



SEP

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

# Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

## Tesis de Maestría

Modelación Dinámica de Ventanas de Vidrio Doble

presentada por

**Ing. Luis David Ake Valle**

como requisito para la obtención del grado de  
**Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica**

Director de tesis

**Dr. Yvonne Chávez Chena.**

Codirector de tesis

**Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor**

Cuernavaca, Morelos, México. Diciembre de 2018.

Cuernavaca, Mor., 08/noviembre /2018

OFICIO No. DIM/244/2018

**Asunto:** Aceptación de documento de tesis

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

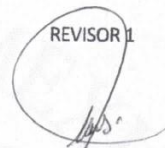
Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. Ing. Luis David Ake Valle, con número de control M16CE052, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"Modelación dinámica de ventanas de vidrio doble"** y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS



\_\_\_\_\_  
DRA. YVONNE CHÁVEZ CHENA  
Doctora en Ciencias en Ingeniería Mecánica  
7492003

REVISOR I



\_\_\_\_\_  
DR. JESÚS ARCE LANDA  
Doctor en Ingeniería  
6170951

REVISOR 2



\_\_\_\_\_  
DR. EFRAÍN SIMÁ MOO  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica  
6601954

REVISOR 3



\_\_\_\_\_  
DR. IRVING OSIRIS HERNÁNDEZ LÓPEZ  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica  
10458243

C.p. Jefa del Departamento de Servicios Escolares.  
Estudiante  
Expediente

Iniciales AAP/mrsr

Cuernavaca, Mor. 15 de noviembre de 2018  
OFICIO No. SAC/525/2018

**Asunto:** Autorización de impresión de tesis

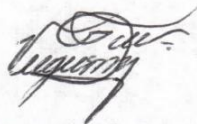
**ING. LUIS DAVID AKE VALLE**  
**CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS**  
**EN INGENIERÍA MECÁNICA**  
**PRESENTE**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **“Modelación Dinámica de Ventanas de Vidrio Doble”**, 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**



SEP TecNM  
CENTRO NACIONAL  
DE INVESTIGACIÓN  
Y DESARROLLO  
TECNOLÓGICO  
SUBDIRECCIÓN  
ACADÉMICA

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.  
Expediente

GVGR/mcr

Dedico este trabajo a mis padres ,  
Luis A. Ake Canul y Bertha P. Valle Ake,  
quienes de manera incondicional decidieron apoyarme  
y no importando las dificultades que se tenga en la vida  
demostraron ser un ejemplo de superación,  
enseñándome a seguir mis propios caminos,  
inculcando principios y valores en mi.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por las oportunidades que me brinda y por su cuidado en cada etapa de mi vida, por las personas que puso en mi camino y por la fortaleza que me da en las dificultades.

A mis padres Luis A. Ake Canul y Bertha P. Valle Ake por sus consejos, su apoyo incondicional y su cariño, por darme ánimo y ser mis ejemplos de superación y por inspirarme con cada palabra y cada acto.

A mis hermanos Mario A. Ake Valle y Ana P. Ake Valle quienes son parte importante en mi vida y parte importante en cada proyecto.

Al Dr. Jesús P. Xáman Villaseñor por la oportunidad que me dio de aprender de él, de su experiencia, dedicación y disciplina, por su conocimiento compartido en el aula y fuera de él. Un gran investigador y una gran persona.

A la Dra. Yvonne Chaves Chena por su insistencia, sus consejos y el apoyo técnico sin el cual no se habría podido realizar el presente trabajo. Por ser una gran persona y una excelente asesora.

A mis revisores Dr. Irving O. Hernández, Dr. Efraín Sima Moo, Dr. Jesús Arce Landa por sus comentarios y sugerencias, por el conocimiento impartido y por la disposición de enseñar.

A mis amigos Alan A. Rodríguez, Miguén A. Beltrán, Luis R. Gonzales, Tomás Pérez, Miguel A. Che. Por sus consejos, por compartir momentos y vivencias, y por su apoyo en el desarrollo de la tesis.

A quienes en el camino me apoyaron Alicia L. Cervantes quien me ayuda a ser mejor persona. Abel García y Viviana Hu, quienes brindaron siempre su apoyo.

Al ing. Julio C. Canul y al M.C. Juan Esquivel por su apoyo para lograr una meta más.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por darme la oportunidad de continuar con mi preparación

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por brindarme el apoyo económico durante mi formación académica.

Al personal administrativo por su atención y su apoyo durante mi estancia.



## Contenido

<b>Índice.....</b>	<b>I</b>
<b>Lista de Tablas .....</b>	<b>III</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>IV</b>
<b>Nomenclatura.....</b>	<b>VII</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>IV</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>X</b>
<b>1 Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Estado del arte.....	3
1.1.1 Estudio numérico.....	3
1.1.2 Estudio experimental. ....	8
1.1.3 Estudio teórico-experimental.....	9
1.1.4 Conclusión del estado del arte. ....	11
1.2 Objetivo.....	11
1.3 Objetivos específicos. ....	12
1.4 Alcance. ....	12
<b>2 Modelo físico y matemático .....</b>	<b>13</b>
2.1 Modelo físico .....	13
2.1.1 Consideraciones.....	14
2.1.2 Mecanismos de transferencia de calor en la ventana doble .....	14
2.2 Modelo matemático .....	18
2.2.1 Tránsito de calor en estado transitorio .....	21

---

2.2.2	Coeficiente de transferencia de calor por radiación del vidrio hacia la bóveda celeste	22
2.2.3	Coeficiente de transferencia de calor por convección debido al viento	23
2.2.4	Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre las hojas de vidrio	23
2.2.5	Coeficiente de transferencia de calor por convección entre las hojas vidrios	23
2.2.6	Coeficiente de transferencia de calor por convección al interior de la habitación	24
2.2.7	Coeficiente de transferencia de calor por radiación del vidrio hacia la habitación	24
2.2.8	Propiedades ópticas del sistema	24
2.2.9	Propiedades físicas del aire	25
<b>3</b>	<b>Metodología de solución</b>	<b>26</b>
3.1	Método de Balance global	26
3.2	Metodología para la solución del modelo físico y matemático	26
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>62</b>
4.1	Temperatura y radiación solar incidente en función del tiempo	62
4.2	Parámetros de estudio	79
4.3	Análisis de los flujos convectivos	86
4.4	Análisis de los flujos radiativos	91
5.5	Análisis de los flujos transmitidos	96
4.6	Integración numérica para el flujo de calor	100
<b>5</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>108</b>
5.1	Conclusiones	108
5.2	Recomendaciones	110
<b>6</b>	<b>Referencias</b>	<b>111</b>

---



**Lista de Tablas**

**Tabla 3.1.-** Datos meteorológicos del 6 de enero ..... 53

**Tabla 4.1.-** Mes más frío y más cálido de cada ciudad..... 63

**Tabla 4.2.-** Datos meteorológicos para la Cd. Juárez. .... 63

**Tabla 4.3.-** Datos meteorológicos para la Cd. de México. .... 64

**Tabla 4.4.-** Datos meteorológicos para la Cd. de Mérida. .... 65

**Tabla 4.5.-** Función de radiación solar para el día cálido y el día frío de Cd. Juárez..... 69

**Tabla 4.6.-** Función de radiación solar para el día cálido y el día frío de Cd. de México. .. 69

**Tabla 4.7.-** Función de radiación solar para el día cálido y el día frío de Cd. de Mérida.... 70

**Tabla 4.8.-**Función de la temperatura para el día cálido y el día frío de Cd. Juárez. .... 74

**Tabla 4.9.-** Función de la temperatura para el día cálido y el día frío de Cd. de México.... 75

**Tabla 4.10.-** Función de la temperatura para el día cálido y el día frío de Cd. de Mérida. . 76

**Tabla 4.11.-** Propiedades ópticas y termofísicas del vidriado disponible en la Republica Mexicana. .... 79

**Tabla 4.12.-**Flujos de calor al interior ( $W \cdot h/m^2$ ) Cd. Juárez, clima cálido. .... 102

**Tabla 4.13.-** Flujos de calor al interior ( $W \cdot h/m^2$ ) Cd. Juárez, clima frío. .... 103

**Tabla 4.14.-** Flujos de calor al interior ( $W \cdot h/m^2$ ) Cd. de Mérida, clima cálido. .... 104

**Tabla 4.15.-** Flujos de calor al interior ( $W \cdot h/m^2$ ) Cd. de Mérida, clima frío ..... 105

**Tabla 4.16.-** Flujos de calor al interior ( $W \cdot h/m^2$ ) Cd. de México, clima cálido ..... 106

**Tabla 4.17.-** Flujos de calor al interior ( $W \cdot h/m^2$ ) Cd. de México, clima frío. .... 107

---

---

## Lista de figuras

<b>Figura 2.1.-</b> Modelo físico de la ventana de vidrio doble.....	13
<b>Figura 2.2.-</b> Trasferencia de calor en una ventana de vidrio doble 3-D .....	15
<b>Figura 2.3.-</b> Trasferencia de calor en una ventana de vidrio doble 2-D .....	16
<b>Figura 2.4a.-</b> Configuración 1; <b>2.4b.-</b> Configuración 2; <b>2.4c.-</b> Configuración 3; <b>2.4d.-</b> Configuración 4 .....	17
<b>Figura 2.5.-</b> Representación de los elementos de la ventana doble .....	18
<b>Figura 2.6.-</b> Elemento del sistema analizado.....	19
<b>Figura 2.7.-</b> Balance de energía en el vidrio 1 .....	20
<b>Figura 2.8.-</b> Balance de energía en el vidrio 2.....	20
<b>Figura 3.1.-</b> Modelo físico de la losa compuesta 1-D.....	27
<b>Figura 3.2.-</b> Diagrama de flujo, método de Jacobi .....	29
<b>Figura 3.3.-</b> Perfil de temperaturas en la placa 1-D, a) balance global, b) MVF .....	31
<b>Figura 3.4.-</b> Losa compuesta considerando flujos convectivos 1-D.....	32
<b>Figura 3.5.-</b> Losa compuesta considerando flujos convectivos y radiativos 1-D.....	34
<b>Figura 3.6.-</b> Perfil de temperatura considerando flujos convectivos y radiativos 1-D .....	36
<b>Figura 3.7.-</b> Losa separada por un fluido 1-D .....	37
<b>Figura 3.8.-</b> Perfil de temperaturas, (a) caso1, (b) caso 2 en 1-D.....	40
<b>Figura 3.9.-</b> Modelo bidimensional (ventana de vidrio doble).....	41
<b>Figura 3.10.-</b> Representación de los nodos computacionales en 2-D.....	42
<b>Figura 3.11.-</b> Perfil de temperaturas bidimensional a) caso 1, b) caso 2.....	44
<b>Figura 3.12.-</b> Modelo de ventana doble con intercambio radiativo entre placas.....	45
<b>Figura 3.13.-</b> Variación de la temperatura a lo largo de la ventana.....	48

---

<b>Figura 3.14.-</b> Perfil de temperaturas a) Temperatura constante, b) Temperatura variable..	49
<b>Figura 3.15.-</b> Radiación solar incidente en la ventana de vidrio doble .....	50
<b>Figura 3.16.-</b> Perfil de temperatura en la ventana doble.....	54
<b>Figura 3.17.-</b> Flujos de calor al interior.....	55
<b>Figura 3.18.-</b> Diagrama de flujo, análisis transitorio.....	60
<b>Figura 3.19.-</b> Evolución de la temperatura en el tiempo, a) vidrio1, b) vidrio2.....	61
<b>Figura 4.1.-</b> Radiación solar en las diferentes orientaciones, a) Cd. Juárez, b) Cd. de México, c) Cd. de Mérida.....	67
<b>Figura 4.2.-</b> Comportamiento de la radiación solar para Cd. Juárez, (a) clima cálido, (b) clima frio.....	71
<b>Figura 4.3.-</b> Comportamiento de la radiación solar para Cd. de México, (a) clima cálido, (b) clima frio.....	72
<b>Figura 4.4.-</b> Comportamiento de la radiación solar para Cd. de Mérida, (a) Clima cálido, (b) clima frio.....	73
<b>Figura 4.5.-</b> Temperatura ambiente (a) Cd. Juárez, (b) Cd. de México, c) Cd. de Mérida. .	77
<b>Figura 4.6</b> Velocidad del viento (a) Cd. Juárez, (b) Cd. de México, c) Cd. de Mérida.....	78
<b>Figura 4.7.-</b> Temperatura en el vidrio 2 para los diferentes casos de Cd. Juárez, (a) Clima cálido, (b) clima frio. ....	81
<b>Figura 4.8.-</b> Temperatura en el vidrio 2 para los diferentes casos de Cd. De Mérida, (a) Clima cálido, (b) clima frio. ....	83
<b>Figura 4.9.-</b> Temperatura en el vidrio 2 para los diferentes casos de Cd. de México, (a) Clima cálido, (b) clima frio. ....	85
<b>Figura 4.10.-</b> Flujo de calor convectivo en el vidrio 2 para los diferentes casos de Cd. Juárez, (a) Clima cálido, (b) clima frio.....	87

