- ✓ Realizar el estudio paramétrico de una ventana de vidrio triple, con valores horarios del día más cálido y frío, para el lugar seleccionado como clima cálido de México.

#### 1.5. Alcance

Se realizó un estudio numérico mediante modelos de balances de energía, de la transferencia de calor en una ventana de vidrio triple, compuesta por vidrios disponibles en el mercado mexicano. Para llevar a cabo la evaluación térmica se consideró un estudio paramétrico con

---

condiciones climatológicas seleccionadas de la República Mexicana. Mediante valores de fluxes de calor al interior de la ventana de vidrio triple, se llevó a cabo la evaluación térmica para proponer una configuración adecuada de ventana. De forma paralela, se llevó a cabo la modelación de una ventana tradicional (vidrio simple) y una ventana de vidrio doble, y los resultados de ambos casos fueron usados de referencia para la comparación con los resultados obtenidos de la ventana de vidrio triple. Para llevar a cabo este trabajo, se consideró la plataforma computacional desarrollada en CENIDET, en el modelado numérico de ventanas de vidrio doble. El estudio se realizó en estado transitorio y en dos dimensiones.

## 1.6. Estructura de la tesis

En el Capítulo 2 se presenta el modelo físico de las configuraciones de ventana a analizar (vidrio simple, doble y triple) haciendo especial hincapié en la configuración más compleja, la ventana compuesta por tres hojas de vidrio separados por dos espacios de aire (vidrio triple). Asimismo, se presentan los modelos matemáticos establecidos para las tres configuraciones de estudio, así como también se describen las consideraciones y suposiciones que fueron tomadas en cuenta para el desarrollo de este trabajo. Posteriormente, en el Capítulo 3 se describe la metodología de solución numérica implementada para el desarrollo del código numérico, que simula la transferencia de calor conjugada (conducción, convección e intercambio radiativo superficial) en ventanas de vidrios múltiples, además se presentan los ejercicios de verificaciones realizados para la verificación del código numérico implementado. En el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos del estudio paramétrico realizado para la ciudad de Mérida, Yucatán. Los resultados se presentan cualitativa y cuantitativamente para cuatro meses representativos a cada estación del año, mostrando la temperatura promedio de la superficie del vidrio en contacto con el ambiente interior y las cargas térmicas a lo largo del día, esto es, durante las 24 horas. En este capítulo se presentan las cargas térmicas mensuales y los porcentajes de reducción obtenidos al comparar las configuraciones de ventanas de vidrios múltiples con la configuración de referencia (vidrio simple). En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones obtenidas del presente trabajo de tesis y las recomendaciones para trabajos futuros. Por último, en los anexos se presentan las funciones de ajuste para determinar las variables climáticas: temperatura ambiente y radiación solar (Anexo A). Posteriormente, en el Anexo B se presentan los flujos de calor para los días más cálidos y más fríos de ocho meses del año.

---

## CAPÍTULO 2

### MODELO FÍSICO Y MODELO MATEMÁTICO

Con la finalidad de reducir el consumo energético y la contaminación ambiental a causa del uso de equipos de acondicionamiento de espacios interiores, diferentes investigaciones se han enfocado al estudio de la interacción edificación-ambiente, lo que conlleva a utilizar los elementos principales de la envolvente de la edificación a favor de ella. De esta forma, mediante el techo, los muros y las ventanas y el uso de los recursos naturales a su disposición es posible lograr un ambiente de confort al interior del recinto.

Uno de los elementos estéticos más importantes en recintos de uso público o recintos residenciales son sin duda alguna las ventanas, debido a que estos elementos cumplen la función de brindar luz y ventilación a la edificación, sin embargo, cuando la configuración de ventana utilizada no es acorde, a las condiciones climáticas de la región en donde se estableció la edificación y su orientación, esto trae consigo problemas, debido a que después del techo, las ventanas son los elementos que mayor ganancia de energía aportan a la edificación, esto para regiones cálidas. Para disminuir el efecto térmico que producen las ventanas a la edificación, es recomendable que, en el proceso de diseño o rediseño, se considere abordar la solución desde una perspectiva de ahorro energético, para esto es conveniente el uso de ventanas distintas a la configuración básica de vidrio simple, la cual hasta la fecha en México es la más usada.

Existen diferentes alternativas para reducir las ganancias de energía a través de ventanas, para ello diferentes estudios se han enfocado al uso de ventanas de parámetros variables, número y tipo de vidrios, fluido encapsulado, uso de accesorios, etc., todo aquello que ha mostrado reducir las ganancias de energía a través de las ventanas y con ello, reducir el consumo energético a causa del uso de equipos de aire acondicionado, los cuales son recurrentes en regiones de clima cálido, en donde el uso de ventanas convencionales es recurrente.

Con la finalidad de recomendar la configuración de ventana más adecuada para las condiciones de clima cálido que prevalecen en México, en este proyecto se consideraron las configuraciones de ventanas de vidrios múltiples: doble y triple. Estas configuraciones están

conformadas por una o más hojas de vidrio en las que se encapsula un fluido. Para el estudio térmico de estas componentes, únicamente se consideraron los cristales y el fluido encapsulado entre ellos, que para este caso fue aire.

### 2.1. Modelo físico

En la Figura 2.1 se presenta el modelo físico correspondiente a una ventana de vidrio doble (2.1a) y una ventana de vidrio triple (2.1b). Estas configuraciones de vidrios múltiples están representadas por una cavidad rectangular cerrada que está constituida por dos o tres paredes semitransparentes de altura  $H$ , el vidrio 1 se encuentra en contacto con el ambiente interior ( $T_{int}$ ), mientras que el vidrio 2 y el vidrio 3 está en contacto con el ambiente exterior ( $T_{ext}$ ), las paredes horizontales superior e inferior se consideran adiabáticas, despreciando las contribuciones térmicas que puedan aportar al sistema. Entre los vidrios existe un espacio de separación ( $b$ ) en el cual se encapsula un fluido, que para el presente estudio es aire.

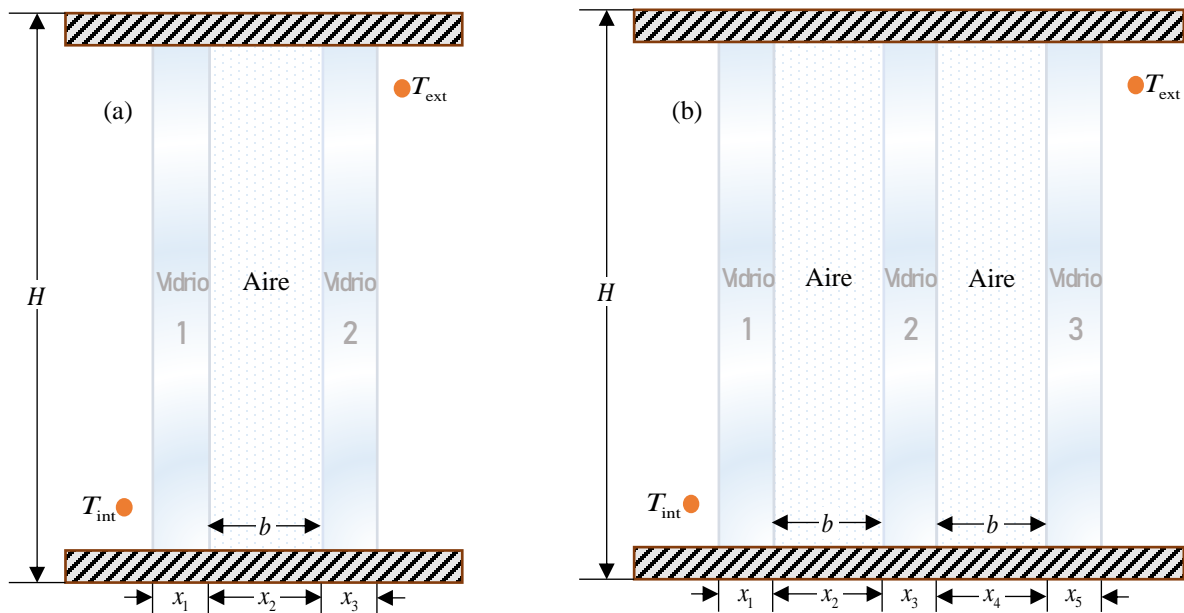


Figura 2.1. Modelo físico general: ventana de vidrio (a) doble y (b) triple.

#### 2.1.1. Consideraciones

- El modelo físico se presenta en dos dimensiones.
- Debido a las dimensiones de la ventana y la diferencia de temperaturas que puede existir, el flujo se considera en régimen laminar.

- El fluido en este caso aire, es newtoniano e incompresible.
- Se considera aire seco, debido a su bajo contenido de humedad y por lo tanto es un medio radiativamente no participante.
- El estudio se realiza en estado transitorio.

En términos generales, las condiciones térmicas de una edificación dependen de la magnitud de las pérdidas o ganancias de calor que pueden tener a lo largo del día. Las ganancias o pérdidas térmicas están relacionadas con la interacción edificación-ambiente exterior, es decir, surgen a partir de un intercambio de energía a través de los mecanismos de transferencia de calor. La transferencia de calor puede ocurrir por conducción, convección (natural, forzada o una combinación de ambas) y radiación.

### 2.1.2. Mecanismos de transferencia de calor

Para el presente estudio se consideró la transferencia de calor conjugada que ocurre en ventanas de vidrios múltiples, con lo que se tiene: conducción de calor a través de los vidrios (paredes semitransparentes, tienen capacidad de absorber, reflejar y transmitir energía), convección natural en el fluido encapsulado, además de, intercambio radiativo superficial entre las paredes verticales que componen las cavidades.

Para la configuración de vidrio doble, se considera que incide radiación solar en forma normal a la superficie, de esta energía adquirida una parte es absorbida por el vidrio, otra parte es transmitida a la cavidad entre los vidrios y la energía restante es reflejada al exterior. De la energía transmitida hacia la cavidad, esta pasa directamente hacia el vidrio en contacto con el ambiente interior, debido a la consideración que se hace al aire como medio radiativamente no participante. Nuevamente, la energía que pasa directo hacia el vidrio 1, una parte es absorbida, otra parte es reflejada hacia la cavidad y la energía restante es transmitida hacia el interior.

Un mismo proceso ocurre en la configuración de vidrio triple, en este caso considerando que existe una pared semitransparente extra, la cual tiene la capacidad de absorber, reflejar y transmitir energía. Para esta configuración se considera que sobre el vidrio 2 o 3 incide radiación solar en forma normal a la superficie, de esta energía adquirida una parte es absorbida por el vidrio, otra parte es transmitida a la cavidad (entre el vidrio 2 y 3) y la

energía restante se refleja hacia el exterior. De la energía transmitida hacia la cavidad, esta pasa directamente hacia el vidrio 2, debido a la consideración que se hace al aire como medio radiativamente no participante. Nuevamente, de la energía transmitida al vidrio 2, una parte es absorbida por el vidrio, otra parte es transmitida a la cavidad y el porcentaje restante es reflejado hacia la cavidad. De la energía transmitida hacia el vidrio 1 parte es absorbida por el vidrio, otro porcentaje es reflejado y el resto es transmitido hacia el interior.

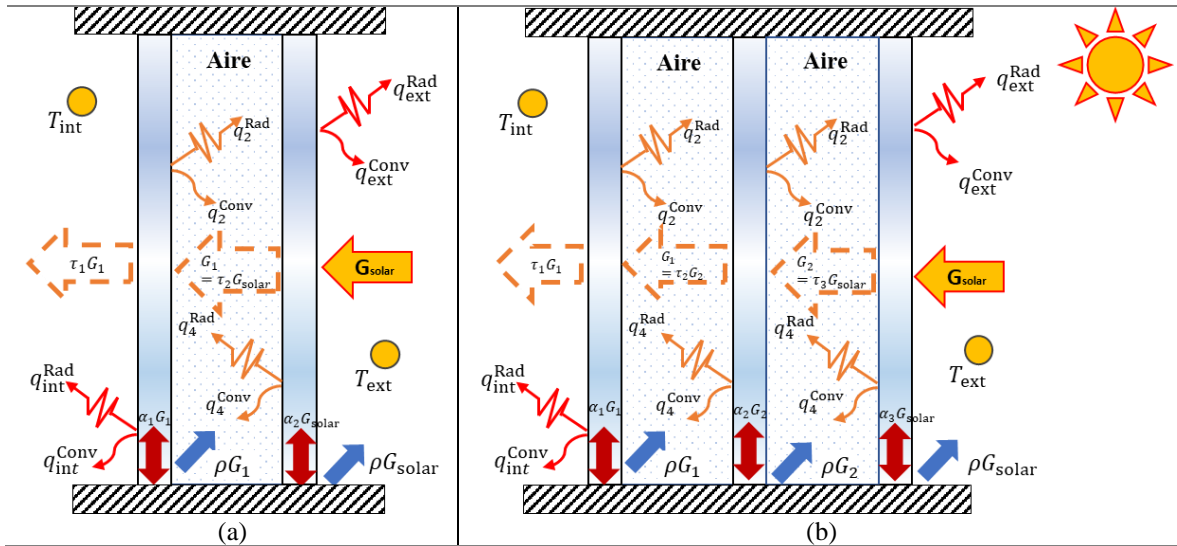


Figura 2.2. Mecanismos de transferencia de calor presentes en una ventana de vidrio (a) doble y (b) triple.

Debido a la energía absorbida por las hojas de vidrio estas incrementan su temperatura provocando gradientes térmicos, los cuales generan flujos de calor convectivos y radiativos, hacia los espacios de aire entre los vidrios (cavidades), el ambiente interior y el ambiente exterior.

## 2.2. Modelo matemático

Para determinar la energía que es intercambiada y acumulada en un sistema, desde un punto de vista general sin tener un interés especial en la fenomenología, se establece un balance de energía en el elemento, para lo cual es necesario conocer las condiciones que existen entre el sistema y su entorno. Se presenta el balance de energía general para cualquier elemento (Ec. 2.1), donde se establece que el flujo que entra al elemento menos el flujo de calor que sale de este, es igual al flujo de calor almacenado dentro del mismo.

$$q_{\text{entra}} - q_{\text{sale}} = q_{\text{almacenado}} \tag{2.1}$$

$$q_{\text{entra}} - q_{\text{sale}} = \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} Hx_{\text{elemento}} \quad (2.2)$$

Para el siguiente paso se considera únicamente el término transitorio, con la finalidad de transformar el término diferencial en un término algebraico, se realiza el siguiente proceso:

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} Hx_{\text{elemento}} = \frac{\rho C_p Hx_{\text{elemento}}}{\Delta t} (T - T^0) = a_p^0 (T - T^0) \quad (2.3)$$

Al concluir el proceso de discretización del término transitorio, se obtiene el término algebraico  $a_p^0$ , el cual relaciona las propiedades termofísicas del elemento de análisis (densidad y calor específico), su espesor y el paso de tiempo utilizado para el proceso de solución. Este término se incluye en los balances de energía que se presentan a continuación.

### 2.2.1. Modelo matemático para una ventana de vidrio simple

Una ventana de vidrio simple, como su nombre lo indica, se representa únicamente por un elemento, en el cual se considera la interface entre el ambiente interior y el ambiente exterior.

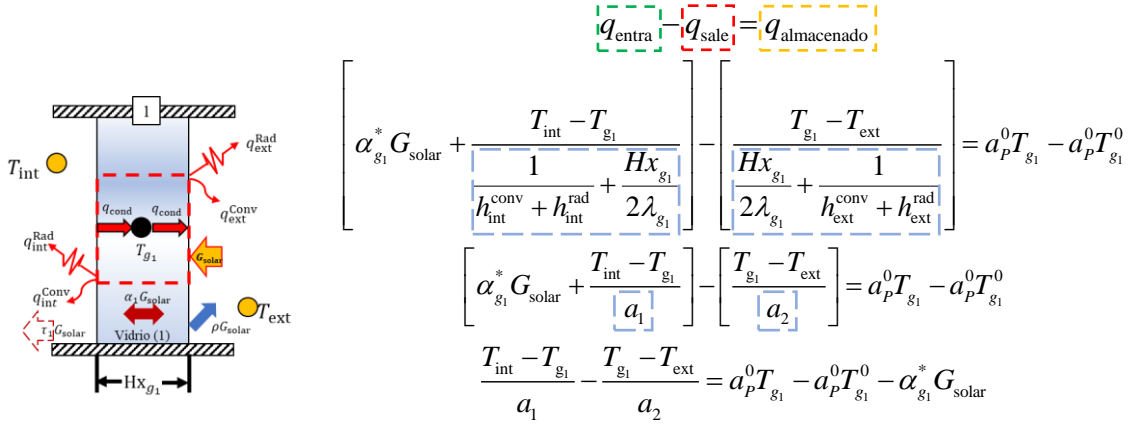


Figura 2.3. Configuración de vidrio simple.

$$a_2 T_{\text{int}} - a_2 T_{g_1} - a_1 T_{g_1} + a_1 T_{\text{ext}} = a_1 a_2 (a_p^0 T_{g_1} - a_p^0 T_{g_1}^0 - \alpha_{g_1}^* G_{\text{solar}})$$

\*El balance de energía se considera de izquierda a derecha.

$$(a_1 + a_2 + a_1 a_2 a_p^0) T_{g_1} = a_2 T_{\text{int}} + a_1 T_{\text{ext}} + a_1 a_2 (a_p^0 T_{g_1}^0 + \alpha_{g_1}^* G_{\text{solar}}) \quad (2.4)$$

$a_1$  y  $a_2$  son constantes que adquieren el valor de la resistencia térmica por conducción, convección y radiación.

Para el análisis se consideró que se tienen pérdidas convectivas y radiativas al interior de este elemento. Al considerarse un vidrio como una pared semitransparente, este tiene la propiedad de absorber, reflejar y transmitir parte de la energía que incide en forma normal a la superficie.



2.2.2. Modelo matemático para una ventana de vidrio doble

Cuando se realiza un balance de energía en un sistema compuesto, además del efecto de las condiciones al interior y exterior, también es necesario considerar el efecto de los otros elementos sobre el elemento de análisis. Debido a esto, al considerar un sistema compuesto por dos vidrios, en donde además se considera que existe un fluido encapsulado el análisis se vuelve un poco más robusto.

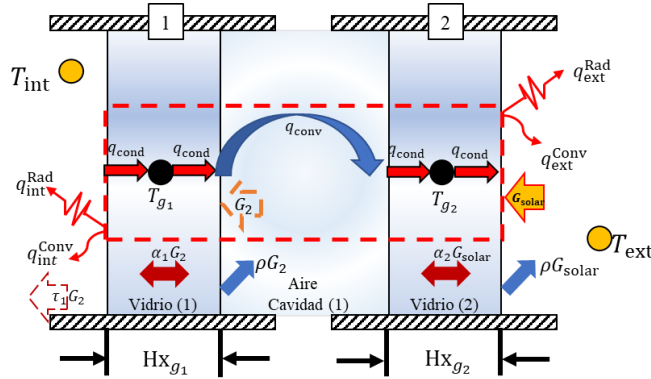


Figura 2.4. Configuración de vidrio doble.

$$q_{entra} - q_{sale} = q_{almacenado}$$

Análisis sobre el primer elemento (vidrio 1)

$$\left[ \alpha_{g_1}^* G_2 + \frac{T_{int} - T_{g_1}}{\frac{1}{h_{int}^{conv}} + h_{int}^{rad} + \frac{Hx_{g_1}}{2\lambda_{g_1}}} \right] - \left[ \frac{T_{g_1} - T_{g_2}}{\frac{Hx_{g_1}}{2\lambda_{g_1}} + \frac{1}{h_1^{conv}} + \frac{Hx_{g_2}}{2\lambda_{g_2}}} + q_{r_1} \right] = a_p^0 T_{g_1} - a_p^0 T_{g_1}^0$$

$$\left[ \alpha_{g_1}^* G_2 + \frac{T_{int} - T_{g_1}}{a_1} \right] - \left[ \frac{T_{g_1} - T_{g_2}}{a_2} + q_{r_1} \right] = a_p^0 T_{g_1} - a_p^0 T_{g_1}^0$$

$$\frac{T_{int} - T_{g_1}}{a_1} - \frac{T_{g_1} - T_{g_2}}{a_2} = a_p^0 T_{g_1} - a_p^0 T_{g_1}^0 - \alpha_{g_1}^* G_2 + q_{r_1}$$

$$a_2 T_{int} - a_2 T_{g_1} - a_1 T_{g_1} + a_1 T_{g_2} = a_1 a_2 (a_p^0 T_{g_1} - a_p^0 T_{g_1}^0 - \alpha_{g_1}^* G_2 + q_{r_1})$$

$$(a_1 + a_2 + a_1 a_2 a_p^0) T_{g_1} - a_1 T_{g_2} = a_2 T_{int} + a_1 a_2 (a_p^0 T_{g_1}^0 + \alpha_{g_1}^* G_2 - q_{r_1}) \tag{2.5}$$

Análisis sobre el segundo elemento (vidrio 2)

$$\left[ \alpha_{g_2}^* G + \frac{T_{g_1} - T_{g_2}}{\frac{Hx_{g_1}}{2\lambda_{g_1}} + \frac{1}{h_1^{conv}} + \frac{Hx_{g_2}}{2\lambda_{g_2}}} \right] - \left[ \frac{T_{g_2} - T_{ext}}{\frac{Hx_{g_2}}{2\lambda_{g_2}} + \frac{1}{h_{ext}^{conv}} + h_{ext}^{rad}} + q_{r_2} \right] = a_p^0 T_{g_2} - a_p^0 T_{g_2}^0$$

$$\begin{aligned} \left[ \alpha_{g_2}^* G + \frac{T_{g_1} - T_{g_2}}{b_1} \right] - \left[ \frac{T_{g_2} - T_{\text{ext}}}{b_2} + q_{r_2} \right] &= a_p^0 T_{g_2} - a_p^0 T_{g_2}^0 \\ \frac{T_{g_1} - T_{g_2}}{b_1} - \frac{T_{g_2} - T_{\text{ext}}}{b_2} &= a_p^0 T_{g_2} - a_p^0 T_{g_2}^0 - \alpha_{g_2}^* G + q_{r_2} \\ b_2 T_{g_1} - b_2 T_{g_2} - b_1 T_{g_2} + b_1 T_{\text{ext}} &= b_1 b_2 (a_p^0 T_{g_2} - a_p^0 T_{g_2}^0 - \alpha_{g_2}^* G + q_{r_2}) \\ -b_2 T_{g_1} + (b_1 + b_2 + b_1 b_2 a_p^0) T_{g_2} &= b_1 T_{\text{ext}} + b_1 b_2 (a_p^0 T_{g_2}^0 + \alpha_{g_2}^* G - q_{r_2}) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Como se aprecia en las ecuaciones (2.5) y (2.6), aparecen los términos  $q_{r_1}$  y  $q_{r_2}$  los cuales son resultado del flujo radiativo neto al considerar que existe intercambio radiativo superficial, además es importante mencionar que el valor de  $a_p^0$  no cambia debido a que se trata del mismo material. El sistema de ecuaciones algebraicas correspondientes se representa en forma matricial a través de la Ec. (2.7).

$$\begin{bmatrix} (a_1 + a_2 + a_1 a_2 a_p^0) & -a_1 \\ -b_2 & (b_1 + b_2 + b_1 b_2 a_p^0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{g_1} \\ T_{g_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 a_2 (a_p^0 T_{g_1}^0 + \alpha_1 G_2 - q_{r_1}) + a_2 T_{\text{int}} \\ b_1 b_2 (a_p^0 T_{g_2}^0 + \alpha_2 G - q_{r_2}) + b_1 T_{\text{ext}} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

### 2.2.3. Modelo matemático para una ventana de vidrio triple

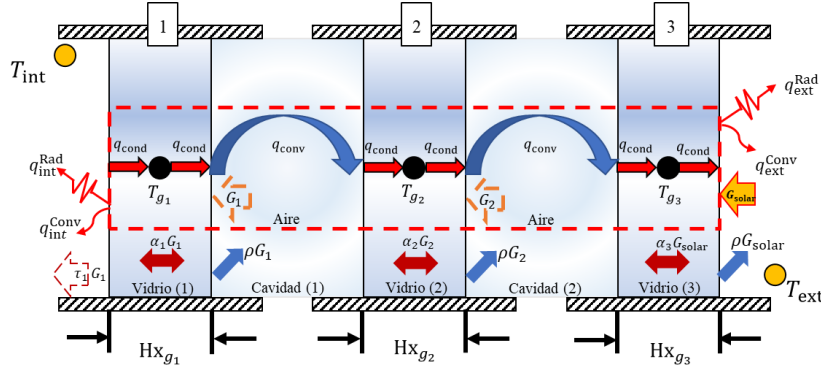


Figura 2.5. Configuración de vidrio triple.

$q_{\text{entra}} - q_{\text{sale}_1} = q_{\text{almacenado}}$

Análisis sobre el primer elemento (vidrio 1)

$$\begin{bmatrix} \alpha_{g_1}^* G_1 + \frac{T_{\text{int}} - T_{g_1}}{\frac{1}{h_{\text{int}}^{\text{conv}}} + \frac{1}{h_{\text{int}}^{\text{rad}}} + \frac{Hx_{g_1}}{2\lambda_{g_1}}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{T_{g_1} - T_{g_2}}{\frac{Hx_{g_1}}{2\lambda_{g_1}} + \frac{1}{h_1^{\text{conv}}} + \frac{Hx_{g_2}}{2\lambda_{g_2}}} + q_{r_1} \end{bmatrix} = a_p^0 T_{g_1} - a_p^0 T_{g_1}^0$$

$$\left[ \alpha_{g_1}^* G_1 + \frac{T_{\text{int}} - T_{g_1}}{a_1} \right] - \left[ \frac{T_{g_1} - T_{g_2}}{a_2} + q_{r_1} \right] = a_p^0 T_{g_1} - a_p^0 T_{g_1}^0$$

$$\begin{aligned} \frac{T_{\text{int}} - T_{g_1}}{a_1} - \frac{T_{g_1} - T_{g_2}}{a_2} &= a_p^0 T_{g_1} - a_p^0 T_{g_1}^0 - \alpha_{g_1}^* G_1 + q_{r_1} \\ a_2 T_{\text{int}} - a_2 T_{g_1} - a_1 T_{g_1} + a_1 T_{g_2} &= a_1 a_2 (a_p^0 T_{g_1} - a_p^0 T_{g_1}^0 - \alpha_{g_1}^* G_1 + q_{r_1}) \\ (a_1 + a_2 + a_1 a_2 a_p^0) T_{g_1} - a_1 T_{g_2} &= a_2 T_{\text{int}} + a_1 a_2 (a_p^0 T_{g_1}^0 + \alpha_{g_1}^* G_1 - q_{r_1}) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Análisis sobre el elemento (vidrio 2)

$$\begin{aligned} \left[ \alpha_{g_2}^* G_2 + \frac{T_{g_1} - T_{g_2}}{\frac{Hx_{g_1}}{2\lambda_{g_1}} + \frac{1}{h_1^{\text{conv}}} + \frac{Hx_{g_2}}{2\lambda_{g_2}}} \right] - \left[ \frac{T_{g_2} - T_{g_3}}{\frac{Hx_{g_2}}{2\lambda_{g_2}} + \frac{1}{h_2^{\text{conv}}} + \frac{Hx_{g_3}}{2\lambda_{g_3}}} + q_{r_{21}} + q_{r_{22}} \right] &= a_p^0 T_{g_2} - a_p^0 T_{g_2}^0 \\ \left[ \alpha_{g_2}^* G_2 + \frac{T_{g_1} - T_{g_2}}{b_1} \right] - \left[ \frac{T_{g_2} - T_{g_3}}{b_2} + q_{r_{21}} + q_{r_{22}} \right] &= a_p^0 T_{g_2} - a_p^0 T_{g_2}^0 \\ \frac{T_{g_1} - T_{g_2}}{b_1} - \frac{T_{g_2} - T_{g_3}}{b_2} &= a_p^0 T_{g_2} - a_p^0 T_{g_2}^0 - \alpha_{g_2}^* G_2 + q_{r_{21}} + q_{r_{22}} \\ b_2 T_{g_1} - b_2 T_{g_2} - b_1 T_{g_2} + b_1 T_{g_3} &= b_1 b_2 (a_p^0 T_{g_2} - a_p^0 T_{g_2}^0 - \alpha_{g_2}^* G_2 + q_{r_{21}} + q_{r_{22}}) \\ -b_2 T_{g_1} + (b_1 + b_2 + b_1 b_2 a_p^0) T_{g_2} - b_1 T_{g_3} &= b_1 b_2 (a_p^0 T_{g_2}^0 + \alpha_{g_2}^* G_2 - q_{r_{21}} - q_{r_{22}}) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Análisis sobre el elemento (vidrio 3)

$$\begin{aligned} \left[ \alpha_{g_3}^* G_3 + \frac{T_{g_2} - T_{g_3}}{\frac{Hx_{g_2}}{2\lambda_{g_2}} + \frac{1}{h_2^{\text{conv}}} + \frac{Hx_{g_3}}{2\lambda_{g_3}}} \right] - \left[ \frac{T_{g_3} - T_{\text{ext}}}{\frac{Hx_{g_3}}{2\lambda_{g_3}} + \frac{1}{h_{\text{ext}}^{\text{conv}}} + h_{\text{ext}}^{\text{rad}}} + q_{r_3} \right] &= a_p^0 T_{g_3} - a_p^0 T_{g_3}^0 \\ \left[ \alpha_{g_3}^* G_3 + \frac{T_{g_2} - T_{g_3}}{c_1} \right] - \left[ \frac{T_{g_3} - T_{\text{ext}}}{c_2} + q_{r_3} \right] &= a_p^0 T_{g_3} - a_p^0 T_{g_3}^0 \\ \frac{T_{g_2} - T_{g_3}}{c_1} - \frac{T_{g_3} - T_{\text{ext}}}{c_2} &= a_p^0 T_{g_3} - a_p^0 T_{g_3}^0 - \alpha_{g_3}^* G_3 + q_{r_3} \\ c_2 T_{g_2} - c_2 T_{g_3} - c_1 T_{g_3} + c_1 T_{\text{ext}} &= c_1 c_2 (a_p^0 T_{g_3} - a_p^0 T_{g_3}^0 - \alpha_{g_3}^* G_3 + q_{r_3}) \\ -c_2 T_{g_2} + (c_1 + c_2 + c_1 c_2 a_p^0) T_{g_3} &= c_1 T_{\text{ext}} + c_1 c_2 (a_p^0 T_{g_3}^0 + \alpha_{g_3}^* G_3 - q_{r_3}) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Se observa en la ecuación resultante para el vidrio 2 (Ec. 2.9), que se añaden dos flujos radiativos, los cuales son resultado del intercambio radiativo entre el vidrio 2 con el vidrio 1 y el vidrio 3, estos flujos se consideran en el análisis como flujos que salen del elemento de análisis (vidrio 2). El sistema de ecuaciones más complejo a resolver es el sistema de ecuaciones algebraicas encontrado para resolver la transferencia de calor conjugada en la ventana de vidrio triple, de forma resumida estas ecuaciones pueden representarse de forma matricial como se muestra en la Ec. (2.11).

$$\begin{bmatrix} (a_1 + a_2 + a_1 a_2 a_p^0) & -a_1 & 0 \\ -b_2 & (b_1 + b_2 + b_1 b_2 a_p^0) & -b_1 \\ 0 & -c_2 & (c_1 + c_2 + c_1 c_2 a_p^0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{g_1} \\ T_{g_2} \\ T_{g_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 a_2 (a_p^0 T_{g_1}^0 + \alpha_1 G_1 - q_{r_1}) + a_2 T_{\text{int}} \\ b_1 b_2 (a_p^0 T_{g_2}^0 + \alpha_2 G_2 - q_{r_{21}} - q_{r_{22}}) \\ c_1 c_2 (a_p^0 T_{g_3}^0 + \alpha_3 G_{\text{solar}} - q_{r_3}) + c_1 T_{\text{ext}} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Para resolver los sistemas de ecuaciones algebraicas obtenidos, se utilizó el método iterativo de Jacobi, la metodología de solución numérica implementada para resolver el problema principal de este trabajo de tesis, se presenta en el siguiente capítulo, así como también los problemas de verificación realizados para el desarrollo del código numérico implementado. Una de las tres partes principales que componen el código numérico, se basa en resolver el mecanismo de conducción de calor, sin embargo, para las configuraciones de vidrios múltiples, también es necesario resolver la convección que existe entre la superficie de los vidrios y el fluido encapsulado, además del intercambio radiativo superficial entre las paredes de la o las cavidades.

Se considera que existe un flujo de calor convectivo, para determinarlo es necesario conocer el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección. En la literatura existen una gran cantidad de correlaciones para determinar el coeficiente convectivo, bajo las características que se presentan en los modelos de ventanas planteados, los cuales son sistemas análogos a una cavidad calentada diferencialmente. Sin embargo, estas correlaciones se encuentran en función de parámetros adimensionales, espacialmente el número de Nusselt, que a su vez es determinado en función del número de Rayleigh, el cual para las correlaciones encontradas en la literatura es función del ancho de cavidad y no del largo de la misma. Esto se vuelve un inconveniente, debido a que el análisis se realizará en dos dimensiones, por lo cual la altura de las secciones será variable y por consiguiente la transferencia de calor no será la misma.

Al considerar esta problemática, fue necesario construir las correlaciones para calcular el coeficiente convectivo a través de determinar el número de Nusselt en función del número de Rayleigh, mismo que está en función del largo de la cavidad o de las secciones según sea el caso.

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

Para determinar las correlaciones para el cálculo del coeficiente convectivo, primero se determinó la relación de aspecto de la cavidad, con base en las dimensiones de las ventanas, después se utilizó el código numérico desarrollado en CENIDET por Xamán [35], que resuelve la transferencia de calor por convección natural en cavidades con diferentes razones de aspecto.

El código utilizado resuelve la transferencia de calor por convección natural en una cavidad calentada diferencialmente, cuyas dimensiones se determinan en función del número de Rayleigh. Como resultado el código proporciona el número de Nusselt promedio. El número de Nusselt fue tabulado junto con el número de Rayleigh, con el objetivo de graficar los resultados y obtener la función de ajuste correspondiente para flujo laminar.

$$Gr = \frac{g\beta(T_H - T_C)H^3}{\nu^2} \qquad Pr = \frac{C_p\mu}{\lambda} \qquad Ra = Pr \cdot Gr$$

Rayleigh (Ra)	Nusselt (Nu)
$Ra \leq 6.4 \times 10^7$	$Nu = 6.4411 \times 10^{-16} Ra^2 + 1.9150 \times 10^{-9} Ra + 40.00$
$6.4 \times 10^7 < Ra \leq 6.4 \times 10^{10}$	$Nu = 2.8765 \times 10^{-1} Ra^{2.6832 \times 10^{-1}}$
$6.4 \times 10^{10} < Ra \leq 6.4 \times 10^{12}$	$Nu = 8.9562 \times 10^{-2} Ra^{3.1468 \times 10^{-1}}$

(2.12)

Las funciones obtenidas se ingresan al código numérico, se calcula el número de Rayleigh, se identifica que correlación le corresponde y se obtiene el número de Nusselt, posteriormente, se despeja el coeficiente de transferencia de calor convectivo (Ec. 2.13).

$$h_{conv} = \frac{Nu \cdot \lambda}{L_c} \tag{2.13}$$

En la Ec. 2.13 están involucrados tres parámetros importantes, el número de Nusselt el cual se obtiene a partir de las correlaciones presentadas en la Ec. (2.12), la conductividad térmica del aire y la longitud característica, que, para este trabajo, se considera que la longitud característica es la altura de las secciones, la cual varía a lo largo del proceso a medida que se resuelve el balance de energía sección por sección. De esta forma, la transferencia de calor por convección, varía a medida que la altura lo hace.

Se han considerado los mecanismos de transferencia de calor por conducción y convección, los cuales están relacionados con la naturaleza de los medios que intervienen y con la presencia del movimiento de un fluido, entre otras cosas. En esta sección, se centrará la atención en el tercer mecanismo: la radiación, el cual es característicamente diferente a los otros dos. La radiación difiere con respecto a los otros dos mecanismos de transferencia de calor, en que no requiere la presencia de un medio material para llevarse a efecto.

### 2.4. Modelo matemático de intercambio radiativo superficial entre placas paralelas

Para modelar el intercambio radiativo superficial entre las paredes semitransparentes, se seleccionó el modelo matemático que involucra únicamente placas paralelas, ignorando las paredes alternas, con las cuales se forma una cavidad rectangular, aunque el modelo físico que se presentó en la sección 2.2 sea representado de esta forma. Esta consideración se hizo basado en la relación de aspecto que tienen las cavidades, y al mínimo efecto en la transferencia de calor en las ventanas debido a las aportaciones de las paredes horizontales (superior e inferior). Además de que, resolver el método de Radiosidad-Irradiación (RIM, por sus siglas en ingles) para las cuatro paredes traería consigo un costo computacional mayor, y los cambios que se obtendrían serían mínimos. Dicho esto, en la Figura 2.6 se observa el modelo físico correspondiente a dos placas paralelas en donde existe intercambio radiativo entre sus superficies.

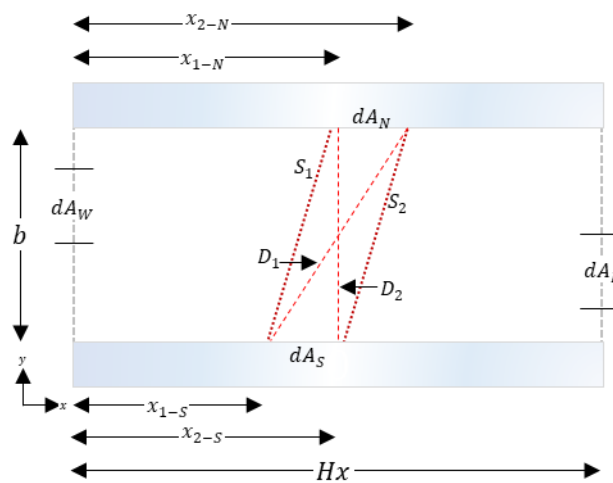


Figura 2.6. Intercambio radiativo superficial entre placas paralelas.

La transferencia de calor por radiación sobre una superficie, se define como la diferencia entre la radiación que sale de la pared (radiosidad) y la que llega a dicha pared (irradiancia). La energía radiativa neta equivale a la diferencia de la energía radiativa que emana de la superficie y la energía radiativa que incide sobre la misma:

$$q_{\text{rad}} = q_{\text{out}} - q_{\text{in}} \tag{2.14}$$

La radiosidad ( $q_{\text{out}}$ ), es la radiosidad y puede expresarse como la suma de una componente emisora  $q_{\text{emit}}$  y otra parte por la reflexión de la radiación incidente  $q_{\text{ref}}$ .

$$q_{\text{out}} = q_{\text{emit}} + (1 - \varepsilon) q_{\text{in}} \tag{2.15}$$

Mientras que la irradiación se determina mediante la suma de todas las contribuciones de las superficies involucradas en el intercambio radiativo.

$$q_{\text{in}} = \sum_{n=1}^N q_{\text{out}} F_{A_k \rightarrow A_i} \tag{2.16}$$

Donde  $F_{i \rightarrow j}$  es conocido como el factor de vista y representa la fracción de energía radiativa emitida por la superficie  $A_k$ , que alcanza a ser interceptada por la superficie  $A_k$ . El factor de vista hace de la irradiancia el elemento más complicado de determinar, ya que el factor de vista depende de la geometría de los elementos involucrados en el intercambio radiativo. El factor de vista de una superficie  $i$  hacia una superficie  $j$ , se denota por  $F_{i \rightarrow j}$  o sólo  $F_{ij}$  y se define como la fracción de la radiación que sale de la superficie  $i$  y choca directamente contra la superficie  $j$ .

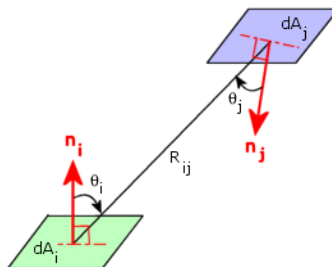


Figura 2.7. Factor de vista.

El cálculo de los factores de vista es sencillo en situaciones bidimensionales, por el método de cuerdas cruzadas. Este método considera que el intercambio radiativo se realiza entre dos superficies cuya longitud transversal es infinitamente larga. El método de cuerdas cruzadas

consiste en trazar líneas de referencia en los puntos del área que se desea conocer el factor de vista. Posteriormente, se deben calcular las distancias diagonales y laterales, para así determinar el factor de forma por la siguiente ecuación:

$$F_{i \rightarrow j} = \frac{\sum \text{Diagonales} - \sum \text{Lados}}{2 \cdot \text{Área de origen}}; \quad (2.17)$$

Por el método de cuerdas cruzadas se obtienen los valores correspondientes para la pared Sur-Norte y Oeste-Este, posteriormente aplicando el principio de reciprocidad se obtienen los factores de vista opuestos.

Factor de vista de Sur-Norte:

$$F_{dA_S \rightarrow dA_N} = \frac{(D_1 + D_2) - (S_1 + S_2)}{2 \cdot dA_S} \quad (2.18)$$

$$D_1 = \sqrt{(x_{1-S} - x_{2-N})^2 + b^2} \quad D_2 = \sqrt{(x_{2-S} - x_{1-N})^2 + b^2} \quad (2.19)$$

$$S_1 = \sqrt{(x_{1-S} - x_{1-N})^2 + b^2} \quad S_2 = \sqrt{(x_{2-S} - x_{2-N})^2 + b^2}$$

Factor de vista Norte-Sur (por reciprocidad):  $F_{dA_N \rightarrow dA_S} = \frac{dA_S}{dA_N} F_{dA_S \rightarrow dA_N}$  los factores de visión

$F_{i \rightarrow j}$  y  $F_{j \rightarrow i}$  no son iguales entre sí, a menos que las áreas de proporción de las dos superficies lo sean; es decir.  $F_{j \rightarrow i} = F_{i \rightarrow j}$  cuando  $A_i = A_j$ , a esta relación se le conoce como relación de reciprocidad o regla de reciprocidad, y permite determinar la contraparte de un factor de visión a partir del conocimiento del propio factor y de las áreas de las dos superficies.