---

---

<b>Figura 4.11.-</b> Flujo de calor convectivo en el vidrio 2 para los diferentes casos de Cd. Mérida, a) Clima cálido, b) clima frio.....	89
<b>Figura 4.12.-</b> Flujo de calor convectivo en el vidrio 2 para los diferentes casos de Cd. México,( a) Clima cálido, (b) clima frio.....	90
<b>Figura 4.13.-</b> Flujo de calor convectivo en el vidrio 2 para los diferentes casos de Cd. Juárez, (a) Clima cálido, (b) clima frio.....	92
<b>Figura 4.14.-</b> Flujo de calor convectivo en el vidrio 2 para los diferentes casos de Cd. de Mérida, (a) Clima cálido, (b) clima frio. ....	93
<b>Figura 4.15.-</b> Flujo de calor convectivo en el vidrio 2 para los diferentes casos de Cd. de México, (a) Clima cálido, (b) clima frio.....	95
<b>Figura 4.16.-</b> Flujo de calor transmitido al interior para los diferentes casos de Cd. Juárez, (a) Clima cálido, (b) clima frio.....	97
<b>Figura 4.17.-</b> Flujo de calor transmitido al interior para los diferentes casos de Cd. de Mérida, (a) Clima cálido, (b) clima frio. ....	98
<b>Figura 4.18.-</b> Flujo de calor transmitido al interior para los diferentes casos Cd. de México, a) Clima cálido, b) clima frio.....	100

---



---

## Nomenclatura

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
$g_1$	Hoja de vidrio 1
$g_2$	Hoja de vidrio 2
$H_x$	Ancho de la ventana (m)
$H_y$	Altura de la ventana (m)
$T_{int}$	Temperatura interior ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{ext}$	Temperatura exterior ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{sky}$	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )
$G$	Radiación solar ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$q_{rad_{int}}$	Flujo de calor radiativo al interior ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$q_{rad_{ext}}$	Flujo de calor radiativo al exterior ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$q_{rad_{g_2}}$	Flujo de calor radiativo en el vidrio 1 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$q_{rad_{g_1}}$	Flujo de calor radiativo en el vidrio 2 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$q_{conv_{int}}$	Flujo de calor convectivo al interior ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$q_{conv_{ext}}$	Flujo de calor convectivo al exterior ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$q_{conv_{g_1}}$	Flujo de calor convectivo en el vidrio 1 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$q_{conv_{g_2}}$	Flujo de calor convectivo en el vidrio 2 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$h_{rad_{int}}$	Coefficiente de transferencia de calor radiativo al interior ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )
$h_{rad_{ext}}$	Coefficiente de transferencia de calor radiativo al exterior ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )

---

$h_{rad_{g1}}$	Coficiente de transferencia de calor radiativo en el vidrio 1 (W/m <sup>2</sup> . K)
$h_{rad_{g2}}$	Coficiente de transferencia de calor radiativo en el vidrio 2 (W/m <sup>2</sup> . K)
$h_{conv_{int}}$	Coficiente de transferencia de calor convectivo al interior (W/m <sup>2</sup> . K)
$h_{conv_{ext}}$	Coficiente de transferencia de calor convectivo al exterior (W/m <sup>2</sup> . K)
$h_{conv_{g1}}$	Coficiente de transferencia de calor convectivo En el vidrio 1 (W/m <sup>2</sup> . K)
$h_{conv_{g2}}$	Coficiente de transferencia de calor convectivo En el vidrio 2 (W/m <sup>2</sup> . K)
$Nu$	Número de Nusselt
$Ra$	Número de Rayleigh
$Gr$	Número de Grashof
$Pr$	Número de Prandtl
$\beta_f$	Coficiente de expansión
$k_f$	Conductividad térmica
$C_f$	Calor específico a presión constante, J/Kg. K
<b>Griegas</b>	
$\varepsilon$	Emisividad exterior
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann, (W/m <sup>2</sup> . K <sup>4</sup> )
$g$	Aceleración de la gravedad (9.81 m/s <sup>2</sup> )
$\rho^*$	Reflectividad
$\alpha_1^*$	Absortividad en el vidrio 1
$\alpha_2^*$	Absortividad en el vidrio 2
$\tau_{system}^*$	Transmisividad
$\mu_f$	Viscosidad dinámica
$\rho_f$	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )

---

## Resumen

En este trabajo se llevó a cabo el estudio de una ventana de vidrio doble en estado transitorio bajo condiciones climáticas de la República Mexicana, siendo las regiones seleccionadas, Cd. Juárez, Cd. de México y Cd. de Mérida, el estudio se realizó considerando un clima frío y un clima cálido de cada región. La ventana de vidrio doble consta de dos láminas de vidrio con una separación entre ellas, siendo está llena de un gas en este caso aire el cual cumple la función de aislante térmico, el cual reduce la ganancia de calor al interior de la habitación.

Para el estudio fueron considerados cuatro casos diferentes empleando vidriados disponibles en la República Mexicana, siendo estos: Caso 1) vidrio solo (caso de referencia), Caso 2) vidrio claro + espacio de aire + vidrio claro, Caso 3) vidrio claro + espacio de aire + vidrio low, Caso 4) vidrio claro + espacio de aire + vidrio reflectivo. Las dimensiones de las ventanas fueron las siguientes: altura ( $H_y$ ) de 80cm, espacio de aire ( $H_x$ ) de 6cm y espesor de la hoja de vidrio de 6mm.

Del estudio se observó que la ventana de vidrio simple es la que genera una mayor ganancia de energía al interior de la habitación, y que el uso de una ventana de vidrio doble trae como beneficio el ahorro en la ganancia de energía, sin embargo, la configuración 4 el cual consta de un vidrio claro al ambiente interior y un vidrio reflectivo al ambiente exterior, mostro el mejor desempeño en el ahorro de la ganancia de energía para el clima cálido

## Abstract

In this work the study of a double glass window in transitory state under climatic conditions of the Mexican Republic was carried out, being the selected regions, Cd. Juárez, Cd. Of Mexico and Cd. Of Mérida, the study was made considering a cold climate and a warm climate of each region. The double glass window consists of two sheets of glass with a separation between them, being filled with a gas in this case air which fulfills the function of thermal insulation, which reduces the heat gain to the interior of the room.

For the study four different cases were considered using glazes available in the Mexican Republic, these being: Case 1) glass only (reference case), Case 2) clear glass + air space + clear glass, Case 3) clear glass + space of air + low glass, Case 4) clear glass + air space + reflective glass. The dimensions of the windows were the following: height ( $H_y$ ) of 80cm, air space ( $H_x$ ) of 6cm and thickness of the glass sheet of 6mm.

From the study it was observed that the simple glass window is the one that generates a greater energy gain inside the room, and that the use of a double glass window brings as a benefit the saving in the energy gain, however, the configuration 4 which consists of a clear glass to the environment interior and reflective glass to the outside environment, showed the best performance in saving the energy gain for the warm weather.



# Capítulo 1

## 1 Introducción.

Desde sus orígenes y a lo largo de toda su evolución, el ser humano se ha procurado con lo que la naturaleza le provee para mejorar su calidad de vida en todos los aspectos: alimentación, vestido, vivienda y eventualmente medios de transporte, entre otros, adoptando o desarrollando sus propias técnicas y métodos para mejorar su bienestar en el entorno que lo rodea. Sin embargo, el crecimiento incesante de la población a nivel mundial con una sociedad altamente consumista, ha generado consecuencias que desafortunadamente, a la fecha pueden definirse como devastadoras, toda vez que esa demanda de recursos naturales se ha producido de manera desmedida y sin ningún control, aunado al constante deterioro que se genera al medio ambiente, causado principalmente por la contaminación derivada de los desechos que se producen de manera constante, así como la emisión al ambiente de gases de efecto invernadero, los cuales se generan por la quema de combustibles de origen fósil. Con el paso de los años, este incremento del consumo, alimentado por una clase media en crecimiento, ha triplicado la cantidad de materias primas extraídas del planeta en las últimas cuatro décadas, según un nuevo informe del Panel Internacional de Recursos (IRP por sus siglas en inglés), auspiciado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Esto ha creado un desbalance en nuestro planeta, la deforestación, quema y tala de árboles, así como un uso desmedido de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica ha sido una de las principales fuentes de contaminación y deterioro del ambiente.

Uno de los principales problemas al emplear combustibles fósiles como los hidrocarburos y el carbón mineral para la generación de energía es que son altamente contaminantes, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) señaló que “La contaminación del aire causa la muerte prematura de 2 millones de personas al año”, además de ser recursos que no son renovables, es decir, se agotan. El problema de contaminación debido a la generación de energía eléctrica puede abatirse en gran medida mediante el uso de energías limpias, las cuales tienen como principal característica no producir contaminantes al ambiente, además

de ser fuentes inagotables y llegan a nuestro planeta de forma continua. La principal fuente de energía limpia es el sol, que al calentar la superficie de la tierra provoca un cambio de densidades del aire generando los vientos, al calentar los mantos acuíferos provoca el ciclo de agua. Este tipo de energía puede ser aprovechada de manera directa por medio de sistemas pasivos como son, chimeneas solares, Torres de viento, Vidrios dobles, Pisos radiativos, etc.

En el sector residencial la climatización es una de las principales fuentes de consumo de energía eléctrica ya que se emplean sistemas eléctricos para ambientar la temperatura interior; sin embargo, estos sistemas contaminan, por ello encontrar alternativas para tener un confort térmico es una de los principales temas de estudio. Una de las maneras para alcanzar ese confort térmico es creando edificaciones cada vez más eficientes con la capacidad de aprovechar los recursos naturales para obtener un estado óptimo, siendo frescas en verano y cálidas en invierno. En una edificación la ganancia o pérdida de energía se da a través de su envolvente, es decir los techos, pisos, paredes y ventanas. Este efecto se ve mayormente acentuado en las ventanas debido a su poca masa térmica, por lo que el desarrollo de nuevas tecnologías en ventanas más eficientes supondría un ahorro en la ganancia o pérdida de energía.

Entre las nuevas tecnologías que se han desarrollado en las últimas décadas podemos mencionar las películas de control solar, las ventanas de vidrio doble y los materiales con cambio de fase entre otros. En particular las ventanas de vidrio doble ofrecen una alternativa accesible ya que no contamina y su costo no es excesivo. En algunos países el uso de dichas ventanas es cada vez más frecuente, existen diferentes tipos: con gases absorbentes en su interior, con películas de control solar, con diferentes tipos de vidriado, esto dependiendo de su aplicación y para que climas serán usados. Estas ventanas están conformadas por dos o más láminas de vidrio sin contacto directo entre ellas, dispuestas paralelamente y el espacio intermedio entre los vidrios suele llenarse con aire u otro gas inerte. Las cámaras se cierran herméticamente para evitar la circulación del aire y la entrada de contaminantes. El marco de la ventana puede ser de diferentes materiales y la ventilación dentro del canal pueden ser por convección natural o convección forzada, la mayoría de estudios se han enfocado a eficientar este mecanismo pasivo, ya que en la actualidad el uso de ventanas no es solo estético, también

es usada para iluminación, por lo que es muy común en las edificaciones. Si bien es cierto el uso de ventanas doble se vislumbra como una alternativa eficiente, resulta importante estudiar las diferentes configuraciones que se pretendan implementar, tomando en cuenta el tipo y espesor del vidrio, si tienen o no película de control solar, así como la colocación del mismo, el gas al interior, etc., toda vez que el comportamiento térmico de una misma ventana puede variar en función del tipo de clima al que esté sujeta. Por lo anterior, en el presente estudio se pretende realizar un análisis de ventanas dobles en estado transitorio, tomando en cuenta la variación de las condiciones del medio ambiente teniendo así información más real del comportamiento de dicha ventana. Se analizarán 4 climas diferentes de la república Mexicana, para lo cual se empleara la técnica de modelación numérica.

## **1.1 Estado del arte**

Se inició la revisión de estudios relacionados con ventanas de vidrio doble para su uso en habitaciones o edificaciones. A la fecha, se han encontrado artículos con estudios experimentales y teórico-experimental, numéricos; los cuales sus resúmenes se presentan a continuación.

### **1.1.1 Estudio numérico**

*Aydın (2000)* realizó un estudio numérico para obtener el espesor óptimo de la capa de aire en una ventana de vidrio doble cuya altura fue de 80cm. La solución numérica se obtuvo usando la técnica de diferencias finitas. El estudio se realizó en cuatro ciudades diferentes de Turquía (Ankara, Antalya, Kars y Trabzon) para la época de invierno. En el estudio no se consideró el efecto de la radiación, así como la transferencia de calor por conducción a través de los vidrios. Se concluyó que para espesores mayores a 15 mm el mecanismo de convección tiene un efecto significativo en la transferencia de calor. De acuerdo a los resultados de la simulación, el intervalo para los espesores óptimos fue; para Antalya de 18 a 21mm, Kars de 12 a 15mm, Trabzon y Ankara de 15 a 18mm.

*Pérez-Grande et al (2005)* realizaron un estudio sobre la influencia de las propiedades del vidrio en el rendimiento de las fachadas de doble acristalamiento, considerando los tres

mecanismos de transferencia de calor. Para dicho estudio se realizaron 10 combinaciones diferentes empleando 4 tipos de vidriado. La simulación fue realizada con el paquete comercial FLUENT, en el cual se consideró el modelo de turbulencia  $k-e$  para el transporte convectivo. Se pudo observar que al permitir que el aire en la cavidad formada por los cristales tenga entrada y salida, éste tiene un gran efecto en la transferencia de calor debido a las pérdidas convectivas. Los autores concluyeron que las propiedades del material influyen en la ganancia de energía, por lo que la selección adecuada de éstas permitirá al sistema tener un buen desempeño térmico.

*Ismail y Henríquez (2005)* realizaron un estudio numérico de la ventilación natural en ventanas de vidrio doble. El modelo numérico fue resuelto usando un esquema de diferencias finitas con formulación bidimensional y en estado transitorio, el algoritmo desarrollado utiliza el Método SIMPLE (Ecuaciones vinculadas semi-implícitas) para el acople de las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía. En el análisis fueron considerados la transferencia de calor por radiación y convección. El sistema tiene vidrios de 8mm de espesor y 1m de longitud, con una separación variable de 0.5, 3, 7 y 10cm, el cual recibe radiación solar constante de  $600 \text{ W/m}^2$  y Temperaturas de 24 y  $35^\circ\text{C}$ , al interior y al exterior respectivamente. La emisividad del vidrio se consideró de 0.84.

Se observó que al incrementar canal entre los vidrios conduce a la reducción de la temperatura del interior vidrio. Los valores del número de Reynolds con respecto al tamaño del canal fueron  $C=0.5\text{cm}$  en  $Re= 12$ ; para  $C = 3\text{cm}$  en  $Re= 416$ ; para  $C= 7\text{cm}$  en  $Re = 1120$  y para  $C = 10\text{cm}$  en  $Re = 1600$ . Los autores concluyeron que existe una mejora térmica al considerar la separación de los cristales en un intervalo de 5 a 10 cm, esto debido al flujo másico como consecuencia del aumento en el número de Reynolds.

En otro estudio, *Aydin (2006)* analizó la transferencia de calor conjugada en una ventana de vidrio doble, empleando la técnica de diferencias finitas. El estudio fue realizado considerando cuatro ciudades diferentes de Turquía (Ankara, Antalya, Kars y Trabzan) para la época de invierno. Se consideró el efecto de la transferencia de calor por convección y por conducción, no considerada anteriormente (Aydin 2000), obteniendo así fronteras más realistas. Para este análisis se consideraron dos casos; caso 1 temperaturas constantes, caso 2

coeficiente de transferencia de calor convectivo de 15, 20, 25 y 30 W/m<sup>2</sup>K. Se concluyó que para el caso 1 el espesor óptimo de la capa de aire entre los cristales fue la obtenida en un estudio anterior (Aydın 2000); para el caso 2 se observó que los coeficientes de la transferencia de calor por convección para la superficie exterior no tienen un efecto considerable en la transferencia de calor.

*Ismail et al (2009)* realizaron un estudio para determinar la eficiencia térmica de tres tipos de ventanas las cuales fueron simuladas para climas cálidos: ventana de vidrio simple, ventanas dobles con gas absorbente y ventanas dobles con ventilación natural. Para las ventanas con gas absorbente en el interior se realizaron con tres mezclas de gases, 1) mezcla de gases fuertemente absorbente 2) mezcla de gases con características intermedias de absorción y 3) mezcla transparente a la radiación infrarroja. La ventana doble con ventilación natural está compuesta por dos láminas de vidrio de 8mm de espesor y 1m de longitud a través del cual fluye el aire. En el estudio se consideró la transferencia de calor por radiación y por convección. La ventana sencilla de un solo vidrio y la Ventana doble con aire en el interior son térmicamente menos eficientes. Se concluyó que la ventana doble con mezcla de gases fuertemente absorbente es la más eficiente.

*Ahmadi y Yousefi (2009)* realizaron un estudio numérico sobre la transferencia de calor por conducción y convección en ventanas de vidrio doble. Para el análisis se empleó la técnica de volumen finito con formulación bidimensional en estado permanente. El problema se resolvió para ventanas de 0.5, 1, 1.5 y 2m de altura, Cada ventana fue analizada con separaciones de: 5 hasta 10 mm (cada 1 mm), y 12, 13, 14, 17 y 19mm, y empleando dos gases diferentes en su interior; Aire y Argón. Para el marco de las ventanas los Materiales empleados fueron UPVC y aluminio. Se notó un aumento del 1.7% en la transferencia calor para el marco de aluminio en comparación con el marco UPVC. Mientras que, para el espaciado lleno de argón se obtuvo una reducción del 25% de la transferencia calor global en comparación con el aire. Se concluyó que el espacio adecuado para minimizar la transferencia de calor fue de 14 mm para la ventana de 0.5 m altura y una separación de 17mm para ventanas de 1, 1.5 y 2m altura.

**Arici y Karabay(2010)** realizaron un estudio numérico para la determinación del espesor óptimo de la capa de aire en ventanas de vidrio doble considerando los costos de calefacción y de inversión. Se empleó el método de grado-día para determinar el requerimiento anual de energía. El costo de calefacción se calcula para gas natural, carbón, combustible, Electricidad y GLP. El estudio fue realizado para 4 ciudades de Turquía: I'skenderun, Kocaeli, Ankara y Ardahan Ubicadas en diferentes zonas climáticas. Se consideró los mecanismos de transferencia de calor por conducción y convección. El espesor del vidrio fue de 4mm tanto para ventanas de vidrio doble como para ventanas simples. El espesor de la capa de aire fue calculado con tres temperaturas 18, 20 y 22 °C. Se observó un ahorro del 58% al usar ventanas de vidrio doble con separación de 15mm en comparación con ventanas de un solo cristal. Los autores concluyeron que el espesor óptimo de la capa de aire de la ventana de doble acristalamiento varía entre 12 y 15mm dependiendo del tipo de combustible para las zonas climáticas de Turquía. El ahorro de energía depende del tipo de combustible empleado, se obtiene un máximo ahorro con el GLP y el Gas natural para todos los casos.

**Noh-Pat et al (2011)** realizaron un estudio numérico en ventanas de vidrio doble, analizadas con y sin película de control solar ( $\text{SnS-Cu}_x\text{S}$ ) para climas cálidos. En el estudio fueron consideradas la transferencia de calor por conducción, convección y radiación. El sistema se analizó con las siguientes características: altura del canal  $H=1\text{m}$ , temperatura interior y exterior de 24 y 32°C respectivamente, la separación entre los cristales fue con un intervalo 1 a 10cm y la radiación incidente con un intervalo de 500 a 800  $\text{W/m}^2$ . Se observó una reducción en un 55% en comparación con la ventana de vidrio doble tradicional sin película de control solar. Los autores concluyeron que la separación óptima entre cristales es de 6cm y que el uso de la película de control solar permitió reducir la energía hacia el ambiente interior.

**Karabay y Arici (2012)** realizaron el estudio numérico de la optimización termo-económica de la ventana de múltiples cristales para ocho ciudades de Turquía; I'skenderun, I'zmir, Kocaeli, Sinop, Malatya, Ankara, Van. El número óptimo de cristales se determinó usando el método de grado-día y fueron considerados los tres mecanismos de transferencia de calor:

conducción, convección y radiación. El efecto del tipo de combustible sobre el número de cristales también se consideró en el estudio, los combustibles empleados fueron: gas natural, carbón, gasóleo, GLP. Se observó que el costo de calentamiento disminuye con el aumento de los números de paneles, sin embargo, el costo de inversión aumenta. Los autores concluyeron que, debido a que el gas se ha convertido en la fuente de combustible más común para la calefacción en las grandes ciudades el número de cristales debe estar entre 2 y 4 mm, mientras que para las pequeñas ciudades el carbón sigue siendo la fuente de combustible más común, como consecuencia del uso de dicho combustible el número de cristales debe estar entre 3 y 4 mm. Los autores recomiendan considerar seriamente las ventanas de múltiples paneles en los edificios muy acristalados.

*Aguilar et al (2015)* realizaron un estudio numérico sobre el desempeño térmico en ventanas de vidrio doble para climas cálidos y fríos, se emplearon vidrios disponibles del mercado mexicano. Se realizaron simulaciones para tres configuraciones; Caso 1: vidrio claro + capa de aire + vidrio claro; Caso 2: vidrio claro + capa de aire + vidrio absorbente; Y el caso 3: vidrio claro + capa de aire + vidrio reflectante. En el estudio se consideró la transferencia de calor por convección y radiación. El análisis numérico se realizó para diferentes valores de radiación solar, de 250 a 700 W/m<sup>2</sup>, en intervalos de 150 W/m<sup>2</sup>. La temperatura interior para el clima cálido varió de 15 a 30°C en intervalos de 5°C mientras que para el clima frío el intervalo fue de 20 a 35°C con intervalo de 5°C. La temperatura al exterior se consideró constante a 35°C para el clima cálido y 15°C para el clima frío, los espesores de la capa de aire entre los vidrios fueron de 0,5, 1, 2, 4 y 8 cm. El espesor de los vidrios fue de 6mm con 0.8m de altura. Se concluyó que el espesor óptimo de la capa de aire para los tres casos y ambos climas fue de 0.02m. En condiciones climáticas frías, el caso 1 alcanzó la mayor energía, 12% más alto que el caso 2 y 30% más que el caso 3. En condiciones climáticas cálidas, el caso 3 muestra el mayor ahorro de energía 220% más que el caso 1 y 120% más que el caso 2. Los autores recomiendan usar ventanas dobles reversibles con la configuración del caso 3.

*Xamán et al (2016)* realizaron un estudio numérico pseudo-transitorio de una ventana de vidrio doble con película de control solar para el clima cálido de México. Para determinar el

comportamiento térmico de la ventana se analizó en horario de 8:00 a 18:00 hr con un intervalo de 5 segundos. En el estudio se consideró la transferencia de calor por convección y radiación. La altura del vidrio fue de 0.8m de altura y el espesor de 6cm, y con una temperatura interior que varía de 15 a 30°C, y un coeficiente convectivo de 6.2 y 6.8 W/m<sup>2</sup> K en el interior y exterior, respectivamente. Los autores concluyeron que la ventana doble con control solar reduce la cantidad de energía al interior en un 53.8% respecto a una ventana de vidrio doble sin película de control solar.

### **1.1.2 Estudio experimental.**

*Buratti y Moretti (2012)* realizaron un estudio experimental para determinar el ahorro de energía en edificaciones empleando un sistema de vidrios con aerogel de sílice. Para el estudio, se construyeron 4 muestras empleando diferentes tipos de acristalamiento: 1) cristales con aerogel granulado; 2) cristales con aerogel monolítico 3) cristales de baja emisividad; 4) cristales flotantes. Las propiedades ópticas fueron medidas empleando un espectrofotómetro SoliSpec 3700. Se observó que una reducción del 12% en la ganancia de energía al comparar un acristalamiento de baja emisividad contra un cristal flotante, mientras que al comparar un acristalamiento con aerogel monolítico y un acristalamiento con aerogel granulado contra un cristal flotante se observó una disminución del 23 y 64%, respectivamente. Los autores concluyeron que el acristalamiento con aerogel monolítico es la mejor opción ya que ofrece un buen rendimiento térmico y permite un mayor paso de luz al compararlo contra un cristal con aerogel granulado.

*Kara y Kurnuc (2012)* realizaron un estudio experimental del desempeño térmico de una ventana con triple vidriado (TGU) acoplado a una pared con material de cambio de fase (PCM). El PCM empleado fue el GR14. Para el estudio se construyó una ventana triple: ventanas de vidrio claro +capa de aire+ vidrio prismasolar +capa de aire+ vidrio de baja emisividad, la separación entre hojas de vidrio se consideró constante a 9mm. Se observó una variación en la transmitancia de 0.45 a 0.55 durante el invierno y de 0.20 a 0.25 para el verano. Los autores concluyeron que al emplear la TGU el sistema cumple su función, disminuyendo la transmitancia durante el verano, evitando un sobrecalentamiento en la pared.