Factor de vista Oeste-Este:

$$F_{dA_W \rightarrow dA_E} = \frac{(D_1 + D_2) - (S_1 + S_2)}{2 \cdot dA_W} \quad (2.18)$$

$$D_1 = \sqrt{(y_{1-W} - y_{2-E})^2 + Hx^2} \quad D_2 = \sqrt{(y_{2-W} - y_{1-E})^2 + Hx^2} \quad (2.19)$$



$$S_1 = \sqrt{(y_{1-W} - y_{1-E})^2 + Hx^2} \quad S_2 = \sqrt{(y_{2-W} - y_{2-E})^2 + Hx^2}$$

Factor de vista Oeste-Este (por reciprocidad):  $F_{dA_E \rightarrow dA_W} = \frac{dA_W}{dA_E} F_{dA_W \rightarrow dA_E}$

Siguiendo con el método RIM, por último, la energía emitida por una superficie se puede determinar a partir de la ley de Steffan-Boltzman:

$$q_{\text{emit}} = \varepsilon_k \sigma T_k^4 \quad (2.20)$$

Una vez que se han presentado los modelos físicos y los modelos matemáticos que describen los mecanismos de transferencia de calor presentes en el sistema, es necesario realizar una serie de ejercicios enfocados al aprendizaje y familiarización con el método de solución a utilizar para el resolver el problema que se aborda en este trabajo. En el siguiente capítulo se presentan los problemas de verificación realizados de forma gradual en cuanto a su nivel de complejidad, abordando poco a poco los mecanismos de transferencia de calor considerados en este trabajo, todo esto, mediante el método de balances de energía. Así mismo, en el siguiente capítulo se describen tres temas importantes, los cuales son necesarios para poder dar solución al problema de la transferencia de calor conjugada en ventanas de vidrios múltiples: los coeficientes de transferencia de calor por convección al interior de las cavidades que encapsulan el fluido entre los vidrios, las propiedades ópticas de los vidrios, y por último el estudio de independencia de malla temporal, para determinar el paso de tiempo indicado, en el cual los resultados no presentan cambios significativos debido al paso de tiempo utilizado para modelar el problema. Todo esto, se describe a continuación en el Capítulo 3 que corresponde a la metodología de solución y verificación del código numérico.

---

## **CAPÍTULO 3**

### **METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN Y VERIFICACIÓN DEL CÓDIGO NUMÉRICO**

La metodología de solución numérica está basada en dar solución a una serie de problemas cuyo nivel de complejidad es progresivo, con la finalidad de acoplar el aprendizaje obtenido de cada problema en uno solo, lo cual permita construir un código numérico que logre el objetivo del tema de tesis. Como primer paso en el seguimiento del método de solución a implementar, es necesario tener un primer acercamiento a este, esto es posible, si se abordan problemas cuyo nivel de complejidad no sea demandante y su función únicamente sea la familiarización con el método. Para el presente proyecto, se utilizó el método de balances de energía para resolver la transferencia de calor conjugada en ventanas de vidrios múltiples.

#### **3.1. Método de balances de energía**

Los balances de energía son aplicados con el objetivo de determinar la cantidad de energía que es intercambiada y acumulada en un sistema desde un punto de vista general, es decir, su propósito o principal ventaja es determinar los efectos globales en el sistema, sin prestar un interés especial al análisis detallado de los fenómenos involucrados. Cuando se resuelve el problema mediante un método más sencillo como lo es el método de balances de energía, esto involucra resultados menos detallados, pero brinda la oportunidad de realizar un estudio completo que preste atención a una mayor cantidad de parámetros para mejorar el desempeño térmico de las ventanas.

#### **3.2. Familiarización con el método de balances de energía y verificación del código numérico**

La metodología de solución implementada para el desarrollo del código numérico, se remonta a resolver problemas de conducción de calor en estado permanente para diferentes condiciones de frontera. Posteriormente, el grado de dificultad de estos problemas se elevó para resolver del mismo modo, problemas de conducción de calor, ahora considerando condiciones de frontera no lineales, esto para representar las pérdidas convectivas y radiativas que se incluyen en el modelo físico previsto, para las tres configuraciones de ventana (vidrio

simple, doble y triple). Al tener como objetivo de este proyecto realizar una evaluación térmica en estado transitorio, fue necesario resolver un problema de este tipo. Cabe señalar que todos los problemas de conducción de calor realizados, fueron verificados con la solución analítica correspondiente.

### 3.2.1. Problema de conducción de calor en estado permanente – diferentes

condiciones de frontera (lineales)

En la Figura 3.1 se muestra un sistema compuesto por cinco elementos, el cual está sometido en la frontera oeste a una condición de primera clase, mientras que en la frontera este se consideran los tres diferentes tipos de condiciones de frontera (primera, segunda y tercera clase). En el sistema se considera que únicamente existe transferencia de calor por conducción unidimensional, en estado permanente. Los resultados obtenidos utilizando la técnica de balances de energía fueron verificados con la solución analítica del problema.

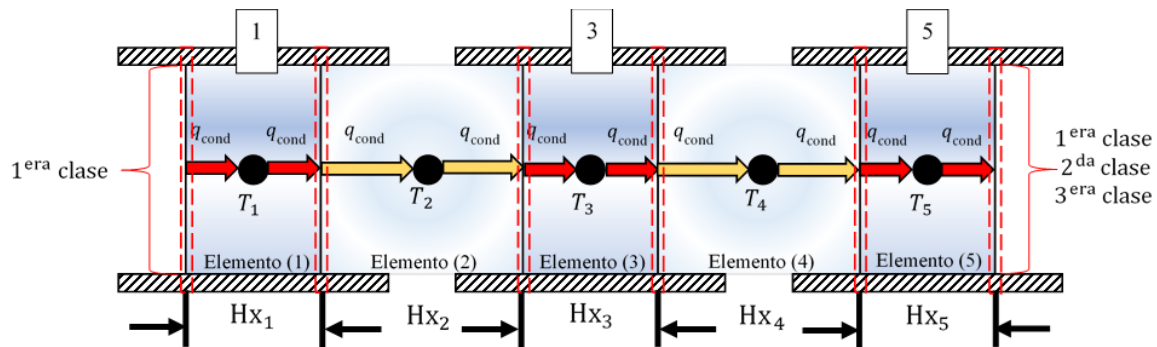


Figura 3.1. Modelo físico: sistema compuesto por cinco elementos (Balances de energía).

En la Figura 3.2 se muestra el modelo físico que representa el caso general, únicamente se fijan las condiciones de frontera que pueden ser de primera, segunda o tercera clase, el medio se plantea no-homogéneo. Primero, se resuelve la ecuación ordinaria de conducción de calor unidimensional, en estado permanente, este proceso matemático permite obtener la solución general para determinar el perfil de temperatura, sin embargo, para determinar la ecuación particular para cada elemento se introducen las condiciones de frontera correspondientes.

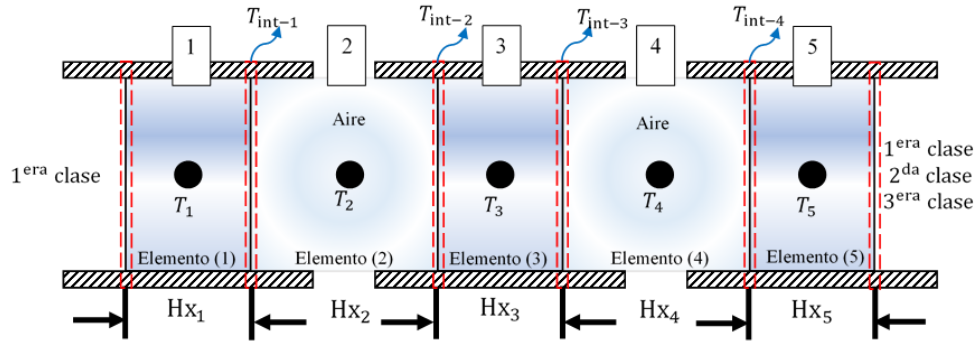


Figura 3.2. Modelo físico: caso general de un medio compuesto sometido a diferentes condiciones de frontera. Para verificar los resultados obtenidos mediante balances de energía, es necesario determinar la solución analítica del problema.

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dT}{dx} \right) = 0 \tag{3.1}$$

$$T(x) = C_1 x + C_2 \tag{3.2}$$

Los casos que se plantean para la verificación del ejercicio se muestran a continuación:

- Caso (1): Condiciones de frontera de primera clase
- Caso (2): Condición de frontera de primera y segunda clase
- Caso (3): Condición de frontera de primera y tercera clase

Una vez obtenida la expresión general para determinar el perfil de temperatura a lo largo del sistema (Ec. 3.2), se utilizan las condiciones de frontera para determinar la expresión particular para cada caso:

Frontera	Elemento (1)	Elemento (2)	Elemento (3)	Elemento (4)	Elemento (5)
Oeste	$T = T_A$	$T = T_{int-1}$	$T = T_{int-2}$	$T = T_{int-3}$	$T = T_{int-4}$
Este	$T = T_{int-1}$	$T = T_{int-2}$	$T = T_{int-3}$	$T = T_{int-4}$	...continua

$$(3.3)$$

Por otra parte, para el elemento cinco en donde la condición de frontera es variable, se hace un especial análisis en el elemento, debido a esto, en la Figura 3.3 se presentan gráficamente los balances de energía que se realizaron para determinar la solución del problema y de esta forma determinar el perfil de temperatura a lo largo del sistema.

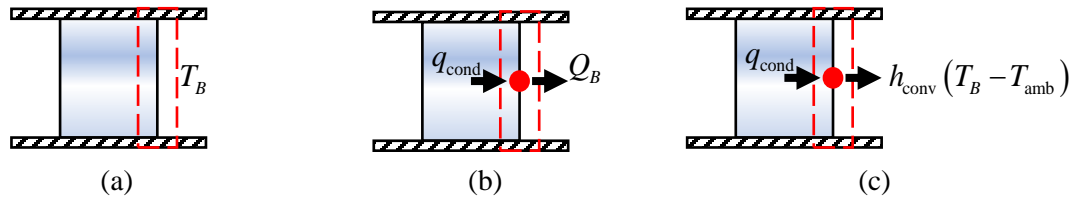


Figura 3.3. Frontera este: condiciones de frontera de a) primera, b) segunda y c) tercera clase.

Aplicando las condiciones de frontera correspondientes para los elementos 1-4, es posible obtener una expresión general para determinar el perfil de temperatura en un sistema compuesto por  $n$  elementos, a continuación, se presenta la expresión general para determinar la temperatura en el elemento (Ec. 3.1) y la temperatura en la interface de los elementos (Ec. 3.5).

$$T(x)_M = \left( \frac{T_{\text{int}-M} - T_{\text{int}-M_{n-1}}}{Hx_M + Hx_{M_{n-1}}} \right) (x - Hx_{M_{n-1}}) + T_{\text{int}-M_{n-1}} \tag{3.4}$$

$$T_{\text{int}} = \frac{\left( \frac{\lambda_{M_{n+1}} Hx_M - Hx_{M_{n-1}}}{\lambda_M Hx_{M_{n+1}} - Hx_M} \right) T_{\text{int}-M_{n+1}} + T_{\text{int}-M_{n-1}}}{1 + \left( \frac{\lambda_{M_{n+1}} Hx_M - Hx_{M_{n-1}}}{\lambda_M Hx_{M_{n+1}} - Hx_M} \right)} \tag{3.5}$$

Esta solución aplica para el quinto elemento siempre y cuando la condición de frontera situada en la frontera este sea de primera clase, de otro modo se debe realizar un balance de energía en la frontera correspondiente, como se muestra en la Figura 3.3.

Para determinar la temperatura en la interface de los elementos, se forma un sistema de ecuaciones algebraicas el cual se resuelve mediante un método de soluciones algebraicas iterativo, al obtener el valor de las temperaturas en las interfaces correspondientes es posible determinar la temperatura en cada uno de los elementos. La expresión para determinar la temperatura en el quinto elemento se obtiene al introducir la condición de frontera correspondiente a la frontera este, de modo que las expresiones correspondientes para cada condición de frontera de forma general se expresan de la siguiente manera:

$$T(x) = \left( \frac{T_B - T_{\text{int-4}}}{x_5 - x_4} \right) (x - x_4) + T_{\text{int-4}} \quad (3.6)$$

$$T(x) = \left( \frac{Q_B}{\lambda_5} \right) (x - x_4) + T_{\text{int-4}} \quad (3.7)$$

$$T(x) = \left[ \frac{h_{\text{conv}}}{\lambda_5} (T_B - T_{\text{amb}}) \right] (x - x_4) + T_{\text{int-4}} \quad (3.8)$$

Para resolver el problema de verificación planteado, se realizan balances de energía en cada uno de los elementos que componen el sistema (Figura 3.1), se obtiene la ecuación para cada uno de los elementos y se forma un sistema de ecuaciones algebraicas, el cual se resuelve mediante un método de solución de ecuaciones algebraicas iterativo.

$$q_{\text{entra}} = q_{\text{sale}} \quad (3.9)$$

Con ayuda de la Figura 3.1 se establece el valor de las resistencias térmicas totales para determinar las ecuaciones algebraicas correspondientes, debido a que únicamente se considera la transferencia de calor por conducción, el valor de las resistencias térmicas se obtiene al relacionar el espesor del elemento partido por la mitad (debido a que el punto nodal con el que se representa al elemento en el balance de energía se coloca a la mitad de su espesor), con su conductividad térmica. Si se parte haciendo una analogía con la teoría de circuitos eléctricos en serie, las resistencias térmicas se suman y se obtiene la resistencia térmica total que se incluye en el balance de energía del elemento de análisis.

$$R_{\text{cond}} = \frac{Hx}{2\lambda} \quad (3.10)$$

El arreglo para obtener la resistencia térmica total cuando hay más de dos resistencias en serie es:

$$R_{\text{total}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (3.11)$$

El sistema de ecuaciones algebraicas obtenido se presenta en la Ec. (3.12), la ecuación algebraica correspondiente al quinto elemento, se presenta en la Ec. (3.14) para las tres diferentes condiciones de frontera, en la representación matricial de la Ec. (3.12) se incluye

únicamente la ecuación algebraica obtenida, si se considera que la condición de frontera este es de primera clase.

Elemento (1)

$$\frac{T_A - T_1}{R_{\text{total-(1)}}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{total-(2)}}}$$

$$\frac{T_A - T_1}{a_1} = \frac{T_1 - T_2}{a_2}$$

$$(a_1 + a_2)T_1 - a_1T_2 = a_2T_A \quad (3.12a)$$

Elemento (2)

$$\frac{T_1 - T_2}{b_1} = \frac{T_2 - T_3}{b_2}$$

$$-b_2T_1 + (b_1 + b_2)T_2 - b_1T_3 = 0 \quad (3.12b)$$

Elemento (3)

$$\frac{T_2 - T_3}{c_1} = \frac{T_3 - T_4}{c_2}$$

$$-c_2T_2 + (c_1 + c_2)T_3 - c_1T_4 = 0 \quad (3.12c)$$

Elemento (4)

$$\frac{T_3 - T_2}{d_1} = \frac{T_2 - T_1}{d_2}$$

$$-d_2T_3 + (d_1 + d_2)T_2 - d_1T_1 = 0 \quad (3.12d)$$

Elemento (5)

$$\frac{T_4 - T_5}{R_{\text{total-(5)}}} = \frac{T_5 - T_B}{R_{\text{total-(6)}}$$

$$\frac{T_4 - T_5}{R_{\text{total-(5)}}} = Q_B$$

$$\frac{T_4 - T_5}{R_{\text{total-(5)}}} = h_{\text{conv}} (T_B - T_{\text{amb}})$$

$$\frac{T_4 - T_5}{e_1} = \frac{T_5 - T_B}{e_2}$$

$$\frac{T_4 - T_5}{e_1} = Q_B$$

$$\frac{T_4 - T_5}{e_1} = h_{\text{conv}} (T_B - T_{\text{amb}})$$

$$-e_2T_4 + (e_1 + e_2)T_5 = e_1T_B \quad (3.13a)$$

$$T_4 - T_5 = e_1Q_B \quad (3.13b)$$

$$T_4 - T_5 = e_1 [h_{\text{conv}} (T_B - T_{\text{amb}})] \quad (3.13c)$$

Una vez obtenido el sistema ecuaciones resultante, es necesario determinar la solución utilizando un método de soluciones de ecuaciones algebraicas, para obtener la solución de este problema y los presentados a continuación se utilizó el método de Jacobi.

$$\begin{bmatrix} (a_1 + a_2) & -a_1 & 0 & 0 & 0 \\ -b_2 & (b_1 + b_2) & -b_1 & 0 & 0 \\ 0 & -c_2 & (c_1 + c_2) & -c_1 & 0 \\ 0 & 0 & -d_2 & (d_1 + d_2) & -c_1 \\ 0 & 0 & 0 & -e_2 & (e_1 + e_2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 T_A \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ e_1 T_B \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

El método de Jacobi consiste en suponer una primera aproximación de la variable general “ $\phi$ ” para resolver el sistema planteado, después ésta se calcula por aproximaciones sucesivas, resolviendo el sistema con respecto a su diagonal (número de iteraciones). Se itera hasta que se satisface un criterio de convergencia. El criterio de convergencia establecido es la raíz media cuadrática, el diagrama de flujo general para obtener la solución se muestra en la Figura 3.4.

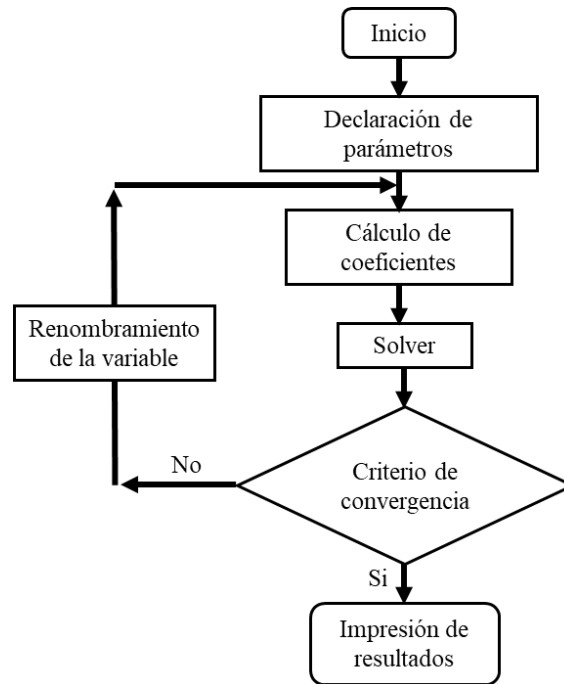


Figura 3.4. Diagrama de flujo general para obtener la solución.

Para obtener resultados es necesario ingresar algunos parámetros tales como las propiedades termofísicas y las dimensiones de cada elemento, el espesor total del sistema  $Hx = 1$  m, todos los elementos tienen la misma dimensión  $Hx_{\text{elemento}} = Hx/5$ , la conductividad térmica de los elementos 1, 3 y 5 es igual a 2 W/mK, mientras que la conductividad térmica de los elementos 2 y 4 es igual a 1 W/mK, los datos correspondientes a las condiciones de frontera se muestran a continuación:



Tabla 3.1. Parámetros utilizados para los tres casos de estudio.

Frontera	Caso (1)	Caso (2)	Caso (3)
Oeste	$T_A = 0^\circ C$	$T_A = 0^\circ C$	$T_A = 0^\circ C$
Este	$T_B = 100^\circ C$	$Q_B = 1000 \text{ W}$	$T_B = 100^\circ C$ , $h_{\text{conv}} = 6.8 \text{ W/m}^2\text{K}$

Los resultados obtenidos utilizando los datos descritos en el párrafo anterior se muestran en la Tabla 3.2, para la solución analítica y la solución obtenida por balances de energía (GEB, por sus siglas en ingles).

Tabla 3.2. Resultados obtenidos al resolver conducción de calor en un medio compuesto, sometido a diferentes condiciones de frontera.

Caso	Solución	Temperatura ( $^\circ C$ )				
		$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$
1	Analítica	7.14	28.57	50	71.43	92.85
	GEB	7.14	28.57	50	71.43	92.85
2	Analítica	2.86	8.57	14.29	20.00	25.71
	GEB	2.86	8.57	14.29	20.00	25.71
3	Analítica	1.46	4.37	7.29	10.20	13.11
	GEB	1.46	4.37	7.29	10.20	13.11

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 3.2 la diferencia porcentual es despreciable, por lo que se concluye que la implementación del código numérico que resuelve transferencia de calor por conducción en un medio compuesto es correcta. Una vez que se ha demostrado que los problemas de transferencia de calor por conducción, con diferentes condiciones de frontera (lineales) pueden ser resueltos, se prosiguió a aumentar el nivel de complejidad, en este caso resolviendo problemas de conducción de calor con condiciones de frontera no lineales.

### 3.2.2. Problema de conducción de calor unidimensional en estado permanente;

#### condición de frontera convectiva

Se presenta un medio sólido en donde se considera que existe transferencia de calor por conducción en estado permanente, el sistema está sometido a una condición de frontera de tercera y primera clase. El modelo físico se muestra en la Figura 3.5, se presenta una losa de

concreto ( $\lambda = 1.7 \text{ W/mK}$ ) de longitud  $Hx = 0.1 \text{ m}$ , en donde la frontera oeste está sometida a un flujo de calor impuesto ( $Q = 750 \text{ W}$ ), asimismo, en esta frontera se considera un pérdida convectiva  $q_{\text{int}}^{\text{conv}} = h_{\text{int}} (T_{\text{int}} - T_1)$ , donde el coeficiente convectivo se considera constante  $h_{\text{int}} = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$  y  $T_A = 303 \text{ K}$ . La frontera este del sistema está sometida a una temperatura constante  $T_B = 297 \text{ K}$ .

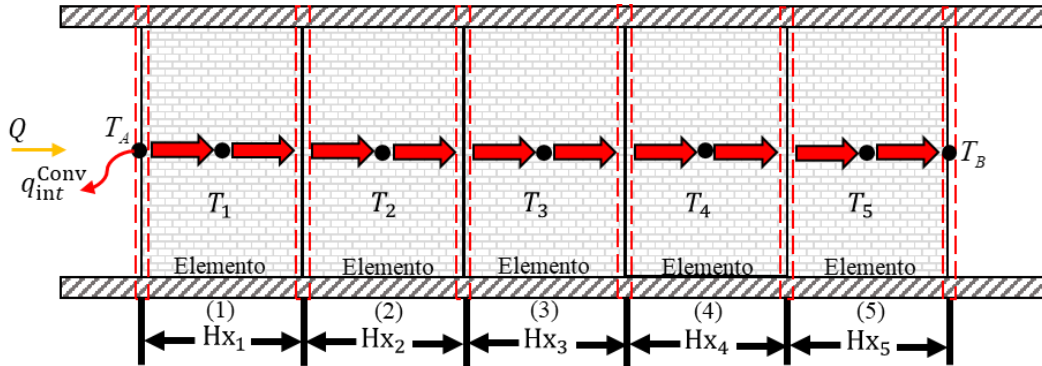


Figura 3.5. Modelo físico: flujo de calor impuesto, pérdidas convectivas en una losa de concreto.

Para resolver el problema de verificación planteado, se realizan balances de energía en cada uno de los elementos que componen el sistema (Figura 3.5), se obtiene la ecuación para cada uno de los elementos y se forma un sistema de ecuaciones algebraicas.

El procedimiento realizado para los nodos internos es el mismo que el descrito en el ejercicio presentado en la sección anterior, únicamente se realiza un procedimiento diferente en los nodos frontera. Es importante señalar que, en ejercicios anteriores, no se había considerado colocar un nodo en el punto frontera, debido a que las condiciones de frontera eran de primera clase, sin embargo, un caso distinto resulta cuando las condiciones de frontera cambian, ejemplo de ellos son los ejercicios que se presentaran en esta sección y la siguiente (sólo en casos de estado permanente).

$$Q + \frac{T_A - T_{\text{frontera}}}{\boxed{\frac{1}{h_{\text{conv}}}}} = \frac{T_{\text{frontera}} - T_1}{\boxed{\frac{Hx_1}{2\lambda}}}$$

$$Q + \frac{T_A - T_{\text{frontera}}}{\boxed{a_1}} = \frac{T_{\text{frontera}} - T_1}{\boxed{a_2}}$$

$$(a_1 + a_2)T_{\text{frontera}} - a_1T_1 = a_2T_A + a_1a_2Q \tag{3.15}$$

Para verificar la funcionalidad del código numérico, los resultados obtenidos fueron verificados con la solución analítica del problema correspondiente (Ec. 3.16).

$$-\frac{Q + h_{\text{int}}(T_{\text{int}} - T_B)}{\lambda + Hx \cdot h_{\text{int}}} x + T_B + \frac{Hx[Q + h_{\text{int}}(T_{\text{int}} - T_B)]}{\lambda + Hx \cdot h_{\text{int}}} \quad (3.16)$$

En la Tabla 3.3 se muestran los resultados obtenidos a partir del método de balances de energía, adicionalmente en la Figura 3.6 se puede observar el comportamiento de la distribución de temperatura.

Tabla 3.3. Comparación de la solución obtenida con balances de energía y la solución analítica: pérdida convectiva.

Punto nodal	Posición $x$ [m]	Balances de energía	Solución analítica
		$T$ [°C]	$T$ [°C]
$T_{\text{frontera}}$	0.00	58.17	58.17
$T_1$	0.01	54.76	54.76
$T_2$	0.03	47.92	47.92
$T_3$	0.05	41.09	41.09
$T_4$	0.07	34.25	34.25
$T_5$	0.09	27.42	27.42
$T_{\text{frontera}}$	0.10	24.00	24.00

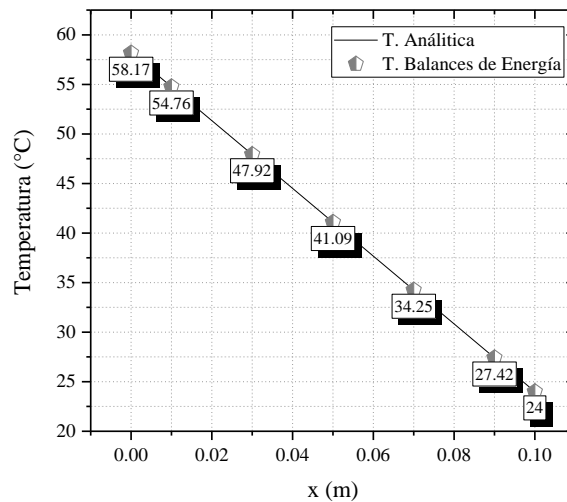


Figura 3.6. Comparación cualitativa del perfil obtenido mediante balances de energía y la solución analítica (pérdida convectiva).

De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla y la figura anterior, la diferencia porcentual obtenida es prácticamente despreciable, por lo cual es posible concluir que el procedimiento llevado a cabo y la construcción del código numérico son correctos.

3.2.3. Problema de conducción de calor unidimensional y en estado permanente;  
condición de frontera convectiva y radiativa

El modelo físico se muestra en la Figura 3.7, se presenta una losa de concreto ( $\lambda = 1.7 \text{ W/mK}$ ) de longitud  $Hx = 0.1 \text{ m}$ , en donde la frontera oeste está sometida a un flujo de calor impuesto ( $Q = 750 \text{ W}$ ), así mismo, en esta frontera se considera una pérdida convectiva  $q_{\text{int}}^{\text{conv}} = h_{\text{int}}(T_{\text{int}} - T_1)$  y una pérdida radiativa  $q_{\text{int}}^{\text{rad}} = \varepsilon\sigma(T_{\text{int}}^4 - T_1^4)$ , donde el coeficiente convectivo se considera constante  $h_{\text{int}} = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$  y  $\varepsilon = 0.90$ ,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$ . La frontera este del sistema está sometida a una temperatura constante  $T_B = 297 \text{ K}$ .

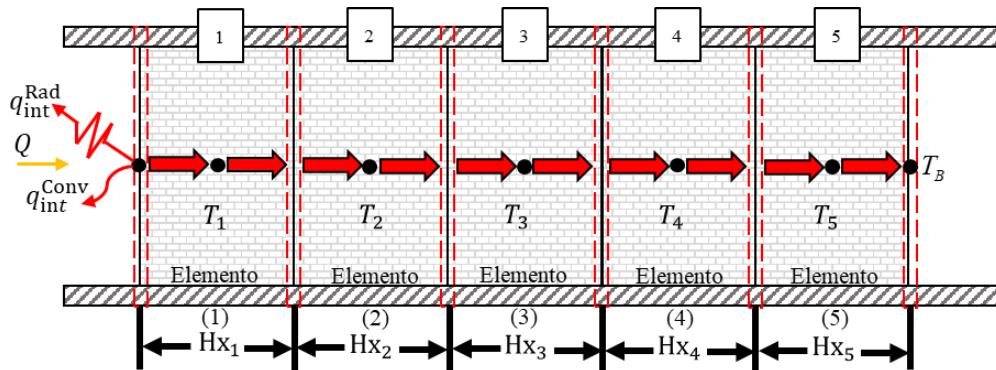


Figura 3.7. Modelo físico: flujo de calor impuesto, pérdidas convectiva y radiativa en una losa de concreto.

En este caso únicamente se realizan los balances de energía en los elementos frontera, un procedimiento similar al realizado en el ejercicio anterior.

$$Q + \frac{T_A - T_{\text{frontera}}}{\frac{1}{h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}}}} = \frac{T_{\text{frontera}} - T_1}{\frac{Hx_1}{2\lambda}}$$

$$Q + \frac{T_A - T_{\text{frontera}}}{a_1} = \frac{T_{\text{frontera}} - T_1}{a_2}$$

$$(a_1 + a_2)T_{F1} - a_1T_1 = a_2T_A + a_1a_2Q \tag{3.17}$$

Para este caso, el coeficiente radiativo se determina utilizando la Ec. (3.18):

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon\sigma(T_{F1}^2 + T_{\text{sky}}^2)(T_{F1} + T_{\text{sky}})(T_{F1} - T_{\text{sky}})$$

$$Q_{\text{rad}} = h_{\text{rad}}(T_{F1} - T_{\text{sky}}) \tag{3.18}$$

Partiendo de la solución analítica general para resolver problemas de transferencia de calor por conducción en una dimensión y en estado permanente, y aplicando las condiciones de frontera que se presentan en este ejemplo, se realizó un extenso proceso matemático para llegar a las ecuaciones 3.19 y 3.20, en donde se presentan las expresiones para determinar las constantes para resolver la Ec. 3.2.

$$C_1 = \frac{T_B - C_2}{Hx} \tag{3.19}$$

$$(\varepsilon\sigma Hx)C_2^4 + (\lambda + h_{\text{conv}} \cdot Hx)C_2 + \left[ -(\lambda T_B + Hx \cdot h_{\text{conv}} \cdot T_{\text{int}} + Hx \cdot \varepsilon \cdot T_{\text{int}}^4 + Hx \cdot Q) \right] = 0 \tag{3.20}$$

El valor de la constante  $C_2$  fue obtenido numéricamente mediante el método de Newton-Raphson, de tal modo que la expresión correspondiente para determinar el perfil de temperatura a lo largo del sistema es:

$$T(x) = -280.92x + 325.092 \text{ [K]} \tag{3.21}$$

Al resolver el sistema de ecuaciones algebraicas mediante un método de solución iterativo, se obtienen los resultados que se presentan en la Tabla 3.4, estos resultados son comparados con los resultados obtenidos a través de la solución numérica del problema.

Tabla 3.4. Comparación de la solución obtenida con balances de energía y la solución analítica: pérdidas convectiva y radiativa.

Punto nodal	Posición $x$ [m]	Balances de energía	Solución analítica
		$T$ [°C]	$T$ [°C]
$T_{\text{frontera}}$	0.00	52.09	52.09
$T_1$	0.01	49.28	49.28
$T_2$	0.03	43.67	43.67
$T_3$	0.05	38.05	38.05
$T_4$	0.07	32.43	32.43

$T_5$	0.09	26.81	26.81
$T_{frontera}$	0.10	24.00	24.00

Se obtuvieron diferencias porcentuales despreciables al comparar los resultados, por lo que es posible concluir que el procedimiento realizado y el código numérico implementado es el correcto.

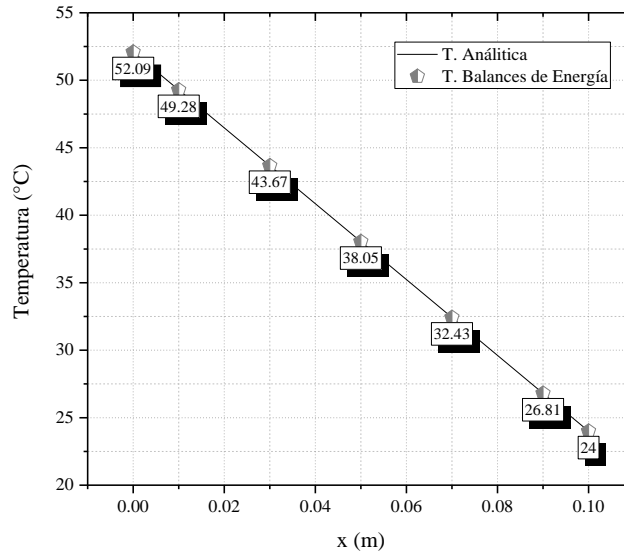


Figura 3.8. Comparación cualitativa del perfil obtenido mediante balances de energía y la solución analítica (pérdida convectiva y radiativa).

### 3.3. Problema de transferencia de calor por conducción en estado transitorio

En esta sección se presenta un ejercicio de transferencia de calor por conducción unidimensional en estado transitorio, al igual que para el ejercicio mostrado en las secciones anteriores, se presenta la solución analítica del problema con la finalidad de verificar los resultados obtenidos mediante el método de balances de energía.

La solución analítica de este problema la presenta Ozisik (1993) por medio de la Ec. (3.16):

$$T(x, t) = \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\alpha\beta_m^2} \frac{1}{N(\beta_m)} X(\beta_m, x) \int_0^{Hx} X(\beta_m, x') F(x') dx' \tag{3.16}$$

Donde el valor correspondiente al valor de  $\beta_m$ , la norma de la función  $N(\beta_m)$ , la función propia  $X(\beta_m, x)$  y la función  $F(x')$  se muestran a continuación:

$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$	$N(\beta_m) = \frac{2}{Hx}$	$X(\beta_m, x) = \sin(\beta_m x)$	$F(x') = T_0 - T_{\text{permanente}}$
-------------------------------------	-----------------------------	-----------------------------------	---------------------------------------

(3.17)

Los parámetros de estudio para obtener resultados de este problema, se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Parámetros para el problema.

<b>Condiciones de frontera y condición inicial</b>			$\lambda$ (W/mK)	$C_p$ (J/kgK)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
$T_A = 303K$	$T_B = 297K$	$T_0 = 313K$	1.7	880	2240

El proceso para obtener el sistema de ecuaciones resultante mediante balances de energía, involucra introducir el término transitorio en el balance de energía para cada elemento.

$$q_{\text{entra}} - q_{\text{sale}} = \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} A_{\text{sale}} Hx_{\text{elemento}} \tag{3.18}$$

El término transitorio debe ser discretizado a manera de que se pueda escribir mediante expresiones algebraicas.

$$\frac{\rho C_p Hx_{\text{elemento}}}{\Delta t} (T - T^0); \text{ donde } a_p^0 = \frac{\rho C_p Hx_{\text{elemento}}}{\Delta t} \tag{3.19}$$

De manera que la expresión discretizada para el término transitorio se escribe:

$$a_p^0 (T - T^0) \tag{3.20}$$

Al introducir este término las ecuaciones resultantes del balance de energía en los elementos cambian, reescribiendo las ecuaciones resultantes el sistema de ecuaciones queda de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} (a_1 + a_2 + a_1 a_2 a_p^0) & -a_1 & 0 & 0 & 0 \\ -b_2 & (b_1 + b_2 + b_1 b_2 a_p^0) & -b_1 & 0 & 0 \\ 0 & -c_2 & (c_1 + c_2 + c_1 c_2 a_p^0) & -c_1 & 0 \\ 0 & 0 & -d_2 & (d_1 + d_2 + d_1 d_2 a_p^0) & -c_1 \\ 0 & 0 & 0 & -e_2 & (e_1 + e_2 + e_1 e_2 a_p^0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 T_A + a_1 a_2 a_p^0 T_1^0 \\ b_1 b_2 a_p^0 T_2^0 \\ c_1 c_2 a_p^0 T_3^0 \\ d_1 d_2 a_p^0 T_4^0 \\ e_1 T_B + e_1 e_2 a_p^0 T_5^0 \end{bmatrix}$$

(3.21)

Añadiendo estos nuevos términos, al código numérico desarrollado para resolver problemas de conducción de calor, e incluyendo un ciclo en el tiempo, es posible obtener los resultados en estado transitorio. Para mostrar resultados se utilizó un paso de tiempo de un segundo ( $\Delta t = 1s$ ). En la Figura 3.9 se presentan los resultados obtenidos correspondientes al perfil de temperatura a lo largo de la loza de concreto, para diferentes instantes de tiempo hasta alcanzar el estado permanente.

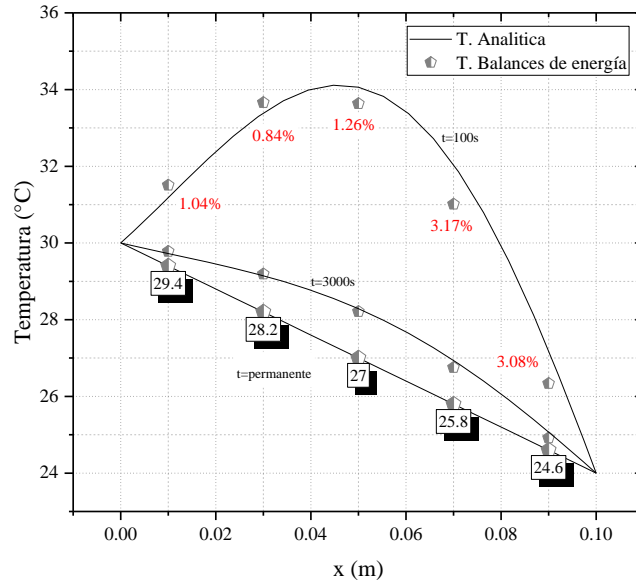


Figura 3.9. Perfil de temperatura a través de una loza de concreto en diferentes instantes de tiempo.

En la Figura 3.9 se observa que existe una desviación considerable entre los valores obtenidos mediante la solución de balances de energía, con respecto a la solución analítica, esto para el primer tiempo reportado. En este instante de tiempo se obtuvo una diferencia porcentual máxima de 3.17%, esto a medida que transcurrió el tiempo, se fue corrigiendo hasta llegar al estado permanente, donde los resultados presentan diferencias porcentuales nulas.

Hasta este punto, se han considerado los mecanismos de transferencia de calor por conducción y convección, los cuales están relacionados con la naturaleza de los medios que intervienen y con la presencia del movimiento de un fluido, entre otras cosas. En esta sección, se centrará la atención en el tercer mecanismo: la radiación, el cual es característicamente diferente a los otros dos. La radiación difiere con respecto a los otros dos mecanismos de transferencia de calor en que no requiere la presencia de un medio material para llevarse a efecto.



### 3.4. Intercambio radiativo superficial entre placas paralelas

Entre los métodos más destacados para describir el intercambio radiativo entre superficies, se encuentra el Método de Radiosidad-Irradiación (RIM, por sus siglas en inglés). Este método consiste en realizar un balance de energía, en cada una de las superficies involucradas en el intercambio radiativo, teniendo como restricciones, que las superficies deben ser isotérmicas y emisoras difusas.

Para hacer del método RIM un procedimiento más digerible, en la Figura 3.10 se presenta el diagrama de flujo general que se siguió para resolver el intercambio radiativo superficial, entre dos placas paralelas separadas por un espacio y de longitud finita, un caso análogo al que se presenta en este proyecto de tesis para las configuraciones de vidrios múltiples: vidrio doble y vidrio triple, en donde es necesario para completar el análisis de la transferencia de calor, considerar también el mecanismo de radiación superficial.

Después de la programación del código numérico siguiendo los pasos establecidos en el diagrama de flujo de la Figura 3.10, es necesario, introducir los parámetros correspondientes a las dimensiones, temperatura y emisividad de las placas, para ello en la Tabla 3.6 se establecen cuatro casos de estudio en donde para los casos 1 y 2 la temperatura y la emisividad de las placas son distintas y para el caso 3 donde la temperatura y la emisividad es la misma en ambas placas. En la Tabla 3.7 se presentan los casos de estudio que fueron evaluados, para llevar a cabo la verificación del código numérico desarrollado para resolver el intercambio radiativo entre placas paralelas.

Tabla 3.6. Parámetros de estudio para resolver el intercambio radiativo entre placas paralelas.

Caso (#)	Longitud de las placas (Hx-m)	Separación entre placas (b-m)	Placa 1		Placa 2	
			Temperatura $T_1$ (K)	Emisividad $\epsilon_1$	Temperatura $T_2$ (K)	Emisividad $\epsilon_2$
Caso (1)			1000	0.80	500	0.60
Caso (2)	1	1	500	0.60	1000	0.80
Caso (3)			1000	0.80	1000	0.80
*Caso (4)	0.80	0.02	298.00	0.85	313.00	0.85

Para los casos 1-3, la constante de Steffan-Boltzman se consideró igual a  $1.712 \times 10^{-9}$ ; mientras que para el caso 4\* esta constante se consideró igual a  $5.667 \times 10^{-8}$ .

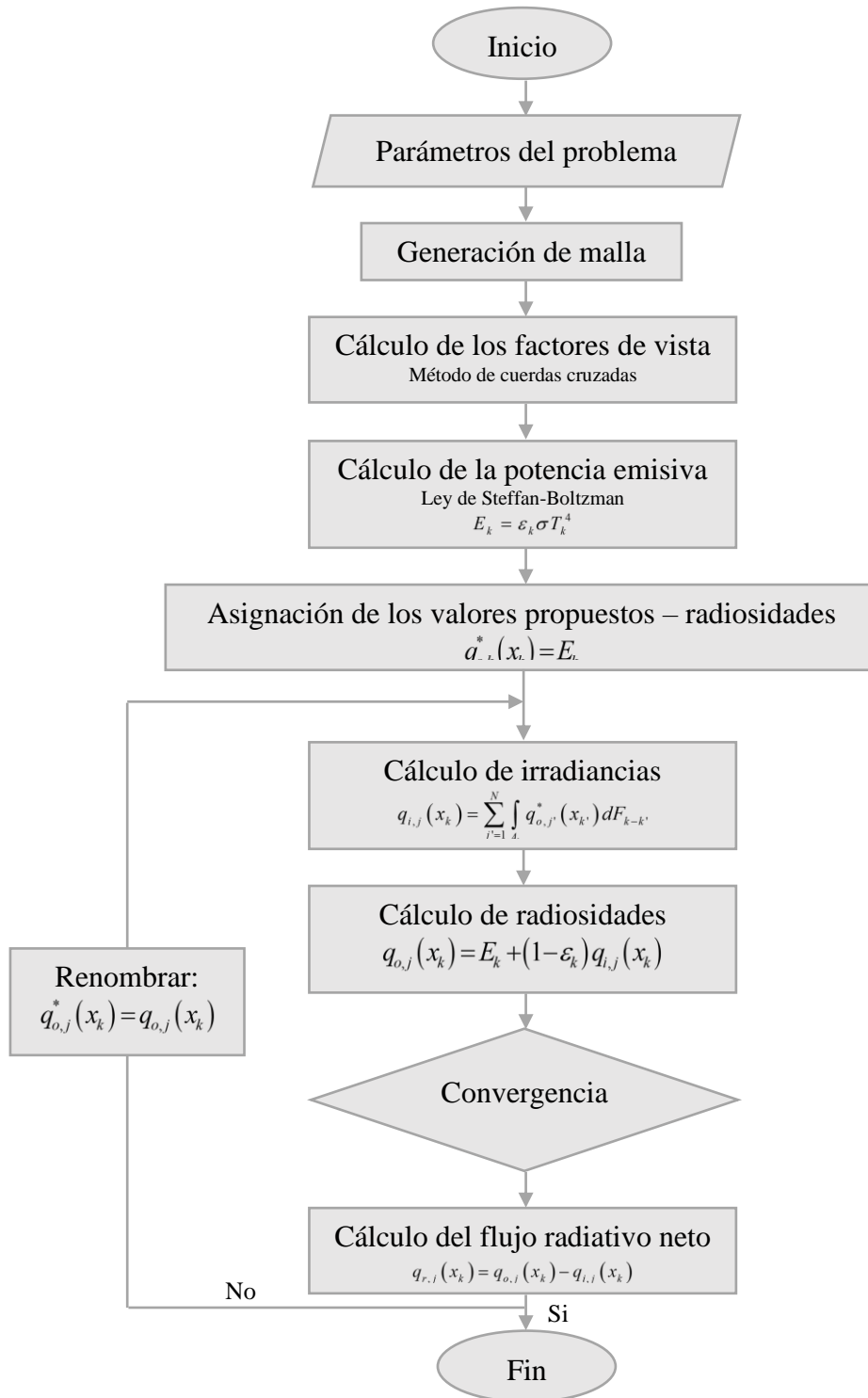


Figura 3.10. Diagrama de flujo general del proceso de solución.

Los resultados correspondientes a cada uno de los casos planteados se presentan a continuación en la Tabla 3.7, los resultados corresponden a una malla numérica de cinco

nodos, en donde se omiten los nodos frontera, debido a que, en las relaciones de malla establecida, los nodos frontera tienen un espesor nulo, debido a esto, los cálculos únicamente se realizan para los nodos internos. Los resultados corresponden a la radiosidad, irradiancia, flux local y flux total de ambas placas.

Tabla 3.7. Resultados obtenidos para los cuatro casos de estudio planteados.

Caso (#)	Radiosidad		Irradiancia		Flux local		Flux total	
	$(q_{o,1})$	$(q_{o,2})$	$(q_{i,1})$	$(q_{i,2})$	$(q_{r,1})$	$(q_{r,2})$	$(q_{T,1})$	$(q_{T,2})$
Caso (1)	1393.23	287.08	557.21	557.21	1275.07	-270.13	1271.59	-282.28
	1395.84	311.40	618.00	618.00	1264.63	-306.60		
	1393.23	287.08	557.22	557.22	1275.07	-270.12		
Caso (2)	287.08	1393.23	557.21	557.21	-270.13	1275.07	-282.28	1271.59
	311.40	1395.84	618.00	618.00	-306.60	1264.63		
	287.08	1393.23	557.22	557.22	-270.12	1275.07		
Caso (3)	1488.99	1488.99	596.96	596.96	892.03	892.03	874.65	874.65
	1502.02	1502.02	839.88	662.14	839.88	839.88		
	1488.99	1488.99	596.96	596.95	892.03	892.03		
Caso (4)	456.25	528.30	509.20	439.79	-52.95	88.51	-58.89	83.20
	459.40	531.10	530.16	458.53	-70.77	72.57		
	456.25	528.29	509.20	439.79	-52.95	88.51		

Una vez desarrollado el código numérico para resolver el problema que se presenta en la Figura 3.10, y anteriormente haber construido el código numérico para resolver conducción de calor en estado transitorio, y después de haber determinado las correlaciones para el coeficiente convectivo, cada una de estas partes se fusionan y dan paso al código numérico general para resolver la transferencia de calor conjugada en ventanas de vidrios múltiples.

### 3.5. Diagrama de flujo general

En esta sección se presenta el diagrama de flujo general para resolver la transferencia de calor conjugada (conducción, convección e intercambio radiativo superficial) a través de ventanas de vidrios múltiples, en estado transitorio. El diagrama de flujo inicia a partir de la declaración de parámetros, en donde se deben ingresar los datos correspondientes a las propiedades termofísicas del fluido encapsulado y los vidrios, además de las propiedades ópticas de estos, así como sus dimensiones, entre otras cosas. Además de las condiciones climáticas a partir de las cuales se realizará la evaluación térmica.

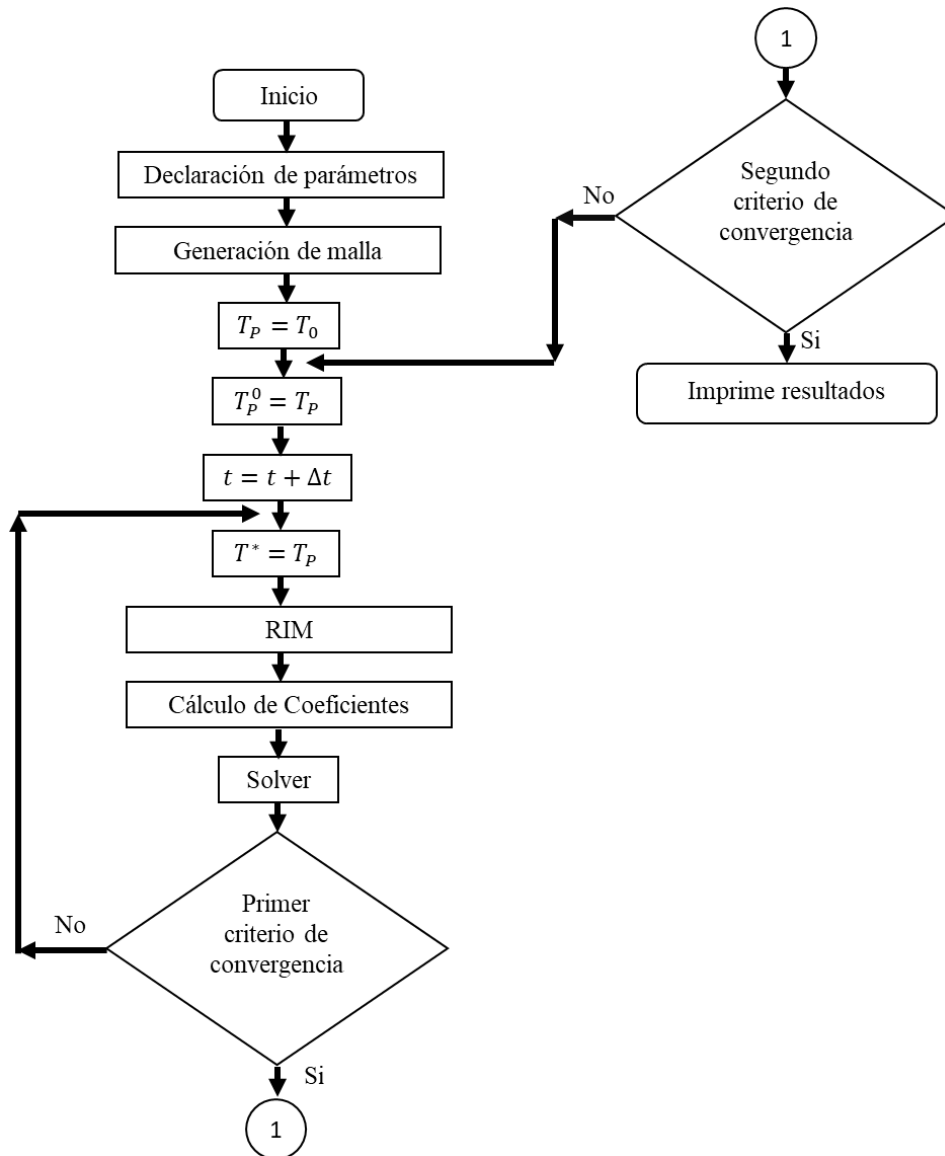


Figura 3.11. Diagrama de flujo general para modelar la transferencia de calor en ventanas de vidrios múltiples, en estado transitorio.

Una vez que los parámetros de estudio se ingresan al código numérico, los procesos matemáticos inician, primero generando el dominio computacional a partir del cual se resolverá el problema (generación de malla), esto es una parte sumamente importante, pues de este punto también parte el cálculo de los factores de vista que son utilizados en el método de intercambio radiativo superficial. Posteriormente, se establece el ciclo externo que corresponde a la parte temporal y el ciclo interno que corresponde al barrido en dirección vertical para resolver el problema de forma bidimensional, esto se logra al dividir el sistema en  $n$  secciones. Posterior a esto se realiza el proceso matemático para resolver el método de intercambio radiativo en la o las cavidades (según sea el caso), después se llega a los coeficientes que componen el sistema de ecuaciones algebraicas a resolver mediante un método iterativo. Para este trabajo de tesis se utilizó el método de Jacobi, para resolver los sistemas de ecuaciones algebraicas que resultaron después de establecer los modelos matemáticos mediante balances de energía. Se establecen los criterios de convergencia para el ciclo interno y externo y por último se tiene la impresión de resultados.

Cuando el código numérico finaliza, para obtener datos utilizando parámetros reales, es necesario disponer de ellos, estos parámetros son los representativos de cada configuración de ventana a estudiar, las dimensiones de los vidrios, el espesor de la capa de aire, las propiedades termofísicas de los vidrios y sus propiedades ópticas. Para el caso del vidrio simple, sus propiedades ópticas han sido medidas y reportadas en la literatura, a diferencia de las configuraciones de vidrio doble y triple, cuyas propiedades ópticas no han sido reportadas considerando el sistema en general.

### 3.6. Propiedades ópticas de los vidrios

En la literatura se han reportado trabajos en donde se estudian ventanas y las propiedades ópticas de los vidrios se obtienen a través de un software. Para este proyecto, las propiedades ópticas para las configuraciones de vidrios múltiples, se obtuvieron a través del software WINDOW [33].

Tabla 3.8. Propiedades ópticas de los vidrios.

Configuración	Propiedades ópticas del sistema (%)		Propiedades ópticas individuales (%)					
	$\tau^*$	$\rho^*$	$\alpha_1^*$	$\tau_1^*$	$\alpha_2^*$	$\tau_2^*$	$\alpha_3^*$	$\tau_3^*$
<b>Vidrio claro</b>	77.07	7.0	15.93					
<b>Vidrio doble claro</b>	60.69	11.37	11.27	88.73	16.67	83.33		
<b>Vidrio triple claro</b>	48.63	14.27	8.19	91.81	11.84	88.16	17.07	82.93

WINDOW permite al usuario crear su propia configuración de ventana y obtener las propiedades ópticas de los vidrios de acuerdo a sus características. Este software tiene pre cargada una extensa base de datos de configuraciones de ventana, tipo de vidrios y fluidos encapsulados, lo cual permite que el análisis sea rápido y sencillo. Las propiedades ópticas para las tres configuraciones de ventana considerando vidrios claros de 6mm se espesor y 0.8m de altura, separados por una capa de aire de 0.02m se presentan en la Tabla 3.8. Con respecto a las propiedades termofísicas del vidrio claro, se considera que la densidad, la conductividad térmica y el calor específico permanecen en un valor constante de 2500 kg/m<sup>3</sup>, 1.4 W/mK y 750 J/kgK, respectivamente. La emisividad de los vidrios se considera de 0.85.

Al abastecer el código numérico con las características de cada sistema, la variante dentro de los parámetros necesarios para la obtención de resultados serán las variables climatológicas que se ingresen al código numérico. Como en el título del proyecto se menciona, la evaluación térmica de las configuraciones de ventana, se harán bajo condiciones de clima cálido, con esto en mente, se seleccionó la ciudad de Mérida, Yucatán, la cual se considera dentro de la región cálida tropical de acuerdo a la clasificación climática mundial de Köppen.

### 3.7. Independencia de malla temporal

Como un último paso dentro de la metodología de solución numérica, es necesario en estudios transitorios determinar el paso de tiempo adecuado para modelar el sistema. Para el estudio de independencia de malla temporal, se fijó el número de secciones en dirección vertical, con la finalidad de descartar que los resultados obtenidos no serán influenciados más que por el paso de tiempo establecido. El número de secciones para las tres configuraciones se fijó en cuarenta y el paso de tiempo se varió de 1 a 15 segundos.

Con respecto a las condiciones climáticas se consideró lo siguiente: se obtuvo la temperatura máxima de los días más cálidos de los doce meses del año, de los resultados, se seleccionó el día del mes que presentó la máxima temperatura, para ese día la radiación solar se transformó de una superficie horizontal a una superficie vertical (90°) para cuatro orientaciones: sur, oeste, norte y este, de este proceso se evaluó la orientación que presentó el valor más alto de radiación solar, y se localizó el horario en donde esto ocurría. Entonces, para determinar el paso de tiempo, se modelo la hora en donde se tenía el valor más alto de radiación solar. Esto se puede entender mejor al observar la Figura 3.12.

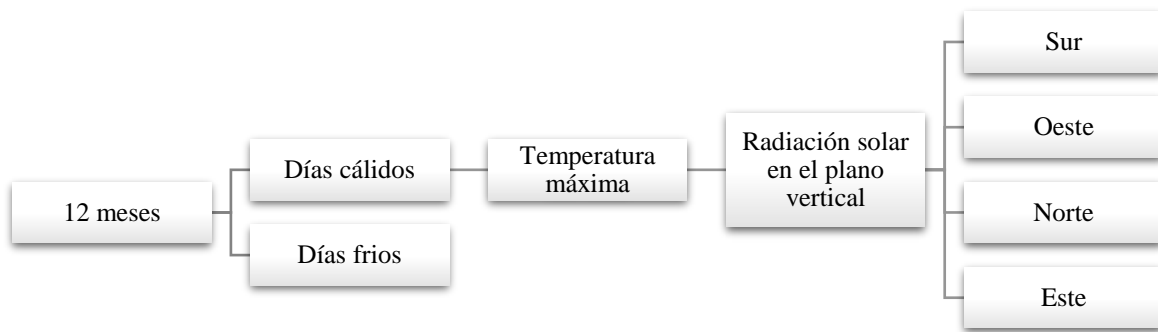


Figura 3.12. Selección del horario para determinar paso de tiempo.

En la Tabla 3.9 se presenta un resumen de los datos obtenidos, primero se realiza la evaluación de la temperatura para determinar el día más cálido de todo el año.

Tabla 3.9. Resumen de temperatura máxima por mes.

Mes	Fecha y hora/Temperatura máxima	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)
<b>Enero</b>	22/01/2018 02:00:00 p.m.	33.70	21.80
<b>Febrero</b>	26/02/2018 03:30:00 p.m.	37.40	21.80
<b>Marzo</b>	19/03/2018 03:00:00 p.m.	39.70	23.40
<b>Abril</b>	07/04/2018 03:20:00 p.m.	41.30	23.30
<b>Mayo</b>	30/05/2018 01:10:00 p.m.	40.20	25.30
<b>Junio</b>	04/06/2018 02:50:00 p.m.	40.80	24.30
<b>Julio</b>	25/07/2018 01:50:00 p.m.	41.30	26.20
<b>Agosto</b>	10/08/2018 03:00:00 p.m.	37.00	25.60
<b>Septiembre</b>	01/09/2018 02:30:00 p.m.	36.90	23.40

<b>Octubre</b>	10/10/2018 01:30:00 p.m.	36.60	22.60
<b>Noviembre</b>	12/11/2018 01:20:00 p.m.	35.60	22.50
<b>Diciembre</b>	02/12/2018 01:50:00 p.m.	36.20	21.70

De la Tabla 3.9 es posible observar que la temperatura máxima se registra en dos días del año, en diferentes meses, para sobrellevar esto, se determinó también la temperatura mínima de los días cálidos, de este modo se asegura que el día seleccionado será el más cálido de todo el año. Debido a que el mes de abril presenta una temperatura mínima inferior a la que se presenta en el mes de julio, abril se descartó y se seleccionó el día 25 de julio del 2018 (Figura 3.13). Para determinar la temperatura ambiente en función del tiempo (en segundos), se establecieron las ecuaciones 3.22 y 3.23, de las cuales se obtiene la temperatura exterior en °C en cualquier instante de tiempo durante el día.

$$\begin{aligned}
 &0 \leq t \leq 49800 \\
 T_{\text{ext}}(t) = &-2.0737 \times 10^{-30} t^7 + 4.3585 \times 10^{-25} t^6 - 3.491230 \times 10^{-20} t^5 + \\
 &1.32815 \times 10^{-15} t^4 - 2.42945 \times 10^{-11} t^3 + 2.02454 \times 10^{-7} t^2 - \\
 &7.57995 \times 10^{-4} t + 2.884351 \times 10^1
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

$$\begin{aligned}
 &49800 < t \leq 86400 \\
 T_{\text{ext}}(t) = &-1.88736 \times 10^{-17} t^4 + 5.13449 \times 10^{-12} t^3 - 5.08173 \times 10^{-7} t^2 + \\
 &2.127 \times 10^{-2} t - 2.7596839 \times 10^2
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

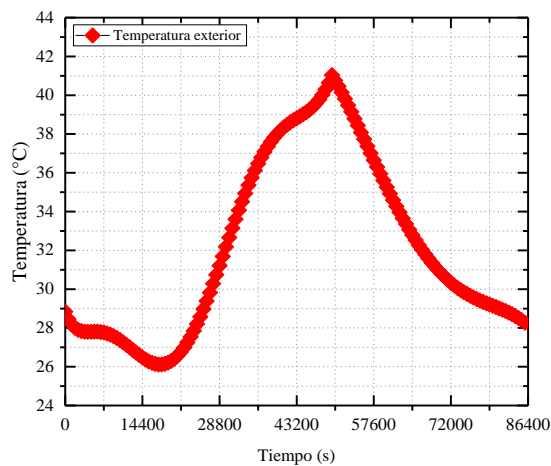


Figura 3.13. Comportamiento de la temperatura exterior durante el día más cálido del año; 25 de julio de 2018.



El siguiente proceso, fue obtener la radiación solar de este día, para posteriormente descomponerla para una superficie vertical en las cuatro orientaciones. Debido a que los datos son cada diez minutos e incluirlos todos haría de esta sección algo muy extenso, únicamente se presentan los datos de forma visual, por medio de la Figura 3.14 donde se graficó la radiación solar en función del tiempo para las cuatro orientaciones.

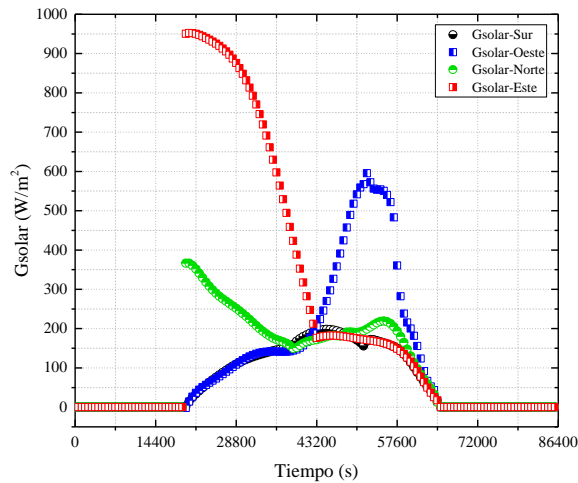


Figura 3.14. Radiación solar en función del tiempo, para el día más cálido del año, para diferentes orientaciones; 25 de julio 2018.

La transformación de la radiación solar de una superficie horizontal a vertical para las cuatro orientaciones, se realizó con ayuda del software TRNSYS. Para conocer cuál es la orientación que presenta el valor de radiación solar más alto, es necesario obtener el valor máximo para las cuatro orientaciones y posteriormente compararlos.

Tabla 3.10. Valores de radiación solar máximos en diferentes orientaciones.

<b>Radiación solar</b>	<b>Sur</b>	<b>Oeste</b>	<b>Norte</b>	<b>Este</b>
Máxima	198.91	591.64	364.79	952.23

Con ayuda de la Tabla 3.10 se observa que el valor de radiación solar más alto se obtuvo para la orientación este, en un horario de 06:00-07:00 a.m. Entonces, para el análisis de independencia de malla temporal se obtienen los datos correspondientes a temperatura (ecuaciones 3.22 y 3.23) y radiación solar (ecuaciones 3.24 y 3.25). Los intervalos de radiación solar están en función de las horas en las cuales existe presencia de radiación solar, para este día, el sol salió a las 05:00 horas con 40 minutos (20400) y se ocultó a las 18:00 horas con 10 minutos (65400), teniendo aproximadamente 13 horas de radiación solar.

$$20400 \leq t \leq 43800$$

$$G_{\text{solar}}(t) = -3.7765664294 \times 10^{-23} t^6 + 7.3602146702 \times 10^{-18} t^5 - 5.8471639863 \times 10^{-13} t^4 + 2.4216382548 \times 10^{-08} t^3 - 5.5284460069 \times 10^{-04} t^2 + 6.6120728254 \times 10^{00} t - 3.1456131123 \times 10^{04} \tag{3.24}$$

$$43800 \leq t \leq 65400$$

$$G_{\text{solar}}(t) = 4.2841729296 \times 10^{-23} t^6 - 1.3529667505 \times 10^{-17} t^5 + 1.7704229067 \times 10^{-12} t^4 - 1.2288920869 \times 10^{-07} t^3 + 4.7726518121 \times 10^{-03} t^2 - 9.8336133532 \times 10^{01} t + 8.3998152875 \times 10^{05} \tag{3.25}$$

Para el caso de la velocidad del viento, se consideró que el valor de esta no cambia en un intervalo de diez minutos, debido a que, obtener una función que represente su comportamiento a lo largo del día es prácticamente imposible, debido al comportamiento variable que tiene de un tiempo a otro.

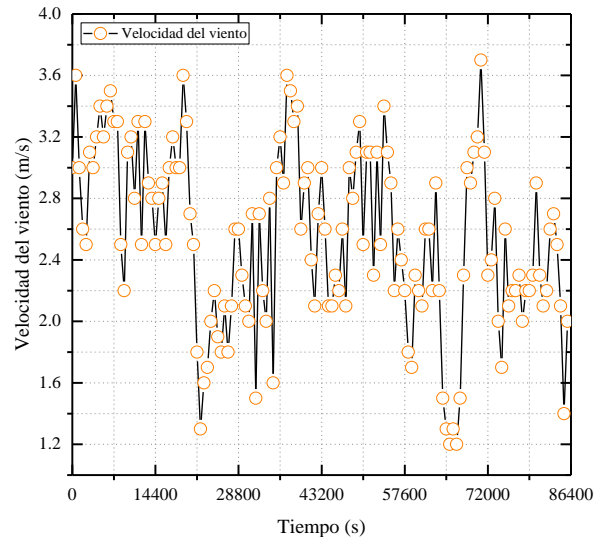


Figura 3.15. Velocidad del viento durante el día cálido del año; 25 de julio 2018.

Para dar paso a las modelaciones además de las condiciones climáticas y otros parámetros que ya han sido descritos, también es necesario establecer los parámetros relevantes para el cálculo de resultados, que para este caso son el flujo de calor resultante por convección y radiación, hacia el interior y hacia el exterior. Para el caso de vidrio simple, el coeficiente convectivo interior y exterior permanece constante, mientras que para las configuraciones de vidrio doble y triple el coeficiente convectivo exterior se determina en función de la

velocidad del viento y el coeficiente convectivo interior permanece constante. La correlación para determinar el coeficiente convectivo al exterior fue la que presenta Zang et al. [42] y del mismo trabajo se utilizó el valor constante para el coeficiente convectivo interior.

Coefficientes de transferencia de calor por convección al interior y el exterior; vidrio simple:

$$\begin{aligned} h_{\text{int}} &= 6.8 \text{ W/m}^2\text{K} \\ h_{\text{ext}} &= 6.2 \text{ W/m}^2\text{K} \end{aligned} \tag{3.26}$$

Coefficientes de transferencia de calor por convección al interior y el exterior; vidrio doble y vidrio triple:

$$\begin{aligned} h_{\text{int}} &= 8.3 \text{ W/m}^2\text{K} \\ h_{\text{ext}} &= 2.8 + 3V_{\text{wind}} \text{ W/m}^2\text{K} \end{aligned} \tag{3.27}$$

Los valores del coeficiente convectivo interior y exterior para la configuración de vidrio simple y vidrios múltiples son distintos, debido a que, para las configuraciones de vidrios múltiples el valor constante del coeficiente convectivo interior fue establecido en función de una temperatura de confort de 24-25°C, en el libro de Fundamentos de la ASHRAE en 2009. Por otra parte, la correlación para determinar el coeficiente convectivo exterior, surge a partir de la evaluación realizada para incluir el efecto de la velocidad del viento sobre la capa de vidrio en los colectores solares y los sistemas que utilizan cubiertas de vidrio, como son las configuraciones de vidrios múltiples.

Una vez establecidas las funciones para el día más cálido del año (25 de julio), posteriormente, se procede al estudio de paso de tiempo, los resultados para la comparación son: temperatura promedio en cada uno de los vidrios y los flujos de calor al interior y al exterior debido a la aportación por convección y radiación, esto se realiza para las tres configuraciones establecidas, para cinco diferentes pasos de tiempo y la impresión de resultados en los minutos 30 y 50 de la hora de modelación establecida. La diferencia porcentual se obtiene al comparar los resultados de paso de tiempo de menor a mayor.

Tabla 3.11. Análisis de independencia de malla temporal para la configuración de vidrio simple.

$\Delta t$	Instante de tiempo (min)	$T_{g_1}$ (°C)	dif%	$q_{\text{int}}$	dif%	$q_{\text{ext}}$	dif%
1	30	31.73	-	77.21	-	50.96	-
	50	32.14	-	81.99	-	48.00	-

3	30	31.73	0.00	77.20	0.01	50.95	0.02
	50	32.14	0.00	81.99	0.00	48.00	0.00
5	30	31.73	0.00	77.19	0.01	50.94	0.02
	50	32.14	0.00	81.99	0.00	47.99	0.00
10	30	31.72	0.01	77.16	0.04	50.91	0.06
	50	32.14	0.00	81.99	0.00	47.99	0.01
15	10	31.72	0.01	77.13	0.04	50.88	0.06
	50	32.14	0.00	81.98	0.00	47.99	0.01

De acuerdo a la Tabla 3.11 al variar el paso de tiempo iniciando en un segundo, para tres y cinco segundos, las diferenciales porcentuales se mantienen para la mayoría de los resultados (excepto el flujo de calor hacia el exterior) por debajo del 0.1%, al aumentar el paso de tiempo por encima de cinco segundos, las diferencias porcentuales se elevan a aproximadamente 0.3%, considerando esto, el paso de tiempo con el que se modelara la configuración de vidrio simple será de cinco segundos. Un procedimiento análogo se realiza para las configuraciones de vidrio doble y vidrio triple.

Tabla 3.12. Análisis de independencia de malla temporal para la configuración de vidrio doble.

$\Delta t$	Instante de tiempo (min)	$T_{g_1}$ (°C)	dif%	$T_{g_2}$ (°C)	dif%	$q_{int}$	dif%	$q_{ext}$	dif%
1	30	31.65		32.29		90.31		90.15	
	50	32.52		33.34		102.30		82.41	
3	30	31.65	0.01	32.28	0.00	90.28	0.03	90.12	0.03
	50	32.52	0.00	33.34	0.00	102.29	0.01	82.40	0.01
5	30	31.65	0.01	32.28	0.00	90.26	0.03	90.09	0.03
	50	32.52	0.00	33.34	0.00	102.28	0.01	82.39	0.01
10	30	31.64	0.01	32.28	0.01	90.20	0.07	90.01	0.09
	50	32.52	0.01	33.34	0.01	102.26	0.02	82.36	0.03
15	10	31.64	0.01	32.27	0.01	90.14	0.07	89.93	0.09
	50	32.52	0.01	33.34	0.01	102.23	0.02	82.33	0.03

De esta comparación cuantitativa se obtienen resultados similares al vidrio simple, en cuestión a las diferencias porcentuales obtenidas al aumentar el paso de tiempo, debido a esto y para esta configuración nuevamente se establece que el paso de tiempo idóneo es de cinco segundos. Resultados similares se presentan también para la configuración de vidrio triple

por ello, se estableció también el mismo paso de tiempo (cinco segundos). Lo descrito anteriormente se escribe con base a los resultados mostrados en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13. Análisis de independencia de malla temporal para la configuración de vidrio triple.

$\Delta t$	Instante de tiempo (min)	$T_{g_1}$ (°C)	dif%	$T_{g_3}$ (°C)	dif%	$q_{int}$	dif%	$q_{ext}$	dif%
1	30	31.07		32.28		82.37		96.88	
	50	32.31		33.73		99.41		95.99	
3	30	31.07	0.01	32.28	0.01	82.35	0.03	96.84	0.03
	50	32.31	0.00	33.73	0.00	99.40	0.02	95.97	0.02
5	30	31.07	0.01	32.28	0.01	82.32	0.03	96.81	0.03
	50	32.31	0.00	33.73	0.00	99.38	0.02	95.95	0.02
10	30	31.07	0.02	32.27	0.02	82.25	0.08	96.72	0.09
	50	32.31	0.01	33.72	0.01	99.34	0.04	95.90	0.05
15	10	31.06	0.02	32.26	0.02	82.18	0.08	96.64	0.09
	50	32.31	0.01	33.72	0.01	99.30	0.04	95.85	0.05

Hasta este punto la metodología de solución numérica ha sido completada, ya que se ha culminado el desarrollo del código numérico y se ha establecido el paso de tiempo adecuado para modelar la transferencia de calor conjugada, a través de ventanas de vidrios múltiples, en estado transitorio, mediante balances de energía.

Posteriormente, en el capítulo a continuación se presentan los parámetros de estudio y los resultados obtenidos para llevar a cabo la evaluación térmica de ventanas de vidrios múltiples, bajo las condiciones climáticas de una ciudad con clima cálido de México.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del código numérico desarrollado para este trabajo de tesis, en donde se lleva a cabo la evaluación térmica de ventanas de vidrios múltiples. Los resultados se presentan de manera gráfica y tabular. El capítulo se compone de cuatro secciones, en la primera sección se presentan los parámetros de estudio que fueron seleccionados para llevar a cabo la evaluación térmica. En la segunda sección se presenta el comportamiento térmico de todas las configuraciones a lo largo del día, posteriormente, en la tercera sección se presenta de forma cuantitativa la evaluación térmica de las diferentes configuraciones de ventana, y, por último, en la cuarta sección se presenta un análisis de costos para las configuraciones de ventana analizadas, con la finalidad de sentar las bases para realizar una recomendación adecuada, para la elección del tipo de ventana para las condiciones de clima cálido de México.

#### 4.1. Parámetros de estudio

Para el presente trabajo, se considera la transferencia de calor conjugada a través de ventanas de vidrios múltiples, los mecanismos de transferencia de calor considerados son: conducción, convección natural e intercambio radiativo superficial. La evaluación térmica de ventanas se considera bajo las condiciones de clima cálido de la República Mexicana, considerando el vidrioado disponible en el mercado mexicano.

Las configuraciones que se analizarán serán las siguientes con su respectiva nomenclatura:

- C1: vidrio claro simple
- C2: vidrio claro + aire + vidrio claro
- C3: vidrio claro + aire + vidrio claro + aire + vidrio claro

Las ventanas están compuestas por una o más hojas de vidrio claro de 0.006m de espesor y 0.80m de altura, separados por un espacio de aire de 0.02m (vidrios múltiples). Se consideró que al interior de la ventana hay una temperatura de confort de 25°C. Por otra parte, las

variables climatológicas exteriores (radiación solar, temperatura y velocidad del viento) se consideraron en función del tiempo.

Para la selección de los datos climatológicos se consideró una ciudad, durante todo un año, para los doce meses, se seleccionó el día con mayor y menor temperatura, para tres configuraciones de ventana: vidrio simple, doble y triple, orientadas hacia el sur, oeste, norte y este. En la Figura 4.1 se presenta el esquema de modelaciones realizadas para el presente proyecto de tesis.

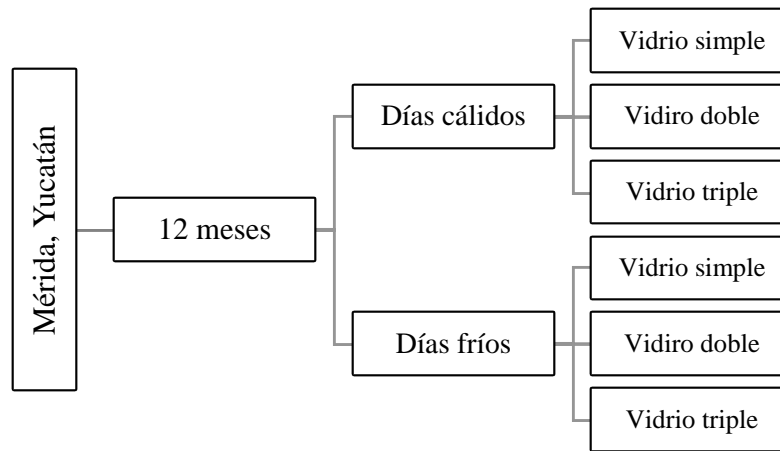


Figura 4.1. Esquema representativo de las modelaciones realizadas.

A manera de resumen se modeló lo siguiente: (1 ciudad) x (12 meses) x (2 días) x (24 horas) x (3 configuraciones) x (4 orientaciones) dando como resultado un total de 6,912 modelaciones. El tiempo de cómputo se muestra en la Tabla 4.1, se utilizó una computadora portátil AMD A8 a 2.20 Hz, 8 Gb de memoria RAM, 1 TB de disco duro y sistema operativo Windows 10. Al realizar el estudio de independencia de malla temporal y teniendo como resultado un paso de tiempo de cinco segundos, el tiempo de cómputo considerando únicamente una hora de modelación se reporta en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Tiempo de cómputo para una hora de modelación, por configuración.

<b>Tiempo de CPU (s)</b>	<b>Vidrio simple</b>	<b>Vidrio doble</b>	<b>Vidrio triple</b>
	210	364	495

Con estos datos, fue posible aproximar el tiempo de cómputo que tomó llevar a cabo las evaluaciones que se establecieron en la Figura 4.1. Con respecto al tiempo de cómputo de la configuración C1: (1 ciudad) x (24 días) x (24 horas) x (4 orientaciones) x (210 s), lo que

resulta en aproximadamente 135 horas de cómputo. Tiempo de CPU-C2: (1 ciudad) x (24 días) x (24 horas) x (4 orientaciones) x (364 s), aproximadamente 233 horas de cómputo. Por último, tiempo de CPU-C3: (1 ciudad) x (24 días) x (24 horas) x (4 orientaciones) x (495 s) = 317 horas de tiempo de cómputo, lo que resulta en aproximadamente 29 días de tiempo de cómputo. Un total de 29 días de tiempo de cómputo tomó realizar las modelaciones que se presentan en la Figura 4.1, con el objetivo de evaluar diferentes configuraciones de ventana y su comportamiento térmico en diferentes orientaciones.

#### 4.1.1. Datos climatológicos

Los datos climatológicos para el estudio fueron proporcionados por el Centro Hidrometeorológico Mérida (CMHR), para el año 2018 en un intervalo de diez minutos para todo el año. Los datos necesarios para la simulación son: radiación solar (en el plano vertical), temperatura ambiente y velocidad del viento. Debido a que la evaluación térmica es en estado transitorio, con paso de tiempo de 5 s, fue necesario determinar funciones para calcular la radiación solar y la temperatura ambiente, para el caso de la velocidad del viento, dado que al graficar los datos es prácticamente imposible establecer una función que la represente, se estableció que esta no cambia en el intervalo de diez minutos.

Para llevar a cabo la evaluación térmica de ventanas de vidrios múltiples, bajo las condiciones climáticas de Mérida, Yucatán para todo el año, se establecieron los días representativos de cada uno de los meses, con base a la mayor y menor temperatura (día cálido y día frío) durante las veinticuatro horas. Para ello, fue necesario realizar un filtro para determinar estos días, posteriormente, al determinar los veinticuatro días para la evaluación térmica, fue necesario determinar las funciones correspondientes para calcular la temperatura ambiente y la radiación solar en el plano vertical, para cuatro orientaciones, todo esto dio como resultado un total de 49 funciones para el cálculo de la temperatura ambiente y 251 funciones para determinar la radiación solar en el plano vertical para las cuatro orientaciones.

Para obtener las funciones de la radiación solar y la temperatura ambiente en función del tiempo, fue necesario hacer uso del programa Origin y Excel, los cuales tienen funciones que permiten obtener la tendencia de las curvas cuando los datos son graficados en función de una variable independiente, que para este caso es el tiempo.



Para presentar resultados de este trabajo de tesis se seleccionaron cuatro meses, los cuales son los meses representativos para las cuatro estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno), los meses seleccionados fueron: abril, julio, octubre y diciembre, respectivamente. Las funciones de ajuste obtenidas para determinar los valores de las variables climáticas en cualquier instante de tiempo para los cuatro meses seleccionados, se presentan en el Anexo A. Para todas las funciones, tanto de temperatura como radiación solar, se consideró el tiempo en segundos, y las unidades respectivas a la temperatura fueron grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) y para la radiación solar Watts por metro cuadrado ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), esto se consideró para todas las ecuaciones a partir de Ec. (A.1) a la Ec. (A.33), esto es para los meses representativos a cada estación del año.

Por otra parte, para fines prácticos las ecuaciones correspondientes a la radiación solar únicamente se presentan para los valores obtenidos en la orientación “este”, debido a que es la orientación elegida para realizar la evaluación térmica de las tres configuraciones de ventana, esto se debe a que es la orientación que presenta los valores máximos de radiación solar para la mayor parte de los meses del año. De esta forma, si se logra una disminución en el flujo de calor a través de la ventana orientada hacia esta dirección, resultados similares se deben obtener para las otras orientaciones.

A continuación, se presentan las gráficas correspondientes al comportamiento de las variables climáticas a lo largo del día más cálido y más frío del mes.

#### 4.1.1.1. Primavera – abril

Durante el mes de abril la temperatura máxima se registró el séptimo día del mes, alcanzando una temperatura de  $41.3^{\circ}\text{C}$  y una radiación solar máxima de 404.51, 740.04, 156.73 y  $848.18 \text{ W}/\text{m}^2$ , para la orientación sur, oeste, norte y este, respectivamente.

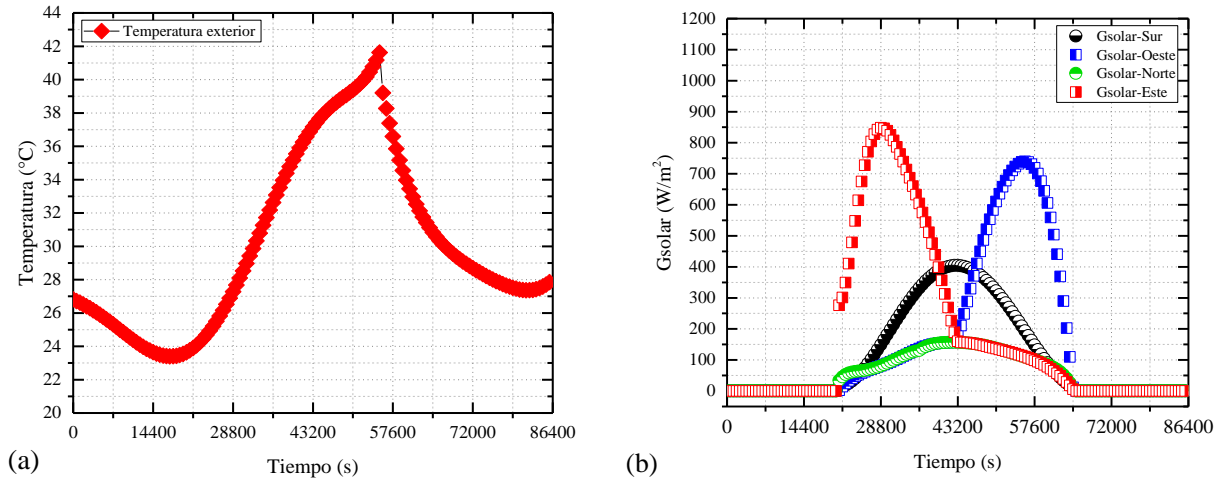


Figura 4.2. Comportamiento térmico durante el día más cálido de la (a) temperatura ambiente y (b) radiación solar del mes de abril 2018.

Por otra parte, para el día frío del mes, 16 de abril, la temperatura mínima registrada fue de 17.53°C, con valores máximos de radiación solar de 357.04, 831.97, 163.49 y 886.97 W/m<sup>2</sup>, correspondientes a las orientaciones antes mencionadas. Para este día, el sol salió a las 06:00 horas y se ocultó a las 18:00 horas con 10 minutos, teniendo aproximadamente 12 horas de radiación solar.

Al igual que para día cálido, para el día frío se presenta el comportamiento de la temperatura ambiente y la radiación solar a lo largo del día, en el cual se reportó la temperatura más baja del mes.