*Li et al (2016)* realizaron un estudio experimental sobre el comportamiento térmico dinámico de ventanas triples con PCM. El estudio fue realizado en Nanjing (China), para clima cálido y fríos. La ventana de vidrio triple con PCM fue comparada contra una ventana de vidrio doble con PCM y una ventana de vidrio doble con aire en su interior. Las características del sistema fueron las siguientes: una ventana triple de 0.5m de largo con 0.5m de ancho, el espesor de cada vidrio fue de 5mm, el material de cambio de fase empleado fue la parafina MG29. Se observó que la temperatura en el interior de la habitación al emplear una ventana de vidrio triple con PCM es 0.74 y 1.65°C más bajo que al cuando se usó ventanas de vidrio doble con PCM y ventanas dobles con aire en su interior, respectivamente y la transferencia de calor a través de la ventana con vidrio triple y PCM es reducido un 14.7 y 4.5% en comparación con ventanas de vidrio doble con PCM y ventanas dobles con aire en su interior, respectivamente. Se concluyó que la ventana de vidrio triple con PCM es la que tiene un mayor ahorro en la ganancia de energía.

### **1.1.3 Estudio teórico-experimental.**

*Cortina (2000)* realizó un estudio teórico-experimental de la transferencia de calor en ventanas con Vidrios doble. Para el análisis teórico se desarrolló un código computacional unidimensional transitorio con fronteras convectivas y radiativas. Para el modelo experimental se construyó un dispositivo denominado DEMETEV (Dispositivo Experimental que Mide la Eficiencia Térmica de Vidrios), el cual fue empleado para determinar el coeficiente global de pérdidas y para evaluar los diferentes vidrios mediante el coeficiente de sombreado. El DEMETEV fue construido con un material acrílico transparente de 12mm de espesor la cual fue aislada empleando fibra de vidrio en lana de 2.5cm, para realizar las pruebas se diseñó un marco de madera de pino blanco con un espacio de 12mm para montar el arreglo de vidrios dobles. Con la finalidad de mantener un flujo de calor constante a 386 W/mK se empleó una placa calefactora calentada por resistencias, para remover el calor dentro de la caja calorimétrica se empleó un intercambiador de calor. Para la simulación solar se emplearon 4 lamparas de halógeno, los flujos radiativos fueron de 536, 628, 732, 860 y 1008 W/m<sup>2</sup>. Para el estudio fueron construidos 4 arreglos de ventanas de vidrios: (1) vidrio claro de 3mm de espesor, (2) vidrio doble claro+aire+claro de 6mm de

espesor, (3) vidrio doble filtradosol+aire+claro de 6mm de espesor y (4) vidrio doble reflectaplata+aire+claro de 6mm de espesor. Para cada arreglo se realizaron 5 pruebas fijando la temperatura del fluido a la entrada del calorímetro a 20°C. De los valores obtenidos de manera teórica y experimental la diferencia máxima fue de un 1.5% para las pruebas realizadas en el arreglo (3), mientras que, para el arreglo (2) la diferencia máxima fue de un 1.35%. se observó que al emplear un arreglo (2) solo el 17% de la energía logra pasar a la habitación comparado con un vidrio claro simple, y al comparar el arreglo (3) con un vidrio simple el 62% de la energía logra pasar. El autor concluyo que el arreglo que permite un mayor ahorro en la ganancia de energía es el arreglo (4).

*Ismail y Henríquez (2001)* realizaron un estudio teórico-experimental de la efectividad térmica de una ventana de vidrio doble con cortinas de material de cambio de fase en movimiento. El estudio experimental se llevó acabo empleando un espectrofotómetro en una ventana simple y en una ventana compuesta con material de cambio de fase. En el estudio también fue investigado el efecto del espesor entre hojas de vidrio y el color del PCM, la variación del espesor fue de 3 a 20mm con un intervalo de 1mm. Se observó que al emplear el PCM color verde, con un espesor de 6mm existe una reducción del 55% al compararlo con una ventana doble con aire en su interior. Los autores concluyeron que al emplear material de cambio de fase en una ventana doble esta es más eficiente ya que reduce la pérdida o ganancia de calor.

*Fracastoro et al (2002)* realizaron un estudio Teórico-Experimental sobre la influencia de la ventilación natural en ventanas abiertas. Las medidas de la habitación ventilada fueron de 4 m de largo, 2.6 m de ancho y 3.6 m de alto. El análisis numérico fue comparado con resultados experimentales. Para la prueba experimental se analizó con diferentes características y condiciones del contorno: radiador Abierto, Cerrado y Proyectado; la altura de la ventana fue fija en 1m mientras que el ancho fue de 0.8, 1.6 y 2.4m. Para las simulaciones se emplearon la técnica CFD y modelos zonales, donde se analizaron las limitaciones, características y aplicaciones de estos modelos teóricos. De la comparación del análisis teórico-experimental se obtuvieron gráficos para evaluar la tasa de ventilación en ventanas verticales abiertas. Se observó que la transferencia de calor entre aire y paredes

depende de la cantidad de cambios de aire en la habitación. Por lo que de las pruebas experimentales se concluyó que la ventana abierta de 1m de alto y 1.6m de ancho es la que proporciona mayores cambios de aire.

*Gil y Gimenez (2013)* realizaron un estudio teórico-experimental de la influencia de una ventana de vidrio doble con circulación de agua en el ahorro de energía al interior de la habitación, para climas cálidos y fríos. Para el estudio se emplearon dos tipos de ventanas: 1) ventanas dobles con aire en su interior; 2) ventanas dobles con circulación de agua en su interior. La simulación se llevó a cabo empleando el programa Stratus 7.4.2 tomando una temperatura constante en el interior de 21°C para climas fríos y 25°C para climas cálidos. Se observó que al emplear ventanas dobles con circulación de agua en su interior el aumento de la temperatura fue de 4.49°C, mientras que, al emplear ventanas dobles con aire en su interior el aumento de la temperatura fue de un 17.29°C. Los autores concluyeron que la ventana doble con circulación de agua en su interior es el más eficiente con un 40% comparado con la ventana doble convencional.

#### **1.1.4 Conclusión del estado del arte.**

De los estudios realizados anteriormente se puede concluir que las ventanas de vidrio doble son una buena opción para las edificaciones en lo que respecta a climatización, sin embargo, el análisis transitorio en ventanas de vidrio doble no ha sido analizado para condiciones climáticas de la república Mexicana.

### **1.2 Objetivo.**

Evaluación térmica bidimensional transitoria de ventanas de vidrio doble para climas de la república Mexicana.

### **1.3 Objetivos específicos.**

- Aprender la técnica de Balance global.
- Implementar un código numérico para simular la transferencia de calor conjugada en una ventana de vidrio doble en estado transitorio.
- Seleccionar diferentes condiciones climáticas de la república Mexicana para climas cálidos: sur, centro y norte.
- Realizar el estudio paramétrico de una ventana de vidrio doble con diferentes climas de México.

### **1.4 Alcance.**

Se realizará un estudio numérico bidimensional de la transferencia de calor conjugada de una ventana de vidrio doble en estado transitorio con tres combinaciones diferentes (vidrio claro, vidrio reflectante y vidrio de baja emisividad). Para llevar a cabo la evaluación térmica se considera un estudio paramétrico con condiciones climatológicas seleccionadas de la República Mexicana. Mediante valores de fluxes de calor en función del tiempo al interior de la ventana de vidrio doble se llevará a cabo la evaluación térmica para ganancia/pérdida total de energía durante un día de modelación. Para llevar a cabo este trabajo, se considera la plataforma computacional desarrollada en CENIDET, en el modelado numérico de ventanas de vidrios doble. El estudio se realizará en estado transitorio y en dos dimensiones.

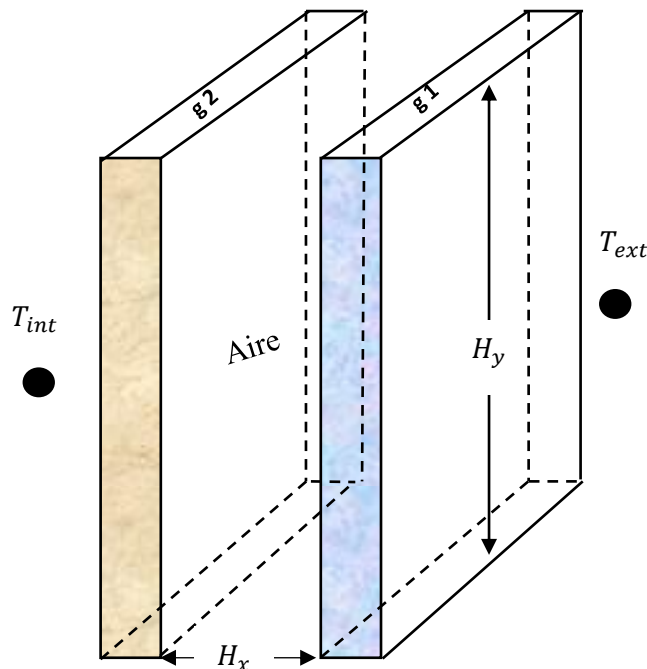
# Capítulo 2

## 2 Modelo físico y matemático

En este capítulo se presenta el modelo físico de la ventana de vidrio doble y los mecanismos de transferencia de calor presentes, esto con el fin de comprender mejor el comportamiento del sistema. Posteriormente, se presenta el modelo matemático a través de un balance de energía, esto mediante el uso de ecuaciones, así como las condiciones de frontera consideradas para este estudio.

### 2.1 Modelo físico

Con el fin de reducir la ganancia de energía en una edificación se emplea el uso de ventanas de vidrio doble, compuesta por dos hojas de vidrio semitransparentes denominadas  $g1$  y  $g2$ , en el que  $g1$  es el vidrio en contacto con el medio ambiente y  $g2$  el vidrio en contacto con la habitación como se muestra en la Figura 2.1. Las paredes horizontales son consideradas adiabáticas y el espacio entre las láminas de vidrio  $H_x$  se encuentra llena de aire. La temperatura en el interior de la habitación es considerada a  $T_{int}$  y en el exterior se considera una temperatura ambiente  $T_{ext}$ .



*Figura 2.1.- Modelo físico de la ventana de vidrio doble.*

### 2.1.1 Consideraciones

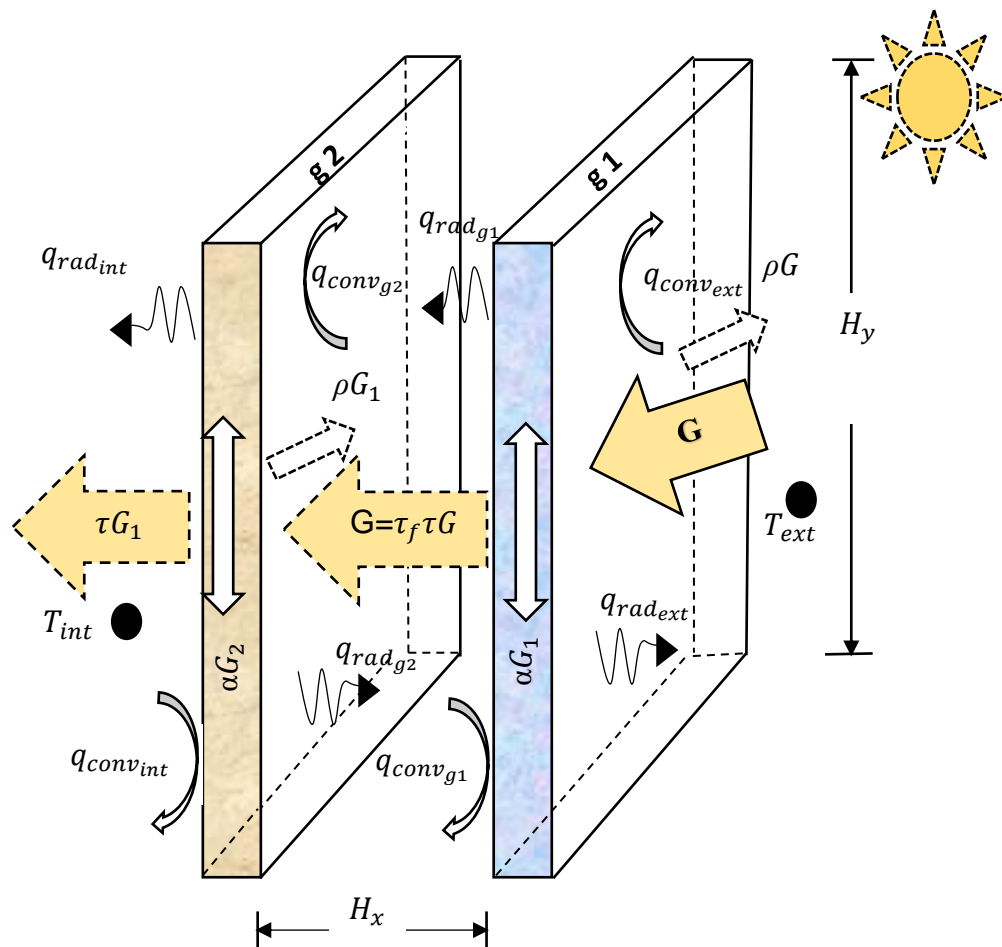
Para el estudio se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las paredes horizontales (inferior y superior) se consideran adiabáticas.
- Debido a las dimensiones de la ventana el flujo es laminar o turbulento en dos dimensiones.
- El fluido (aire) contenido entre los vidrios se considerará como un fluido Newtoniano e incompresible.
- Se hará la consideración que el aire es seco debido a su bajo contenido de humedad, por lo tanto, este medio es no participante.
- Las propiedades termo-físicas del aire y el vidrio se consideran constantes y las propiedades ópticas se consideran independientes tanto de la longitud de onda como de la temperatura.
- El estudio se realiza en estado transitorio.