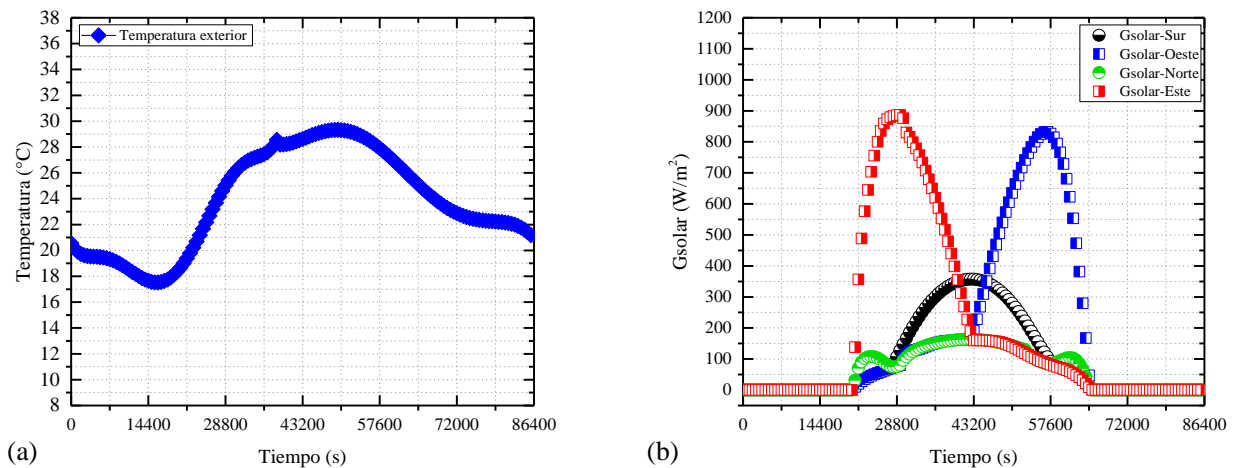


Figura 4.3. Comportamiento térmico durante el día más frío de la (a) temperatura ambiente y (b) radiación solar del mes de abril 2018.

Para el día más frío de este mes, el intervalo de radiación solar abarcó de las 06:00 horas hasta las 18:00 horas con 10 minutos.

4.1.1.2. Verano – julio

Los valores y funciones correspondientes a las variables climáticas del día cálido del mes de julio ya se presentaron en el capítulo anterior (ecuaciones 3.22 - 3.25), en donde se describió el valor máximo de temperatura durante el día y radiación solar máxima para las cuatro orientaciones. Por otra parte, el día más frío del mes de julio, de acuerdo a la temperatura mínima alcanzada se reportó el día 10, con una temperatura mínima de 23.74 °C, con una radiación solar máxima de 168.5, 609.21, 304.37 y 912.61 W/m<sup>2</sup>, en la orientación sur, oeste, norte y este, respectivamente. El comportamiento de la temperatura y radiación solar a lo largo del día 10 de julio, se presenta en la Figura 4.4.

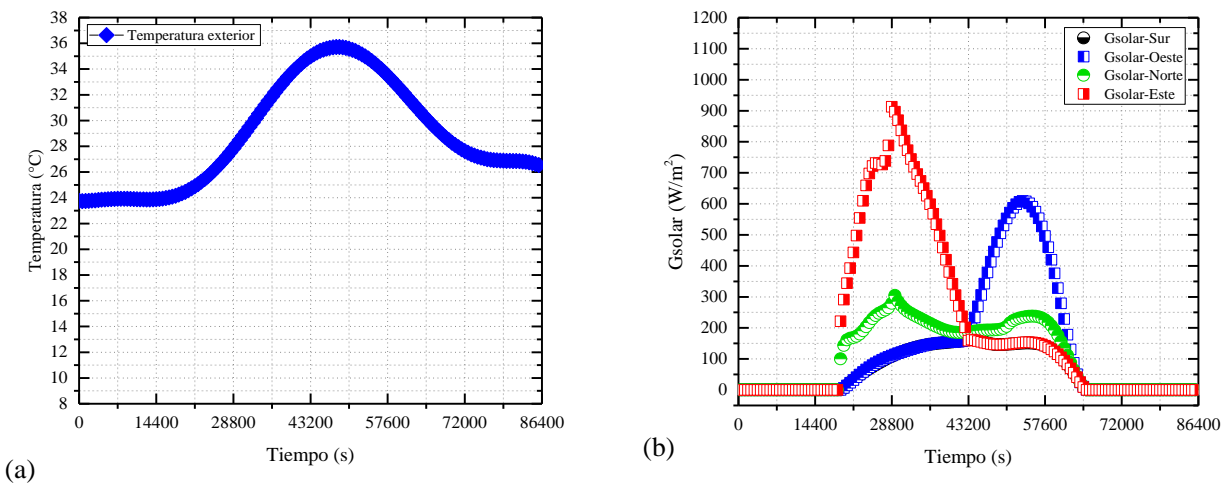


Figura 4.4. Comportamiento térmico durante el día más frío de la (a) temperatura ambiente y (b) radiación solar del mes de julio 2018.

Para el día más frío del mes de julio, el sol inicio su trayectoria a las 05:00 horas con 30 minutos y la concluyó a las 18:00 horas con 10 minutos, de la misma forma que para el mes de abril, para el día más cálido y más frío.

4.1.1.3. Otoño – octubre

El día cálido se registró el 10 de octubre, alcanzando una temperatura máxima de 36.6°C, con valores máximos de radiación solar de 679.17, 115.55, 179.54 y 810.65 W/m<sup>2</sup>. El comportamiento de las variables climáticas para el día cálido se presenta en las Figura 4.5.

Para el mes de octubre, durante el día más cálido la radiación solar tiene presencia de las 06:00 horas y término a las 17:00 horas con 40 minutos.

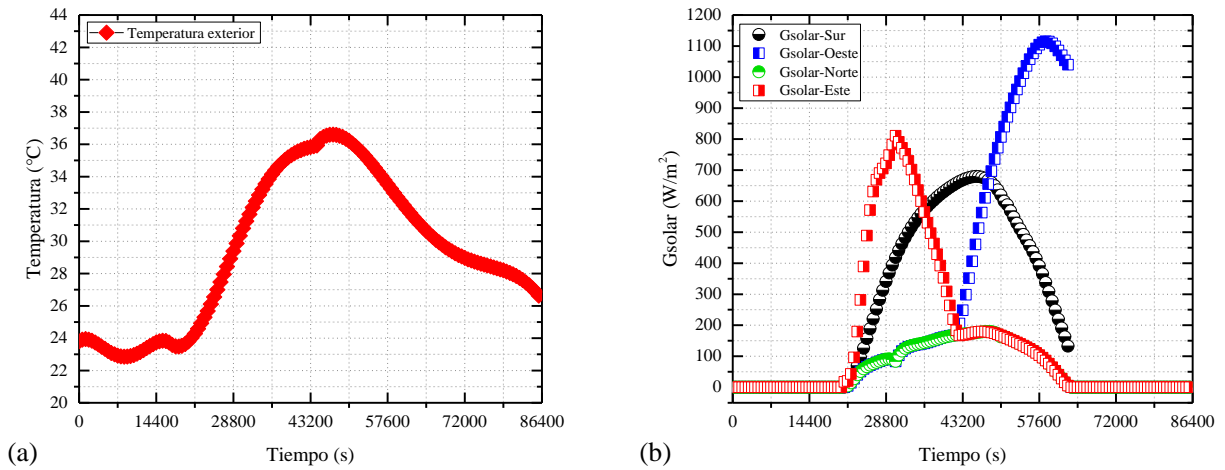


Figura 4.5. Comportamiento térmico durante el día más cálido de la (a) temperatura ambiente y (b) radiación solar del mes de octubre 2018.

El día con la temperatura mínima del mes corresponde al 23 de octubre, con un valor de 20.32°C y radiación máxima de 744.34, 681.16, 166.94 y 890.21 W/m<sup>2</sup>, en la orientación sur, oeste, norte y este, respectivamente.

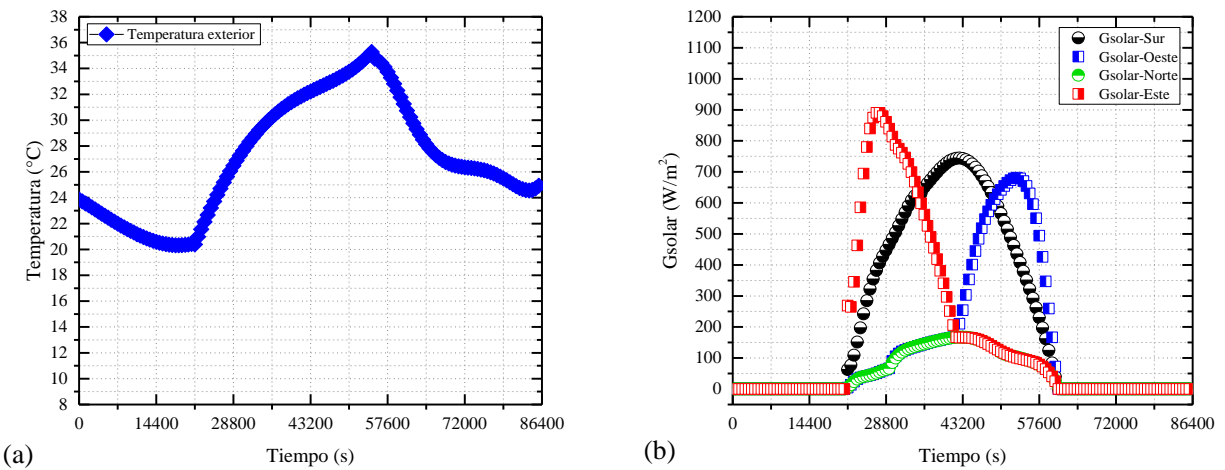


Figura 4.6. Comportamiento térmico durante el día más frío de la (a) temperatura ambiente y (b) radiación solar del mes de octubre 2018.

Para el día más frío de este mes, el intervalo de radiación solar duró aproximadamente 11 horas, dando inicio a las 06:00 horas con 10 minutos y concluyendo a las 17:00 horas.

4.1.1.4. Invierno – diciembre

Durante el mes de diciembre, la temperatura máxima reportada fue para el día 02 del mes, con un valor de 36.20°C, mientras que los valores máximos de radiación en las diferentes orientaciones fueron de 783.60, 462.62, 163.97 y 915.54 W/m<sup>2</sup>. El comportamiento de la temperatura ambiente y radiación solar se presentan en la Figura 4.7 para el día cálido. Para este día el intervalo de radiación solar dio inicio a las 06:00 horas con 10 minutos y concluyó a las 17:00 horas y 10 minutos, teniendo aproximadamente 11 horas de radiación solar durante este día.

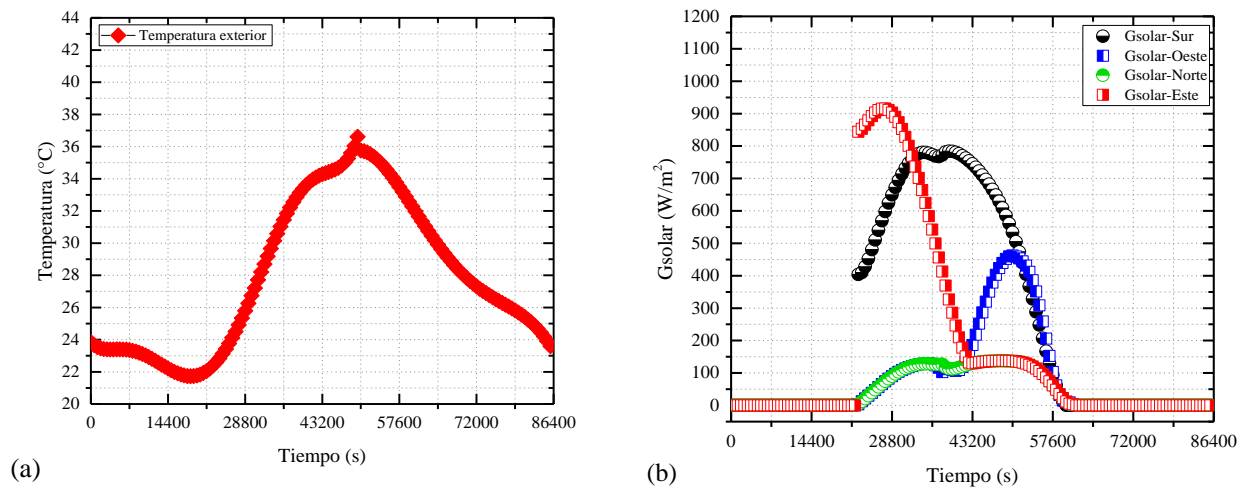


Figura 4.7. Comportamiento térmico durante el día más cálido de la (a) temperatura ambiente y (b) radiación solar del mes de diciembre 2018.

Por otra parte, para el día frío, la temperatura mínima reportada corresponde al día 22 de diciembre con un valor de 10.21°C, siendo esta la temperatura más baja de todo el año. Los valores de radiación solar máximos son de 855.91, 511.50, 140.55 y 1005.38 W/m<sup>2</sup>. La radiación solar para el día más frío del mes de diciembre, inició a las 06:00 horas y 40 minutos y concluyó a las 17:00 horas y 10 minutos, teniendo como resultado un poco más de 10 horas con luz solar.

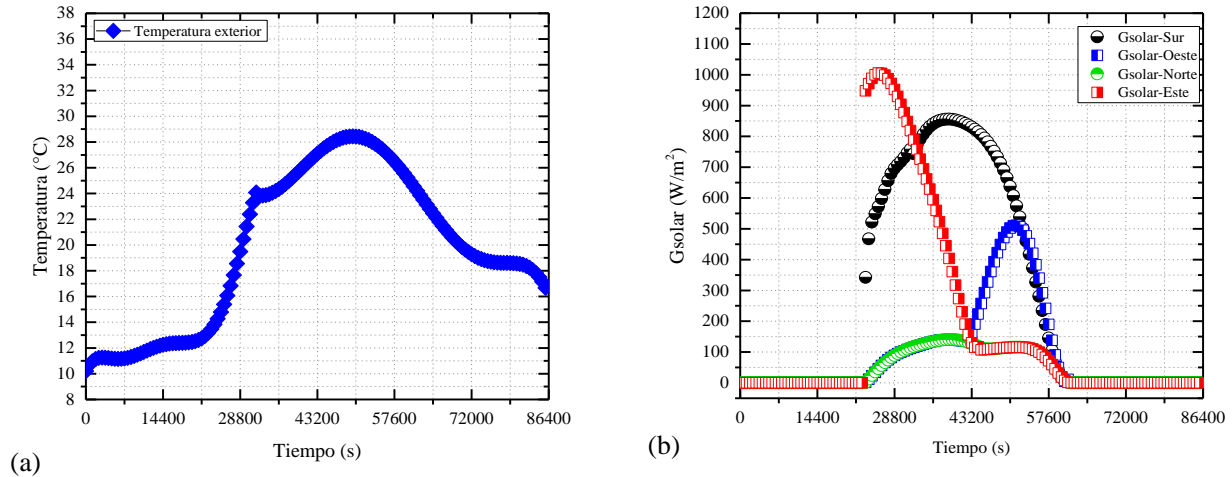


Figura 4.8. Comportamiento térmico durante el día más frío de la (a) temperatura ambiente y (b) radiación solar del mes de diciembre 2018.

## 4.2. Evaluación térmica

En esta sección se realiza la evaluación térmica a partir del análisis de los datos resultantes de la modelación numérica para los sistemas de ventana de vidrios múltiples, se comparó el desempeño de estas ventanas con respecto al desempeño de un sistema de ventana convencional (vidrio claro simple), para el día más frío y más cálido de cuatro meses representativos a las estaciones del año. La evaluación térmica se realizó para los días mencionados en la sección anterior, considerando que las ventanas están orientadas en dirección este.

En un primer apartado, se muestra la temperatura promedio obtenida del vidrio en contacto con el ambiente interior, para las tres configuraciones de ventana analizadas. Posteriormente, los resultados se muestran cualitativamente para el flujo de calor total hacia el interior, para las tres configuraciones analizadas en este trabajo de tesis.

### 4.2.1. Temperatura promedio

En esta sección se presentan los resultados del perfil de temperatura obtenido a lo largo del día para las tres configuraciones analizadas en este trabajo. Es importante mencionar, que la temperatura promedio corresponde al vidrio en contacto con el ambiente interior, y se considera que la ventana está orientada en dirección este. Debido a esto, las temperaturas

máximas se obtienen durante las primeras horas sol del día, esto es, cuando la radiación solar alcanza sus máximos valores.

4.2.1.1. Primavera – abril

En la Figura 4.9 se presenta el perfil de temperatura promedio que corresponde al vidrio en contacto con el ambiente interior, para las tres configuraciones de ventana analizadas, esto para el día más cálido y más frío del mes. Por medio de esta figura es posible apreciar que, durante el día más cálido la temperatura máxima alcanzada fue de 33.83°C a las 15:00 horas para la configuración C1, mientras que para las configuraciones C2 y C3 la temperatura promedio fue de 32.09 y 30.79°C (10:00 horas), respectivamente, esto se registró a las 15:00 horas.

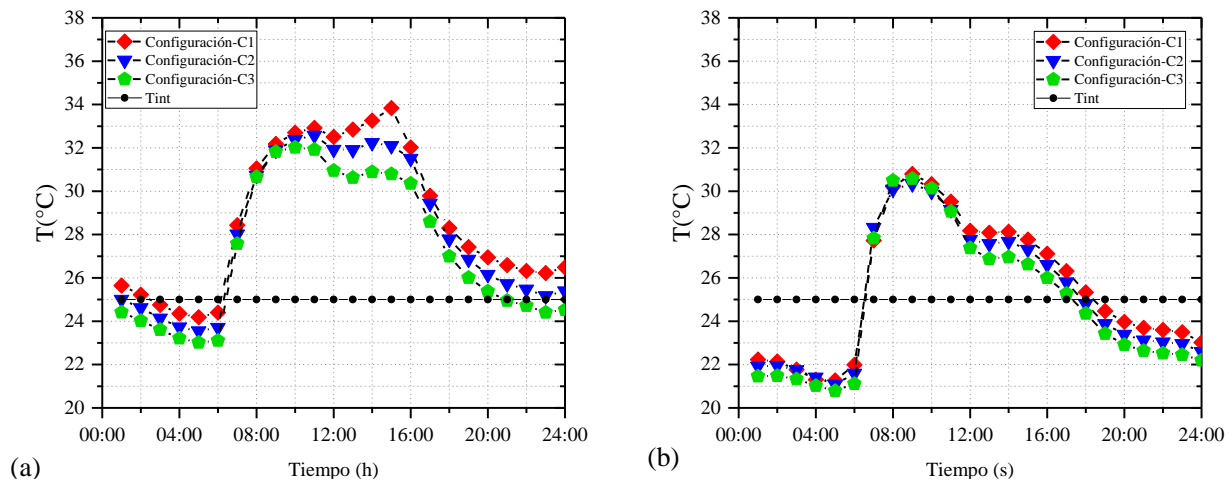


Figura 4.9. Comportamiento de la temperatura promedio a lo largo del día (a) más cálido y (b) más frío, del mes de abril 2018.

Por otra parte, durante el día más frío (Figura 4.9b), la temperatura máxima fue de 30.80, 30.34 y 30.58 °C, para la configuración C1, C2 y C3, respectivamente, a las 09:00 horas. Para ambos días es posible observar que la temperatura promedio alcanzada por la configuración de interés, la configuración C3, está por debajo de la línea que hace referencia a las otras dos configuraciones, lo que demuestra que la temperatura promedio es más cercana a la temperatura de confort establecida al interior de la ventana.

4.2.1.2. Verano – julio

Por medio de la Figura 4.10 es posible observar que durante el día más cálido del mes de julio la temperatura máxima alcanzada por la configuración de referencia (C1) fue de 34.71 °C, mientras que para la configuración C2 y C3 fue de 34.69 y 34.58 °C, respectivamente, a las 10:00 horas. Por otra parte, para el día más frío la temperatura promedio máxima de las tres configuraciones alcanzó valores de 32.31, 32.49 y 32.60 °C, a las 09:00 horas.

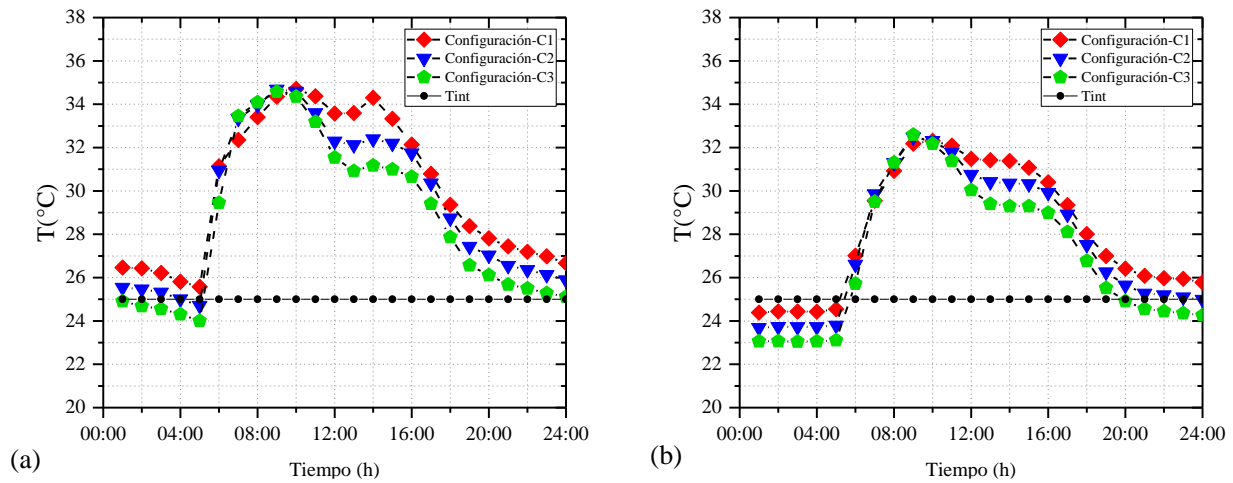


Figura 4.10. Comportamiento de la temperatura promedio a lo largo del día (a) más cálido y (b) más frío, del mes de julio 2018.

4.2.1.3. Otoño – octubre

En la Figura 4.11 se observa que durante las primeras horas luz del día, y debido a la orientación de la ventana, la temperatura promedio máxima para las configuraciones de vidrios múltiples (C2 y C3), es superior a la temperatura de la configuración C1, sin embargo, para la mayor parte del día la línea que hace referencia a la configuración de interés, la configuración C3.



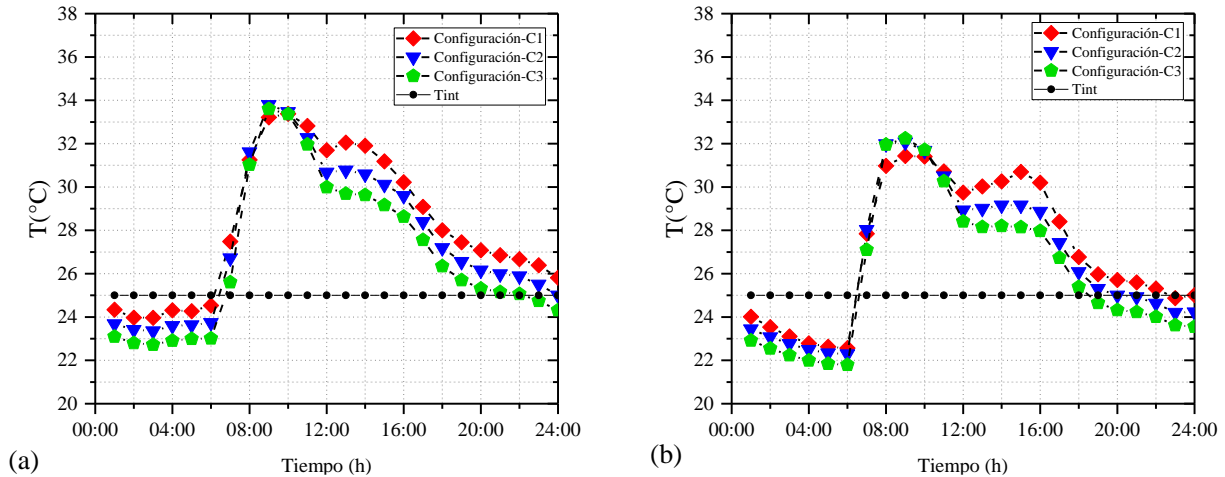


Figura 4.11. Comportamiento de la temperatura promedio a lo largo del día (a) más cálido y (b) más frío, del mes de octubre 2018.

Se observa que los valores de temperatura promedio están por debajo de las líneas que hacen referencia a las otras dos configuraciones, un comportamiento muy similar al obtenido en los meses presentados anteriormente. La temperatura promedio máxima se obtuvo a las 09:00 horas, con valores de 33.38, 33.80 y 33.60 °C, para el día más cálido del mes; y de 31.43, 32.07 y 32.24°C para el día más frío.

#### 4.2.1.4. Invierno – diciembre

Para el mes de diciembre (Figura 4.12), se obtiene un patrón similar al obtenido para el mes de octubre, en donde para gran parte del día la configuración C3 presenta una tendencia inferior a la obtenida para la temperatura promedio de las configuraciones C1 y C2; sin embargo, y nuevamente durante las primeras horas sol del día la tendencia es diferente, puesto que los valores promedios obtenidos para la configuración C3 son mayores, a las 09:00 horas del día más cálido; y este comportamiento se presentó durante el día más frío a la misma hora con valores de 29.74, 31.06 y 31.50 °C para la configuración C1, C2 y C3, respectivamente.

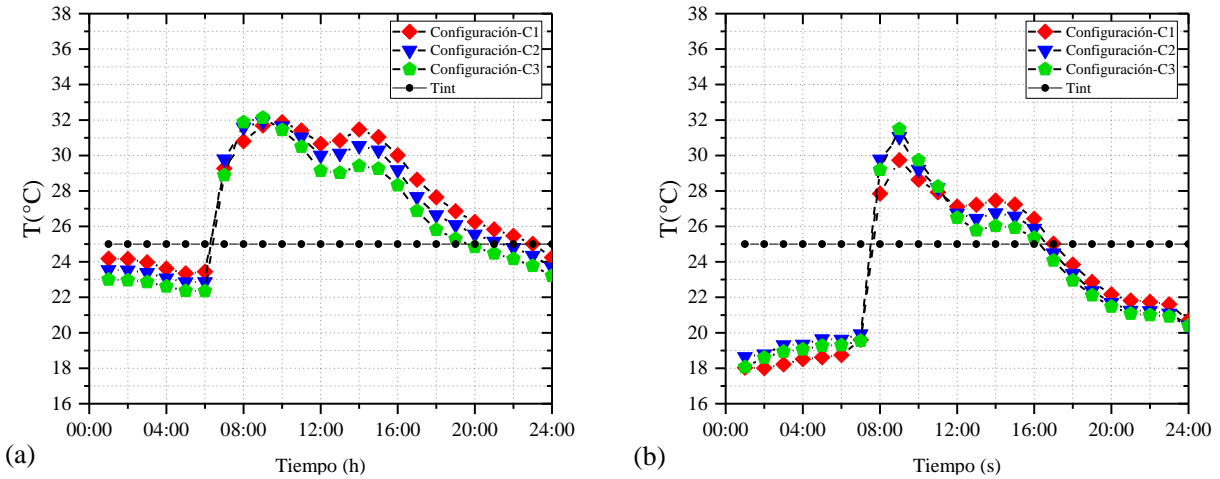


Figura 4.12. Comportamiento de la temperatura promedio a lo largo del día (a) más cálido y (b) más frío, del mes de diciembre 2018.

De acuerdo a los resultados del comportamiento de la temperatura a lo largo del día, fue posible observar en las figuras 4.9 – 4.12, que las diferencias máximas entre los valores promedio de temperatura obtenidas del vidrio, se tienen en un horario de 12:00 – 16:00 horas para los cuatro meses seleccionados, y durante este intervalo de tiempo la temperatura promedio de la configuración C3 con respecto a la configuración C1, se reduce hasta 4 °C.

#### 4.2.2. Flujo de calor total al interior

El flujo de calor total se compone por los flujos convectivo y radiativo al interior, y la aportación del flujo transmitido debido a la incidencia de radiación solar, esto se debe a la propiedad que poseen los vidrios de transmitir energía. Para el cálculo del flujo de calor total se utilizó la Ec. (4.1).

$$q_{\text{total-int}} = h_i (T_g - T_i) + \sigma \varepsilon (T_g^4 - T_i^4) + q_r \tag{4.1}$$

Se considera que, si el flujo de calor total es positivo, entonces la temperatura del vidrio en contacto con el ambiente interior es mayor que la temperatura de confort que se fijó al interior de la ventana.

##### 4.2.2.1. Primavera – abril

En la Figura 4.13 se presentan los flujos de calor total hacia el interior de la ventana, para las tres configuraciones analizadas, el flujo de calor total se obtuvo durante todo el día para el

día más cálido y más frío del mes, considerando que las ventanas están orientadas en dirección este.

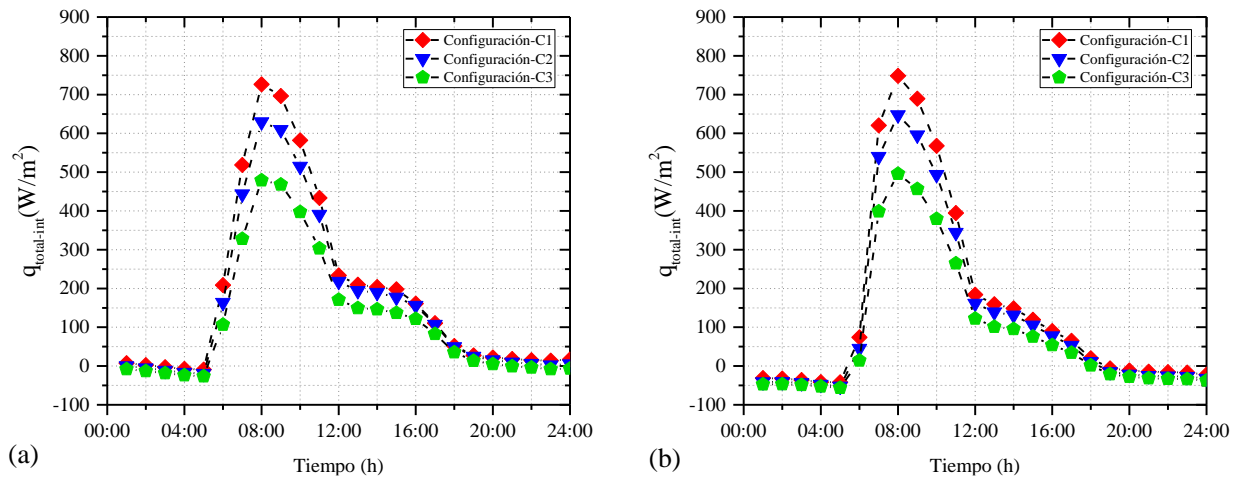


Figura 4.13. Flujo de calor total al interior para el día (a) más cálido y (b) más frío de abril 2018.

Los valores mínimos de flujo de calor total se obtienen fuera del horario en donde existe presencia de radiación solar, y el flujo de calor es resultado únicamente de las aportaciones por convección y radiación, las cuales se obtienen debido a la diferencia de temperatura entre el ambiente interior y la temperatura superficial del vidrio en contacto con el interior.

Para el día más cálido del mes, se obtuvo que los valores más altos de flujo de calor se presentan a las 08:00 horas con valores de 735.61, 639.29 y 488.21  $W/m^2$ , para la configuración C1, C2 y C3, respectivamente. Para el día frío en el mismo horario, pero con valores un poco más altos, de 756.59, 651.73 y 498.47  $W/m^2$  para la configuración C1, C2 y C3. Esto se debe a que se registraron valores más altos de radiación solar durante este día, en comparación a los reportados para el día más cálido del mes.

#### 4.2.2.2. Verano – julio

Durante el día más cálido del mes de julio, los valores máximos de flujo de calor para las tres configuraciones fueron de 816.73, 726.26 y 559.70  $W/m^2$  a las 06:00 horas, para la configuración C1, C2 y C3, respectivamente, estos resultados son producto de la combinación de las altas temperaturas que se reportan en este mes y la incidencia de radiación solar. Un comportamiento similar, se presenta para el día más frío del mes (Figura 4.14b), pero con valores un poco más bajos, debido a la radiación solar.

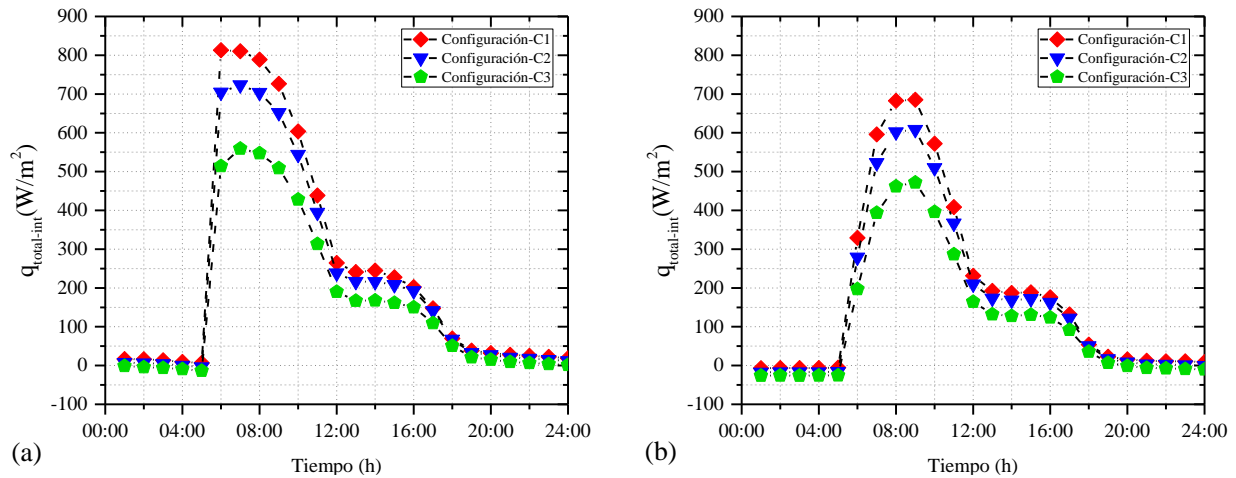


Figura 4.14. Flujo de calor total al interior para el día (a) más cálido y (b) más frío de julio 2018.

Por otra parte, debido a la diferencia de temperaturas que existe entre el ambiente interior y el ambiente exterior, el flujo de calor sin presencia de radiación solar es mayor que el reportado para el día cálido del mes, durante las primeras horas del día. Para el día frío del mes de julio los flujos de calor máximos fueron obtenidos a las 08:00 horas, con valores de 786.58, 690.92y 527.21 W/m<sup>2</sup>, para la configuración C1, C2 y C3, respectivamente.

4.2.2.3. Otoño – octubre

Durante el mes de octubre se reportaron valores máximos de flujo de calor total a las 08:00 horas para el día más cálido (Figura 4.15a) y más frío (Figura 4.15b) del mes.

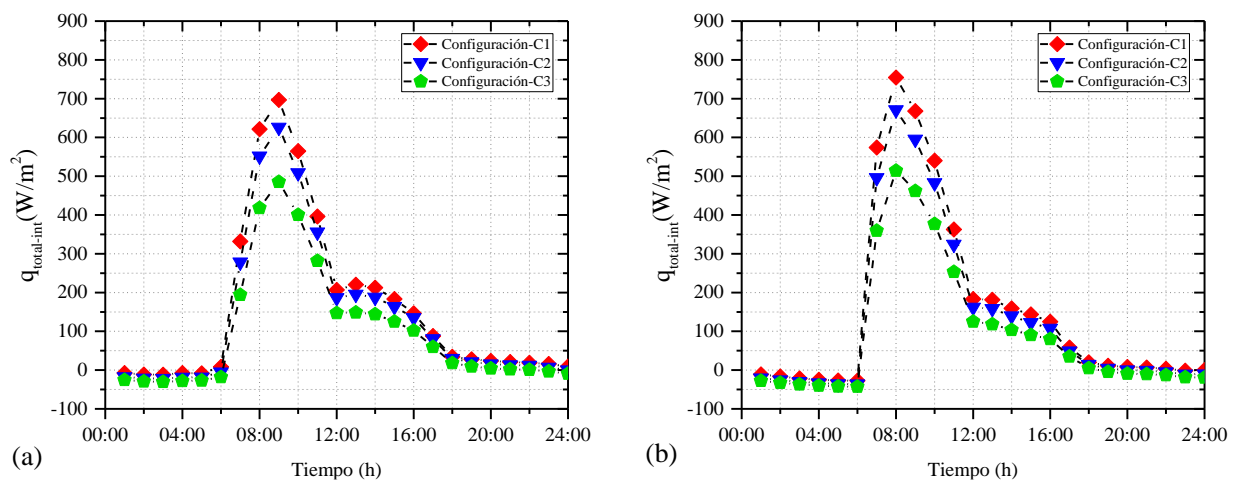


Figura 4.15. Flujo de calor total al interior para el día (a) más cálido y (b) más frío de octubre 2018.

Los valores máximos de flujo de calor total en la configuración C1, C2 y C3 para el día más cálido fueron de 722.00, 644.04 y 494.82 W/m<sup>2</sup>, respectivamente, mientras que para el día más frío fueron de 760.33, 673.46 y 513.58 W/m<sup>2</sup>, respectivamente.

4.2.2.4. Invierno – diciembre

Para el mes de diciembre los valores más altos de flujo de calor total al interior se reportaron durante las 07:00 a 08:00 horas, para el día más cálido y frío más del mes, en presencia de radiación solar. Para los horarios en donde la radiación solar es cero, es posible observar en la Figura 4.16 que los valores del flujo de calor son negativos, esto se debe a que la temperatura interior es mayor a la temperatura exterior, debido a que, sin presencia de radiación solar la única variable que tiene efecto sobre la temperatura superficial de los vidrios es la temperatura exterior, y para el mes de diciembre para ambos días las temperaturas para la mayor parte del día son inferiores a la temperatura de confort que se consideró al interior de la ventana.

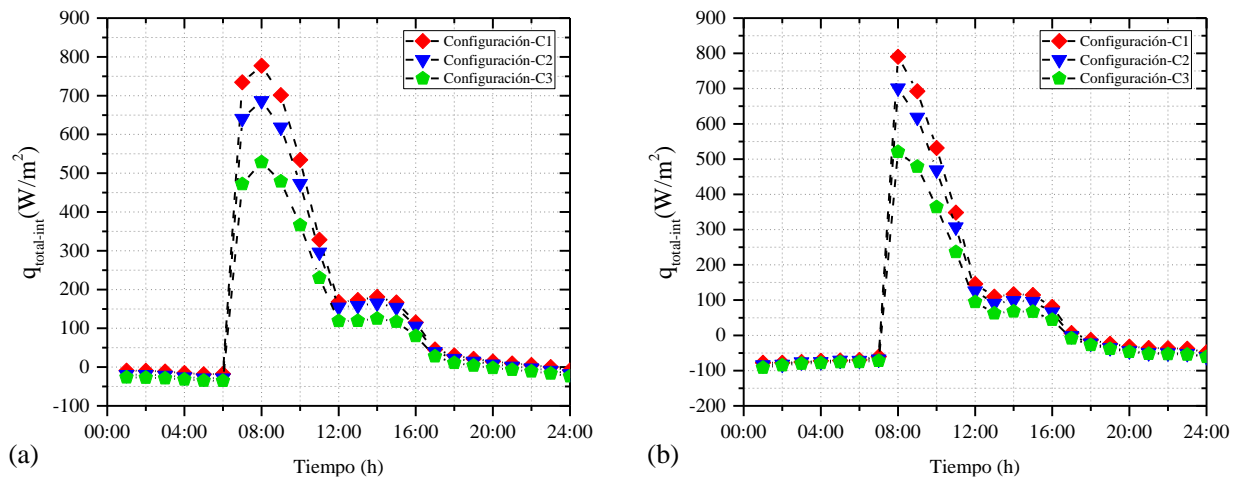


Figura 4.16. Flujo de calor total al interior para el día (a) más cálido y (b) más frío de diciembre 2018.

Los valores máximos de flujo de calor al interior para el día cálido del mes de diciembre fueron de 778.07, 688.10 y 527.86 W/m<sup>2</sup>, mientras que para el día frío los valores fueron de 797.09, 700.39 y 510.72 W/m<sup>2</sup>, la diferencia principal entre los valores de flujo de calor del día cálido y frío del mes, radica en una de las variables climáticas que mayor efecto tiene en las ventanas, la radiación solar, recordando que para el día frío la radiación solar en el mes de diciembre alcanza valores más altos que los reportados para el día cálido.

Como observa en las figuras 4.13 – 4.16 el flujo de calor máximo para los cuatro meses, se alcanza durante las primeras horas del día, en donde la radiación solar es considerablemente más alta, esto puede cambiar al considerar las otras orientaciones, en donde la trayectoria solar es diferente y por consiguiente los valores de radiación solar también lo son. Con la finalidad de evaluar el efecto de la orientación a la que se posicionan las tres configuraciones de ventana, se realizó un análisis de los flujos de calor totales para el día más cálido y más frío de todo el año, que corresponden a los días 25 de julio y 22 de diciembre, respectivamente.

#### 4.2.3. Efecto de la orientación para el día más cálido y más frío del año

El objetivo de la orientación es aprovechar al máximo la trayectoria del sol, optimizando así la energía solar para crear confort y obtener una mayor eficiencia energética. Además, una vivienda con áreas vidriadas que estén bien orientada puede permitir un ahorro en el consumo de climatización e iluminación en una edificación. Recordando que la trayectoria del sol inicia en la dirección este y finaliza en la dirección opuesta (oeste), esta trayectoria se presenta en las cuatro estaciones del año, sin embargo, la inclinación del sol hacia el norte y sur varía de acuerdo a las estaciones del año, que a su vez dependen del hemisferio en donde este ubicada la edificación.

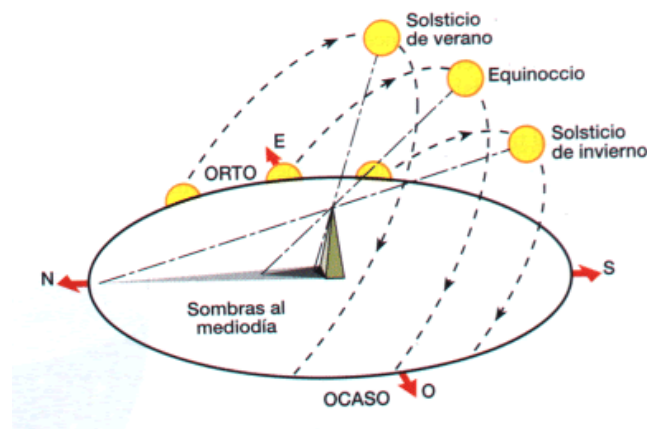


Figura 4.17. Trayectoria aparente del sol durante el año.

Para el hemisferio norte, en invierno, el sol pasa casi todo su tiempo diurno en el cielo del sur, y en verano en el cielo del norte (esto es inverso para el hemisferio sur). Durante el invierno los días son más cortos, y el arco que describe el sol es más pequeño y, tanto en su

salida como en la puesta, está más cerca del sur. Debido a esto, en invierno, el sol sale por el sureste y se pone por el suroeste. Por otra parte, en la orientación norte no se recibe ningún rayo directo del sol, es por esto que durante los meses que comprenden el invierno se reportan valores pequeños de radiación a lo largo del día, para esta dirección.

A medida que los meses avanzan se llega al equinoccio de primavera, donde el sol sale exactamente por el este y se pone por el oeste. A partir de esta fecha, según avanzan los días, la orientación norte comienza a recibir algo de radiación solar en las primeras horas de la mañana y con los últimos rayos de sol durante la tarde.

Por otra parte, en verano, los días se alargan, y el arco que describe el sol es más amplio y más vertical. En esta época del año el sol sale por el noreste y se pone por el noroeste, recibiendo la orientación norte radiación y luz a primera hora de la mañana y a última hora de la tarde. Pasado el verano llega el otoño y se da una situación similar a la de la primavera. En el equinoccio de otoño el sol sale por el este y se pone por el oeste. A partir de este momento, el norte deja de recibir radiación solar directa y los días se acortan según se acerca el invierno, la orientación sur vuelve a ser la principal receptora de radiación solar.

En la Figura 4.18 se presenta el flujo de calor total, para las tres diferentes configuraciones de ventana para el día más cálido de todo el año, se considera que las ventanas se orientaron en dirección sur, oeste, norte y este. Es posible observar que las tendencias del flujo de calor se ven fuertemente afectadas por la radiación solar que incide sobre las ventanas, estos valores son distintos para cada orientación. El día 25 de julio pertenece al verano y la tendencia obedece a lo descrito en los párrafos anteriores (05:40 – 18:10).

En la Figura 4.18c se observa la tendencia del flujo de calor total por la influencia de la radiación solar en la orientación norte. Durante la primera parte del día los flujos de calor aumentan hasta llegar a su máximo valor a las 06:00 horas y más tarde descienden a un valor inferior aproximadamente a las 11:00 horas; posteriormente, a medida que la radiación solar vuelve a incrementar debido a la trayectoria del sol para su puesta hacia la dirección oeste, los valores de los flujos de calor total vuelven a incrementar para las tres configuraciones de ventana. Los valores menores de flujo de calor total a consecuencia de la radiación solar, se presentan en la orientación sur para un mayor número de horas del día, debido a que esta orientación es la que recibe radiación solar durante toda la trayectoria del sol, desde su salida

hasta la puesta. La orientación sur, durante las cuatro estaciones del año, es la única que tiene horas de sol desde su salida hasta su puesta, con valores variables de acuerdo a la época del año. En las Figuras 4.18b y 4.18d se aprecia como el flujo de calor se ve influenciado por la radiación solar para diferentes horas del día.

La orientación oeste y este, a medida que el sol sigue su trayectoria en estas orientaciones aumenta o disminuye el valor de radiación con el paso de tiempo, lo que vuelve poco factible utilizar estas orientaciones para cualquier configuración de ventana, debido a que no se aprovecharía la luz que brinda el sol durante todo el día, además a medida que el sol se mueve presentan los valores más altos de radiación solar para la mayor parte de los meses del año.

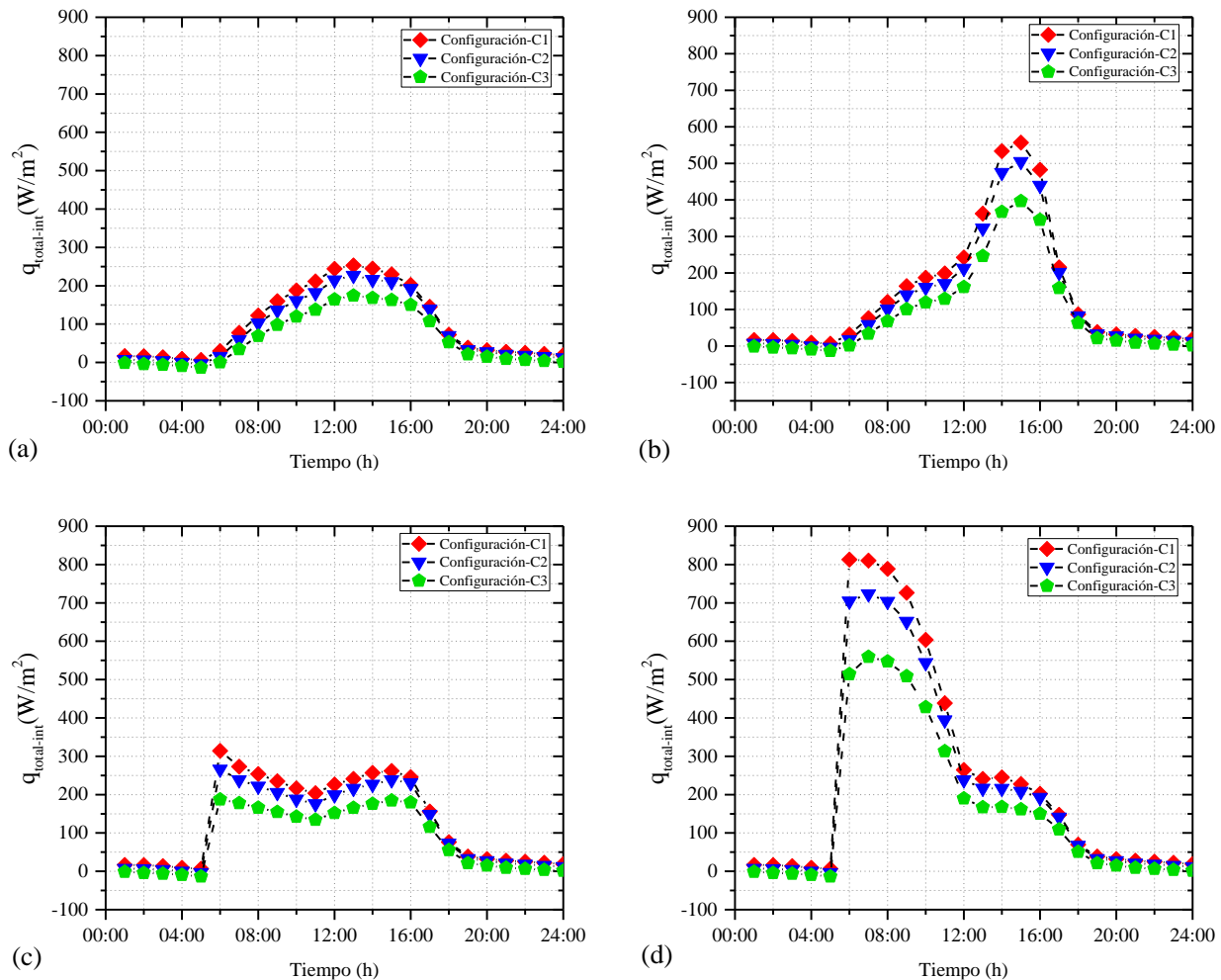


Figura 4.18. Flujo de calor total en la orientación (a) sur, (b) oeste, (c) norte y (d) este, día más cálido del año; 25 de julio de 2018.



Por otra parte, para el día más frío del año que se encuentra dentro de la época de invierno, la tendencia de los flujos de calor para las diferentes orientaciones es acorde a lo descrito en los párrafos anteriores, con respecto a la trayectoria del sol durante la época de invierno. Lo anterior se observa claramente en la Figura 4.19, debido a que los valores máximos de flujo de calor total al interior se presentan si las ventanas son orientadas en dirección sur y este, durante las primeras horas del día para la orientación este, y de forma continua en dirección sur (aproximadamente 12 horas).

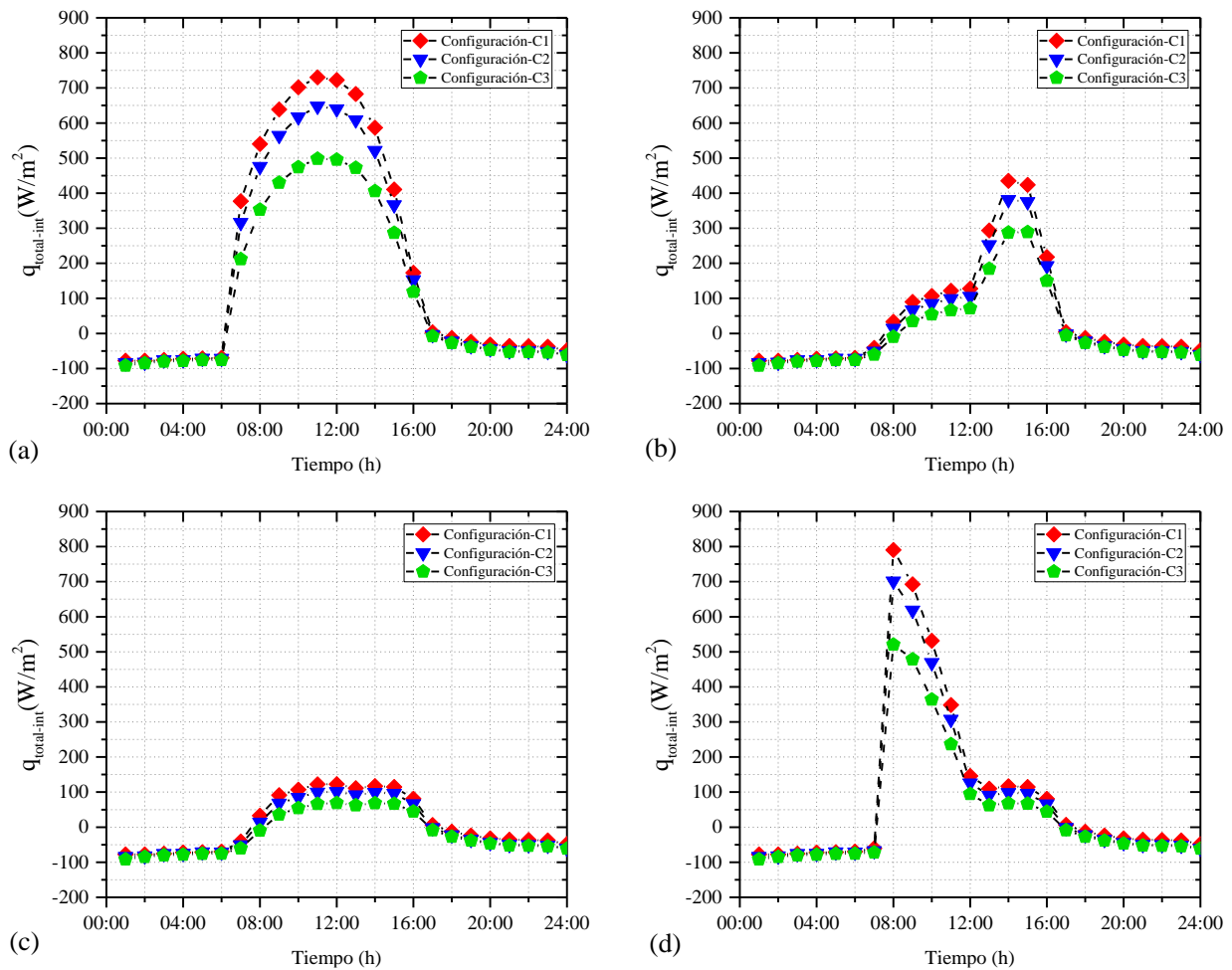


Figura 4.19. Flujo de calor total en la orientación (a) sur, (b) oeste, (c) norte y (d) este, día más frío del año; 22 de diciembre del 2018.

Por otro lado, la orientación que presenta los valores mínimos de flujo de calor total, es la orientación norte, debido a que durante la época de invierno esta orientación no recibe radiación solar directa, por lo tanto, esta orientación al igual que la orientación oeste y este, no es recomendable para ubicar las ventanas.

Durante el día cálido la temperatura ambiente por lo regular es superior a la temperatura de confort deseada dentro de una edificación, para este trabajo la temperatura del día más cálido del año fue de 41.30°C, aproximadamente 15°C mayor a la temperatura de confort establecida al interior de la ventana. Las variables climáticas tienen un fuerte efecto sobre el desempeño térmico de la ventana, a temperaturas elevadas los vidrios presentan grandes pérdidas por convección y radiación, aunado a esto, la alta radiación solar incidente produce mayores ganancias de energía hacia el interior debido a la transmitancia de los vidrios. Por otro lado, para el día más frío del año también se presentó una diferencia de temperaturas entre la temperatura interior y exterior de aproximadamente 15°C, no obstante, debido a que durante este día la radiación solar en dirección sur es alta, los vidrios tienen la capacidad de absorber esta energía y aumentar su temperatura, para así disminuir las pérdidas de energía del ambiente interior al ambiente exterior.

Si se considera orientar las ventanas en dirección sur, se producirá una reducción considerable en los flujos de calor, para las tres configuraciones, además de que esto permitirá que la ventana cumpla con dos objetivos, permitir el paso de luz durante la mayor parte del día e impedir que la energía que pase al interior sea demasiada. Aunado a elegir la orientación óptima para colocar las ventanas en una edificación, también es necesario elegir la configuración de ventana que presente el mejor desempeño térmico, reduciendo de forma considerable los flujos de calor al interior de la ventana. Al comparar cualitativamente los flujos de calor totales, de las configuraciones de vidrios múltiples con la configuración de referencia se observa una disminución considerable. Para determinar cuantitativamente el porcentaje de reducción de las configuraciones C2 y C3 con respecto a sí mismas y la configuración de referencia (C1). En las tablas 4.2 – 4.9 se presentan los flujos de calor totales a lo largo del día más cálido y el día más frío, para los cuatro meses seleccionados como referencia para cada estación del año. Para los meses restantes, las tablas de flujo de calor total para el día más cálido y más frío se encuentran en el Anexo B.

Tabla 4.2. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); abril, día más cálido.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	7.35	7.35	7.35	7.35	0.07	0.07	0.07	0.07	-7.83	-7.83	-7.83	-7.83
<b>02:00</b>	2.56	2.56	2.56	2.56	-5.19	-5.19	-5.19	-5.19	-13.02	-13.02	-13.02	-13.02
<b>03:00</b>	-2.82	-2.82	-2.82	-2.82	-11.59	-11.59	-11.59	-11.59	-18.57	-18.57	-18.57	-18.57
<b>04:00</b>	-7.32	-7.32	-7.32	-7.32	-16.99	-16.99	-16.99	-16.99	-23.80	-23.80	-23.80	-23.80
<b>05:00</b>	-9.18	-9.18	-9.18	-9.18	-19.41	-19.41	-19.41	-19.41	-26.42	-26.42	-26.42	-26.42
<b>06:00</b>	3.57	-4.93	19.54	208.77	-8.59	-15.73	4.82	163.79	-18.83	-24.03	-9.06	106.68
<b>07:00</b>	42.34	44.38	54.07	518.50	27.15	29.10	37.92	443.47	8.84	10.51	17.82	328.04
<b>08:00</b>	123.53	77.09	76.47	726.32	101.75	61.65	61.15	629.56	67.34	37.16	36.93	478.79
<b>09:00</b>	221.38	113.33	114.20	696.25	192.27	98.33	99.08	609.28	139.05	66.97	67.53	468.17
<b>10:00</b>	313.13	154.84	151.69	582.02	278.74	141.21	138.52	514.83	208.18	101.65	99.68	397.25
<b>11:00</b>	381.26	187.83	187.73	433.41	342.00	171.85	171.74	390.60	260.36	127.96	127.81	303.42
<b>12:00</b>	414.65	204.19	204.11	233.88	375.02	189.04	188.98	217.99	288.73	143.08	143.04	170.96
<b>13:00</b>	409.53	392.34	209.04	209.67	372.03	353.40	193.52	194.17	288.97	268.98	148.32	149.34
<b>14:00</b>	370.40	579.26	204.81	203.67	338.56	521.24	190.49	189.49	264.46	402.24	147.02	146.29
<b>15:00</b>	310.63	696.49	197.36	197.86	280.13	625.53	176.61	177.02	220.25	487.74	136.95	137.22
<b>16:00</b>	212.89	694.72	160.89	160.99	202.65	627.59	155.75	155.87	160.72	495.00	121.64	121.78
<b>17:00</b>	116.43	527.02	118.51	110.67	112.35	473.31	113.71	106.94	87.91	372.24	87.87	82.77
<b>18:00</b>	51.07	133.96	59.10	51.57	48.77	126.03	56.03	49.31	35.00	103.63	40.85	35.47
<b>19:00</b>	27.54	27.55	27.54	27.54	24.89	25.02	24.90	24.89	13.64	14.67	13.71	13.65
<b>20:00</b>	22.16	22.16	22.16	22.16	15.45	15.45	15.45	15.45	5.10	5.14	5.10	5.10
<b>21:00</b>	18.06	18.06	18.06	18.06	9.74	9.74	9.74	9.74	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63
<b>22:00</b>	14.95	14.95	14.95	14.95	6.34	6.34	6.34	6.34	-3.80	-3.80	-3.80	-3.80
<b>23:00</b>	13.82	13.82	13.82	13.82	2.27	2.27	2.27	2.27	-7.93	-7.93	-7.93	-7.93
<b>24:00</b>	16.86	16.86	16.86	16.86	5.24	5.24	5.24	5.24	-6.30	-6.30	-6.30	-6.30
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	3101.33 (W-h/m <sup>2</sup> )	3940.91 (W-h/m <sup>2</sup> )	1888.04 (W-h/m <sup>2</sup> )	4464.10 (W-h/m <sup>2</sup> )	2794.54 (W-h/m <sup>2</sup> )	3548.67 (W-h/m <sup>2</sup> )	1702.86 (W-h/m <sup>2</sup> )	3956.85 (W-h/m <sup>2</sup> )	2168.62 (W-h/m <sup>2</sup> )	2762.24 (W-h/m <sup>2</sup> )	1304.57 (W-h/m <sup>2</sup> )	3046.17 (W-h/m <sup>2</sup> )

Tabla 4.3. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); abril, día más frío.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	-31.08	-31.08	-31.08	-31.08	-41.02	-41.02	-41.02	-41.02	-47.13	-47.13	-47.13	-47.13
<b>02:00</b>	-32.14	-32.14	-32.14	-32.14	-40.63	-40.63	-40.63	-40.63	-46.84	-46.84	-46.84	-46.84
<b>03:00</b>	-36.29	-36.29	-36.29	-36.29	-43.29	-43.29	-43.29	-43.29	-48.83	-48.83	-48.83	-48.83
<b>04:00</b>	-41.42	-41.42	-41.42	-41.42	-47.77	-47.77	-47.77	-47.77	-52.83	-52.83	-52.83	-52.83
<b>05:00</b>	-41.82	-41.82	-41.82	-41.82	-52.09	-52.09	-52.09	-52.09	-56.00	-56.00	-56.00	-56.00
<b>06:00</b>	-25.89	-25.88	-9.40	73.91	-38.76	-38.74	-24.90	45.09	-46.79	-46.78	-36.70	14.26
<b>07:00</b>	24.04	24.00	72.16	620.41	6.86	6.83	50.66	539.98	-11.06	-11.09	23.35	398.77
<b>08:00</b>	70.25	60.11	61.11	748.28	50.67	42.13	43.57	647.48	25.80	19.60	21.98	495.76
<b>09:00</b>	181.12	116.61	113.56	689.35	151.89	96.23	93.50	595.70	106.61	64.31	62.16	456.69
<b>10:00</b>	259.26	138.71	139.26	567.99	222.24	117.46	117.96	493.51	163.37	82.53	82.95	379.79
<b>11:00</b>	307.15	154.46	154.03	394.63	266.10	133.39	133.00	344.20	198.97	95.86	95.53	264.86
<b>12:00</b>	324.11	158.06	159.65	183.98	281.84	137.08	138.41	161.37	211.92	99.22	100.18	122.44
<b>13:00</b>	314.88	354.41	158.44	159.24	275.38	307.82	138.24	138.91	207.82	228.56	100.53	101.26
<b>14:00</b>	273.59	537.80	148.87	148.55	240.13	468.50	131.18	130.95	181.37	355.04	95.59	95.50
<b>15:00</b>	199.19	670.85	123.50	119.55	175.04	584.93	108.64	105.10	131.52	447.37	78.74	75.87
<b>16:00</b>	109.43	724.87	90.27	90.32	94.69	634.13	77.17	77.28	68.93	487.63	53.88	54.02
<b>17:00</b>	64.15	591.30	97.47	64.97	52.21	515.86	80.98	52.89	34.04	399.64	55.52	34.35
<b>18:00</b>	19.63	150.40	40.12	20.21	10.65	130.29	29.11	11.14	1.13	104.40	16.25	1.47
<b>19:00</b>	-5.98	-5.95	-5.97	-5.98	-14.98	-14.76	-14.95	-14.98	-20.96	-19.36	-20.75	-20.96
<b>20:00</b>	-11.64	-11.64	-11.64	-11.64	-21.58	-21.58	-21.58	-21.58	-27.77	-27.70	-27.76	-27.77
<b>21:00</b>	-14.73	-14.73	-14.73	-14.73	-25.07	-25.07	-25.07	-25.07	-31.52	-31.51	-31.52	-31.52
<b>22:00</b>	-15.82	-15.82	-15.82	-15.82	-26.20	-26.20	-26.20	-26.20	-33.08	-33.08	-33.08	-33.08
<b>23:00</b>	-16.99	-16.99	-16.99	-16.99	-27.29	-27.29	-27.29	-27.29	-33.96	-33.96	-33.96	-33.96
<b>24:00</b>	-22.26	-22.26	-22.26	-22.26	-32.15	-32.15	-32.15	-32.15	-37.42	-37.42	-37.42	-37.42
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	2416.19 (W-h/m <sup>2</sup> )	3950.93 (W-h/m <sup>2</sup> )	1611.33 (W-h/m <sup>2</sup> )	4124.89 (W-h/m <sup>2</sup> )	2201.95 (W-h/m <sup>2</sup> )	3548.66 (W-h/m <sup>2</sup> )	1502.78 (W-h/m <sup>2</sup> )	3679.09 (W-h/m <sup>2</sup> )	1783.40 (W-h/m <sup>2</sup> )	2834.42 (W-h/m <sup>2</sup> )	1217.21 (W-h/m <sup>2</sup> )	2889.11 (W-h/m <sup>2</sup> )

Tabla 4.4. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); julio, día más cálido.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	16.58	16.58	16.58	16.58	7.28	7.28	7.28	7.28	-1.14	-1.14	-1.14	-1.14
<b>02:00</b>	16.23	16.23	16.23	16.23	6.26	6.26	6.26	6.26	-4.20	-4.20	-4.20	-4.20
<b>03:00</b>	13.73	13.73	13.73	13.73	4.30	4.30	4.30	4.30	-5.94	-5.94	-5.94	-5.94
<b>04:00</b>	9.18	9.18	9.18	9.18	0.14	0.14	0.14	0.14	-9.26	-9.26	-9.26	-9.26
<b>05:00</b>	6.54	6.54	6.54	6.54	-3.84	-3.84	-3.84	-3.84	-13.31	-13.31	-13.31	-13.31
<b>06:00</b>	29.71	31.62	314.09	812.83	15.48	17.07	265.99	704.45	0.27	1.41	187.38	514.44
<b>07:00</b>	77.56	76.27	273.14	810.30	59.39	58.35	238.17	723.42	34.72	34.03	177.93	559.28
<b>08:00</b>	122.54	120.88	253.64	788.83	102.35	100.81	221.60	703.63	69.40	68.15	165.80	547.40
<b>09:00</b>	159.81	163.90	234.93	726.34	136.12	139.72	205.42	651.85	98.34	101.02	154.92	509.10
<b>10:00</b>	187.81	186.90	216.26	603.59	160.95	160.34	187.89	543.79	119.77	119.48	142.64	428.26
<b>11:00</b>	211.52	198.77	203.69	438.48	181.77	170.61	176.02	394.64	137.55	129.19	134.60	313.58
<b>12:00</b>	244.04	242.31	226.53	264.32	214.83	212.48	199.12	238.17	164.25	161.67	152.20	190.05
<b>13:00</b>	253.02	362.41	241.20	241.20	226.77	322.65	215.88	216.31	174.58	246.61	165.71	167.26
<b>14:00</b>	244.72	533.38	256.91	245.01	216.16	474.77	226.64	216.09	168.37	367.31	175.83	167.97
<b>15:00</b>	229.84	556.93	261.84	227.39	210.11	504.81	238.52	208.19	162.89	396.70	184.87	161.70
<b>16:00</b>	202.34	482.37	245.47	202.10	192.68	439.80	230.66	192.49	150.24	345.60	179.99	150.10
<b>17:00</b>	145.31	215.42	155.78	147.53	138.95	201.12	148.44	140.85	107.88	158.59	115.95	109.29
<b>18:00</b>	72.31	86.76	76.28	69.74	69.60	82.55	73.20	67.35	52.64	63.56	55.63	50.97
<b>19:00</b>	38.43	38.44	38.43	38.43	32.80	32.82	32.80	32.79	21.13	21.31	21.17	21.12
<b>20:00</b>	31.99	31.99	31.99	31.99	27.30	27.30	27.30	27.30	15.02	15.03	15.02	15.02
<b>21:00</b>	27.71	27.71	27.71	27.71	20.92	20.92	20.92	20.92	9.15	9.15	9.15	9.15
<b>22:00</b>	24.92	24.92	24.92	24.92	18.29	18.29	18.29	18.29	6.71	6.71	6.71	6.71
<b>23:00</b>	22.51	22.51	22.51	22.51	15.24	15.24	15.24	15.24	3.85	3.85	3.85	3.85
<b>24:00</b>	18.92	18.92	18.92	18.92	11.98	11.98	11.98	11.98	1.58	1.58	1.58	1.58
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	2389.52 (W-h/m <sup>2</sup> )	3466.92 (W-h/m <sup>2</sup> )	3168.75 (W-h/m <sup>2</sup> )	5786.65 (W-h/m <sup>2</sup> )	2063.88 (W-h/m <sup>2</sup> )	3023.82 (W-h/m <sup>2</sup> )	2766.27 (W-h/m <sup>2</sup> )	5139.94 (W-h/m <sup>2</sup> )	1530.83 (W-h/m <sup>2</sup> )	2283.44 (W-h/m <sup>2</sup> )	2083.42 (W-h/m <sup>2</sup> )	3959.32 (W-h/m <sup>2</sup> )

Tabla 4.5. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); julio, día más frío.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	-6.90	-6.90	-6.90	-6.90	-17.59	-17.59	-17.59	-17.59	-25.91	-25.91	-25.91	-25.91
<b>02:00</b>	-6.28	-6.28	-6.28	-6.28	-16.88	-16.88	-16.88	-16.88	-25.80	-25.80	-25.80	-25.80
<b>03:00</b>	-6.37	-6.37	-6.37	-6.37	-17.01	-17.01	-17.01	-17.01	-26.04	-26.04	-26.04	-26.04
<b>04:00</b>	-6.45	-6.45	-6.45	-6.45	-17.04	-17.04	-17.04	-17.04	-25.87	-25.87	-25.87	-25.87
<b>05:00</b>	-5.17	-5.17	-5.17	-5.17	-16.09	-16.09	-16.09	-16.09	-25.18	-25.18	-25.18	-25.18
<b>06:00</b>	18.45	17.64	139.63	329.13	4.65	3.96	112.83	279.01	-9.47	-9.97	72.84	197.07
<b>07:00</b>	62.91	67.18	189.32	595.95	45.41	49.15	159.14	522.85	22.76	25.57	112.14	393.75
<b>08:00</b>	102.19	105.31	239.71	682.69	82.39	85.26	205.85	601.99	52.81	55.13	150.36	461.84
<b>09:00</b>	136.35	135.59	242.35	685.11	115.85	115.23	211.47	608.08	80.62	80.22	157.53	472.02
<b>10:00</b>	162.18	162.13	226.10	572.15	141.19	141.12	198.95	509.65	101.87	101.78	148.60	396.26
<b>11:00</b>	179.56	180.22	213.20	408.66	158.08	158.67	188.71	366.99	116.75	117.21	141.75	287.00
<b>12:00</b>	193.53	193.87	216.05	231.51	172.67	172.93	192.96	209.99	129.35	129.52	145.64	164.30
<b>13:00</b>	194.78	352.06	226.48	192.37	175.36	312.68	203.31	173.19	133.17	236.29	154.73	132.18
<b>14:00</b>	187.38	512.33	231.43	187.28	168.39	457.19	207.69	168.29	127.90	351.28	158.59	127.83
<b>15:00</b>	187.01	576.49	257.55	188.69	170.74	516.43	233.21	172.21	129.92	400.59	178.56	131.02
<b>16:00</b>	175.21	500.72	248.73	176.11	161.82	449.32	226.51	162.64	123.25	350.38	173.89	123.93
<b>17:00</b>	132.53	281.48	175.83	131.62	122.68	255.26	161.08	121.89	92.69	200.65	123.58	92.09
<b>18:00</b>	53.44	53.57	53.73	53.97	50.00	51.19	50.58	50.47	35.55	39.29	36.82	35.91
<b>19:00</b>	22.65	22.65	22.65	22.65	16.90	16.91	16.90	16.90	7.04	7.19	7.09	7.04
<b>20:00</b>	16.03	16.03	16.03	16.03	8.63	8.63	8.63	8.63	-1.20	-1.19	-1.20	-1.20
<b>21:00</b>	12.29	12.29	12.29	12.29	3.62	3.62	3.62	3.62	-5.93	-5.93	-5.93	-5.93
<b>22:00</b>	11.01	11.01	11.01	11.01	2.61	2.61	2.61	2.61	-7.38	-7.38	-7.38	-7.38
<b>23:00</b>	10.69	10.69	10.69	10.69	1.37	1.37	1.37	1.37	-8.63	-8.63	-8.63	-8.63
<b>24:00</b>	8.79	8.79	8.79	8.79	-0.16	-0.16	-0.16	-0.16	-9.86	-9.86	-9.86	-9.86
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	1890.31 (W-h/m <sup>2</sup> )	3243.38 (W-h/m <sup>2</sup> )	2764.90 (W-h/m <sup>2</sup> )	4540.03 (W-h/m <sup>2</sup> )	1678.26 (W-h/m <sup>2</sup> )	2877.43 (W-h/m <sup>2</sup> )	2461.32 (W-h/m <sup>2</sup> )	4056.28 (W-h/m <sup>2</sup> )	1307.07 (W-h/m <sup>2</sup> )	2248.98 (W-h/m <sup>2</sup> )	1906.04 (W-h/m <sup>2</sup> )	3166.16 (W-h/m <sup>2</sup> )

Tabla 4.6. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); octubre, día más cálido.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	-7.49	-7.49	-7.49	-7.49	-17.65	-17.65	-17.65	-17.65	-25.45	-25.45	-25.45	-25.45
<b>02:00</b>	-11.59	-11.59	-11.59	-11.59	-21.18	-21.18	-21.18	-21.18	-29.33	-29.33	-29.33	-29.33
<b>03:00</b>	-11.67	-11.67	-11.67	-11.67	-22.02	-22.02	-22.02	-22.02	-30.39	-30.39	-30.39	-30.39
<b>04:00</b>	-7.81	-7.81	-7.81	-7.81	-18.79	-18.79	-18.79	-18.79	-27.85	-27.85	-27.85	-27.85
<b>05:00</b>	-8.25	-8.25	-8.25	-8.25	-18.28	-18.28	-18.28	-18.28	-26.79	-26.79	-26.79	-26.79
<b>06:00</b>	-5.34	-3.36	-3.47	8.35	-16.94	-15.28	-15.37	-5.44	-26.51	-25.30	-25.37	-18.13
<b>07:00</b>	112.20	56.76	56.83	331.79	85.85	37.25	37.31	278.21	50.72	14.49	14.53	193.91
<b>08:00</b>	286.94	97.71	97.77	621.44	245.16	75.55	75.60	551.67	176.55	46.45	46.49	418.13
<b>09:00</b>	431.05	118.43	138.10	696.77	378.52	111.72	111.92	625.83	285.42	76.65	76.81	485.57
<b>10:00</b>	527.19	170.92	172.48	564.69	468.48	145.41	146.80	508.69	360.12	105.62	106.67	400.32
<b>11:00</b>	587.90	194.69	194.17	395.96	525.44	166.61	166.20	355.91	408.12	124.38	124.14	281.83
<b>12:00</b>	627.11	237.27	208.42	206.91	562.09	208.44	183.97	186.21	438.06	156.70	138.86	147.10
<b>13:00</b>	645.70	501.51	218.65	220.39	579.75	443.70	193.79	195.33	452.93	336.99	147.07	148.73
<b>14:00</b>	608.42	721.57	213.19	212.54	548.12	644.96	188.33	187.70	430.83	499.02	144.58	144.12
<b>15:00</b>	510.80	874.73	182.82	183.39	460.67	783.72	163.24	163.71	363.02	610.77	124.79	125.12
<b>16:00</b>	405.30	978.86	146.88	146.16	365.29	870.43	135.40	134.77	285.83	678.52	102.44	101.97
<b>17:00</b>	255.05	976.74	87.36	87.81	230.31	869.38	80.05	80.46	179.97	679.10	59.37	59.69
<b>18:00</b>	35.04	40.30	34.18	34.18	32.75	51.46	29.54	29.53	25.47	64.62	18.15	18.13
<b>19:00</b>	27.83	27.84	27.83	27.83	20.89	21.07	20.86	20.86	9.82	11.75	9.46	9.46
<b>20:00</b>	23.63	23.63	23.63	23.63	15.56	15.56	15.56	15.56	4.23	4.34	4.21	4.21
<b>21:00</b>	21.02	21.02	21.02	21.02	13.24	13.24	13.24	13.24	2.07	2.08	2.07	2.07
<b>22:00</b>	18.96	18.96	18.96	18.96	11.95	11.95	11.95	11.95	0.91	0.91	0.91	0.91
<b>23:00</b>	15.76	15.76	15.76	15.76	6.86	6.86	6.86	6.86	-3.41	-3.41	-3.41	-3.41
<b>24:00</b>	9.18	9.18	9.18	9.18	0.02	0.02	0.02	0.02	-9.13	-9.13	-9.13	-9.13
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	5192.90 (W-h/m <sup>2</sup> )	5127.72 (W-h/m <sup>2</sup> )	1909.18 (W-h/m <sup>2</sup> )	3865.24 (W-h/m <sup>2</sup> )	4656.98 (W-h/m <sup>2</sup> )	4581.70 (W-h/m <sup>2</sup> )	1685.10 (W-h/m <sup>2</sup> )	3461.04 (W-h/m <sup>2</sup> )	3635.64 (W-h/m <sup>2</sup> )	3572.75 (W-h/m <sup>2</sup> )	1280.98 (W-h/m <sup>2</sup> )	2694.46 (W-h/m <sup>2</sup> )

Tabla 4.7. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); octubre, día más frío.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	-11.18	-11.18	-11.18	-11.18	-20.81	-20.81	-20.81	-20.81	-27.76	-27.76	-27.76	-27.76
<b>02:00</b>	-16.56	-16.56	-16.56	-16.56	-25.70	-25.70	-25.70	-25.70	-32.69	-32.69	-32.69	-32.69
<b>03:00</b>	-21.33	-21.33	-21.33	-21.33	-29.80	-29.80	-29.80	-29.80	-36.78	-36.78	-36.78	-36.78
<b>04:00</b>	-24.92	-24.92	-24.92	-24.92	-33.46	-33.46	-33.46	-33.46	-40.07	-40.07	-40.07	-40.07
<b>05:00</b>	-26.72	-26.72	-26.72	-26.72	-35.55	-35.55	-35.55	-35.55	-42.10	-42.10	-42.10	-42.10
<b>06:00</b>	-27.41	-27.41	-27.41	-27.41	-36.08	-36.08	-36.08	-36.08	-42.68	-42.68	-42.68	-42.68
<b>07:00</b>	193.34	24.07	24.07	573.94	157.24	7.64	7.64	495.89	102.52	-10.27	-10.27	359.62
<b>08:00</b>	368.49	56.46	56.46	754.35	319.14	38.79	38.79	671.17	234.46	16.81	16.81	514.19
<b>09:00</b>	483.70	122.23	119.91	668.07	424.91	99.84	97.67	595.29	321.23	65.97	64.24	462.00
<b>10:00</b>	565.35	150.08	150.49	540.19	501.39	127.36	127.74	482.86	384.83	90.15	90.42	376.73
<b>11:00</b>	639.62	170.92	170.80	362.70	568.89	147.56	147.45	324.28	438.74	107.66	107.57	253.17
<b>12:00</b>	674.48	219.04	183.72	183.25	603.04	189.19	159.15	161.56	468.03	139.73	117.81	125.00
<b>13:00</b>	643.40	455.22	181.04	181.54	576.52	400.79	157.93	158.43	449.81	302.58	117.62	118.43
<b>14:00</b>	552.67	583.87	158.48	159.21	495.99	519.84	138.85	139.42	388.33	400.22	103.40	103.81
<b>15:00</b>	429.30	636.85	145.63	143.83	385.10	570.22	123.66	122.16	302.60	443.41	91.58	90.54
<b>16:00</b>	277.37	523.74	123.63	124.96	249.39	474.14	106.17	107.32	197.46	374.83	79.35	80.17
<b>17:00</b>	41.38	46.46	58.94	58.24	39.11	51.09	49.64	49.00	33.99	52.25	35.74	35.27
<b>18:00</b>	20.07	20.08	20.07	20.07	14.56	14.68	14.51	14.51	5.76	6.70	5.27	5.27
<b>19:00</b>	11.05	11.05	11.05	11.05	4.15	4.15	4.15	4.15	-4.69	-4.65	-4.71	-4.71
<b>20:00</b>	8.05	8.05	8.05	8.05	0.02	0.02	0.02	0.02	-9.08	-9.08	-9.09	-9.09
<b>21:00</b>	6.80	6.80	6.80	6.80	-0.98	-0.98	-0.98	-0.98	-10.26	-10.26	-10.26	-10.26
<b>22:00</b>	3.51	3.51	3.51	3.51	-4.95	-4.95	-4.95	-4.95	-13.19	-13.19	-13.19	-13.19
<b>23:00</b>	-1.45	-1.45	-1.45	-1.45	-10.62	-10.62	-10.62	-10.62	-18.36	-18.36	-18.36	-18.36
<b>24:00</b>	0.12	0.12	0.12	0.12	-10.32	-10.32	-10.32	-10.32	-19.28	-19.28	-19.28	-19.28
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	5042.62 (W-h/m <sup>2</sup> )	3162.42 (W-h/m <sup>2</sup> )	1546.69 (W-h/m <sup>2</sup> )	3923.80 (W-h/m <sup>2</sup> )	4532.16 (W-h/m <sup>2</sup> )	2838.02 (W-h/m <sup>2</sup> )	1366.08 (W-h/m <sup>2</sup> )	3518.77 (W-h/m <sup>2</sup> )	3601.18 (W-h/m <sup>2</sup> )	2283.96 (W-h/m <sup>2</sup> )	1113.53 (W-h/m <sup>2</sup> )	2797.65 (W-h/m <sup>2</sup> )



Tabla 4.8. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); diciembre, día más cálido.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	-9.24	-9.24	-9.24	-9.24	-19.43	-19.43	-19.43	-19.43	-26.67	-26.67	-26.67	-26.67
<b>02:00</b>	-9.40	-9.40	-9.40	-9.40	-19.69	-19.69	-19.69	-19.69	-27.20	-27.20	-27.20	-27.20
<b>03:00</b>	-11.52	-11.52	-11.52	-11.52	-21.58	-21.58	-21.58	-21.58	-28.62	-28.62	-28.62	-28.62
<b>04:00</b>	-15.49	-15.49	-15.49	-15.49	-25.66	-25.66	-25.66	-25.66	-31.88	-31.88	-31.88	-31.88
<b>05:00</b>	-18.54	-18.54	-18.54	-18.54	-28.58	-28.58	-28.58	-28.58	-35.11	-35.11	-35.11	-35.11
<b>06:00</b>	-17.53	-17.53	-17.53	-17.53	-28.44	-28.44	-28.44	-28.44	-35.36	-35.36	-35.36	-35.36
<b>07:00</b>	371.36	14.36	14.21	734.59	316.84	-0.41	-0.55	641.03	225.53	-14.79	-14.91	472.08
<b>08:00</b>	531.36	71.99	71.69	777.35	463.15	52.60	52.35	686.71	348.34	27.24	27.07	528.43
<b>09:00</b>	653.00	119.01	119.55	701.26	572.39	98.71	99.16	618.56	436.80	65.42	65.74	478.94
<b>10:00</b>	696.85	145.75	144.49	534.40	613.77	128.84	127.75	473.05	471.38	91.96	91.16	365.97
<b>11:00</b>	714.14	144.09	144.72	328.53	634.19	129.82	130.71	295.99	489.97	94.85	95.89	230.44
<b>12:00</b>	695.87	187.23	161.68	167.89	621.30	168.39	146.72	154.28	483.16	124.59	108.89	119.01
<b>13:00</b>	638.07	354.05	173.37	173.08	571.04	316.44	158.60	158.36	444.71	239.20	119.22	119.29
<b>14:00</b>	542.57	454.83	180.71	181.12	489.30	408.18	164.64	165.01	383.04	314.18	124.76	125.05
<b>15:00</b>	374.33	411.49	167.23	166.78	340.40	371.82	154.07	153.69	268.20	289.77	117.46	117.18
<b>16:00</b>	162.85	183.96	114.65	115.30	150.11	169.92	104.68	105.22	119.68	136.20	79.84	80.22
<b>17:00</b>	40.83	48.50	44.37	45.55	35.24	42.05	38.35	39.44	25.24	30.66	26.78	27.66
<b>18:00</b>	30.04	30.04	30.04	30.04	22.09	22.11	22.10	22.10	10.92	11.03	10.92	10.94
<b>19:00</b>	21.06	21.06	21.06	21.06	14.58	14.58	14.58	14.58	4.01	4.01	4.01	4.01
<b>20:00</b>	14.27	14.27	14.27	14.27	7.44	7.44	7.44	7.44	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11
<b>21:00</b>	9.38	9.38	9.38	9.38	2.09	2.09	2.09	2.09	-6.98	-6.98	-6.98	-6.98
<b>22:00</b>	5.32	5.32	5.32	5.32	-2.74	-2.74	-2.74	-2.74	-11.24	-11.24	-11.24	-11.24
<b>23:00</b>	0.24	0.24	0.24	0.24	-8.60	-8.60	-8.60	-8.60	-16.39	-16.39	-16.39	-16.39
<b>24:00</b>	-8.53	-8.53	-8.53	-8.53	-17.55	-17.55	-17.55	-17.55	-23.81	-23.81	-23.81	-23.81
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	5582.91 (W-h/m <sup>2</sup> )	2296.94 (W-h/m <sup>2</sup> )	1498.35 (W-h/m <sup>2</sup> )	4087.53 (W-h/m <sup>2</sup> )	5007.71 (W-h/m <sup>2</sup> )	2087.18 (W-h/m <sup>2</sup> )	1377.57 (W-h/m <sup>2</sup> )	3691.33 (W-h/m <sup>2</sup> )	3931.11 (W-h/m <sup>2</sup> )	1664.03 (W-h/m <sup>2</sup> )	1106.78 (W-h/m <sup>2</sup> )	2899.35 (W-h/m <sup>2</sup> )