### 2.1.2 Mecanismos de transferencia de calor en la ventana doble

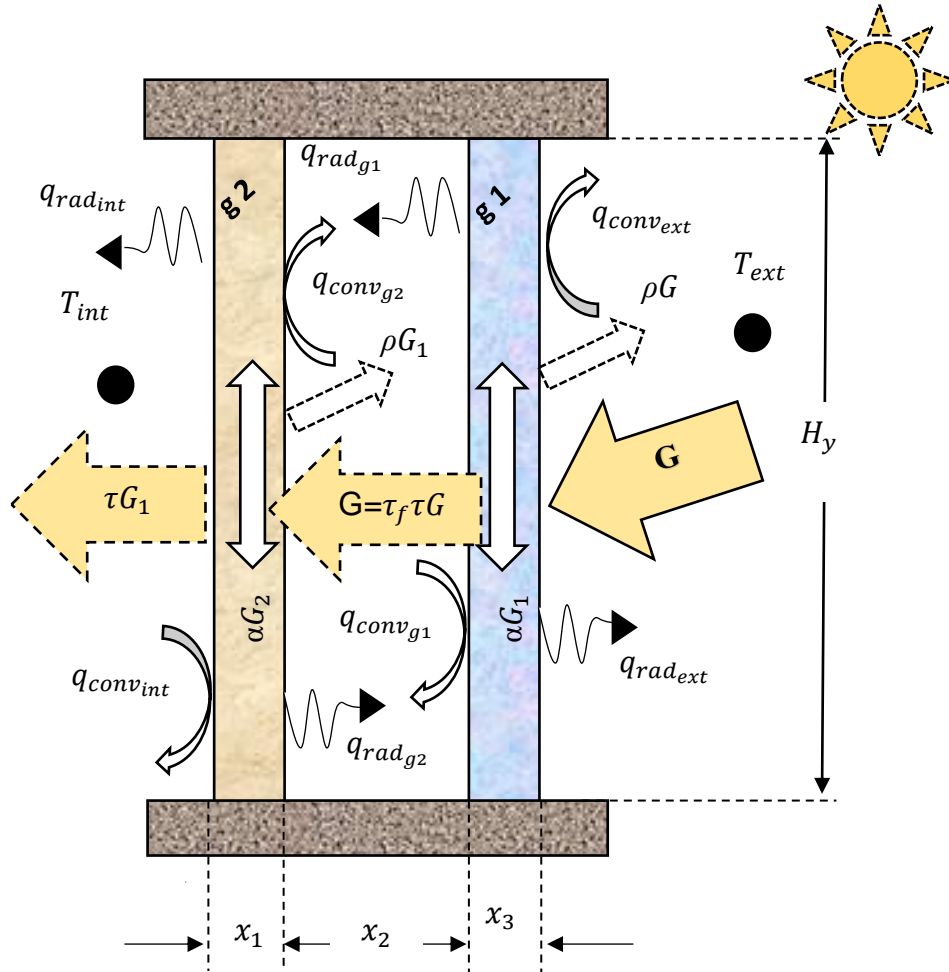
De la Figura 2.2, se observa los diferentes mecanismos de transferencia de calor en el sistema. En el vidrio 1 llega radiación normal a la superficie, de la energía total que incide en el vidrio 1 parte es transmitida hacia el interior de la cavidad, parte es reflejada al exterior y parte es absorbida por el vidrio, el fluido en el interior de la cavidad es considerado como medio radiativamente no participante por lo que la energía transmitida llega al vidrio 2, parte de esta energía nuevamente es transmitida al interior, parte se refleja y parte se absorbe por el vidrio 2. Como consecuencia de la energía absorbida por los vidrios, estos incrementan su temperatura generando gradientes térmicos, los cuales generan flujos de calor convectivos y radiativos hacia el espacio de aire entre los vidrios, hacia el ambiente interior y otros al exterior, mientras que, en el interior de la cavidad formada por las hojas de vidrio se genera una celda convectiva esto debido a que la temperatura en el vidrio 1 es mayor a la temperatura del vidrio 2.

La cantidad de energía que absorbe cada hoja de vidrio depende de las propiedades ópticas de esta, así como la cantidad de energía que logra pasar a través de cada vidrio, por lo que, se estudia diferentes configuraciones para climas cálidos y fríos de los estados seleccionados, siendo estos comparados contra una ventana de vidrio simple. Se considera el efecto de la radiación solar incidente, así como, los diferentes mecanismos de transferencia de calor presentes y como estos afectan en la ganancia o pérdida de energía.



**Figura 2.2.-**Trasferencia de calor en una ventana de vidrio doble 3-D.

La ventana se analizó en este trabajo en forma bidimensional, por lo que, la representación geométrica del modelo físico queda como en la Figura 2.3, en donde  $H_y$  es la altura de la ventana.

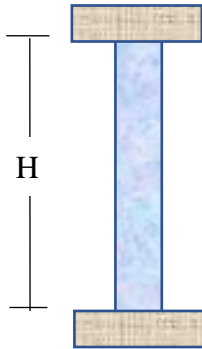


**Figura 2.3.-** Transferencia de calor en una ventana de vidrio doble 2-D.

Para el análisis de la transferencia de calor conjugada en una ventana de vidrio doble se emplean vidriados disponibles en el mercado Mexicano, y con el fin de determinar la mejor configuración para el ahorro de ganancia o pérdida de calor al interior de la habitación se analizan las siguientes configuraciones:

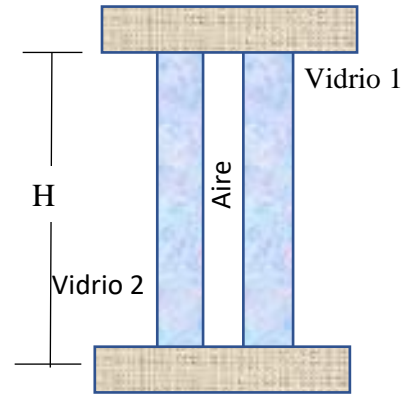


Vidrio Claro simple



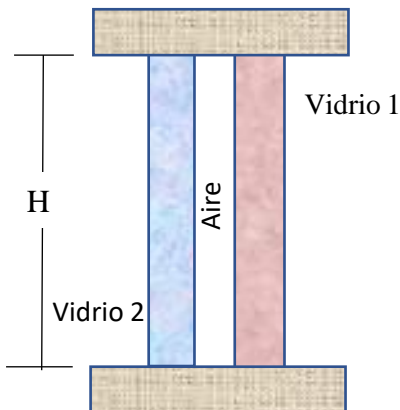
**Figura 2.4a.- Configuración 1.**

Vidrio Claro + aire + Vidrio Claro



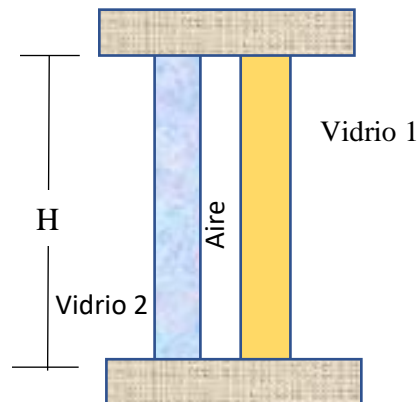
**Figura 2.4b.- Configuración 2.**

Vidrio Claro + aire + Vidrio de baja emisividad.



**Figura 2.4c.- Configuración 3.**

Vidrio Claro + aire + Vidrio reflectivo.

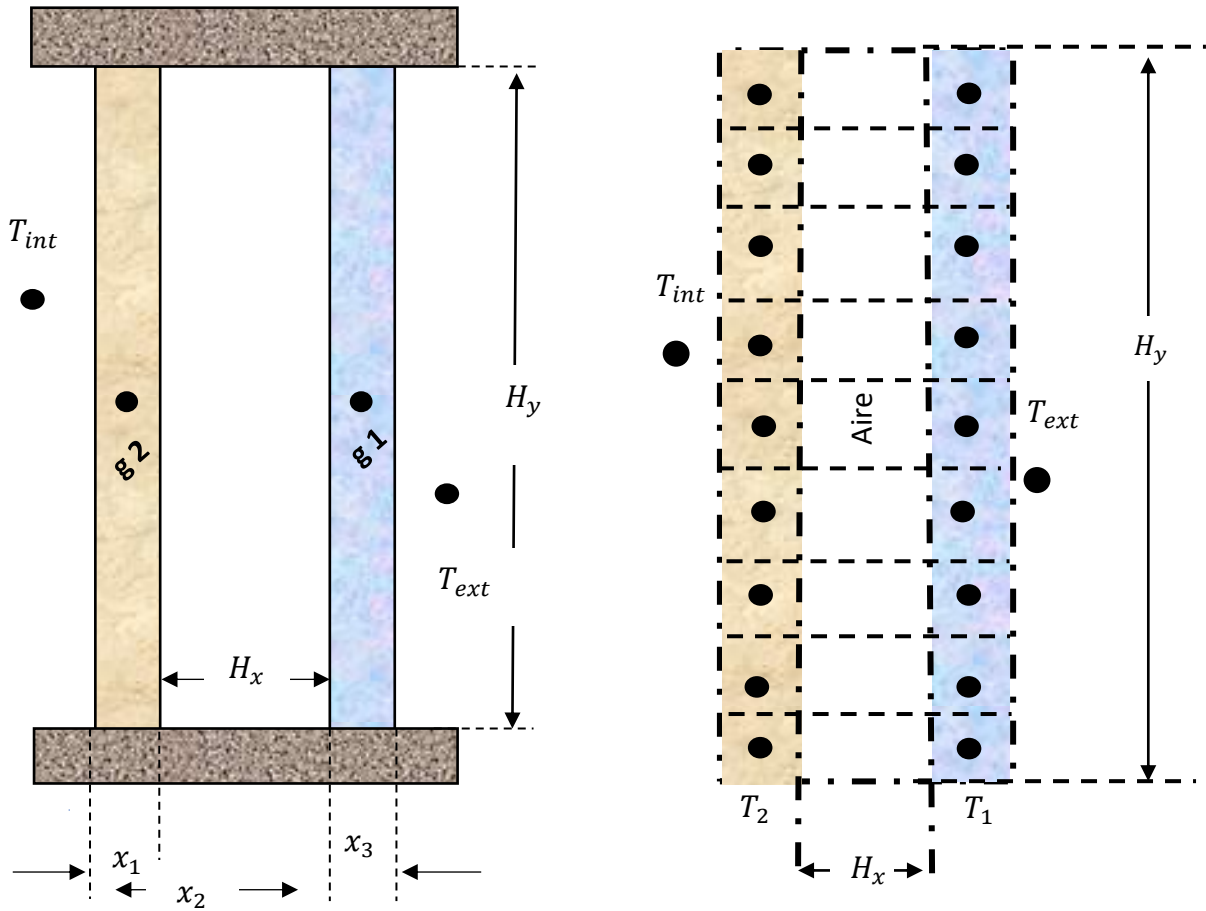


**Figura 2.4d.- Configuración 4.**

Dichas configuraciones se analizan empleando las diferentes condiciones climatológicas seleccionadas para: Ciudad Juárez, Ciudad de México y la ciudad de Mérida, cada configuración se analizó de forma transitoria para los días más cálidos y más fríos del año con una orientación Sur en su componente vertical.