Tabla 4.9. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); diciembre, día más frío.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	-77.49	-77.49	-77.49	-77.49	-84.15	-84.15	-84.15	-84.15	-91.67	-91.67	-91.67	-91.67
<b>02:00</b>	-77.81	-77.81	-77.81	-77.81	-82.23	-82.23	-82.23	-82.23	-84.76	-84.76	-84.76	-84.76
<b>03:00</b>	-75.46	-75.46	-75.46	-75.46	-75.38	-75.38	-75.38	-75.38	-80.29	-80.29	-80.29	-80.29
<b>04:00</b>	-72.22	-72.22	-72.22	-72.22	-74.93	-74.93	-74.93	-74.93	-78.65	-78.65	-78.65	-78.65
<b>05:00</b>	-71.10	-71.10	-71.10	-71.10	-71.01	-71.01	-71.01	-71.01	-75.95	-75.95	-75.95	-75.95
<b>06:00</b>	-69.67	-69.67	-69.67	-69.67	-71.36	-71.36	-71.36	-71.36	-75.55	-75.55	-75.55	-75.55
<b>07:00</b>	377.24	-41.35	-40.70	-60.17	316.09	-51.13	-50.58	-67.32	211.93	-60.48	-60.07	-72.34
<b>08:00</b>	540.00	33.49	33.00	790.41	475.91	14.36	13.92	701.56	352.90	-9.27	-9.59	520.45
<b>09:00</b>	638.63	90.01	91.33	692.73	564.43	66.76	67.92	618.63	429.85	35.35	36.22	478.87
<b>10:00</b>	701.97	107.14	107.05	531.84	617.04	84.77	84.73	468.90	474.09	54.45	54.47	364.07
<b>11:00</b>	730.13	121.99	122.07	348.22	647.64	99.10	99.14	307.35	498.32	66.14	66.14	236.44
<b>12:00</b>	722.70	127.51	122.58	145.90	640.16	105.39	101.22	125.74	495.59	72.01	69.00	94.56
<b>13:00</b>	682.74	293.88	111.25	110.01	608.85	252.81	91.79	90.60	472.41	184.47	62.70	62.39
<b>14:00</b>	586.89	435.02	117.08	116.83	521.39	381.20	98.43	98.21	405.70	287.88	68.27	68.14
<b>15:00</b>	410.52	423.66	114.51	114.73	366.42	375.42	95.94	96.11	286.81	288.93	66.88	67.01
<b>16:00</b>	173.14	218.09	80.94	80.73	152.53	192.87	66.17	66.00	118.89	150.05	44.54	44.42
<b>17:00</b>	3.34	4.28	6.27	6.50	-3.46	-1.97	-1.80	-1.60	-7.60	-5.35	-8.71	-8.56
<b>18:00</b>	-12.99	-12.99	-12.99	-12.99	-22.16	-22.14	-22.17	-22.17	-27.11	-26.97	-27.30	-27.30
<b>19:00</b>	-23.98	-23.98	-23.98	-23.98	-35.18	-35.18	-35.18	-35.18	-38.45	-38.44	-38.46	-38.46
<b>20:00</b>	-31.88	-31.88	-31.88	-31.88	-44.04	-44.04	-44.04	-44.04	-46.91	-46.91	-46.91	-46.91
<b>21:00</b>	-35.75	-35.75	-35.75	-35.75	-49.77	-49.77	-49.77	-49.77	-52.17	-52.17	-52.17	-52.17
<b>22:00</b>	-36.52	-36.52	-36.52	-36.52	-50.15	-50.15	-50.15	-50.15	-53.28	-53.28	-53.28	-53.28
<b>23:00</b>	-38.02	-38.02	-38.02	-38.02	-51.89	-51.89	-51.89	-51.89	-54.27	-54.27	-54.27	-54.27
<b>24:00</b>	-48.09	-48.09	-48.09	-48.09	-60.74	-60.74	-60.74	-60.74	-61.10	-61.10	-61.10	-61.10
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	6175.49 (W-h/m <sup>2</sup> )	2504.61 (W-h/m <sup>2</sup> )	1554.97 (W-h/m <sup>2</sup> )	3606.26 (W-h/m <sup>2</sup> )	5614.47 (W-h/m <sup>2</sup> )	2326.31 (W-h/m <sup>2</sup> )	1472.20 (W-h/m <sup>2</sup> )	3342.58 (W-h/m <sup>2</sup> )	4497.87 (W-h/m <sup>2</sup> )	1958.01 (W-h/m <sup>2</sup> )	1290.57 (W-h/m <sup>2</sup> )	2761.23 (W-h/m <sup>2</sup> )

### 4.3. Flujos de calor mensuales

Los flujos de calor totales a lo largo del día, para los veinticuatro días seleccionados para llevar a cabo las modelaciones numéricas, se obtuvieron a través de una integración numérica por medio de la regla del trapecio, esto se realizó para las tres configuraciones de ventana, orientadas hacia diferentes direcciones.

$$\int_{t_{inicial}}^{t_{final}} q_{total-int}(t) dt = \frac{\Delta t}{2} \left[ \left( q_{total-int}(t_{inicial}) + q_{total-int}(t_{final}) \right) + 2 \cdot \sum_{t_{inicial+\Delta t}}^{t_{final-\Delta t}} q_{total-int}(t) \right] \quad (4.2)$$

Los resultados obtenidos de la integración numérica para todos los días de modelación, se presentan en las tablas 4.10 y 4.11, junto con los porcentajes de reducción de las configuraciones de vidrios múltiples (C2 y C3) con respecto a la configuración de referencia (C1).

#### 4.3.1. Orientación sur

Para la orientación sur, la configuración C3 para los días cálidos obtuvo los valores máximos de reducción de flujo de calor total durante el día más cálido del mes de julio, con porcentajes de 35.94 y 26% con respecto a las configuraciones C1 y C2, respectivamente. Para los días más cálidos de todo el año al considerar las ventanas hacia la orientación sur, los porcentajes de reducción de C3 con respecto a C1 se mantuvieron en un intervalo de 28.17 a 35.94%, por otra parte, al comparar los flujos de calor total mensuales de C3 con respecto a C2 se obtuvo un intervalo de reducción de 20.31 a 26%. Al comparar la configuración C2 con respecto a C1, el porcentaje de reducción varió de 9.28 a 13.63%.

Para los días seleccionados por presentar la menor temperatura de los doce meses, se encontró que el intervalo de reducción del flujo de calor total de C3 con respecto a C1 fue de 16.90 a 30.85%. El porcentaje más alto de reducción de flujo de calor se presentó nuevamente para el mes de julio.

#### 4.3.2. Orientación oeste

Para la orientación oeste para los días más cálidos del año, los porcentajes de reducción de flujo de calor se mantuvieron en un intervalo de 27.55 a 34.14% para la configuración C3

---

con respecto a C1, mientras que al comparar la configuración C3 con respecto a C2, los porcentajes fueron de 20.25 a 24.56%, teniendo los valores máximos de reducción para el mes de julio. Por otra parte, al comparar C2 con respecto a C1 el intervalo de reducción fue de 9.28 a 13.63%. Para los días más fríos del año, el porcentaje de reducción fue de 16.92 a 30.66%, al comparar C3 con respecto a C1 y de 13.21 a 21.84% al comparar C3 con C2. Para la configuración C2 los porcentajes de reducción se mantuvieron en un intervalo de 4.28 a 12.49%.

#### 4.3.3. Orientación norte

Para la orientación norte, el intervalo de reducción de los flujos de calor para los días más cálidos del año, se mantuvo, así como en las otras orientaciones con un valor máximo por encima del 34%, y un valor mínimo por arriba del 25%, esto al comparar la configuración C3 con C1, nuevamente para el mes más cálido del año, julio se obtuvo el porcentaje más alto de reducción.

Por otra parte, para los días con menor temperatura del año, el porcentaje de reducción que logró la configuración C3 se mantuvo de 15.14 a 31.24%. Sin embargo, al comparar la configuración C2 con C1, la reducción de los flujos calor no es tan prominente, y el intervalo decae de 3.20 a 12.92%, alcanzando el valor mínimo durante el mes de enero y el valor máximo en agosto.

#### 4.3.4. Orientación este

Para la orientación en la que se presentan los valores más altos de radiación solar, aunque durante un menor número de horas durante el día, la orientación este, presentó un intervalo de reducción de 27.35 a 33.03% para los días cálidos y de 16.11 a 30.26% para los días fríos, al comparar C3 con respecto a C1. Los valores máximos de reducción de flujo de calor, ocurrieron durante el día más cálido y más frío del mes de julio, mientras que los valores mínimos se presentaron en el mes de enero.

### 4.4. Porcentajes de reducción

Los valores de reducción de flujo de calor, son acorde al comportamiento térmico observado en la sección anterior, en donde cualitativamente se observó la disminución de los flujos de calor mediante el uso de la configuración C3. La reducción de los flujos de calor por el uso

de la configuración C3 se hace más prominente durante las horas en donde existe radiación solar, de ahí provienen los valores de reducción más altos.

Por lo anterior, se puede resumir lo siguiente, al comparar la configuración C3 con la configuración de referencia (C1), el porcentaje de reducción promedio está por encima del 30% para las cuatro orientaciones, teniendo un promedio de 31.08, 30.28, 30.07 y 30.17% en la orientación sur, oeste, norte y este, respectivamente. Por otra parte, al comparar los resultados obtenidos por el uso de C2 con respecto a C1, el porcentaje de reducción promedio es de aproximadamente 10%. Al comparar las configuraciones de vidrios múltiples, es decir, la configuración C3 con respecto a C2, el porcentaje de reducción promedio es de aproximadamente 22%, para las cuatro orientaciones, todo esto para los días con mayor temperatura durante el año. Por otra parte, la orientación sur fue la orientación con la que se pudo mejorar el desempeño térmico de la ventana, esto debido a que para esta orientación el uso de la configuración C3 mostró el mejor intervalo de reducción de los flujos de calor, esto se debe a los valores mínimo y máximo alcanzado por la configuración C3 orientada en esta dirección.

Para los días más fríos del año, el promedio de reducción de los flujos de calor estuvo por encima del 25% para tres orientaciones (sur, oeste y este), sin embargo, para la orientación norte no ocurre lo mismo y el promedio de reducción se mantuvo una unidad por debajo del promedio para las demás orientaciones, esto corresponde a la comparación de C3 con respecto a C1. Resultados similares se obtuvieron al comparar la configuración C2 con C1 y C3 con C2 para esta orientación, esto se debe a que en esta orientación la mayor parte del año, la orientación norte no recibe rayos directos del sol y esto se traduce en bajos valores de radiación solar incidente sobre las ventanas, sin importar la configuración que se utilice. Por otra parte, al comprar la configuración C2 con C1 (aproximadamente 9%) y C3 con C2 (aproximadamente 19%), los porcentajes de reducción son muy similares a los obtenidos para los días cálido, con excepción de la orientación norte. De acuerdo a las tablas 4.10 y 4.11 el promedio de reducción mayor para la configuración C3 y C2 se obtuvo con la orientación sur.

Tabla 4.10. Flujos de calor mensuales y porcentajes de reducción, días más cálidos.

Mes	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>Enero</b>	4960.15	3283.66	1359.75	1933.25	4471.23	2973.92	1247.42	1760.73	3563.06	2371.81	1013.87	1404.45
<b>Febrero</b>	4994.51	4015.66	1570	3950.49	4485.78	3606.38	1446.29	3554.56	3511.19	2833.64	1149.41	2780.09
<b>Marzo</b>	3818.77	3839.77	1853.23	3151.13	3464.48	3484.6	1721.76	2867.41	2743.06	2757.69	1373.08	2260.95
<b>Abril</b>	3101.33	3940.91	1888.04	4464.1	2794.54	3548.67	1702.86	3956.85	2168.62	2762.24	1304.57	3046.17
<b>Mayo</b>	1996.81	2924.78	2543.08	4051.81	1773.92	2596.83	2260.43	3601.93	1312.68	1959.14	1695.56	2749.86
<b>Junio</b>	2021.86	3748.55	3249.36	5369.42	1749.24	3305.01	2870.34	4810.55	1331.33	2559.54	2211.51	3751.91
<b>Julio</b>	2389.52	3466.92	3168.75	5786.65	2063.88	3023.82	2766.27	5139.94	1530.83	2283.44	2083.42	3959.32
<b>Agosto</b>	2381.83	4773.34	2320.94	2651.34	2101.06	4227.93	2044.42	2339.1	1588.44	3262.89	1544.18	1775.69
<b>Septiembre</b>	2850.96	5247.26	1958.95	3685.38	2563.56	4685.86	1759.05	3313.26	1989.52	3647.08	1351.51	2581.89
<b>Octubre</b>	5192.9	5127.72	1909.18	3865.24	4656.98	4581.7	1685.1	3461.04	3635.64	3572.75	1280.98	2694.46
<b>Noviembre</b>	5501.59	2635.38	1515.58	4075.6	4930.41	2374.25	1375.28	3668.26	3880.87	1865.6	1079.23	2896.6
<b>Diciembre</b>	5582.91	2296.94	1498.35	4087.53	5007.71	2087.18	1377.57	3691.33	3931.11	1664.03	1106.78	2899.35

Porcentajes de reducción

	% de reducción de C2-C1				% de reducción de C3-C1				% de reducción de C3-C2			
<b>Enero</b>	9.86	9.86	9.86	9.86	28.17	27.77	25.44	27.35	20.31	20.25	18.72	20.23
<b>Febrero</b>	10.19	10.19	10.19	10.19	29.70	29.44	26.79	29.63	21.73	21.43	20.53	21.79
<b>Marzo</b>	9.28	9.28	9.28	9.28	28.17	28.18	25.91	28.25	20.82	20.86	20.25	21.15
<b>Abril</b>	9.89	9.89	9.89	9.89	30.07	29.91	30.90	31.76	22.40	22.16	23.39	23.02
<b>Mayo</b>	11.16	11.16	11.16	11.16	34.26	33.02	33.33	32.13	26.00	24.56	24.99	23.66
<b>Junio</b>	13.48	13.48	13.48	13.48	34.15	31.72	31.94	30.12	23.89	22.56	22.95	22.01
<b>Julio</b>	13.63	13.63	13.63	13.63	35.94	34.14	34.25	31.58	25.83	24.48	24.68	22.97
<b>Agosto</b>	11.79	11.79	11.79	11.79	33.31	31.64	33.47	33.03	24.40	22.83	24.47	24.09
<b>Septiembre</b>	10.08	10.08	10.08	10.08	30.22	30.50	31.01	29.94	22.39	22.17	23.17	22.07
<b>Octubre</b>	10.32	10.32	10.32	10.32	29.99	30.32	32.90	30.29	21.93	22.02	23.98	22.15
<b>Noviembre</b>	10.38	10.38	10.38	10.38	29.46	29.21	28.79	28.93	21.29	21.42	21.53	21.04
<b>Diciembre</b>	10.30	10.30	10.30	10.30	29.59	27.55	26.13	29.07	21.50	20.27	19.66	21.46
<b>Promedio</b>	10.86	10.86	10.86	10.86	31.08	30.28	30.07	30.17	22.71	22.08	22.36	22.14
<b>Máximo</b>	13.63	13.63	13.63	13.63	35.94	34.14	34.25	33.03	26.00	24.56	24.99	24.09
<b>Mínimo</b>	9.28	9.28	9.28	9.28	28.17	27.55	25.44	27.35	20.31	20.25	18.72	20.23

Tabla 4.11. Flujos de calor mensuales y porcentajes de reducción, días más fríos.

Mes	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>Enero</b>	1667.35	1641.34	1482.87	1513.22	1595.81	1571.13	1435.38	1448.86	1385.56	1363.64	1258.38	1269.38
<b>Febrero</b>	5098.8	3050.65	1332.21	3251.09	4655.34	2807.24	1276.03	2975.37	3735.65	2301.45	1105.64	2382.6
<b>Marzo</b>	3569.55	3632.08	1588.27	4026.56	3226.01	3303.17	1481.71	3636.01	2578.4	2648.88	1221.55	2892.34
<b>Abril</b>	2416.19	3950.93	1611.33	4124.89	2201.95	3548.66	1502.78	3679.09	1783.4	2834.42	1217.21	2889.11
<b>Mayo</b>	2087.42	3212.61	2636.56	5474.83	1855.99	2846.85	2346.57	4903.92	1452.22	2229.4	1813.02	3835.78
<b>Junio</b>	1799.57	3271.25	3123.28	5097.95	1610.28	2906.58	2786.95	4538.58	1272.03	2281.27	2183.97	3562.81
<b>Julio</b>	1890.31	3243.38	2764.9	4540.03	1678.26	2877.43	2461.32	4056.28	1307.07	2248.98	1906.04	3166.16
<b>Agosto</b>	2132.29	2782.69	2002.17	3478.6	1863.03	2435.02	1743.48	3076.72	1502.74	1952.97	1406.2	2461.28
<b>Septiembre</b>	3608.02	3222.26	1633.78	4382.48	3304.41	2959.6	1550.31	3975.34	2659.94	2375.66	1280.81	3162.81
<b>Octubre</b>	5042.62	3162.42	1546.69	3923.8	4532.16	2838.02	1366.08	3518.77	3601.18	2283.96	1113.53	2797.65
<b>Noviembre</b>	5671.68	2478.87	1513.92	4243.05	5131.3	2267.09	1409.48	3878.28	4118.5	1879.54	1221.36	3141.07
<b>Diciembre</b>	6175.49	2504.61	1554.97	3606.26	5614.47	2326.31	1472.2	3342.58	4497.87	1958.01	1290.57	2761.23

Porcentajes de reducción

	% de reducción de C2-C1				% de reducción de C3-C1				% de reducción de C3-C2			
<b>Enero</b>	4.29	4.28	3.20	4.25	16.90	16.92	15.14	16.11	13.18	13.21	12.33	12.39
<b>Febrero</b>	8.70	7.98	4.22	8.48	26.73	24.56	17.01	26.71	19.76	18.02	13.35	19.92
<b>Marzo</b>	9.62	9.06	6.71	9.70	27.77	27.07	23.09	28.17	20.07	19.81	17.56	20.45
<b>Abril</b>	8.87	10.18	6.74	10.81	26.19	28.26	24.46	29.96	19.01	20.13	19.00	21.47
<b>Mayo</b>	11.09	11.39	11.00	10.43	30.43	30.60	31.24	29.94	21.75	21.69	22.74	21.78
<b>Junio</b>	10.52	11.15	10.77	10.97	29.31	30.26	30.07	30.11	21.01	21.51	21.64	21.50
<b>Julio</b>	11.22	11.28	10.98	10.66	30.85	30.66	31.06	30.26	22.12	21.84	22.56	21.94
<b>Agosto</b>	12.63	12.49	12.92	11.55	29.52	29.82	29.77	29.25	19.34	19.80	19.35	20.00
<b>Septiembre</b>	8.41	8.15	5.11	9.29	26.28	26.27	21.60	27.83	19.50	19.73	17.38	20.44
<b>Octubre</b>	10.12	10.26	11.68	10.32	28.59	27.78	28.01	28.70	20.54	19.52	18.49	20.49
<b>Noviembre</b>	9.53	8.54	6.90	8.60	27.38	24.18	19.32	25.97	19.74	17.09	13.35	19.01
<b>Diciembre</b>	9.08	7.12	5.32	7.31	27.17	21.82	17.00	23.43	19.89	15.83	12.34	17.39
<b>Promedio</b>	9.51	9.32	7.96	9.36	27.26	26.52	23.98	27.20	19.66	19.01	17.51	19.73
<b>Máximo</b>	12.63	12.49	12.92	11.55	30.85	30.66	31.24	30.26	22.12	21.84	22.74	21.94
<b>Mínimo</b>	4.29	4.28	3.20	4.25	16.90	16.92	15.14	16.11	13.18	13.21	12.33	12.39

#### 4.5. Análisis de costos

En esta sección se presenta el análisis de costo anual, del consumo de energía eléctrica que se puede lograr con la implementación de ventanas de vidrios múltiples. El análisis de costos se realiza a partir de los datos obtenidos en las tablas 4.10 y 4.11. De acuerdo al estudio, se tomó la carga térmica total para el día cálido y frío de cada mes, y se consideró que durante el mes existen quince días cálidos y quince días fríos, para así obtener el consumo mensual total, el consumo mensual total en kW-h se cotizó con base a las tarifas que presenta la Comisión Federal de Electricidad. En las tablas 4.13 – 4.15 se presenta la carga térmica y el costo generado para una ventana de 1 m<sup>2</sup>. El análisis de costos se lleva a cabo para la ciudad de Mérida, Yucatán considerando las tarifas de consumo eléctrico proporcionadas por la comisión federal de electricidad (CFE). Las cargas térmicas deben removerse y para ello es necesario el uso de un equipo de aire acondicionado, el cual se considera con una eficiencia del 100% y cuya demanda de energía eléctrica varía de acuerdo al tipo de ventana que se utilice.

Con base en los datos obtenidos de la página oficial de la CFE, los costos por consumo de energía eléctrica para la ciudad de Mérida, Yucatán se presentan en la Tabla 4.12, en donde se muestra el costo por kW-h para los doce meses del año, considerando que partir de octubre del 2019 la comisión federal de electricidad anunció que para esta ciudad la tarifa es la 1C.

Tabla 4.12. Costo por kW-h para diferentes meses.

<b>Mes</b>	<b>Consumo básico (MX \$)</b>	<b>Consumo intermedio (MX \$)</b>	<b>Consumo excedente (MX \$)</b>
<b>Enero</b>	0.831	1.006	2.941
<b>Febrero</b>	0.831	1.006	2.941
<b>Marzo</b>	0.835	1.010	2.955
<b>Abril</b>	0.837	1.012	2.962
<b>Mayo</b>	0.743	0.868	2.969
<b>Junio</b>	0.745	0.870	2.976
<b>Julio</b>	0.747	0.872	1.119
<b>Agosto</b>	0.749	0.874	1.122
<b>Septiembre</b>	0.751	0.876	1.125
<b>Octubre</b>	0.753	0.878	1.128
<b>Noviembre</b>	0.851	1.028	3.011
<b>Diciembre</b>	0.853	1.031	3.018



---

Durante los primeros meses del año (enero - abril) el consumo básico cubre los primeros 75 kW-h del consumo total, el consumo intermedio los siguientes 100 kW-h y los kW-h restantes se cotizan con el costo por consumo excedente. Para los meses restantes el consumo básico se modifica con una tolerancia de 150 kW-h. Con base a esto se obtuvo un consumo total de energía y posteriormente un consumo mensual.

De acuerdo a los datos mostrados en las tablas 4.13 – 4.15 se puede apreciar que el mayor consumo energético es a causa del uso de la configuración C1, debido a que para tres de cuatro orientaciones muestra un costo por consumo energético mayor a los mil pesos, excepto para la orientación norte, esto debido a los resultados obtenidos de flujo de calor en esta orientación en donde los resultados se ven afectados por los bajos valores de la radiación solar incidente (esto se presenta para las tres configuraciones).

Al comparar los costos por el uso de la configuración C2 con respecto a la configuración C1, se obtiene una reducción de 9.79 a 12.70% ( $\approx$ \$100). La orientación sur, la cual, de acuerdo al análisis del efecto de orientación en el comportamiento térmico de las configuraciones, mostró el mejor desempeño, por su parte logró un porcentaje de reducción de casi 11%. Al comparar el costo generado por la configuración C3 con respecto a la configuración C1, se obtuvo un porcentaje de reducción de 28.25 a 35.53% ( $\approx$ \$300), en donde nuevamente la orientación sur muestra un porcentaje de reducción bastante aceptable de aproximadamente 30%.

Tabla 4.13. Costos de consumo eléctrico para la configuración C1.

Mes	Días más cálidos (kW-h) /m <sup>2</sup>				Días más fríos (kW-h) /m <sup>2</sup>				Consumo eléctrico mensual (kW-h) /m <sup>2</sup>			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
Enero	74.40	49.25	20.40	29.00	25.01	24.62	22.24	22.70	99.41	73.88	42.64	51.70
Febrero	74.92	60.23	23.55	59.26	76.48	45.76	19.98	48.77	151.40	105.99	43.53	108.02
Marzo	57.28	57.60	27.80	47.27	53.54	54.48	23.82	60.40	110.82	112.08	51.62	107.67
Abril	46.52	59.11	28.32	66.96	36.24	59.26	24.17	61.87	82.76	118.38	52.49	128.83
Mayo	29.95	43.87	38.15	60.78	31.31	48.19	39.55	82.12	61.26	92.06	77.69	142.90
Junio	30.33	56.23	48.74	80.54	26.99	49.07	46.85	76.47	57.32	105.30	95.59	157.01
Julio	35.84	52.00	47.53	86.80	28.35	48.65	41.47	68.10	64.20	100.65	89.00	154.90
Agosto	35.73	71.60	34.81	39.77	31.98	41.74	30.03	52.18	67.71	113.34	64.85	91.95
Septiembre	42.76	78.71	29.38	55.28	54.12	48.33	24.51	65.74	96.88	127.04	53.89	121.02
Octubre	77.89	76.92	28.64	57.98	75.64	47.44	23.20	58.86	153.53	124.35	51.84	116.84
Noviembre	82.52	39.53	22.73	61.13	85.08	37.18	22.71	63.65	167.60	76.71	45.44	124.78
Diciembre	83.74	34.45	22.48	61.31	92.63	37.57	23.32	54.09	176.38	72.02	45.80	115.41
									Costo mensual (\$)			
									Sur	Oeste	Norte	Este
Enero									86.88	61.39	35.43	42.96
Febrero									139.18	119.26	36.18	89.77
Marzo									98.81	131.03	43.10	89.90
Abril									70.63	142.98	43.93	107.83
Mayo									45.52	83.21	60.07	106.17
Junio									42.70	78.45	71.21	116.97
Julio									47.96	75.19	66.49	115.71
Agosto									50.72	84.89	48.57	68.87
Septiembre									72.76	95.41	40.47	90.88
Octubre									116.05	93.64	39.03	87.98
Noviembre									145.74	65.28	38.67	106.19
Diciembre									155.14	61.44	39.07	98.44
Total anual									1072.10	1092.17	562.23	1121.68

Tabla 4.14. Costos de consumo eléctrico para la configuración C2.

Mes	Días más cálidos (kW-h) /m <sup>2</sup>				Días más fríos (kW-h) /m <sup>2</sup>				Consumo eléctrico mensual (kW-h) /m <sup>2</sup>				
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	
Enero	67.07	44.61	18.71	26.41	23.94	23.57	21.53	21.73	91.01	68.18	40.24	48.14	
Febrero	67.29	54.10	21.69	53.32	69.83	42.11	19.14	44.63	137.12	96.20	40.83	97.95	
Marzo	51.97	52.27	25.83	43.01	48.39	49.55	22.23	54.54	100.36	101.82	48.05	97.55	
Abril	41.92	53.23	25.54	59.35	33.03	53.23	22.54	55.19	74.95	106.46	48.08	114.54	
Mayo	26.61	38.95	33.91	54.03	27.84	42.70	35.20	73.56	54.45	81.66	69.11	127.59	
Junio	26.24	49.58	43.06	72.16	24.15	43.60	41.80	68.08	50.39	93.17	84.86	140.24	
Julio	30.96	45.36	41.49	77.10	25.17	43.16	36.92	60.84	56.13	88.52	78.41	137.94	
Agosto	31.52	63.42	30.67	35.09	27.95	36.53	26.15	46.15	59.46	99.94	56.82	81.24	
Septiembre	38.45	70.29	26.39	49.70	49.57	44.39	23.25	59.63	88.02	114.68	49.64	109.33	
Octubre	69.85	68.73	25.28	51.92	67.98	42.57	20.49	52.78	137.84	111.30	45.77	104.70	
Noviembre	73.96	35.61	20.63	55.02	76.97	34.01	21.14	58.17	150.93	69.62	41.77	113.20	
Diciembre	75.12	31.31	20.66	55.37	84.22	34.89	22.08	50.14	159.33	66.20	42.75	105.51	
									Costo mensual (\$)				
									Sur	Oeste	Norte	Este	
									Enero	78.43	56.65	33.44	40.01
									Febrero	124.81	101.28	33.93	81.40
									Marzo	88.24	112.10	40.12	81.46
									Abril	62.73	120.94	40.25	95.87
									Mayo	40.46	66.45	51.35	94.80
									Junio	37.54	69.41	63.22	104.48
									Julio	41.93	66.12	58.58	103.04
									Agosto	44.54	74.86	42.56	60.85
									Septiembre	66.10	86.13	37.28	82.11
									Octubre	103.79	83.81	34.46	78.84
									Noviembre	128.60	59.25	35.55	96.33
									Diciembre	137.57	56.47	36.46	90.00
									Total anual	954.74	953.47	507.20	1009.17

Tabla 4.15. Costos de consumo eléctrico para la configuración C3.

Mes	Días más cálidos (kW-h) /m <sup>2</sup>				Días más fríos (kW-h) /m <sup>2</sup>				Consumo eléctrico mensual (kW-h) /m <sup>2</sup>				
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	
Enero	53.45	35.58	15.21	21.07	20.78	20.45	18.88	19.04	74.23	56.03	34.08	40.11	
Febrero	52.67	42.50	17.24	41.70	56.03	34.52	16.58	35.74	108.70	77.03	33.83	77.44	
Marzo	41.15	41.37	20.60	33.91	38.68	39.73	18.32	43.39	79.82	81.10	38.92	77.30	
Abril	32.53	41.43	19.57	45.69	26.75	42.52	18.26	43.34	59.28	83.95	37.83	89.03	
Mayo	19.69	29.39	25.43	41.25	21.78	33.44	27.20	57.54	41.47	62.83	52.63	98.78	
Junio	19.97	38.39	33.17	56.28	19.08	34.22	32.76	53.44	39.05	72.61	65.93	109.72	
Julio	22.96	34.25	31.25	59.39	19.61	33.73	28.59	47.49	42.57	67.99	59.84	106.88	
Agosto	23.83	48.94	23.16	26.64	22.54	29.29	21.09	36.92	46.37	78.24	44.26	63.55	
Septiembre	29.84	54.71	20.27	38.73	39.90	35.63	19.21	47.44	69.74	90.34	39.48	86.17	
Octubre	54.53	53.59	19.21	40.42	54.02	34.26	16.70	41.96	108.55	87.85	35.92	82.38	
Noviembre	58.21	27.98	16.19	43.45	61.78	28.19	18.32	47.12	119.99	56.18	34.51	90.57	
Diciembre	58.97	24.96	16.60	43.49	67.47	29.37	19.36	41.42	126.43	54.33	35.96	84.91	
									Costo mensual (\$)				
									Sur	Oeste	Norte	Este	
									Enero	61.68	46.56	28.32	33.33
									Febrero	96.23	66.05	28.11	64.35
									Marzo	67.50	73.88	32.50	64.54
									Abril	49.62	79.32	31.66	74.52
									Mayo	30.81	46.68	39.10	73.40
									Junio	29.09	54.10	49.12	81.74
									Julio	31.80	50.79	44.70	79.84
									Agosto	34.73	58.60	33.15	47.60
									Septiembre	52.38	67.85	29.65	64.71
									Octubre	81.74	66.15	27.05	62.03
									Noviembre	102.11	47.81	29.37	77.07
									Diciembre	107.85	46.34	30.67	72.43
									Total anual	745.54	704.12	403.40	795.57

Una vez que se llevó a cabo la evaluación térmica mediante los valores obtenidos de flujo de calor hacia el interior de las tres configuraciones de ventana, en el siguiente capítulo se describen las conclusiones del presente trabajo de tesis. En este capítulo se engloban los resultados más relevantes del estudio térmico realizado, y posteriormente, se presentan también algunas recomendaciones para trabajos futuros enfocados al estudio térmico de ventanas de vidrios múltiples.

---

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones finales de este trabajo de tesis, todas ellas con base en la información presentada en los capítulos anteriores. Así mismo, se presentan algunas recomendaciones para trabajos futuros, con la finalidad de que la búsqueda por mejorar el desempeño térmico de las ventanas siga su curso.

#### 5.1. Conclusiones

En este trabajo se estudió la transferencia de calor conjugada (conducción, convección y radiación) en ventanas de vidrio simple, doble y triple, para evaluar su desempeño térmico a lo largo del día bajo condiciones de clima cálido de la República Mexicana. La evaluación térmica de las ventanas se realizó para los días más cálidos y más fríos de cada mes, de acuerdo a la temperatura máxima y mínima, para todo el año, considerando las condiciones climáticas de Mérida, Yucatán. Para el estudio las tres configuraciones de ventana se consideraron orientadas en dirección sur, oeste, norte y este.

Con respecto a la evaluación térmica llevada a cabo se concluye lo siguiente:

- De acuerdo al estudio del efecto de la orientación, se encontró que la condición que favorece el desempeño térmico de las ventanas y permiten mejorar la calidad visual al interior de la edificación debido al paso de luz proveniente del sol, es tener altos niveles de radiación solar.
- Con base en lo resultados, se observó que los flujos de calor por el uso de las tres configuraciones tienen los valores máximos durante las primeras horas del día debido a la orientación que se eligió (para presentar resultados), para evitar esto, se recomienda que, durante el proceso de diseño de una edificación para las condiciones de clima cálido de México, se consideren las ventanas o áreas vidriadas en dirección sur.
- Debido al tiempo de exposición más prolongado de radiación solar y con valores que no presentan grandes fluctuaciones durante el día, la orientación sur presenta las mejores cualidades para considerar que las ventanas sean orientadas en esta dirección, puesto que presenta valores de radiación similares a los obtenidos en las orientaciones este y oeste

a lo largo del día, esto en conjunto con la resistencia térmica que el uso de más de un vidrio en una ventana proporcionan ayuda a reducir el flujo de calor al interior, disminuyendo de esta forma las ganancias de energía que se puedan tener durante el día debido a las condiciones de clima cálido.

- Al comparar los valores de flujo de calor al interior obtenidos del análisis realizado para la configuración C3 con respecto a los resultados obtenidos de la configuración C1, se obtuvo un porcentaje de reducción de 25 – 36% para los días con mayor temperatura ambiente del año, y de 15 – 31% para los días con menor temperatura, esto considerando un análisis de las cuatro orientaciones.
- El valor promedio de reducción de los flujos de calor al interior durante todo el año, considerando las cuatro orientaciones fue de aproximadamente 30% para los días cálidos y de aproximadamente 25% para los días más frío, al comparar C3 con respecto a C1; y de 9 y 19% para los días cálidos y fríos, respectivamente, al comparar la configuración C2 con C1.
- La orientación que presentó los valores más altos de porcentaje de reducción fue la orientación sur, con un intervalo de reducción de 28.17 a 35.94%, y un promedio anual de 31.08% para los días más cálidos. Mientras que el intervalo de reducción para los días fríos fue de 16.90 a 30.85%, teniendo un promedio anual de 30.85%, todo esto al comparar la configuración C3 con C1.
- Al comparar los costos por consumo de energía eléctrica por el uso de las tres configuraciones, se concluyó que la configuración C3 tiene un porcentaje de reducción de 28.25 a 35.53% con respecto a la configuración C1 (para las cuatro orientaciones), lo que se traduce en un ahorro anual de aproximadamente \$300 pesos mexicanos.

## 5.2. Recomendaciones

Con la finalidad de dar seguimiento y continuidad al presente trabajo de investigación, se hacen las siguientes recomendaciones para trabajos futuros.

- Realizar el estudio bajo condiciones climáticas de más de una región de la República Mexicana.
- Considerar el uso de vidrios alternos al vidrio claro. Pueden ser absorbentes, reflectivos, de baja emisividad, etc.
- Realizar un estudio experimental de las propiedades ópticas del sistema de vidrio triple, compuesto por diferentes tipos de vidrios.
- Utilizar el método de volumen finito, para llevar a cabo la modelación numérica de ventanas de vidrios múltiples en estado transitorio, con el fin de analizar de manera específica la fenomenología de los sistemas.
- Llevar a cabo el estudio de la transferencia de calor conjugada de una ventana de vidrio triple acoplada a una habitación, con el objetivo de analizar en conjunto el efecto que tiene la ventana sobre el ambiente interior.



---

**REFERENCIAS**

- [1] Aguilar J. O., Xamán J., Álvarez G., Hernández-Pérez I., López-Mata C., Thermal performance of a double pane window using glazing available on the Mexican market. *Renewable Energy*, Vol. 81, Págs. 785-794, 2015.
- [2] Amaral A. R., Rodrigues E., Rodrigues Gaspar A., Gomes Á., A thermal performance parametric study of window type, orientation, size and shadowing effect. *Sustainable Cities and Society*, Vol. 26, Págs. 456 – 465, 2016.
- [3] Arıcı M., Karabay H., Kan M., Flow and heat transfer in double, triple and quadruple pane windows. *Energy and Buildings*, Vol. 86, Págs. 394-402, 2015.
- [4] Arıcı M., Kan M., An investigation of flow and conjugate heat transfer in multiple pane windows with respect to gap width, emissivity and gas filling. *Renewable Energy*, Vol. 75, Págs. 249 - 256, 2015.
- [5] Bitaab M., Abardeh R. H., Movahhed S., Experimental and numerical study of energy loss through double-glazed windows. *Heat and Mass Transfer*, Vol. 56, Págs. 727-747, 2019.
- [6] Cortina-Leyva C., Estudio de la transferencia de calor en ventanas con vidrios Duovent. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, CENIDET, Cuernavaca, Mor. (México), 2000.
- [7] Ché-Pan M. A., Evaluación térmica de ventanas con un material de cambio de fase. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, CENIDET, Cuernavaca, Mor. (México), 2019.
- [8] Fang Y., Hyde J. T., Hewitt N., Predicted thermal performance of triple vacuum glazing. *Solar Energy*, Vol. 84, Págs. 2132 – 2139, 2010.

- 
- [9] Fang Y., Hyde T. J., Arya F., Hewitt N., Wang R., Dai Y., Enhancing the thermal performance of triple vacuum glazing with low-emittance coatings. *Solar Energy*, Vol. 97, Págs. 186-195, 2015.
- [10] Foruzan Nia M., Gandjalikhan Nassab S. A., Babak Ansari A., Transient numerical simulation of multiple pane windows filling with radiating gas. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 108, 104291, 2019.
- [11] González-Julián E. C., Evaluación térmica de vidrios de control solar disponibles en el mercado mexicano para ventanas de vidrio doble. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, CENIDET, Cuernavaca, Mor. (México), 2017.
- [12] González-Julián E., Xamán J., Nelson O. M., Chávez Y., Zavala-Guillén I., Simá E., Annual thermal evaluation of a double pane window using glazing available in the Mexican market. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 143, Págs. 100-111, 2018.
- [13] Hernández-Martínez E., Estudio de la influencia de las ventanas en el funcionamiento térmico de las edificaciones. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, CENIDET, Cuernavaca, Mor. (México), 2013.
- [14] Jiménez-Antonio D. N., Análisis de la transferencia de calor en estado transitorio de un vidrio con controlador óptico. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, CENIDET, Cuernavaca, Mor. (México), 1995.
- [15] Jiménez-García I. P., Estudio de la transferencia de calor en ventanas mexicanas en condiciones de clima frío mediante una cámara de ambiente controlado. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, CENIDET, Cuernavaca, Mor. (México), 2012.

- 
- [16] Jiménez-Xamán C. M., Aplicación del método de multimallas a problemas de transferencia de calor. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, CENIDET, Cuernavaca, Mor. (México), 2015.
- [17] Kalinović S. M., Djoković J. M., Nikolić R. R., Influence of windows geometrical parameters on calculations of the heat conduction coefficient. *Procedia Engineering*, Vol. 192, Págs. 404-409, 2017.
- [18] Kara Y. A., Kurnuç A., Performance of coupled novel triple glass and phase change material wall in the heating season: An experimental study. *Solar Energy*, Vol. 86, Págs. 2432 - 2442, 2012.
- [19] Karabay H., Arıcı M., Multiple plane window applications in various climatic of Turkey. *Energy and Buildings*, Vol. 45, Págs. 67 - 71, 2012.
- [20] Li D., Wu Y., Liu C., Zhang G., Arıcı M., Numerical investigation of thermal and Optical performance of window units filled with nanoparticle enhanced PCM. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 125, Págs. 1321 – 1332, 2018a.
- [21] Li D., Wu Y., Liu C., Zhang G., Arıcı M., Energy investigation of glazed windows containing Nano-PCM in different seasons. *Energy Conversion and Management*, Vol. 172, Págs. 119 - 128, 2018b.
- [22] Li S., Zou K., Sun G., Zhang X., Simulating research on the dynamic thermal performance of a novel triple-glazed window filled with PCM. *Sustainable Cities and Society*, Vol. 40, Págs. 266-273, 2018.
- [23] Liu M., Heiselberg P. K., Antonov Y. I., Parametric analysis on the heat transfer, daylight and thermal confort for a sustainable roof window with triple glazing and external shutter. *Energy and Buildings*, Vol. 183, Págs. 209-221, 2019.

- 
- [24] Medina-Agreda I., Estudios de transmisión de calor en marcos de ventanas de edificios diseñados en México. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, CENIDET, Cuernavaca, Mor. (México), 2009.
- [25] Memon S., Eamen P. C., Predicting the solar energy and space-heating energy performance for solid-wall detached house retrofitted with the composite edge-sealed triple vacuum glazing. *Energy Procedia*, Vol. 122, Págs. 565 – 570, 2017.
- [26] Olazo-Gómez Y., Análisis térmico de una habitación con una ventana de vidrio doble. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, CENIDET, Cuernavaca, Mor. (México), 2015.
- [27] Palacios-Gallegos M. J., Diseño, construcción y caracterización de un calorímetro para la evaluación térmica de vidrios con filtros solares. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, CENIDET, Cuernavaca, Mor. (México), 1997.
- [28] Pérez-Nucamendi C. M., Análisis de térmico de una ventana de vidrio doble. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, CENIDET, Cuernavaca, Mor. (México), 2012.
- [29] Sánchez Corral J., La vivienda “social” en México, 2011- 2012. JSa
- [30] Sierra P., Hernández J. A., Solar heat gain coefficient of water flow glazings. *Energy and Buildings*, Vol. 139, Págs. 133 - 145, 2017.
- [31] Thalfeldt M., Kurnitski J., Voll H., Detailed and simplified window model and opening effects on optimal window size and heating need. *Energy and Buildings*, Vol. 127, Págs. 242 – 251, 2016.
- [32] Tükel M., Mumcuoğlu., Arıcı M., Karavay H., Analysis of fluid flow and heat transfer characteristics in multiple glazing roofs with a special emphasis on the thermal performance. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 148, Págs. 694-703, 2019.

- 
- [33] US Department of Energy, Lawrence Berkeley National Laboratory, WINDOW 7.4.
- [34] Vicente-López J. A., Evaluación del funcionamiento térmico de ventanas mexicanas mediante una cámara de ambiente controlado. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, CENIDET, Cuernavaca, Mor. (México), 2009.
- [35] Xamán J., Álvarez G., Lira L., Estrada C., Numerical study of heat transfer by laminar and turbulent natural convection in tall cavities of façade elements. *Energy and Buildings*, Vol. 37, Págs. 787-794, 2005.
- [36] Xamán J., Jiménez-Xamán C. M., Álvarez G., Zavala-Guillén I., Hernández-Pérez I., Aguilar J. O., Thermal performance of a double pane window with a solar coating for a warm climate. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 106, Págs. 257-265, 2016a.
- [37] Xamán J., Olazo-Gómez Y., Chávez Y., Hinojosa J. F., Hernández-Pérez I., Hernández-López I., Zavala-Guillén I., Computational fluid dynamics for thermal evaluation of a room with a double glazing window with a solar control film. *Renewable Energy*, Vol. 94, Págs. 237-250, 2016b.
- [38] Xamán J., Olazo-Gómez Y., Zavala-Guillén I., Hernández-Pérez I., Aguilar J. O., Hinojosa J. F., Thermal evaluation of a room coupled with a double glazing window with/without a solar control film for Mexico. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 110, Págs. 805-820, 2017.
- [39] Zanetti Freire R., Mazuroski W., Abadie M. O., Mendes N., Capacitive effect on the heat transfer through building glazing system. *Applied Energy*, Vol. 88, Págs. 4310 – 4319, 2011.
- [40] Zhang C., Wang J., Xu X., Zou F., Yu J., Modeling and thermal performance evaluation of a switchable triple glazing exhaust air window. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 92, Págs. 8 – 17, 2016.

- [41] Zhang C., Gang W., Wang J., Xu X., Du Q., Experimental investigation and dynamic modeling of a triple-glazed exhaust air window with built-in venetian blinds in the cooling season. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 140, Págs. 73 – 85, 2018.
- [42] Zhang C., Gang W., Wang J., Xu X., Du Q., Numerical and experimental study on the thermal performance improvement of a triple glazed Window by utilizing low-grade exhaust air. *Energy*, Vol. 167, Págs. 1132-1143, 2019.

# ANEXOS

Anexo A. Variables climáticas

En esta sección se presentan las funciones de ajuste obtenidas para determinar el valor de la temperatura ambiente y la radiación solar en cualquier instante de tiempo, para los días más cálidos y más fríos del mes de abril, julio, octubre y diciembre, meses seleccionados como representativos para cada estación del año.

A.1. Abril – día cálido

<b>Temperatura ambiente</b>	
$0 \leq t \leq 55800$	
$T_{\text{ext}}(t) = 2.254230 \times 10^{-26} t^6 - 3.093710 \times 10^{-21} t^5 + 1.336030 \times 10^{-16} t^4 - 1.594090 \times 10^{-12} t^3 - 1.436410 \times 10^{-10} t^2 - 1.676660 \times 10^{-4} t + 2.682368 \times 10^1$	(A.1)

$55800 < t \leq 86400$	
$T_{\text{ext}}(t) = 5.185860 \times 10^{-17} t^4 - 1.535820 \times 10^{-11} t^3 + 1.711090 \times 10^{-6} t^2 - 8.5180 \times 10^{-2} t + 1.63013379 \times 10^3$	(A.2)

<b>Radiación solar</b>	
$21600 \leq t \leq 43800$	
$G_{\text{solar}}(t) = 3.3883903772 \times 10^{-22} t^6 - 6.8847996286 \times 10^{-17} t^5 + 5.7649203184 \times 10^{-12} t^4 - 2.5426054627 \times 10^{-07} t^3 + 6.2159913329 \times 10^{-03} t^2 - 7.9644099299 \times 10^{01} t + 4.1721929414 \times 10^{05}$	(A.3)

$43800 < t \leq 65400$	
$G_{\text{solar}}(t) = -2.7278346304 \times 10^{-24} t^6 + 9.4828580817 \times 10^{-19} t^5 - 1.3800521619 \times 10^{-13} t^4 + 1.0727190860 \times 10^{-08} t^3 - 4.6868248150 \times 10^{-04} t^2 + 1.0893420699 \times 10^{01} t - 1.0490710873 \times 10^{05}$	(A.4)

A.2. Abril – día frío

<b>Temperatura ambiente</b>	
$0 \leq t \leq 38400$	
$T_{\text{ext}}(t) = 3.485710 \times 10^{-25} t^6 - 3.949160 \times 10^{-20} t^5 + 1.61670 \times 10^{-15} t^4 - 2.864420 \times 10^{-11} t^3 + 2.197980 \times 10^{-07} t^2 - 7.73310 \times 10^{-04} t + 2.056446 \times 10^{01}$	(A.5)



$$38400 < t \leq 84600$$

$$T_{\text{ext}}(t) = -9.8767 \times 10^{-22} t^5 + 3.04628 \times 10^{-16} t^4 - 3.65630 \times 10^{-11} t^3 + 2.12687 \times 10^{-06} t^2 - 5.9930 \times 10^{-02} t + 6.8374691 \times 10^{02} \quad (\text{A.6})$$

Radiación solar

$$21600 \leq t \leq 31200$$

$$G_{\text{solar}}(t) = -3.0330353596 \times 10^{-20} t^6 + 4.8548336685 \times 10^{-15} t^5 - 3.2304389766 \times 10^{-10} t^4 + 1.1438445101 \times 10^{-05} t^3 - 2.2732920977 \times 10^{-01} t^2 + 2.4047770896 \times 10^{03} t - 1.0580227921 \times 10^{07} \quad (\text{A.7})$$

$$31200 < t \leq 43800$$

$$G_{\text{solar}}(t) = 4.5757254336 \times 10^{-22} t^6 - 9.8734373776 \times 10^{-17} t^5 + 8.8531475580 \times 10^{-12} t^4 - 4.2219594986 \times 10^{-07} t^3 + 1.1290251296 \times 10^{-02} t^2 - 1.6048710792 \times 10^{02} t + 9.4816047534 \times 10^{05} \quad (\text{A.8})$$

$$43800 < t \leq 65400$$

$$G_{\text{solar}}(t) = 2.2576599852 \times 10^{-23} t^6 - 7.7636408814 \times 10^{-18} t^5 + 1.1027589073 \times 10^{-12} t^4 - 8.2835031974 \times 10^{-08} t^3 + 3.4710147252 \times 10^{-03} t^2 - 7.6942170581 \times 10^{01} t + 7.0523352647 \times 10^{05} \quad (\text{A.9})$$

A.3. Julio – día frío

Temperatura ambiente

$$0 \leq t \leq 86400$$

$$T_{\text{ext}}(t) = 1.695660 \times 10^{-36} t^8 - 6.558610 \times 10^{-31} t^7 + 9.87940 \times 10^{-26} t^6 - 7.248690 \times 10^{-21} t^5 + 2.627830 \times 10^{-16} t^4 - 4.237480 \times 10^{-12} t^3 + 2.746850 \times 10^{-08} t^2 - 3.59460 \times 10^{-05} t + 2.375723 \times 10^{01} \quad (\text{A.10})$$

Radiación solar

$$19800 \leq t \leq 29400$$

$$G_{\text{solar}}(t) = 1.3230675396 \times 10^{-21} t^6 - 5.5148560652 \times 10^{-17} t^5 - 4.7668395122 \times 10^{-12} t^4 + 4.0553788477 \times 10^{-07} t^3 - 1.1693833047 \times 10^{-02} t^2 + 1.5248470268 \times 10^{02} t - 7.6172289580 \times 10^{05} \quad (\text{A.11})$$

$$29400 < t \leq 43800$$

$$G_{\text{solar}}(t) = -1.6526958853 \times 10^{-21} t^6 + 3.6574813470 \times 10^{-16} t^5 - 3.3575857676 \times 10^{-11} t^4 + 1.6364262223 \times 10^{-06} t^3 - 4.4656906475 \times 10^{-02} t^2 + 6.4690090179 \times 10^{02} t - 3.8848417675 \times 10^{06} \quad (\text{A.12})$$

$$43800 < t \leq 65400$$

$$G_{\text{solar}}(t) = -1.2576952273 \times 10^{-23} t^6 + 4.4403159867 \times 10^{-18} t^5 - 6.4727723876 \times 10^{-13} t^4 + 4.9831489360 \times 10^{-08} t^3 - 2.1362077114 \times 10^{-03} t^2 + 4.8345525607 \times 10^{01} t - 4.5114835490 \times 10^{05} \quad (\text{A.13})$$

A.4. Octubre – día cálido

Temperatura ambiente

$$0 \leq t \leq 16200$$

$$T_{\text{ext}}(t) = -3.739560 \times 10^{-16} t^4 + 1.266520 \times 10^{-11} t^3 - 1.214760 \times 10^{-07} t^2 - 2.343930 \times 10^{-04} t + 2.3810480 \times 10^{01} \quad (\text{A.14})$$

$$16200 < t \leq 44400$$

$$T_{\text{ext}}(t) = 8.751050 \times 10^{-22} t^5 - 6.821120 \times 10^{-17} t^4 - 1.653160 \times 10^{-12} t^3 + 2.666650 \times 10^{-07} t^2 - 6.94 \times 10^{-03} t + 7.716163 \times 10^{02} \quad (\text{A.15})$$

$$44400 < t \leq 86400$$

$$T_{\text{ext}}(t) = -2.59820 \times 10^{-17} t^4 + 6.978380 \times 10^{-12} t^3 - 6.891020 \times 10^{-07} t^2 + 2.9350 \times 10^{-02} t - 4.18358270 \times 10^{02} \quad (\text{A.16})$$

Radiación solar

$$21600 \leq t \leq 31200$$

$$G_{\text{solar}}(t) = -3.2228584503 \times 10^{-20} t^6 + 5.1089465280 \times 10^{-15} t^5 - 3.3562023519 \times 10^{-10} t^4 + 1.1692472128 \times 10^{-05} t^3 - 2.2779838978 \times 10^{-01} t^2 + 2.3529607750 \times 10^{03} t - 1.0066643907 \times 10^{07} \quad (\text{A.17})$$

$$31200 < t \leq 43200$$

$$G_{\text{solar}}(t) = 4.1743276922 \times 10^{-21} t^6 - 9.2311518248 \times 10^{-16} t^5 + 8.4835938820 \times 10^{-11} t^4 - 4.1471758639 \times 10^{-06} t^3 + 1.1373052565 \times 10^{-01} t^2 - 1.6588981614 \times 10^{03} t + 1.0055651953 \times 10^{07} \quad (\text{A.18})$$

$$43200 < t \leq 63600$$

$$G_{\text{solar}}(t) = 7.3977102642 \times 10^{-23} t^6 - 2.3778840478 \times 10^{-17} t^5 + 3.1722603803 \times 10^{-12} t^4 - 2.2481478828 \times 10^{-07} t^3 + 8.9256584542 \times 10^{-03} t^2 - 1.8820877293 \times 10^{02} t + 1.6466822195 \times 10^{06} \quad (\text{A.19})$$

A.5. Octubre – día frío

<b>Temperatura ambiente</b>		
$0 \leq t \leq 21000$		
$T_{\text{ext}}(t) = 3.7568 \times 10^{-13} t^3 - 3.61447 \times 10^{-09} t^2 - 2.53897 \times 10^{-04} t + 2.387408 \times 10^{01}$	(A.20)	
$21000 < t \leq 54600$		
$T_{\text{ext}}(t) = 1.264810 \times 10^{-17} t^4 - 1.400530 \times 10^{-12} t^3 + 3.497890 \times 10^{-08} t^2 + 9.432560 \times 10^{-04} t - 4.947250 \times 10^0$	(A.21)	
$54600 < t \leq 86400$		
$T_{\text{ext}}(t) = 8.839770 \times 10^{-21} t^5 - 3.142170 \times 10^{-15} t^4 + 4.4369 \times 10^{-10} t^3 - 3.109040 \times 10^{-05} t^2 + 1.080140 \times 10^0 t - 1.483950071 \times 10^{04}$	(A.22)	
<b>Radiación solar</b>		
$22200 \leq t \leq 31200$		
$G_{\text{solar}}(t) = 1.2804423144 \times 10^{-20} t^6 - 2.2153663611 \times 10^{-15} t^5 + 1.5930479210 \times 10^{-10} t^4 - 6.0917948741 \times 10^{-06} t^3 + 1.3058671462 \times 10^{-01} t^2 - 1.4869654670 \times 10^{03} t + 7.0223181194 \times 10^{06}$	(A.23)	
$31200 < t \leq 42600$		
$G_{\text{solar}}(t) = 3.4901609016 \times 10^{-21} t^6 - 7.7254718518 \times 10^{-16} t^5 + 7.1052823964 \times 10^{-11} t^4 - 3.4753048292 \times 10^{-06} t^3 + 9.5333195190 \times 10^{-02} t^2 - 1.3905346446 \times 10^{03} t + 8.4260402405 \times 10^{06}$	(A.24)	
$42600 < t \leq 61800$		
$G_{\text{solar}}(t) = 6.5569604869 \times 10^{-23} t^6 - 2.0918697659 \times 10^{-17} t^5 + 2.7619967771 \times 10^{-12} t^4 - 1.9320629311 \times 10^{-07} t^3 + 7.5524026299 \times 10^{-03} t^2 - 1.5643503629 \times 10^{02} t + 1.3417508742 \times 10^{06}$	(A.25)	

A.6. Diciembre – día cálido

<b>Temperatura ambiente</b>		
$0 \leq t \leq 49800$		
$T_{\text{ext}}(t) = 8.360990 \times 10^{-26} t^6 - 1.171080 \times 10^{-20} t^5 + 5.817230 \times 10^{-16} t^4 - 1.203840 \times 10^{-11} t^3 + 1.013320 \times 10^{-07} t^2 - 3.619320 \times 10^{-04} t + 2.385004 \times 10^{01}$	(A.26)	

$49800 < t \leq 86400$ $T_{\text{ext}}(t) = -3.479670 \times 10^{-17} t^4 + 9.556310 \times 10^{-12} t^3 - 9.695680 \times 10^{-07} t^2 + 4.2690 \times 10^{-02} t - 6.51876470 \times 10^{02}$	(A.27)
Radiación solar	
$23400 \leq t \leq 43200$ $G_{\text{solar}}(t) = 1.1352634890 \times 10^{-22} t^6 - 2.3187258067 \times 10^{-17} t^5 + 1.9684816506 \times 10^{-12} t^4 - 8.8674334410 \times 10^{-08} t^3 + 2.2263594183 \times 10^{-03} t^2 - 2.9425356433 \times 10^{01} t + 1.6035406249 \times 10^{05}$	(A.28)
$43200 < t \leq 61800$ $G_{\text{solar}}(t) = 7.1638449020 \times 10^{-23} t^6 - 2.1529969784 \times 10^{-17} t^5 + 2.6864447339 \times 10^{-12} t^4 - 1.7818598185 \times 10^{-07} t^3 + 6.6272609768 \times 10^{-03} t^2 - 1.3106454558 \times 10^{02} t + 1.0769450959 \times 10^{06}$	(A.29)

#### A.7. Diciembre – día frío

Temperatura ambiente	
$0 \leq t \leq 32400$ $T_{\text{ext}}(t) = -7.677650 \times 10^{-25} t^6 + 7.205470 \times 10^{-20} t^5 - 2.485470 \times 10^{-15} t^4 + 3.948960 \times 10^{-11} t^3 - 2.896050 \times 10^{-07} t^2 + 9.217650 \times 10^{-04} t + 1.021479 \times 10^{01}$	(A.30)
$32400 < t \leq 86400$ $T_{\text{ext}}(t) = -1.650480 \times 10^{-26} t^6 + 4.762110 \times 10^{-21} t^5 - 5.19110 \times 10^{-16} t^4 + 2.585790 \times 10^{-11} t^3 - 5.315250 \times 10^{-07} t^2 + 8.938880 \times 10^{-04} t + 9.448852 \times 10^{01}$	(A.31)
Radiación solar	
$26400 \leq t \leq 45000$ $G_{\text{solar}}(t) = 1.6837551725 \times 10^{-22} t^6 - 3.3050028321 \times 10^{-17} t^5 + 2.6675527461 \times 10^{-12} t^4 - 1.1310365513 \times 10^{-07} t^3 + 2.6487568227 \times 10^{-03} t^2 - 3.2377925294 \times 10^{01} t + 1.6183711110 \times 10^{05}$	(A.32)
$45000 < t \leq 61800$ $G_{\text{solar}}(t) = 1.4505407102 \times 10^{-22} t^6 - 4.5103613191 \times 10^{-17} t^5 + 5.8281536753 \times 10^{-12} t^4 - 4.0066696243 \times 10^{-07} t^3 + 1.5158375538 \times 10^{-02} t^2 - 3.1739949612 \times 10^{02} t + 2.7099685214 \times 10^{06}$	(A.33)

Anexo B. Flujos de calor al interior

Tabla B. 1. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); enero, día más cálido.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
01:00	-13.58	-13.58	-13.58	-13.58	-24.03	-24.03	-24.03	-24.03	-30.51	-30.51	-30.51	-30.51
02:00	-13.57	-13.57	-13.57	-13.57	-24.17	-24.17	-24.17	-24.17	-31.17	-31.17	-31.17	-31.17
03:00	-13.71	-13.71	-13.71	-13.71	-24.17	-24.17	-24.17	-24.17	-31.23	-31.23	-31.23	-31.23
04:00	-15.21	-15.21	-15.21	-15.21	-25.55	-25.55	-25.55	-25.55	-32.25	-32.25	-32.25	-32.25
05:00	-17.42	-17.42	-17.42	-17.42	-27.95	-27.95	-27.95	-27.95	-34.14	-34.14	-34.14	-34.14
06:00	-18.93	-18.93	-18.93	-18.93	-29.61	-29.61	-29.61	-29.61	-35.80	-35.80	-35.80	-35.80
07:00	-18.30	-13.11	-13.46	-7.98	-29.00	-24.64	-24.93	-20.34	-35.85	-32.67	-32.88	-29.54
08:00	15.12	25.50	22.73	32.38	1.23	9.54	7.12	15.69	-12.02	-6.52	-8.33	-1.74
09:00	100.77	73.65	74.02	84.46	76.06	53.16	53.44	62.66	43.88	27.53	27.66	34.78
10:00	379.77	124.26	125.22	386.29	324.39	101.29	102.05	329.55	235.56	67.49	67.99	238.71
11:00	662.54	128.60	132.91	374.26	577.64	107.33	110.99	326.04	436.53	73.65	76.31	246.25
12:00	786.28	166.01	160.73	227.64	696.98	141.31	137.18	201.33	536.84	100.24	97.61	153.85
13:00	776.77	330.23	175.66	172.14	693.53	287.50	152.16	149.39	539.18	212.93	111.10	110.34
14:00	764.66	562.66	169.82	173.35	680.89	497.48	151.45	154.45	529.61	378.32	112.05	114.22
15:00	612.37	647.62	143.29	137.53	549.13	576.92	127.92	123.10	430.10	445.72	95.49	92.09
16:00	413.81	575.82	111.62	111.29	374.78	519.26	98.49	98.14	296.85	408.28	72.33	71.96
17:00	274.89	480.83	75.64	71.27	247.18	432.40	62.94	61.25	193.79	338.89	44.72	43.52
18:00	31.45	31.95	31.23	31.24	25.02	27.64	23.38	23.42	18.48	24.77	13.38	13.43
19:00	19.67	19.67	19.67	19.67	10.71	10.76	10.68	10.68	0.87	1.33	0.51	0.51
20:00	9.17	9.17	9.17	9.17	2.13	2.13	2.13	2.13	-6.28	-6.26	-6.29	-6.29
21:00	1.72	1.72	1.72	1.72	-7.35	-7.35	-7.35	-7.35	-15.39	-15.38	-15.39	-15.39
22:00	-1.71	-1.71	-1.71	-1.71	-11.49	-11.49	-11.49	-11.49	-19.69	-19.69	-19.69	-19.69
23:00	-2.51	-2.51	-2.51	-2.51	-12.48	-12.48	-12.48	-12.48	-20.83	-20.83	-20.83	-20.83
24:00	-6.01	-6.01	-6.01	-6.01	-15.55	-15.55	-15.55	-15.55	-22.92	-22.92	-22.92	-22.92
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	4960.15	3283.66	1359.75	1933.25	4471.23	2973.92	1247.42	1760.73	3563.06	2371.81	1013.87	1404.45

Tabla B. 2. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); enero, día más frío.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
01:00	-41.40	-41.40	-41.40	-41.40	-49.00	-49.00	-49.00	-49.00	-56.13	-56.13	-56.13	-56.13
02:00	-45.80	-45.80	-45.80	-45.80	-51.02	-51.02	-51.02	-51.02	-56.39	-56.39	-56.39	-56.39
03:00	-50.93	-50.93	-50.93	-50.93	-52.32	-52.32	-52.32	-52.32	-57.75	-57.75	-57.75	-57.75
04:00	-54.75	-54.75	-54.75	-54.75	-54.94	-54.94	-54.94	-54.94	-60.91	-60.91	-60.91	-60.91
05:00	-56.24	-56.24	-56.24	-56.24	-62.67	-62.67	-62.67	-62.67	-65.66	-65.66	-65.66	-65.66
06:00	-55.04	-55.04	-55.04	-55.04	-62.58	-62.58	-62.58	-62.58	-66.53	-66.53	-66.53	-66.53
07:00	-44.65	-46.20	-46.21	-43.71	-47.96	-49.26	-49.27	-47.17	-57.02	-57.97	-57.98	-56.45
08:00	0.59	-4.62	-4.63	3.98	-12.42	-17.13	-17.13	-9.34	-27.88	-31.51	-31.52	-25.50
09:00	45.59	38.20	38.21	46.63	31.35	24.57	24.58	32.41	6.11	0.81	0.82	7.04
10:00	80.68	72.67	72.66	79.06	63.72	56.30	56.30	62.31	33.49	27.59	27.59	32.48
11:00	112.56	102.68	102.69	106.59	92.14	83.10	83.10	86.79	57.15	50.02	50.02	53.08
12:00	149.54	137.97	137.89	138.83	125.96	115.22	115.16	116.15	84.93	76.36	76.31	77.25
13:00	149.13	142.69	140.30	140.72	127.91	121.79	119.72	120.05	87.93	82.85	81.31	81.57
14:00	171.50	159.58	136.88	136.43	144.36	133.59	113.54	113.20	101.66	93.20	78.03	77.81
15:00	206.38	212.47	107.26	107.26	175.83	180.51	87.56	87.55	125.38	128.23	57.91	57.85
16:00	49.87	72.84	45.55	51.00	39.52	59.95	32.21	37.07	24.47	39.64	14.83	18.51
17:00	-6.30	-0.86	-8.24	-8.45	-16.46	-11.55	-18.62	-18.64	-22.92	-18.91	-25.36	-25.15
18:00	-30.36	-30.36	-30.36	-30.36	-41.74	-41.72	-41.75	-41.74	-44.91	-44.84	-44.99	-44.98
19:00	-37.71	-37.71	-37.71	-37.71	-48.02	-48.02	-48.02	-48.02	-51.28	-51.28	-51.28	-51.28
20:00	-45.92	-45.92	-37.71	-45.92	-55.91	-55.91	-55.91	-55.91	-58.50	-58.50	-58.50	-58.50
21:00	-55.21	-55.21	-55.21	-55.21	-62.57	-62.57	-62.57	-62.57	-64.73	-64.73	-64.73	-64.73
22:00	-66.33	-66.33	-66.33	-66.33	-72.78	-72.78	-72.78	-72.78	-73.43	-73.43	-73.43	-73.43
23:00	-80.87	-80.87	-80.87	-80.87	-81.43	-81.43	-81.43	-81.43	-81.80	-81.80	-81.80	-81.80
24:00	-101.40	-101.40	-101.40	-101.40	-95.40	-95.40	-95.40	-95.40	-93.33	-93.33	-93.33	-93.33
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	1667.35	1641.34	1482.87	1513.22	1595.81	1571.13	1435.38	1448.86	1385.56	1363.64	1258.38	1269.38

Tabla B. 3. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); febrero, día más cálido.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	-4.63	-4.63	-4.63	-4.63	-14.05	-14.05	-14.05	-14.05	-20.74	-20.74	-20.74	-20.74
<b>02:00</b>	-5.82	-5.82	-5.82	-5.82	-15.78	-15.78	-15.78	-15.78	-23.51	-23.51	-23.51	-23.51
<b>03:00</b>	-8.41	-8.41	-8.41	-8.41	-18.29	-18.29	-18.29	-18.29	-25.76	-25.76	-25.76	-25.76
<b>04:00</b>	-13.07	-13.07	-13.07	-13.07	-22.90	-22.90	-22.90	-22.90	-29.63	-29.63	-29.63	-29.63
<b>05:00</b>	-16.71	-16.71	-16.71	-16.71	-26.98	-26.98	-26.98	-26.98	-33.29	-33.29	-33.29	-33.29
<b>06:00</b>	-16.20	-16.20	-16.20	-16.20	-27.07	-27.07	-27.07	-27.07	-34.02	-34.02	-34.02	-34.02
<b>07:00</b>	102.83	12.13	12.13	344.91	77.73	-2.29	-2.29	290.61	45.07	-15.51	-15.51	205.71
<b>08:00</b>	244.20	52.98	52.98	645.15	204.82	36.33	36.33	560.56	145.11	15.50	15.50	421.74
<b>09:00</b>	398.27	80.84	80.84	722.34	344.05	64.94	64.94	632.61	255.80	39.40	39.40	485.70
<b>10:00</b>	516.50	151.49	144.56	617.35	452.54	131.21	125.12	544.33	343.11	92.10	87.50	420.65
<b>11:00</b>	588.80	158.18	167.65	456.16	521.06	140.41	148.55	406.70	399.67	102.45	108.39	315.72
<b>12:00</b>	619.65	193.72	183.27	254.92	553.24	173.31	164.68	231.47	427.58	127.87	121.94	180.45
<b>13:00</b>	622.90	339.22	196.08	193.99	556.88	301.56	176.58	174.94	431.91	227.49	133.26	133.02
<b>14:00</b>	593.39	547.59	184.42	187.46	532.63	487.76	167.56	170.11	414.95	372.90	126.69	128.54
<b>15:00</b>	524.32	702.27	176.66	169.97	472.79	628.47	160.23	154.78	369.93	486.41	121.90	118.17
<b>16:00</b>	395.13	797.38	137.53	130.94	359.60	716.11	126.37	120.40	284.91	558.71	98.64	93.92
<b>17:00</b>	213.40	470.90	88.59	84.52	194.44	421.63	84.21	80.60	152.84	336.52	63.01	60.06
<b>18:00</b>	58.44	392.26	28.61	26.10	53.69	339.94	27.14	25.16	39.25	256.85	16.82	15.54
<b>19:00</b>	17.54	17.56	17.54	17.54	12.44	12.55	12.42	12.42	2.80	3.70	2.58	2.60
<b>20:00</b>	14.26	14.26	14.26	14.26	9.38	9.38	9.38	9.38	-0.63	-0.60	-0.64	-0.64
<b>21:00</b>	11.26	11.26	11.26	11.26	5.07	5.07	5.07	5.07	-4.25	-4.25	-4.25	-4.25
<b>22:00</b>	6.87	6.87	6.87	6.87	-0.83	-0.83	-0.83	-0.83	-9.47	-9.47	-9.47	-9.47
<b>23:00</b>	0.46	0.46	0.46	0.46	-8.18	-8.18	-8.18	-8.18	-15.87	-15.87	-15.87	-15.87
<b>24:00</b>	-7.53	-7.53	-7.53	-7.53	-16.72	-16.72	-16.72	-16.72	-22.91	-22.91	-22.91	-22.91
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	4994.51	4015.66	1570.00	3950.49	4485.78	3606.38	1446.29	3554.56	3511.19	2833.64	1149.41	2780.09

Tabla B. 4. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); febrero, día más frío.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	-35.13	-35.13	-35.13	-35.13	-48.33	-48.33	-48.33	-48.33	-52.67	-52.67	-52.67	-52.67
<b>02:00</b>	-36.45	-36.45	-36.45	-36.45	-47.55	-47.55	-47.55	-47.55	-51.91	-51.91	-51.91	-51.91
<b>03:00</b>	-39.58	-39.58	-39.58	-39.58	-48.98	-48.98	-48.98	-48.98	-53.30	-53.30	-53.30	-53.30
<b>04:00</b>	-43.51	-43.51	-43.51	-43.51	-50.80	-50.80	-50.80	-50.80	-55.59	-55.59	-55.59	-55.59
<b>05:00</b>	-46.17	-46.17	-46.17	-46.17	-54.09	-54.09	-54.09	-54.09	-58.05	-58.05	-58.05	-58.05
<b>06:00</b>	-45.45	-45.45	-45.45	-45.45	-54.66	-54.66	-54.66	-54.66	-59.02	-59.02	-59.02	-59.02
<b>07:00</b>	3.73	-29.20	-29.67	58.74	-13.42	-41.09	-41.48	32.84	-29.09	-49.24	-49.52	4.55
<b>08:00</b>	282.13	15.83	15.17	554.81	233.60	-1.44	-2.02	476.91	160.62	-17.56	-17.98	347.70
<b>09:00</b>	438.58	48.79	49.41	617.36	378.13	29.49	30.02	541.45	279.94	7.96	8.35	412.28
<b>10:00</b>	547.66	85.98	85.22	531.94	481.34	64.97	64.31	471.74	363.65	37.07	36.59	362.45
<b>11:00</b>	601.02	114.14	116.77	382.31	531.51	92.89	95.16	338.46	407.52	61.06	62.73	261.21
<b>12:00</b>	663.49	133.83	128.68	200.83	590.28	112.29	107.75	177.09	455.01	78.50	75.10	136.06
<b>13:00</b>	637.16	278.34	143.78	142.73	568.39	240.82	123.36	122.80	442.02	176.34	88.26	89.43
<b>14:00</b>	575.66	442.27	148.19	150.08	515.58	390.11	126.66	128.34	401.52	295.61	92.32	93.69
<b>15:00</b>	478.55	540.35	144.63	144.80	428.84	480.26	122.27	122.47	334.96	368.91	88.87	89.09
<b>16:00</b>	348.97	580.64	116.96	116.88	314.07	521.16	101.61	101.52	247.10	406.23	74.90	74.83
<b>17:00</b>	218.82	473.21	52.95	53.35	189.55	413.88	44.09	44.45	144.85	321.14	29.93	30.21
<b>18:00</b>	2.63	7.67	-0.37	-0.37	-1.37	9.66	-8.00	-8.00	-2.52	15.75	-13.77	-13.78
<b>19:00</b>	-7.20	-7.20	-7.21	-7.21	-16.61	-16.53	-16.65	-16.65	-22.46	-21.74	-22.91	-22.91
<b>20:00</b>	-10.73	-10.73	-10.73	-7.21	-20.88	-20.88	-20.88	-20.88	-27.29	-27.25	-27.31	-27.31
<b>21:00</b>	-13.07	-13.07	-13.07	-13.07	-23.43	-23.43	-23.43	-23.43	-29.96	-29.95	-29.96	-29.96
<b>22:00</b>	-15.15	-15.15	-15.15	-15.15	-25.68	-25.68	-25.68	-25.68	-32.01	-32.01	-32.01	-32.01
<b>23:00</b>	-16.89	-16.89	-16.89	-16.89	-27.88	-27.88	-27.88	-27.88	-33.73	-33.73	-33.73	-33.73
<b>24:00</b>	-17.26	-17.26	-17.26	-17.26	-29.06	-29.06	-29.06	-29.06	-34.39	-34.39	-34.39	-34.39
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	5098.80	3050.65	1332.21	3251.09	4655.34	2807.24	1276.03	2975.37	3735.65	2301.45	1105.64	2382.60



Tabla B. 5. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); marzo, día más cálido.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	6.93	6.93	6.93	6.93	-0.31	-0.31	-0.31	-0.31	-8.80	-8.80	-8.80	-8.80
<b>02:00</b>	2.66	2.66	2.66	2.66	-5.10	-5.10	-5.10	-5.10	-13.13	-13.13	-13.13	-13.13
<b>03:00</b>	-0.98	-0.98	-0.98	-0.98	-9.95	-9.95	-9.95	-9.95	-17.61	-17.61	-17.61	-17.61
<b>04:00</b>	-5.34	-5.34	-5.34	-5.34	-14.66	-14.66	-14.66	-14.66	-21.70	-21.70	-21.70	-21.70
<b>05:00</b>	-8.88	-8.88	-8.88	-8.88	-18.83	-18.83	-18.83	-18.83	-25.40	-25.40	-25.40	-25.40
<b>06:00</b>	-9.35	-9.35	-9.35	-9.35	-19.77	-19.77	-19.77	-19.77	-26.73	-26.73	-26.73	-26.73
<b>07:00</b>	23.43	23.37	23.37	33.19	9.04	8.96	8.97	17.85	-5.79	-5.90	-5.88	1.15
<b>08:00</b>	111.30	99.43	99.43	162.71	88.45	78.23	78.23	132.79	55.94	48.30	48.30	89.24
<b>09:00</b>	278.37	126.67	126.67	577.96	238.55	107.76	107.76	498.04	172.74	74.42	74.42	369.60
<b>10:00</b>	396.06	136.68	135.68	597.10	348.04	119.43	118.69	527.85	261.86	83.98	83.55	406.48
<b>11:00</b>	462.64	168.96	173.51	432.66	411.30	151.62	155.39	387.89	313.94	111.26	113.87	301.28
<b>12:00</b>	504.54	200.40	196.28	242.71	452.50	182.27	179.15	223.62	348.75	135.71	133.90	174.80
<b>13:00</b>	497.78	354.47	203.88	207.68	450.20	320.22	189.36	192.74	349.60	242.48	143.80	147.03
<b>14:00</b>	469.71	561.22	201.78	202.56	426.34	504.49	187.60	188.35	332.69	388.26	144.45	145.16
<b>15:00</b>	392.67	664.75	193.54	193.39	360.03	599.35	182.02	181.88	282.64	466.13	141.01	140.90
<b>16:00</b>	300.03	651.16	177.98	179.89	277.87	588.66	168.24	169.90	218.41	460.25	130.21	131.47
<b>17:00</b>	202.72	570.63	142.35	142.83	191.79	518.82	137.21	137.67	151.36	408.22	106.80	107.22
<b>18:00</b>	74.92	177.41	74.16	73.85	79.09	173.28	77.86	77.55	63.09	145.02	60.74	60.47
<b>19:00</b>	36.41	36.43	36.41	36.41	34.22	34.45	34.22	34.22	24.63	26.07	24.54	24.54
<b>20:00</b>	17.64	17.64	17.64	17.64	10.57	10.57	10.57	10.57	2.29	2.36	2.28	2.28
<b>21:00</b>	8.67	8.67	8.67	8.67	-1.30	-1.30	-1.30	-1.30	-9.93	-9.93	-9.93	-9.93
<b>22:00</b>	6.11	6.11	6.11	6.11	-6.10	-6.10	-6.10	-6.10	-15.84	-15.84	-15.84	-15.84
<b>23:00</b>	4.68	4.68	4.68	4.68	-6.49	-6.49	-6.49	-6.49	-16.27	-16.27	-16.27	-16.27
<b>24:00</b>	0.83	0.83	0.83	0.83	-8.26	-8.26	-8.26	-8.26	-16.64	-16.64	-16.64	-16.64
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	3818.77	3839.77	1853.23	3151.13	3464.48	3484.60	1721.76	2867.41	2743.06	2757.69	1373.08	2260.95

Tabla B. 6. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); marzo, día más frío.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	-24.83	-24.83	-24.83	-24.79	-36.86	-36.86	-36.86	-36.86	-42.02	-42.02	-42.02	-42.02
<b>02:00</b>	-28.40	-28.40	-28.40	-28.40	-40.63	-40.63	-40.63	-40.63	-44.45	-44.45	-44.45	-44.45
<b>03:00</b>	-33.52	-33.52	-33.52	-33.52	-45.71	-45.71	-45.71	-45.71	-48.90	-48.90	-48.90	-48.90
<b>04:00</b>	-37.75	-37.75	-37.75	-37.75	-50.11	-50.11	-50.11	-50.11	-53.12	-53.12	-53.12	-53.12
<b>05:00</b>	-39.07	-39.07	-39.07	-39.07	-53.51	-53.51	-53.51	-53.51	-55.64	-55.64	-55.64	-55.64
<b>06:00</b>	-36.18	-36.18	-36.18	-36.18	-49.86	-49.86	-49.86	-49.86	-53.98	-53.98	-53.98	-53.98
<b>07:00</b>	31.42	12.38	12.00	373.98	10.16	-6.27	-6.59	316.68	-8.69	-20.90	-21.10	233.00
<b>08:00</b>	154.33	38.26	38.12	730.40	120.29	18.99	18.87	628.76	77.61	0.79	0.70	472.36
<b>09:00</b>	277.36	101.12	97.79	709.48	232.22	77.84	74.82	614.73	167.05	47.27	44.83	471.64
<b>10:00</b>	374.43	135.76	136.20	597.49	323.29	112.97	113.39	523.34	240.29	76.92	77.27	402.24
<b>11:00</b>	436.11	159.71	159.55	427.48	383.09	137.24	137.07	378.97	289.98	98.06	97.90	292.72
<b>12:00</b>	461.49	173.07	174.54	219.76	409.27	151.33	152.54	196.80	313.59	110.78	111.65	152.76
<b>13:00</b>	452.99	351.97	178.13	178.91	404.25	311.25	159.96	160.73	311.52	232.52	118.93	120.30
<b>14:00</b>	414.25	531.71	171.70	171.90	370.60	472.05	151.83	152.06	287.39	360.89	114.41	114.68
<b>15:00</b>	351.00	684.98	164.61	160.53	314.92	611.28	146.22	142.64	244.58	472.23	109.64	106.93
<b>16:00</b>	247.30	671.02	132.37	133.93	223.82	605.16	118.56	119.90	176.65	475.48	91.33	92.25
<b>17:00</b>	126.73	456.90	91.62	90.92	115.21	404.57	83.98	83.37	88.38	316.42	62.45	62.00
<b>18:00</b>	27.93	110.55	27.00	27.16	22.70	98.16	21.69	21.84	13.35	78.31	11.99	12.11
<b>19:00</b>	5.64	5.65	5.64	5.64	-1.66	-1.53	-1.66	-1.66	-9.27	-8.31	-9.30	-9.30
<b>20:00</b>	1.89	1.89	1.89	1.89	-6.50	-6.50	-6.50	-6.50	-14.45	-14.41	-14.45	-14.45
<b>21:00</b>	1.81	1.81	1.81	1.81	-7.93	-7.93	-7.93	-7.93	-16.94	-16.93	-16.94	-16.94
<b>22:00</b>	2.75	2.75	2.75	2.75	-5.84	-5.84	-5.84	-5.84	-14.77	-14.77	-14.77	-14.77
<b>23:00</b>	10.48	0.91	0.91	0.91	-7.34	-7.34	-7.34	-7.34	-15.27	-15.27	-15.27	-15.27
<b>24:00</b>	-8.61	-8.61	-8.61	-8.61	-17.34	-17.34	-17.34	-17.34	-23.04	-23.04	-23.04	-23.04
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	3569.55	3632.08	1588.27	4026.56	3226.01	3303.17	1481.71	3636.01	2578.40	2648.88	1221.55	2892.34