## 2.2 Modelo matemático

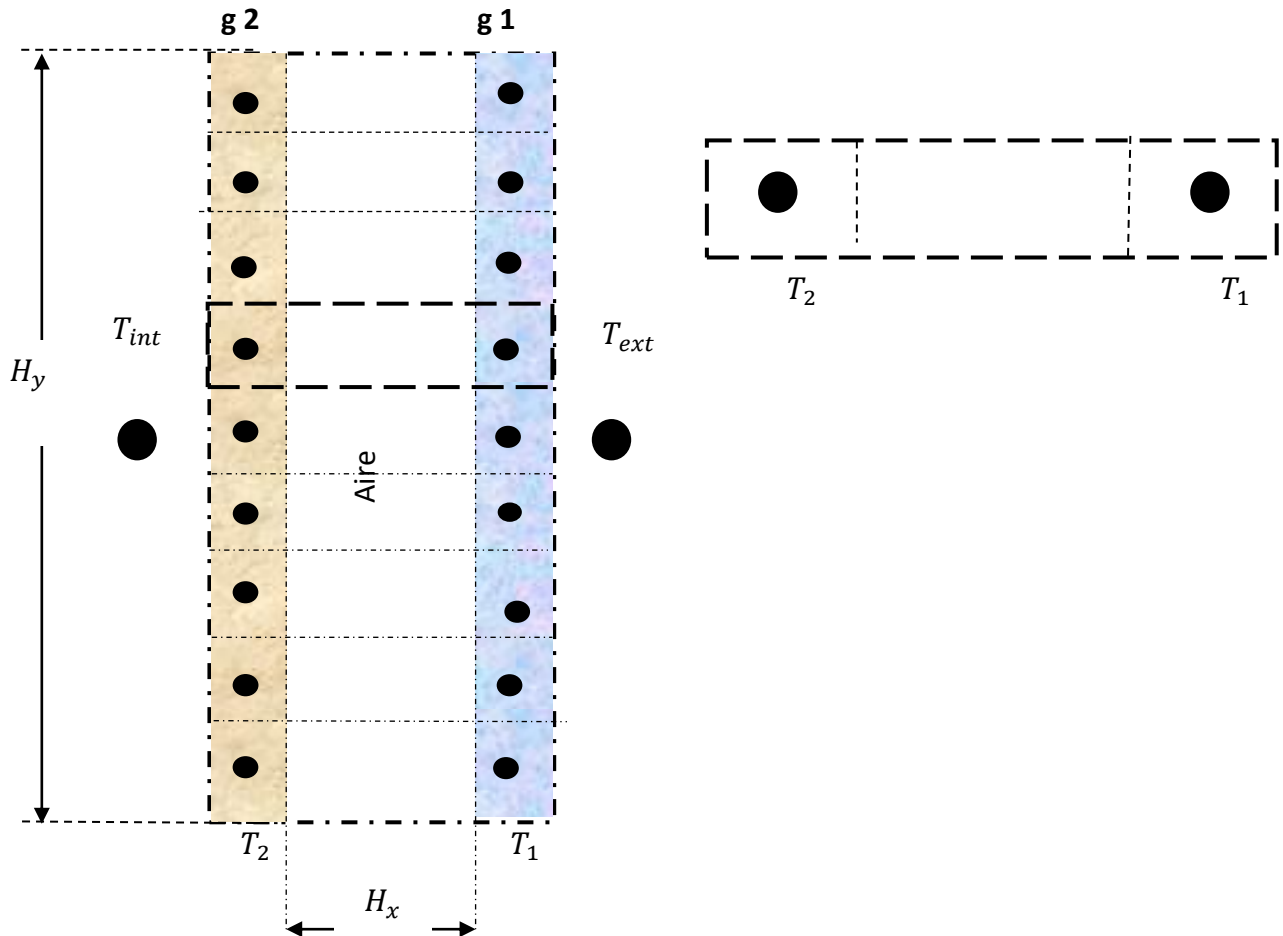
El modelo matemático se construye empleando el método de balance global, el cual consiste en realizar un balance de energía en cada elemento del sistema representado por los puntos como se muestra en la Figura 2.5, en donde las  $T_1$  y  $T_2$  representa las temperaturas en el vidrio 1 y la temperatura de vidrio 2, respectivamente.



*Figura 2.5.- Representación de los elementos de la ventana doble.*

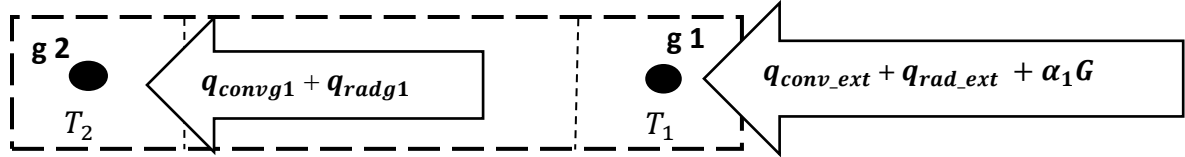
Del balance de energía se obtienen las ecuaciones correspondientes que nos permitirán asociar la temperatura del mismo. A continuación, se muestran las ecuaciones correspondientes para cada uno de las partes de la ventana de vidrio doble. En la Figura 2.6 se toma una parte del arreglo el cual será analizado elemento por elemento, esto con el fin de facilitar la comprensión del método que nos ayudará a encontrar las temperaturas del sistema,

así como mirar el comportamiento en estado transitorio, para ello se continua con el siguiente análisis. Debido a que el balance de energía del sistema es similar en cada punto, es suficiente con analizar lo que ocurre en el volumen de control seleccionado para observar el comportamiento del sistema. Los procedimientos que a continuación se describen son para obtener las ecuaciones de la ventana de vidrio doble, sin embargo, esta técnica se desarrollo de manera gradual y es descrita en el Capítulo 3. En esta sección solo se mencionan las ecuaciones que serán empleadas para el tema se tesis, el primer análisis que se muestra a continuación es un análisis en estado permanente esto con el fin de poder comprender de manera más fácil el análisis en estado transitorio descrito más adelante, siendo este último el modelo matemático a resolver para este estudio.



**Figura 2.6.- Elemento del sistema analizado.**

De la Figura 2.6 se toma el elemento a analizar y se consideran las entradas y salidas de energía en los nodos seleccionados. En la Figura 2.7 se tiene el primer elemento del sistema con las energías que llegan y salen de él. Realizando el balance de energía en estado permanente se tiene que:



**Figura 2.7.-** Balance de energía en el vidrio 1.

$$q_{abs1} + q_{conv_{ext}} + q_{rad_{ext}} = q_{conv_{g1}} + q_{rad_{g1}}$$

$$\alpha_1 G + h_{conv_{ext}}(T_{ext} - T_1) + h_{rad_{ext}}(T_{sky} - T_1) = h_{conv_{g1}}(T_1 - T_2) + h_{rad_{g1}}(T_1 - T_2)$$

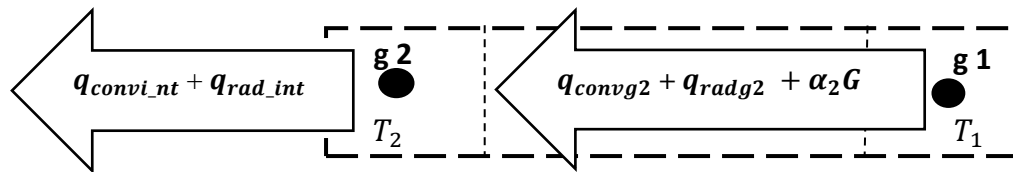
$$\alpha_1 G + (h_{conv_{ext}})T_{ext} - (h_{conv_{ext}})T_1 + (h_{rad_{ext}})T_{sky} - (h_{rad_{ext}})T_1 =$$

$$(h_{conv_{g1}})T_1 - (h_{conv_{g1}})T_2 + (h_{rad_{g1}})T_1 - (h_{rad_{g1}})T_2$$

$$\alpha_1 G + h_{conv_{ext}}(T_{ext}) + h_{rad_{ext}}(T_{sky}) =$$

$$[h_{rad_{ext}} + h_{conv_{ext}} + h_{conv_{g1}} + h_{rad_{g1}}] T_1 - [h_{conv_{g1}} + h_{rad_{g1}}] T_2 \quad (2.1)$$

En la Figura 2.8 se tiene el último elemento de la ventana el cual corresponde al vidrio 2 en el interior de la habitación, de manera análoga se realiza el balance de energía y se tiene que:



**Figura 2.8.-** Balance de energía en el vidrio 2.

$$q_{abs2} + q_{conv_{g2}} + q_{rad_{g2}} = q_{conv_{int}} + q_{rad_{int}}$$

$$\alpha_2 \mathbf{G} + h_{conv_{g2}}(T_1 - T_2) + h_{rad_{g2}}(T_1 - T_2) = h_{conv_{int}}(T_2 - T_{int}) + h_{rad_{int}}(T_2 - T_{int})$$

$$\alpha_2 \mathbf{G} + (h_{conv_{g2}})T_1 - (h_{conv_{g2}})T_2 + (h_{rad_{g2}})T_1 - (h_{rad_{g2}})T_2 =$$

$$(h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}})T_2 - (h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}})T_{int}$$

$$(h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}})T_{int} + \alpha_2 \mathbf{G} =$$

$$\left[ h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}} + h_{conv_{g2}} + h_{rad_{g2}} \right] T_2 - [h_{conv_{g2}} + h_{rad_{g2}}] T_1 \quad (2.2)$$

### 2.2.1 Tráferencia de calor en estado transitorio

Para llevar a cabo el estudio de la ventana doble en estado transitorio es necesario establecer el modelo anterior en estado transitorio. Sé considera el término transitorio con propiedades constantes para un pequeño volumen de control.

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} \mathbf{V} \quad (2.3)$$

Reescribiendo la ecuación (2.1) y considerando el término transitorio se tiene la nueva ecuación (2.4), donde  $v$  es el volumen de control del nodo donde se realiza el balance de energía, y puede ser escrita como:  $V = A * \delta_x$ , siendo  $A$  y  $\delta_x$  el área y el espesor del volumen de control, respectivamente.

$$\frac{\partial(\rho C_p T_1)}{\partial t} \mathbf{A} \delta_x = q_{abs1} \mathbf{A} + q_{conv_{ext}} \mathbf{A} + q_{rad_{ext}} \mathbf{A} - q_{conv_{g1}} \mathbf{A} - q_{rad_{g1}} \mathbf{A} \quad (2.4)$$

Al emplear para el término transitorio una diferencia finita adelantada, se tienen el modelo matemático el cual queda finalmente como:

$$\alpha_1 \mathbf{G} + (h_{conv_{ext}})(T_{ext}) + (h_{rad_{ext}})(T_{sky}) + \frac{\rho C_p \delta_x}{\Delta t} T_1^{old} =$$

$$[h_{rad_{ext}} + h_{conv_{ext}} + h_{conv_{g1}} + h_{rad_{g1}} + \frac{\rho C_p \delta_x}{\Delta t}] T_1 - [h_{conv_{g1}} + h_{rad_{g1}}] T_2 \quad (2.5)$$

De manera análoga para ecuación (2.2) el cual corresponde al vidrio en contacto con la habitación, se tienen que:

$$\frac{\partial(\rho C_p T_2)}{\partial t} \mathbf{A} \delta_x = \mathbf{q}_{abs2} + q_{rad_{g2}} \mathbf{A} + q_{conv_{g2}} \mathbf{A} - q_{conv_{int}} \mathbf{A} - q_{rad_{int}} \mathbf{A} \quad (2.6)$$

$$\alpha_2 \mathbf{G} + (h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}}) T_{int} + \frac{\rho C_p \delta_x}{\Delta t} T_2^{old} =$$

$$- [h_{conv_{g2}} + h_{rad_{g2}}] T_1 + [h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}} + h_{conv_{g2}} + h_{rad_{g2}} + \frac{\rho C_p \delta_x}{\Delta t}] T_2 \quad (2.7)$$

### 2.2.2 Coeficiente de transferencia de calor por radiación del vidrio hacia la bóveda celeste

Coeficiente de transferencia de calor por radiación desde la superficie superior hacia la bóveda celeste con referencia a la temperatura ambiente está dado por:

$$q_{rad_{ext}} = \varepsilon \sigma_1 (T_1 + T_{sky}) (T_1^2 + T_{sky}^2) (T_1 - T_{sky}) \quad (2.8)$$

$$q_{rad_{ext}} = h_{rad_{ext}} (T_1 - T_{sky}) \quad (2.9)$$

Donde:

$$h_{rad_{ext}} = \varepsilon \sigma_1 (T_1 + T_{sky}) (T_1^2 + T_{sky}^2) \quad (2.10)$$

y la temperatura  $T_s$  es dado por Swinbank (1963) como:

$$T_{sky} = 0.0552 T_{ext}^{1.5} \quad (2.11)$$

### 2.2.3 Coeficiente de transferencia de calor por convección debido al viento

El coeficiente de transferencia de calor por convección debido al viento es dado por McAdams (1994) como:

$$h_{conv_{ext}} = 5.7 + 3.8 V_{wind} \quad (2.12)$$

### 2.2.4 Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre las hojas de vidrio

El coeficiente de transferencia de calor por radiación para la placa 1 y 2 puede ser obtenida por el modelo de placas infinitas dadas por Duffie y Beckman, (1991) como:

$$h_{rad} = \frac{\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \quad (2.13)$$

### 2.2.5 Coeficiente de transferencia de calor por convección entre las hojas vidrios

El coeficiente de transferencia de calor promedio por convección entre las hojas de vidrio es dado por ElSherbiny et al (1982).

$$Nu = h_{conv} \frac{Hx}{\lambda} \quad (2.14)$$

La dependencia del número de Nusselt (Nu), número de Rayleigh (Ra) y la razón de aspecto (A) para una pared vertical está dado por:

$$Nu_1 = 0.0605 Ra^{1/3} \quad (2.15)$$

$$Nu_2 = [1 + (0.104Ra^{0.293}/(1 + (6310/Ra)^{1.36}))^3]^{1/3} \quad (2.16)$$

$$Nu_3 = 0.242 (Ra/A)^{0.272} \quad (2.17)$$

$$Nu = [Nu_1, Nu_2, Nu_3]max = Nu_{90} \quad (2.18)$$

El número de Rayleigh (Ra) se define como:

$$Ra = Gr Pr \quad (2.19)$$

y el número de Prandtl (Pr) se puede determinar por medio de la siguiente ecuación:

$$Pr = \frac{C_f \mu_f}{k_f} \quad (2.20)$$

Y el número de Grashof (Gr) se calcula como:

$$Gr = g \beta_f (T_g - T_f) \frac{L^3}{\nu^2} \quad (2.21)$$

### 2.2.6 Coeficiente de transferencia de calor por convección al interior de la habitación

Para el coeficiente de transferencia de calor por convección al interior de la habitación se considera el valor dado por la norma ASHRAE:

$$h_{conv_{int}} = 6.2 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (2.22)$$

### 2.2.7 Coeficiente de transferencia de calor por radiación del vidrio hacia la habitación

Para simplificar el cálculo de la transferencia de calor por radiación al interior de la habitación se tiene una expresión como:

$$q_{rad_{int}} = \varepsilon \sigma_1 (T_1 + T_{int}) (T_1^2 + T_{int}^2) (T_1 - T_{int}) \quad (2.23)$$

$$q_{rad_{int}} = h_{rad_{int}} (T_1 - T_{int}) \quad (2.24)$$

Donde:

$$h_{rad_{int}} = \varepsilon \sigma_2 (T_1 + T_{int}) (T_1^2 + T_{int}^2) \quad (2.25)$$

### 2.2.8 Propiedades ópticas del sistema

Las propiedades ópticas del sistema pueden ser obtenidas a partir de las ecuaciones reportadas por Morris (2004).



Componente total reflejado:

$$\rho_{system}^* = \rho_1^* + \rho_2^* \tau_1^{*2} / (1 - \rho_1^* \rho_2^*) \quad (2.26)$$

La radiación absorbida en el primer panel es:

$$\alpha_1^* = \alpha_1^* + \alpha_1^* \rho_2^* \tau_2^* / (1 - \rho_1^* \rho_2^*) \quad (2.27)$$

La radiación absorbida en el segundo panel es:

$$\alpha_2^* = \alpha_2^* \tau_1^* / (1 - \rho_1^* \rho_2^*) \quad (2.28)$$

El componente total transmitido es:

$$\tau_{system}^* = \tau_1^* \tau_2^* / (1 - \rho_1^* \rho_2^*) \quad (2.29)$$

### 2.2.9 Propiedades físicas del aire

Las propiedades físicas del aire se consideran que varían linealmente con la temperatura debido al bajo intervalo de temperaturas con las que se están trabajando. Las siguientes relaciones empleadas por Ong (2003):

Viscosidad dinámica:

$$\mu_f = [1.846 + 0.00472(T_f - 300)] \times 10^{-5} \quad (2.30)$$

Densidad:

$$\rho_f = 1.16114 - 0.00353(T_f - 300) \quad (2.31)$$

Conductividad térmica:

$$k_f = 0.0263 - 0.000074(T_f - 300) \quad (2.32)$$

Calor específico:

$$C_f = [1.007 + 0.00004(T_f - 300)] \times 10^3 \quad (2.33)$$

Coefficiente de expansión volumétrica:

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (2.34)$$

# Capítulo 3

## **3 Metodología de solución**

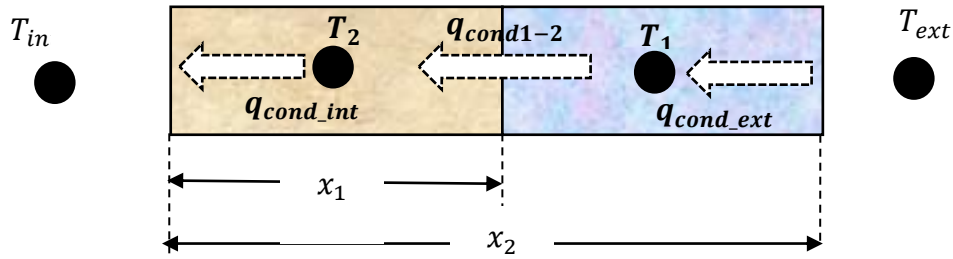
En este capítulo se presenta la metodología seguida para obtener los modelos físicos y matemáticos de la ventana doble, se describen los pasos seguidos para aprender la técnica de balance global y los diferentes problemas resueltos de manera gradual hasta obtener finalmente el modelo descrito en el capítulo anterior.

### **3.1 Método de Balance global**

El método de balance global consiste en un balance de energía en el nodo seleccionado, siendo este representativo de lo que ocurre en cada elemento del sistema, por lo que, el tiempo de cómputo es menor que el demandado por soluciones numéricas de ecuaciones diferenciales. Por lo tanto, el análisis en estado transitorio fue llevado a cabo empleando dicho método.

### **3.2 Metodología para la solución del modelo físico y matemático**

Para resolver el problema de balance global se sigue la siguiente metodología con el fin de entender los fenómenos que ocurren en los diferentes componentes de la ventana de vidrio doble, así como para entender el método mismo. Para ellos se llevó a cabo el desarrollo de modelos físicos y matemáticos simples, desde 1-D hasta 2-D considerando solo un mecanismo de transferencia de calor hasta que finalmente se obtiene el modelo físico y matemático empleado para este tema de estudio. Para el primer modelo físico y matemático como se muestra en la Figura 3.1 se consideró una losa compuesta por dos materiales diferentes y el análisis fue en 1-D.



**Figura 3.1.-** Modelo físico de la losa compuesta 1-D.

De un balance de energía en el primer y Segundo término se obtienen las ecuaciones (3.1) y (3.2), respectivamente. Las cuales ayudaran a determinar las temperaturas en cada elemento de la placa. Para el primer elemento se tiene que las energía que entran y salen del sistema esta dada por:

$$q_{cond_{ext}} = q_{cond_{1-2}}$$

$$h_{cond_{ext}}(T_{ext} - T_1) = h_{cond_{1-2}}(T_1 - T_2)$$

$$(h_{cond_{ext}})T_{ext} - (h_{cond_{ext}})T_1 = (h_{cond_{1-2}})T_1 - (h_{cond_{1-2}})T_2$$

$$(h_{cond_{ext}})T_{ext} = (h_{cond_{ext}} + h_{cond_{1-2}})T_1 - (h_{cond_{1-2}})T_2 \quad (3.1)$$

Para el elemento 2 el cual consiste en la ventana en contacto con la habitación se tienen que la energía que entras y sale del sistema está dada por:

$$q_{cond_{1-2}} = q_{cond_{int}}$$

$$h_{cond_{1-2}}(T_1 - T_2) = h_{cond_{int}}(T_2 - T_{int})$$

$$(h_{cond_{1-2}})T_1 - (h_{cond_{1-2}})T_2 = (h_{cond_{int}})T_2 - (h_{cond_{int}})T_{int}$$

$$(h_{cond_{int}})T_{int} = (h_{cond_{int}} + h_{cond_{1-2}})T_2 - (h_{cond_{1-2}})T_1 \quad (3.2)$$

Re-acomodando las ecuaciones (3.1) y (3.2) en forma matricial se tiene que:

$$\begin{bmatrix} [h_{cond_{ext}} + h_{cond_{1-2}}] & -[h_{cond_{1-2}}] \\ -[h_{cond_{1-2}}] & +[h_{cond_{int}} + h_{cond_{1-2}}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (h_{cond_{ext}})T_{ext} \\ (h_{cond_{int}})T_{int} \end{bmatrix}$$

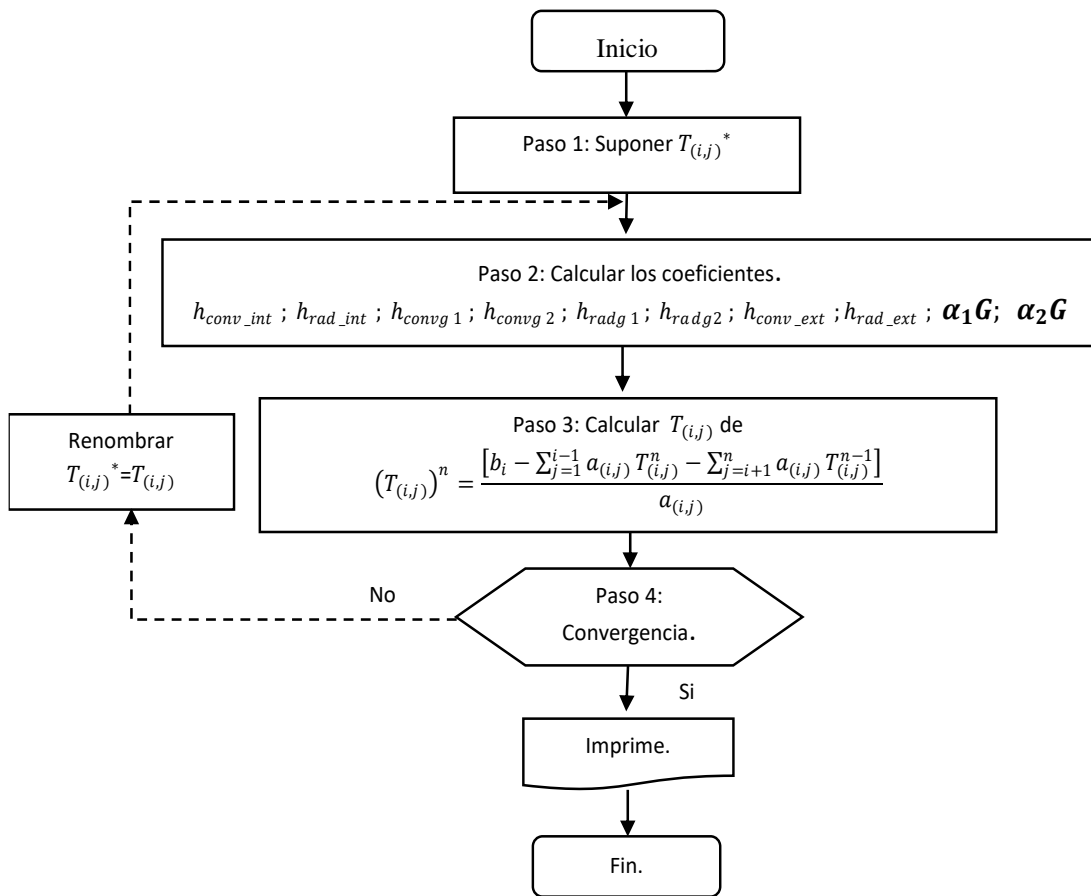
La matriz queda como:

$$[A_{(i,j)}][T_{(i,j)}] = [B_{(i,j)}] \quad (3.3)$$

La temperatura puede ser obtenida por la matriz inversa como:

$$[T] = [A]^{-1}[B] \quad (3.4)$$

Para resolver dicho sistema de ecuaciones existen diferentes métodos iterativos, sin embargo, para el problema planteado anteriormente se emplea el método de Jacobi, esto debido a que no se demanda mucho tiempo de cómputo para obtener la solución. En la Figura 3.2 se muestra el diagrama de flujo empleado para encontrar la temperatura en los puntos señalados anteriormente.



**Figura 3.2.-** Diagrama de flujo, método de Jacobi.

El método de Jacobi consiste en suponer una primera aproximación en este caso la temperatura  $(T_{(i,j)})^{n=0}$  para la solución de la ecuación (3.4). Donde se calcula por aproximaciones sucesivas  $(T_{(i,j)})^n$

$$\begin{bmatrix} a_{(2,1)} & a_{(2,2)} \\ a_{(1,1)} & a_{(1,2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{(1)} \\ T_{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{(1)} \\ b_{(2)} \end{bmatrix}$$

El método de Jacobi se resume en los siguientes pasos (Xamán y Gijon-Rivera):

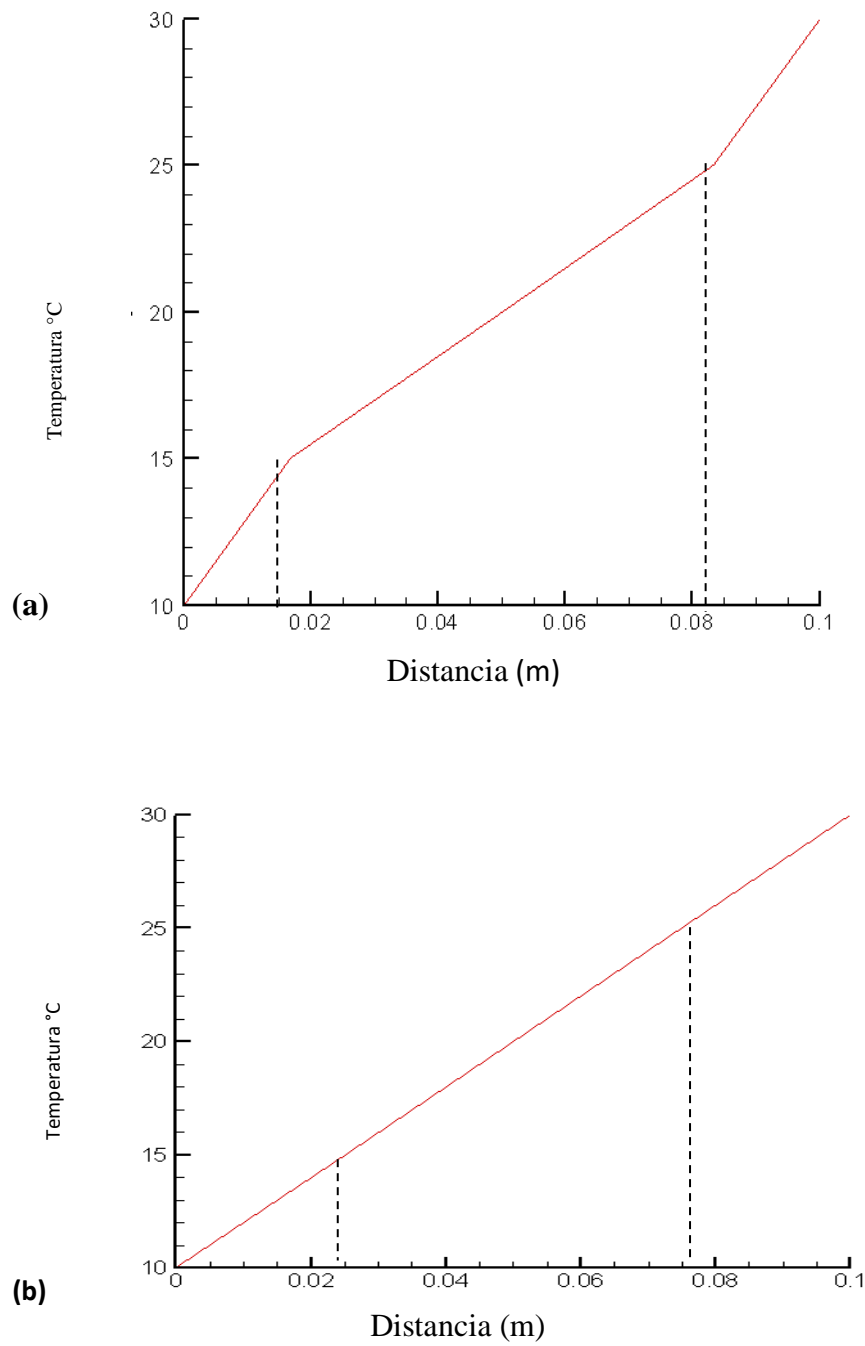
Paso 1: Suponer una distribución de la variable  $(T_{(i,j)})^n$  en todo el dominio computacional (comúnmente constante).

Paso 2: Calcular  $T_{(i,j)}$  a partir de la ecuación (4) usando los valores supuestos del paso 1.

Paso 3: Aplicar un criterio de convergencia; si se cumple el criterio establecido, entonces  $(T_{(i,j)})^{n+1}$  es la solución del problema. En caso contrario, se renombra  $(T_{(i,j)})^n = (T_{(i,j)})^{n+1}$  y se regresa al paso 2, de esta manera se continua con el proceso iterativo hasta cumplir el criterio de convergencia.

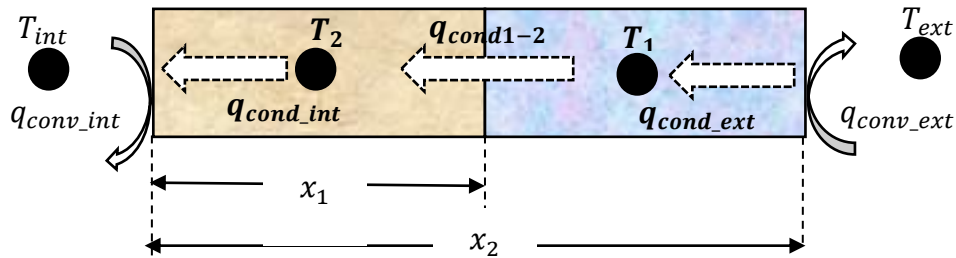
El método de Jacobi tiene la desventaja que la convergencia a la solución del sistema de ecuaciones algebraicas es lenta.

La solución del problema anterior fue llevada a cabo empleado dos métodos iterativos, los cuales fueron: método de volumen finito (MVF) y método de balance global, ambas con las mismas condiciones, las cuales fueron: un sólido de 0.1m de largo y una conductividad térmica de  $15\text{W/m}^2$ , las temperaturas al interior y exterior igual a 10 y  $30^\circ\text{C}$ , respectivamente. para el caso del método MVF el análisis se llevó a cabo en un solo material considerando la conducción como el único mecanismo de transferencia, como se aprecia en la figura 3.3a el comportamiento es lineal siendo las temperaturas en los puntos señalados los mismo obtenidos al emplear la técnica de balance global los cuales fueron de  $T_1 = 25^\circ\text{C}$  y  $T_2 = 15^\circ\text{C}$ , donde  $T_1$  se considera en contacto con el ambiente exterior y  $T_2$  en contacto con el ambiente interior de la habitación, para el método MVF la cantidad de nodos empleados fueron 4, siendo el nodo 2 y 3 los valores correspondientes a  $T_1$  y  $T_2$ . Mientras que, para el método de balance global se consideran dos nodos siendo el nodo  $T_1$  el representativo para el material 1 y el nodo  $T_2$  el nodo representativo para el material 2. En la Figura 3.3(b) se observa el comportamiento de la losa compuesta, la cual se comporta como un solo material, esto debido a las consideraciones realizadas, las cuales fueron, tomar las propiedades como constantes. Como se observa las temperaturas obtenidas empleando el método de balance global son las mismas arrojadas al emplear el método MVF.



*Figura 3.3.- Perfil de temperaturas en la placa 1-D, (a) balance global, (b) MVF.*

En el ejercicio anterior solo fue considerado el mecanismo de transferencia de calor por conducción, sin embargo, para el siguiente ejercicio mostrado en la Figura 3.4 la losa compuesta toma en cuenta los flujos convectivos hacia el exterior e interior, esto debido a que, al existir una diferencia de temperatura entre las placas y el ambiente en el cual el fluido considerado el aire, este tiende a perder o ganar energía por convección. El análisis se llevó a cabo en 1-D.



**Figura 3.4.-** Losa compuesta considerando flujos convectivos 1-D.

De manera análoga se realiza un balance de energía en cada elemento del sistema, pero tomando en cuenta los efectos convectivos debido a las consideraciones realizadas para este problema, obteniendo así las ecuaciones para determinar las temperaturas en dichos puntos, como se observa en las siguientes ecuaciones, la entrada de energía considera el efecto convectivo por lo que el modelo matemático queda como ecuación (3.5):

$$q_{cond_{ext}} + q_{conv_{ext}} = q_{cond_{1-2}}$$

$$h_{cond_{ext}}(T_{ext} - T_1) + h_{conv_{ext}}(T_{ext} - T_1) = h_{cond_{1-2}}(T_1 - T_2)$$

$$(h_{cond_{ext}})T_{ext} - (h_{cond_{ext}})T_1 + (h_{conv_{ext}})T_{ext} - (h_{conv_{ext}})T_1 =$$

$$(h_{cond_{1-2}})T_1 - (h_{cond_{1-2}})T_2$$

$$(h_{conv_{ext}} + h_{cond_{ext}})T_{ext} = (h_{cond_{ext}} + h_{cond_{1-2}} + h_{conv_{ext}})T_1 - (h_{cond_{1-2}})T_2 \quad (3.5)$$



Aplicado nuevamente el método de balance global para el elemento 2, se observa que la energía que sale del sistema considera el termino convectivo, siendo la ecuación resultante la ecuación (3.6).

$$q_{cond_{1-2}} = q_{cond_{int}} + q_{conv_{int}}$$

$$h_{cond_{1-2}}(T_1 - T_2) = h_{cond_{int}}(T_2 - T_{int}) + h_{conv_{int}}(T_2 - T_{int})$$

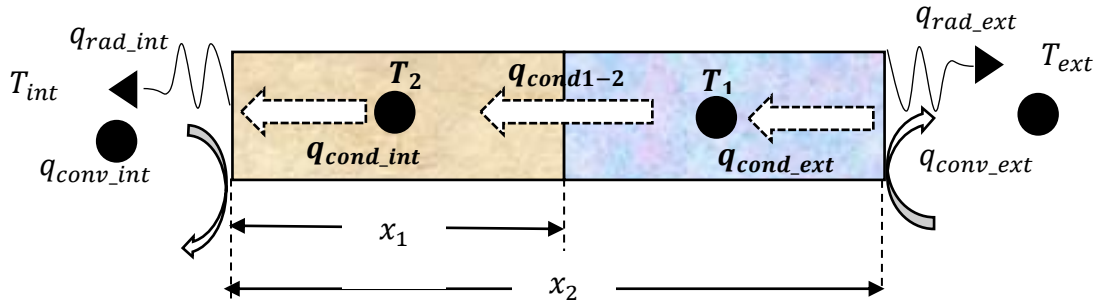
$$(h_{cond_{1-2}})T_1 - (h_{cond_{1-2}})T_2 = (h_{cond_{int}} + h_{conv_{int}})T_2 - (h_{cond_{int}} + h_{conv_{int}})T_{int}$$

$$(h_{cond_{int}} + h_{conv_{int}})T_{int} = (h_{cond_{int}} + h_{cond_{1-2}} + h_{conv_{int}})T_2 - (h_{cond_{1-2}})T_1 \quad (3.6)$$

Del balance de energía, se observa el término convectivo, esto debido a que se consideran flujos convectivos al ambiente interior y al ambiente exterior, las ecuaciones (3.5) y (3.6) en forma matricial quedan como:

$$\begin{bmatrix} [h_{cond_{ext}} + h_{cond_{1-2}} + h_{conv_{ext}}] & - [h_{cond_{1-2}}] \\ - [h_{cond_{1-2}}] & + [h_{cond_{int}} + h_{cond_{1-2}} + h_{conv_{int}}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (h_{conv_{ext}} + h_{cond_{ext}})T_{ext} \\ (h_{cond_{int}} + h_{conv_{int}})T_{int} \end{bmatrix}$$

Para el problema anterior fueron considerados tanto la transferencia de calor por conducción, así como las pérdidas convectivas. Sin embargo, también están presentes los flujos radiativos, por lo que, el modelo físico queda finalmente como en la Figura 3.5 donde se observa los flujos radiativos tanto al exterior como al interior.



**Figura 3.5.-** Losa compuesta considerando flujos convectivos y radiativos 1-D.

Nuevamente para obtener las ecuaciones que nos ayudaran a resolver el ejercicio planteado se realiza un balance de energía con las consideraciones ya mencionadas obteniendo las ecuaciones (3.7) y (3.8), respectivamente.

$$q_{cond_{ext}} + q_{conv_{ext}} + q_{rad_{ext}} = q_{cond_{