Tabla B. 7. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); mayo, día más cálido.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	5.41	5.41	5.41	5.41	-3.53	-3.53	-3.53	-3.53	-11.99	-11.99	-11.99	-11.99
<b>02:00</b>	3.96	3.96	3.96	3.96	-5.12	-5.12	-5.12	-5.12	-13.98	-13.98	-13.98	-13.98
<b>03:00</b>	2.15	2.15	2.15	2.15	-7.59	-7.59	-7.59	-7.59	-16.42	-16.42	-16.42	-16.42
<b>04:00</b>	1.39	1.39	1.39	1.39	-8.97	-8.97	-8.97	-8.97	-18.22	-18.22	-18.22	-18.22
<b>05:00</b>	2.70	2.70	2.70	2.70	-7.61	-7.61	-7.61	-7.61	-17.16	-17.16	-17.16	-17.16
<b>06:00</b>	31.00	31.14	111.85	249.73	16.92	17.03	87.84	208.06	0.93	1.00	54.07	143.67
<b>07:00</b>	88.65	88.60	188.66	447.89	70.33	70.28	159.71	390.23	43.15	43.11	113.24	292.17
<b>08:00</b>	132.17	131.76	218.00	522.43	111.33	110.98	188.36	458.95	76.51	76.25	137.83	349.54
<b>09:00</b>	138.09	130.65	222.83	651.02	121.53	114.91	196.62	575.05	86.61	81.50	145.87	441.54
<b>10:00</b>	170.90	173.69	217.30	534.79	153.44	155.91	195.01	477.22	112.42	114.28	146.00	369.75
<b>11:00</b>	203.85	202.84	223.37	388.84	184.62	183.72	202.28	351.85	138.50	137.81	152.99	274.59
<b>12:00</b>	216.63	223.16	229.07	246.59	194.89	200.59	206.11	224.06	149.16	153.44	158.13	176.03
<b>13:00</b>	215.36	398.67	235.57	208.70	199.80	359.97	217.61	194.05	152.64	274.04	166.44	148.90
<b>14:00</b>	214.13	597.52	258.96	217.79	197.04	537.60	236.78	200.29	154.39	416.58	184.90	156.82
<b>15:00</b>	209.35	539.29	254.94	202.61	195.54	488.00	235.88	189.35	151.81	385.41	183.86	146.84
<b>16:00</b>	143.51	165.74	139.69	143.90	131.43	152.95	128.59	131.79	100.93	123.24	99.99	101.22
<b>17:00</b>	66.83	71.36	69.71	66.92	56.22	60.40	58.82	56.35	39.09	42.97	41.14	39.25
<b>18:00</b>	27.23	31.25	34.02	31.49	20.87	24.51	26.84	24.70	8.82	11.73	13.32	11.77
<b>19:00</b>	27.80	27.80	27.80	27.80	21.42	21.44	21.44	21.44	9.08	9.14	9.14	9.13
<b>20:00</b>	26.52	26.52	26.52	26.52	20.29	20.29	20.29	20.29	8.37	8.37	8.37	8.37
<b>21:00</b>	23.05	23.05	23.05	23.05	15.55	15.55	15.55	15.55	4.32	4.32	4.32	4.32
<b>22:00</b>	20.01	20.01	20.01	20.01	13.49	13.49	13.49	13.49	2.41	2.41	2.41	2.41
<b>23:00</b>	19.62	19.62	19.62	19.62	12.96	12.96	12.96	12.96	1.68	1.68	1.68	1.68
<b>24:00</b>	18.41	18.41	18.41	18.41	10.38	10.38	10.38	10.38	-0.17	-0.17	-0.17	-0.17
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	1996.81	2924.78	2543.08	4051.81	1773.92	2596.83	2260.43	3601.93	1312.68	1959.14	1695.56	2749.86

Tabla B. 8. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); mayo, día más frío.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	-10.10	-10.10	-10.10	-10.10	-20.09	-20.09	-20.09	-20.09	-26.70	-26.70	-26.70	-26.70
<b>02:00</b>	-11.30	-11.30	-11.30	-11.30	-21.53	-21.53	-21.53	-21.53	-28.99	-28.99	-28.99	-28.99
<b>03:00</b>	-12.95	-12.95	-12.95	-12.95	-23.28	-23.28	-23.28	-23.28	-30.05	-30.05	-30.05	-30.05
<b>04:00</b>	-15.22	-15.22	-15.22	-15.22	-25.68	-25.68	-25.68	-25.68	-32.08	-32.08	-32.08	-32.08
<b>05:00</b>	-15.82	-15.82	-15.82	-15.82	-26.45	-26.45	-26.45	-26.45	-33.28	-33.28	-33.28	-33.28
<b>06:00</b>	16.26	15.11	267.54	827.31	1.23	0.31	224.65	719.14	-12.96	-13.57	157.46	532.09
<b>07:00</b>	66.27	66.75	241.39	843.74	47.16	47.56	205.38	744.69	23.44	23.71	149.94	573.45
<b>08:00</b>	107.97	108.98	212.78	802.36	87.01	87.91	181.51	707.13	55.86	56.57	132.35	546.93
<b>09:00</b>	150.24	149.22	193.73	734.29	126.86	126.00	166.94	653.00	88.50	87.90	121.85	506.47
<b>10:00</b>	192.07	182.65	188.27	610.16	165.42	157.13	162.90	547.03	120.64	114.39	120.09	427.30
<b>11:00</b>	224.47	195.33	192.06	415.12	194.35	168.34	165.42	373.88	145.29	125.37	123.32	295.46
<b>12:00</b>	237.57	194.40	197.03	200.78	207.52	168.35	170.68	179.36	157.16	126.43	128.16	142.69
<b>13:00</b>	232.82	405.20	201.73	200.33	204.07	355.41	175.50	174.29	155.72	268.63	132.72	132.58
<b>14:00</b>	212.62	536.20	209.98	193.37	194.64	481.49	191.51	177.44	148.94	372.06	145.32	135.15
<b>15:00</b>	205.04	548.49	230.19	205.24	191.26	492.90	213.07	191.40	146.88	383.24	163.37	146.83
<b>16:00</b>	173.74	451.16	215.20	173.52	161.92	405.54	198.11	161.73	124.07	316.23	152.09	123.94
<b>17:00</b>	115.16	205.99	133.47	115.42	107.15	188.63	123.49	107.37	80.84	148.89	94.25	80.99
<b>18:00</b>	28.24	28.18	28.24	28.24	27.98	27.86	27.99	27.97	18.43	18.90	18.60	18.41
<b>19:00</b>	18.37	18.37	18.37	18.37	14.25	14.25	14.25	14.25	4.84	4.86	4.85	4.84
<b>20:00</b>	12.74	12.74	12.74	12.74	6.13	6.13	6.13	6.13	-3.05	-3.05	-3.05	-3.05
<b>21:00</b>	10.81	10.81	10.81	10.81	3.57	3.57	3.57	3.66	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00
<b>22:00</b>	11.28	11.28	11.28	11.28	3.46	3.46	3.46	3.44	-6.49	-6.49	-6.49	-6.49
<b>23:00</b>	10.48	10.48	10.48	10.48	1.66	1.66	1.66	1.66	-8.12	-8.12	-8.12	-8.12
<b>24:00</b>	1.85	1.85	1.85	1.85	-6.73	-6.73	-6.73	-6.73	-14.48	-14.48	-14.48	-14.48
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	2087.42	3212.61	2636.56	5474.83	1855.99	2846.85	2346.57	4903.92	1452.22	2229.40	1813.02	3835.78

Tabla B. 9. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); junio, día más cálido.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	5.70	5.70	5.70	5.70	-3.51	-3.51	-3.51	-3.51	-11.40	-11.40	-11.40	-11.40
<b>02:00</b>	3.66	3.66	3.66	3.66	-6.39	-6.39	-6.39	-6.39	-15.49	-15.49	-15.49	-15.49
<b>03:00</b>	1.54	1.54	1.54	1.54	-8.53	-8.53	-8.53	-8.53	-17.45	-17.45	-17.45	-17.45
<b>04:00</b>	-1.40	-1.40	-1.40	-1.40	-11.66	-11.66	-11.66	-11.66	-20.38	-20.38	-20.38	-20.38
<b>05:00</b>	-3.29	-3.29	-3.29	-3.29	-14.29	-14.29	-14.29	-14.29	-23.08	-23.08	-23.08	-23.08
<b>06:00</b>	29.46	28.94	306.70	755.94	12.33	11.88	264.76	670.98	-4.55	-4.88	187.43	494.96
<b>07:00</b>	79.93	80.38	290.47	748.63	57.82	58.21	254.07	676.23	31.69	31.98	189.85	524.66
<b>08:00</b>	126.51	126.31	281.95	787.07	104.16	104.00	246.94	705.23	70.59	70.48	186.38	549.41
<b>09:00</b>	169.18	168.86	284.11	773.69	144.38	144.09	249.31	693.81	104.31	104.07	188.64	541.06
<b>10:00</b>	193.19	193.80	255.46	636.89	168.32	168.86	225.64	572.13	124.19	124.59	171.41	449.32
<b>11:00</b>	197.54	197.09	233.22	415.62	172.22	171.85	205.02	374.92	128.77	128.52	155.60	296.67
<b>12:00</b>	196.62	198.25	219.85	218.27	172.92	174.27	194.15	196.35	130.58	131.52	147.78	155.21
<b>13:00</b>	206.58	371.57	221.79	208.32	182.98	328.94	196.98	184.87	138.52	249.52	149.94	140.90
<b>14:00</b>	195.47	545.47	248.12	195.03	172.19	484.98	218.74	171.76	131.30	372.78	166.79	131.03
<b>15:00</b>	181.35	696.74	288.55	183.20	156.36	623.93	253.14	158.01	120.50	485.45	195.38	121.75
<b>16:00</b>	159.55	634.81	268.67	160.48	142.10	574.87	241.25	142.97	109.69	454.74	188.37	110.42
<b>17:00</b>	128.55	341.96	188.44	128.33	121.79	310.70	174.56	121.61	92.03	247.56	134.85	91.92
<b>18:00</b>	53.83	60.27	57.93	53.85	51.08	57.82	55.18	51.09	36.75	45.39	41.15	36.74
<b>19:00</b>	22.31	22.31	22.31	22.31	18.44	18.46	18.45	18.44	8.32	8.53	8.40	8.32
<b>20:00</b>	17.81	17.81	17.81	17.81	8.98	8.98	8.98	8.98	-1.07	-1.06	-1.07	-1.07
<b>21:00</b>	16.44	16.44	16.44	16.44	6.73	6.73	6.73	6.73	-4.24	-4.24	-4.24	-4.24
<b>22:00</b>	16.25	16.25	16.25	16.25	7.11	7.11	7.11	7.11	-3.84	-3.84	-3.84	-3.84
<b>23:00</b>	14.56	14.56	14.56	14.56	6.67	6.67	6.67	6.67	-3.98	-3.98	-3.98	-3.98
<b>24:00</b>	7.97	7.97	7.97	7.97	0.06	0.06	0.06	0.06	-8.61	-8.61	-8.61	-8.61
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	2021.86	3748.55	3249.36	5369.42	1749.24	3305.01	2870.34	4810.55	1331.33	2559.54	2211.51	3751.91

Tabla B. 10. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); junio, día más frío.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	-3.15	-3.15	-3.15	-3.15	-12.77	-12.77	-12.77	-12.77	-20.35	-20.35	-20.35	-20.35
<b>02:00</b>	-5.03	-5.03	-5.03	-5.03	-14.94	-14.94	-14.94	-14.94	-22.88	-22.88	-22.88	-22.88
<b>03:00</b>	-7.59	-7.59	-7.59	-7.59	-17.55	-17.55	-17.55	-17.55	-25.12	-25.12	-25.12	-25.12
<b>04:00</b>	-9.49	-9.49	-9.49	-9.49	-19.67	-19.67	-19.67	-19.67	-26.89	-26.89	-26.89	-26.89
<b>05:00</b>	-8.66	-8.66	-8.66	-8.66	-19.20	-19.20	-19.20	-19.20	-27.13	-27.13	-27.13	-27.13
<b>06:00</b>	23.33	26.43	316.85	575.53	9.05	11.71	270.20	495.49	-6.05	-4.10	193.63	362.09
<b>07:00</b>	64.89	62.51	288.71	753.86	47.69	45.65	248.65	662.75	24.95	23.48	184.58	506.58
<b>08:00</b>	116.49	116.61	286.27	779.47	96.89	96.93	247.40	682.56	64.31	64.25	184.04	525.30
<b>09:00</b>	168.34	171.02	306.21	811.07	146.15	148.50	268.39	714.33	104.68	106.49	201.49	551.30
<b>10:00</b>	202.75	200.68	287.12	672.57	180.01	178.25	254.84	595.83	132.75	131.50	192.73	463.62
<b>11:00</b>	214.53	213.15	264.68	468.79	190.73	189.43	235.65	419.60	142.81	141.73	178.86	327.88
<b>12:00</b>	215.37	221.49	255.08	245.91	192.65	198.04	228.05	223.26	144.49	148.59	172.62	174.79
<b>13:00</b>	191.12	381.00	233.62	189.94	170.19	337.63	208.36	169.21	130.75	257.23	160.60	130.66
<b>14:00</b>	156.31	486.84	219.07	158.15	137.84	428.50	193.06	139.72	102.72	327.76	145.60	104.49
<b>15:00</b>	152.57	536.76	225.62	149.16	132.51	469.26	196.50	129.62	96.80	359.18	146.66	94.77
<b>16:00</b>	117.51	566.34	227.70	116.23	100.60	494.16	197.16	99.52	71.95	378.09	146.80	71.15
<b>17:00</b>	98.23	208.37	137.57	98.94	82.95	183.45	118.18	83.50	57.76	144.08	86.84	58.04
<b>18:00</b>	21.10	23.02	17.75	21.30	13.95	15.99	11.44	14.12	4.04	6.92	3.03	4.17
<b>19:00</b>	8.94	8.94	8.94	8.94	0.86	0.87	0.86	0.86	-8.14	-8.05	-6.73	-8.14
<b>20:00</b>	6.47	6.47	6.47	6.47	-2.10	-2.10	-2.10	-2.10	-11.18	-11.17	-11.11	-11.18
<b>21:00</b>	4.10	4.10	4.10	4.10	-4.46	-4.46	-4.46	-4.46	-13.01	-13.01	-13.01	-13.01
<b>22:00</b>	1.80	1.80	1.80	1.80	-6.55	-6.55	-6.55	-6.55	-14.62	-14.62	-14.62	-14.62
<b>23:00</b>	-0.87	-0.87	-0.87	-0.87	-10.28	-10.28	-10.28	-10.28	-18.30	-18.30	-18.30	-18.30
<b>24:00</b>	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-14.14	-14.14	-14.14	-14.14	-21.04	-21.04	-21.04	-21.04
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	1799.57	3271.25	3123.28	5097.95	1610.28	2906.58	2786.95	4538.58	1272.03	2281.27	2183.97	3562.81

Tabla B. 11. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); agosto, día más cálido.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	11.75	11.75	11.75	11.75	2.53	2.53	2.53	2.53	-6.05	-6.05	-6.05	-6.05
<b>02:00</b>	9.41	9.41	9.41	9.41	0.49	0.49	0.49	0.49	-9.10	-9.10	-9.10	-9.10
<b>03:00</b>	6.53	6.53	6.53	6.53	-2.66	-2.66	-2.66	-2.66	-11.77	-11.77	-11.77	-11.77
<b>04:00</b>	3.94	3.94	3.94	3.94	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-15.00	-15.00	-15.00	-15.00
<b>05:00</b>	2.91	2.91	2.91	2.91	-7.28	-7.28	-7.28	-7.28	-16.63	-16.63	-16.63	-16.63
<b>06:00</b>	5.52	8.60	7.21	5.87	-4.38	-1.79	-2.96	-4.09	-14.23	-12.35	-13.20	-14.02
<b>07:00</b>	66.19	69.41	73.48	82.22	49.26	52.03	55.62	63.44	26.26	28.26	31.00	37.10
<b>08:00</b>	121.99	116.14	120.71	150.20	101.60	96.50	100.59	126.54	68.58	64.77	68.00	87.89
<b>09:00</b>	185.10	189.66	187.96	199.76	158.83	162.74	161.33	171.69	113.82	116.63	115.68	123.91
<b>10:00</b>	240.51	219.95	222.69	459.52	212.69	194.87	197.19	404.00	158.16	144.87	146.55	303.30
<b>11:00</b>	238.06	189.69	176.20	414.08	213.27	170.57	158.91	371.45	160.27	127.20	118.50	287.24
<b>12:00</b>	269.36	202.06	196.38	239.07	244.19	184.50	179.79	219.95	185.50	138.59	135.18	171.34
<b>13:00</b>	272.94	364.41	206.33	199.06	245.74	324.22	186.01	179.70	188.93	245.86	141.79	137.64
<b>14:00</b>	244.29	584.59	194.25	202.38	223.85	522.14	179.16	186.07	172.12	400.26	136.42	141.41
<b>15:00</b>	205.21	748.17	190.84	196.59	186.71	669.73	173.14	178.67	143.87	518.74	132.11	136.81
<b>16:00</b>	154.31	780.88	202.52	132.65	142.00	700.15	183.99	122.72	109.77	546.58	141.08	94.75
<b>17:00</b>	114.63	778.68	206.09	106.04	106.80	696.84	187.58	98.95	80.92	544.87	143.50	74.39
<b>18:00</b>	76.00	332.25	148.22	76.18	69.05	303.94	133.93	69.15	50.77	245.69	102.32	50.67
<b>19:00</b>	40.86	41.99	41.20	40.86	34.72	39.89	36.24	34.71	21.58	33.89	25.00	21.56
<b>20:00</b>	34.99	34.99	34.99	34.99	29.08	29.13	29.09	29.08	16.20	16.84	16.38	16.20
<b>21:00</b>	29.46	29.46	29.46	29.46	23.97	23.97	23.97	23.97	12.18	12.21	12.19	12.18
<b>22:00</b>	24.41	24.41	24.41	24.41	19.14	19.14	19.14	19.14	7.61	7.61	7.61	7.61
<b>23:00</b>	20.33	20.33	20.33	20.33	12.74	12.74	12.74	12.74	2.10	2.10	2.10	2.10
<b>24:00</b>	18.01	18.01	18.01	18.01	10.69	10.69	10.69	10.69	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	2381.83	4773.34	2320.94	2651.34	2101.06	4227.93	2044.42	2339.10	1588.44	3262.89	1544.18	1775.69

Tabla B. 12. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); agosto, día más frío.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	9.16	9.16	9.16	9.16	-2.58	-2.58	-2.58	-2.58	-12.27	-12.27	-12.27	-12.27
<b>02:00</b>	8.49	8.49	8.49	8.49	-1.16	-1.16	-1.16	-1.16	-11.26	-11.26	-11.26	-11.26
<b>03:00</b>	5.45	5.45	5.45	5.45	-3.92	-3.92	-3.92	-3.92	-13.09	-13.09	-13.09	-13.09
<b>04:00</b>	3.22	3.22	3.22	3.22	-6.71	-6.71	-6.71	-6.71	-15.79	-15.79	-15.79	-15.79
<b>05:00</b>	3.77	3.77	3.77	3.77	-6.66	-6.66	-6.66	-6.66	-16.24	-16.24	-16.24	-16.24
<b>06:00</b>	9.49	9.97	11.95	8.00	-0.83	-0.43	1.23	-2.09	-11.79	-11.49	-10.28	-12.70
<b>07:00</b>	77.05	77.54	90.95	148.15	59.31	59.74	71.12	120.56	33.90	34.21	42.44	79.30
<b>08:00</b>	129.06	128.82	177.19	492.79	108.06	107.83	150.90	429.93	74.21	74.02	107.17	319.98
<b>09:00</b>	159.89	158.54	180.00	584.01	137.40	136.29	156.24	518.57	98.85	98.07	114.64	398.02
<b>10:00</b>	193.12	174.73	172.99	603.54	168.53	152.26	151.06	538.65	124.19	111.92	111.66	416.92
<b>11:00</b>	247.38	194.39	194.34	440.28	220.37	173.55	173.52	397.66	165.51	129.58	129.60	312.37
<b>12:00</b>	275.33	212.84	211.11	255.80	243.82	185.75	185.75	230.82	186.66	142.30	141.03	183.18
<b>13:00</b>	280.73	397.05	220.01	219.77	253.01	353.17	198.36	198.29	194.88	267.88	151.55	152.49
<b>14:00</b>	243.11	580.31	210.35	210.03	218.73	519.14	188.31	188.11	170.39	401.34	145.27	145.25
<b>15:00</b>	213.36	519.85	219.19	212.60	200.64	468.41	205.49	199.83	154.80	366.82	157.84	153.62
<b>16:00</b>	155.88	177.80	161.86	155.76	139.61	163.34	145.05	139.51	108.09	133.21	112.42	108.00
<b>17:00</b>	56.57	63.54	57.90	56.63	44.55	50.83	45.86	44.60	30.71	36.34	31.88	30.74
<b>18:00</b>	35.96	31.89	38.93	35.88	24.25	20.62	26.87	24.18	10.70	8.10	12.71	10.65
<b>19:00</b>	7.55	7.61	7.59	7.55	-3.43	-3.17	-3.23	-3.43	-12.54	-12.19	-12.21	-12.54
<b>20:00</b>	7.06	7.06	7.06	7.06	-2.94	-2.94	-2.94	-2.94	-12.88	-12.86	-12.86	-12.88
<b>21:00</b>	6.26	6.26	6.26	6.26	-2.71	-2.71	-2.71	-2.71	-12.48	-12.48	-12.48	-12.48
<b>22:00</b>	4.59	4.59	4.59	4.59	-4.80	-4.80	-4.80	-4.80	-13.78	-13.78	-13.78	-13.78
<b>23:00</b>	3.06	3.06	3.06	3.06	-6.44	-6.44	-6.44	-6.44	-15.39	-15.39	-15.39	-15.39
<b>24:00</b>	2.66	2.66	2.66	2.66	-7.72	-7.72	-7.72	-7.72	-16.94	-16.94	-16.94	-16.94
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	2132.29	2782.69	2002.17	3478.60	1863.03	2435.02	1743.48	3076.72	1502.74	1952.97	1406.20	2461.28



Tabla B. 13. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); septiembre, día más cálido.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	1.38	1.38	1.38	1.38	-7.97	-7.97	-7.97	-7.97	-15.90	-15.90	-15.90	-15.90
<b>02:00</b>	0.18	0.18	0.18	0.18	-9.55	-9.55	-9.55	-9.55	-18.13	-18.13	-18.13	-18.13
<b>03:00</b>	-1.10	-1.10	-1.10	-1.10	-11.05	-11.05	-11.05	-11.05	-19.61	-19.61	-19.61	-19.61
<b>04:00</b>	-2.99	-2.99	-2.99	-2.99	-12.84	-12.84	-12.84	-12.84	-21.06	-21.06	-21.06	-21.06
<b>05:00</b>	-6.03	-6.03	-6.03	-6.03	-15.99	-15.99	-15.99	-15.99	-23.98	-23.98	-23.98	-23.98
<b>06:00</b>	-8.68	-8.68	-6.53	-4.25	-19.45	-19.45	-17.65	-15.73	-27.62	-27.62	-26.31	-24.91
<b>07:00</b>	60.98	64.48	72.98	237.71	42.35	45.27	52.86	194.97	18.99	21.02	26.82	131.58
<b>08:00</b>	128.78	110.74	113.26	558.46	106.37	90.89	93.17	489.22	70.80	59.44	61.31	367.80
<b>09:00</b>	206.05	125.85	122.11	686.43	178.11	107.49	104.23	608.65	128.90	75.04	72.68	467.86
<b>10:00</b>	284.76	153.94	156.03	567.37	249.83	133.18	134.93	508.01	186.73	96.04	97.42	396.44
<b>11:00</b>	346.68	183.63	181.47	412.91	306.91	160.58	158.67	370.84	233.47	118.85	117.44	290.53
<b>12:00</b>	377.88	197.33	196.12	218.74	337.54	175.61	174.62	198.89	259.31	131.76	131.05	156.72
<b>13:00</b>	383.33	409.87	205.07	206.55	344.50	364.07	185.00	186.35	266.05	275.18	140.05	141.70
<b>14:00</b>	351.47	610.41	203.25	202.76	316.99	545.17	183.36	182.99	246.38	419.78	139.87	139.70
<b>15:00</b>	273.47	733.37	178.40	180.11	246.26	657.30	159.14	160.54	192.63	511.26	121.94	122.92
<b>16:00</b>	168.41	818.22	130.32	149.75	154.54	734.24	119.43	136.52	120.96	573.31	91.57	104.55
<b>17:00</b>	100.78	822.82	137.22	105.28	93.12	736.49	124.17	97.01	71.16	577.06	93.17	73.72
<b>18:00</b>	56.20	903.93	152.62	51.57	52.05	797.47	135.85	48.00	36.84	617.97	100.52	33.78
<b>19:00</b>	26.15	26.65	26.23	26.15	21.89	24.98	22.32	21.89	10.93	23.51	12.54	10.93
<b>20:00</b>	22.16	22.16	22.16	22.16	18.25	18.27	18.25	18.25	6.77	7.24	6.83	6.77
<b>21:00</b>	18.80	18.80	18.80	18.80	14.30	14.30	14.30	14.30	3.40	3.42	3.41	3.40
<b>22:00</b>	13.88	13.88	13.88	13.88	6.16	6.16	6.16	6.16	-3.38	-3.38	-3.38	-3.38
<b>23:00</b>	8.41	8.41	8.41	8.41	0.23	0.23	0.23	0.23	-8.58	-8.58	-8.58	-8.58
<b>24:00</b>	6.19	6.19	6.19	6.19	-2.59	-2.59	-2.59	-2.59	-11.78	-11.78	-11.78	-11.78
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	2850.96	5247.26	1958.95	3685.38	2563.56	4685.86	1759.05	3313.26	1989.52	3647.08	1351.51	2581.89

Tabla B. 14. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); septiembre, día más frío.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	4.67	4.67	4.67	4.67	-3.74	-3.74	-3.74	-3.74	-11.21	-11.21	-11.21	-11.21
<b>02:00</b>	1.24	1.24	1.24	1.24	-8.33	-8.33	-8.33	-8.33	-16.74	-16.74	-16.74	-16.74
<b>03:00</b>	-1.32	-1.32	-1.32	-1.32	-11.49	-11.49	-11.49	-11.49	-20.20	-20.20	-20.20	-20.20
<b>04:00</b>	-2.79	-2.79	-2.79	-2.79	-12.87	-12.87	-12.87	-12.87	-21.25	-21.25	-21.25	-21.25
<b>05:00</b>	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-12.32	-12.32	-12.32	-12.32	-21.23	-21.23	-21.23	-21.23
<b>06:00</b>	7.12	5.16	2.15	193.48	-4.15	-5.79	-8.32	152.41	-14.91	-16.11	-17.95	99.08
<b>07:00</b>	99.26	47.75	47.78	679.42	78.06	33.15	33.17	592.96	47.66	13.96	13.94	443.82
<b>08:00</b>	219.77	79.81	79.85	769.77	187.85	64.75	64.78	678.47	134.40	39.94	39.96	522.02
<b>09:00</b>	335.49	139.92	137.98	712.14	294.14	122.34	120.59	628.50	219.31	85.46	84.07	486.79
<b>10:00</b>	425.74	170.21	168.64	591.23	377.23	151.71	150.41	526.62	286.65	111.16	110.25	409.03
<b>11:00</b>	479.12	186.66	187.24	405.12	427.08	166.59	167.00	365.06	328.37	124.13	124.32	286.17
<b>12:00</b>	491.85	202.69	192.64	211.92	440.42	182.56	173.88	193.66	340.82	137.20	130.76	151.53
<b>13:00</b>	467.41	410.87	186.70	185.59	419.78	365.47	169.22	168.32	325.92	276.95	128.38	128.24
<b>14:00</b>	414.30	574.82	185.93	187.66	374.82	514.81	170.62	172.11	291.78	396.45	129.79	130.91
<b>15:00</b>	315.02	592.10	164.31	167.85	287.18	529.64	153.82	156.95	224.51	412.25	117.86	120.33
<b>16:00</b>	197.49	479.21	135.21	133.66	177.10	430.01	119.97	118.64	138.11	336.39	91.30	90.34
<b>17:00</b>	83.27	229.77	68.65	70.08	70.52	208.23	56.24	57.48	52.26	166.50	39.38	40.27
<b>18:00</b>	1.96	33.07	6.48	4.34	-4.92	23.48	-1.13	-3.00	-10.22	14.73	-7.83	-9.24
<b>19:00</b>	-7.98	-7.98	-7.98	-7.98	-17.21	-17.13	-17.21	-17.21	-24.25	-23.71	-24.25	-24.27
<b>20:00</b>	-12.27	-12.27	-12.27	-12.27	-21.62	-21.61	-21.62	-21.62	-30.00	-29.95	-30.00	-30.00
<b>21:00</b>	-12.29	-12.29	-12.29	-12.29	-22.50	-22.50	-22.50	-22.50	-30.81	-30.81	-30.81	-30.81
<b>22:00</b>	-10.29	-10.29	-10.29	-10.29	-20.86	-20.86	-20.86	-20.86	-29.58	-29.58	-29.58	-29.58
<b>23:00</b>	-9.83	-9.83	-9.83	-9.83	-20.05	-20.05	-20.05	-20.05	-29.41	-29.41	-29.41	-29.41
<b>24:00</b>	-15.75	-15.75	-15.75	-15.75	-24.08	-24.08	-24.08	-24.08	-31.89	-31.89	-31.89	-31.89
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	3608.02	3222.26	1633.78	4382.48	3304.41	2959.60	1550.31	3975.34	2659.94	2375.66	1280.81	3162.81

Tabla B. 15. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); noviembre, día más más cálido.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	-2.94	-2.94	-2.94	-2.94	-12.59	-12.59	-12.59	-12.59	-20.07	-20.07	-20.07	-20.07
<b>02:00</b>	-4.50	-4.50	-4.50	-4.50	-14.34	-14.34	-14.34	-14.34	-22.31	-22.31	-22.31	-22.31
<b>03:00</b>	-7.68	-7.68	-7.68	-7.68	-17.47	-17.47	-17.47	-17.47	-24.74	-24.74	-24.74	-24.74
<b>04:00</b>	-11.37	-11.37	-11.37	-11.37	-21.37	-21.37	-21.37	-21.37	-28.25	-28.25	-28.25	-28.25
<b>05:00</b>	-13.03	-13.03	-13.03	-13.03	-23.43	-23.43	-23.43	-23.43	-30.48	-30.48	-30.48	-30.48
<b>06:00</b>	-10.32	-10.32	-10.32	-10.32	-21.19	-21.19	-21.19	-21.19	-29.29	-29.29	-29.29	-29.29
<b>07:00</b>	391.88	40.48	40.48	877.08	335.62	24.10	24.17	769.10	244.08	5.02	5.08	580.12
<b>08:00</b>	491.06	87.16	87.08	784.86	427.73	68.48	68.40	692.90	322.76	41.23	41.17	536.87
<b>09:00</b>	576.37	124.00	124.17	670.96	506.55	104.69	104.84	593.74	385.96	71.56	71.67	459.75
<b>10:00</b>	650.88	153.28	153.05	532.09	575.65	135.22	135.02	473.45	442.31	97.17	97.02	367.65
<b>11:00</b>	694.89	169.60	169.94	341.40	619.14	150.88	151.17	307.47	479.06	111.74	111.95	240.32
<b>12:00</b>	695.96	213.66	174.39	101.00	621.88	190.71	157.47	96.26	483.79	142.01	117.80	77.12
<b>13:00</b>	659.08	389.56	162.03	161.82	590.35	346.93	147.13	146.63	460.13	262.92	110.56	109.64
<b>14:00</b>	581.58	548.03	156.38	156.79	523.33	489.70	142.36	142.75	409.92	377.00	107.63	107.92
<b>15:00</b>	413.51	501.41	151.42	151.77	374.84	451.52	136.67	136.85	296.37	353.29	103.41	103.43
<b>16:00</b>	168.36	228.61	119.18	118.13	155.04	209.76	108.53	107.68	123.50	167.78	81.63	81.09
<b>17:00</b>	41.56	43.13	41.00	43.24	36.42	38.39	35.67	37.57	26.05	28.83	24.45	25.82
<b>18:00</b>	30.15	30.15	30.15	30.15	23.75	23.76	23.74	23.75	12.55	12.66	12.48	12.49
<b>19:00</b>	22.25	22.25	22.25	22.25	15.05	15.05	15.05	15.05	4.55	4.55	4.54	4.54
<b>20:00</b>	15.62	15.62	15.62	15.62	6.85	6.85	6.85	6.85	-2.98	-2.98	-2.98	-2.98
<b>21:00</b>	10.39	10.39	10.39	10.39	1.74	1.74	1.74	1.74	-7.72	-7.72	-7.72	-7.72
<b>22:00</b>	6.40	6.40	6.40	6.40	-2.58	-2.58	-2.58	-2.58	-11.56	-11.56	-11.56	-11.56
<b>23:00</b>	3.22	3.22	3.22	3.22	-5.13	-5.13	-5.13	-5.13	-13.71	-13.71	-13.71	-13.71
<b>24:00</b>	0.12	0.12	0.12	0.12	-9.33	-9.33	-9.33	-9.33	-17.53	-17.53	-17.53	-17.53
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	5501.59	2635.38	1515.58	4075.60	4930.41	2374.25	1375.28	3668.26	3880.87	1865.60	1079.23	2896.60

Tabla B. 16. Flujo de calor total al interior (W/m<sup>2</sup>); noviembre, día más frío.

Horario	Configuración C1				Configuración C2				Configuración C3			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
<b>01:00</b>	-50.56	-50.56	-50.56	-50.56	-53.93	-53.93	-53.93	-53.93	-63.00	-63.00	-63.00	-63.00
<b>02:00</b>	-50.85	-50.85	-50.85	-50.85	-53.34	-53.34	-53.34	-53.34	-59.54	-59.54	-59.54	-59.54
<b>03:00</b>	-50.94	-50.94	-50.94	-50.94	-52.46	-52.46	-52.46	-52.46	-59.28	-59.28	-59.28	-59.28
<b>04:00</b>	-52.11	-52.11	-52.11	-52.11	-53.32	-53.32	-53.32	-53.32	-59.46	-59.46	-59.46	-59.46
<b>05:00</b>	-52.94	-52.94	-52.94	-52.94	-55.06	-55.06	-55.06	-55.06	-60.64	-60.64	-60.64	-60.64
<b>06:00</b>	-49.31	-49.31	-49.31	-49.31	-54.19	-54.19	-54.19	-54.19	-60.68	-60.68	-60.68	-60.68
<b>07:00</b>	366.29	3.43	4.11	822.94	326.95	-8.35	-7.71	747.11	233.85	-26.71	-26.22	554.88
<b>08:00</b>	488.66	70.80	69.99	756.91	425.83	49.83	49.10	671.94	319.84	22.53	21.97	521.13
<b>09:00</b>	587.18	107.12	108.21	677.21	515.59	86.12	87.07	599.83	392.60	55.41	56.11	464.76
<b>10:00</b>	720.84	144.19	143.50	561.33	632.71	120.64	120.06	494.94	484.36	83.99	83.59	383.17
<b>11:00</b>	793.70	166.34	166.21	372.39	700.46	141.54	141.38	328.53	540.47	101.38	101.22	254.37
<b>12:00</b>	737.69	189.36	155.53	182.16	654.92	161.55	130.09	159.48	508.63	116.59	93.76	121.47
<b>13:00</b>	620.95	349.85	128.49	131.36	551.82	304.78	109.47	112.47	429.31	227.23	77.98	81.19
<b>14:00</b>	492.91	444.79	138.72	138.86	436.45	390.56	119.15	119.25	338.48	296.72	85.51	85.64
<b>15:00</b>	334.95	397.91	125.00	124.91	295.27	350.03	106.97	106.91	228.39	268.90	76.62	76.59
<b>16:00</b>	134.12	194.52	78.22	78.26	116.07	169.96	64.44	64.46	88.17	130.67	43.87	43.88
<b>17:00</b>	4.20	20.38	5.75	6.53	-3.36	11.92	-2.17	-1.49	-8.96	4.29	-9.00	-8.49
<b>18:00</b>	-6.29	-6.28	-6.29	-6.29	-15.49	-15.43	-15.49	-15.49	-22.02	-21.71	-22.08	-22.07
<b>19:00</b>	-12.11	-12.11	-12.11	-12.11	-22.17	-22.17	-22.17	-22.17	-28.17	-28.16	-28.18	-28.18
<b>20:00</b>	-15.57	-15.57	-15.57	-15.57	-26.30	-26.30	-26.30	-26.30	-32.05	-32.05	-32.05	-32.05
<b>21:00</b>	-17.76	-17.76	-17.76	-17.76	-28.50	-28.50	-28.50	-28.50	-34.45	-34.45	-34.45	-34.45
<b>22:00</b>	-20.39	-20.39	-20.39	-20.39	-31.28	-31.28	-31.28	-31.28	-36.75	-36.75	-36.75	-36.75
<b>23:00</b>	-24.04	-24.04	-24.04	-24.04	-34.77	-34.77	-34.77	-34.77	-39.94	-39.94	-39.94	-39.94
<b>24:00</b>	-25.19	-25.19	-25.19	-25.19	-36.04	-36.04	-36.04	-36.04	-41.91	-41.91	-41.91	-41.91
$\int_{00:00}^{24:00} q(t)dt$	5671.68	2478.87	1513.92	4243.05	5131.30	2267.09	1409.48	3878.28	4118.50	1879.54	1221.36	3141.07

### Anexo C. Productos y beneficios obtenidos

En este anexo se presentan los productos y beneficios obtenidos durante el desarrollo de este trabajo de tesis, los cuales se enlistan a continuación:

- a) Estancia académica en la Northeast Petroleum University, situada en Daqing H., Republica Popular China.
- b) Reconocimiento por obtener un promedio de 99 en maestría en ciencias en Ingeniería Mecánica línea del conocimiento Análisis y diseño térmico de edificaciones y sistemas solares relacionados.



# 东北石油大学

Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor  
Depart.of Mech. Engineering  
National Research Centre and Technological  
Development - CENIDET,  
Cuernavaca, Morelos, México  
Email: jxaman@cenidet.edu.mx

School of Architecture and Civil Engineering  
Northeast Petroleum University  
No. 99 Fuxue Street  
Daqing, Heilongjiang, 163318, P.R. China  
Phone: +86-459-6507763 Fax: +86-459-6507763  
Email: lidong@nepu.edu.cn

Dear Professor Jesús Xamán,

Regarding a collaborative opportunity involving one of your Master students at the National Research Centre and Tecnology Development (CENIDET) Miss **Samanta López Salazar**, I inform you that the Prof. Dong Li would be very happy to accept Miss S. López Salazar within his research group at the School of Architecture and Civil Engineering of the Northeast Petroleum University to work on activities related to the study of the “Experimental thermal performance of windows with and without a PCM”, as described in the attached document.

As an activity related to his Master Project titled: **Evaluación térmica de ventanas de vidrio triple para un clima cálido de México** (Thermal evaluation of triple glazing windows for a warm climate of Mexico), Miss S. López Salazar may carry out a period stay from **01/July 2019 to 31/ October 2019** at the Northeast Petroleum University. An attachment to this letter provides some details on his activities schedule.

I understand that no financial funds will be required from Northeast Petroleum University to support Miss **S. López Salazar** during his stay.

I look forward to collaborating on this project and to hosting your student.

Best regards,

Prof. Lingyong Ma

Director

School of Architecture and Civil  
Engineering



Prof. Dr. Dong Li

International Orientador

School of Architecture and Civil  
Engineering

地址：黑龙江省大庆市高新技术开发区学府街 99 号  
电话：+86-459-6507763

传 真：+86-459-6507763  
电子邮箱：lidong@nepu.edu.cn



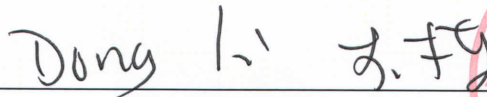
# 东北石油大学

Daqing, Heilongjiang, P. R. China, October 31 2019

TO WHOM IT MAY CONCERN:

This letter is to certify that Master's student Samanta López Salazar was worked from 01/July to 31/October 2019 at the School of Architecture and Civil Engineering of Northeast Petroleum University (NEPU) in Daqing, Heilongjiang, P. R. China, on activities related to the study of experimental thermal performance of windows with and without phase change material (PCM), activities related to her master's project entitled: **Evaluación térmica de ventanas de vidrio triple para un clima cálido de México** (Thermal evaluation of triple glazing windows for a warm climate of Mexico). The specific objective, expected results and the activities Schedule during the stay at NEPU of Eng. Samanta López Salazar were Satisfactory.

Sincerely,



Prof. Dr. Dong Li  
International advisor  
School of Architecture and Civil Engineering  
Northeast Petroleum University



地址：黑龙江省大庆市高新技术开发区学府街 99 号  
电话：+86-459-6507763

传 真：+86-459-6507763  
电子邮箱：lidong@nepu.edu.c



**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y  
DESARROLLO TECNOLÓGICO**

OTORGA EL PRESENTE

**RECONOCIMIENTO**

A

**SAMANTA LÓPEZ SALAZAR**

TecNM/CENIDET

POR OBTENER UN PROMEDIO DE 99 EN MAESTRÍA EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA MECÁNICA LÍNEA DEL CONOCIMIENTO ANÁLISIS Y  
DISEÑO TÉRMICO DE EDIFICACIONES Y SISTEMAS SOLARES  
RELACIONADOS

CUERNAVACA, MOR., 25 DE MAYO DE 2020

**DRA. YESICA IMELDA SAAVEDRA BENÍTEZ**  
DIRECTORA



LSS004220

<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>

Sello Digital:

*SQ49/NmxLgH2Kt9vutw0MsPxPc8kyeXY76tNI71yCaQQXe7XmQVo1KgghkPpRmp4Fd5Z10Jm0ptxd/65K8KvmJh4m0uJcVFQC8Wf0ydpHUAH5K+ZWr/hD0PMD12mcfYKiA+Jt50+JBdUvg8kIIDmfYUtsX9AY2qUwwoBn+Aot4k0zty07ZPVVvFNkSfoqyPcpHAqEXu/1t15Yv26fsCXaCEoZAYEffk6qLx1GxdEWExZFWtJz111RikFchwesJsHqfFAYj/YAGPoNNFNfarhbQEmYUhyK9HgLiRyBg90U/sz8nKIAX0qV/TgF4Z1vMCx7b5GrV5Vy3YmZyzbkIkq==*

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C. P. 62490 Cuernavaca, Morelos.  
Tel. (01) 777 3 62 77 70, ext. 4101, e-mail: [dir\\_cenidet@tecnm.mx](mailto:dir_cenidet@tecnm.mx)

[www.tecnm.mx](http://www.tecnm.mx) | [www.cenidet.tecnm.mx](http://www.cenidet.tecnm.mx)





**TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO**

---

***cenidet***<sup>®</sup>  
Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico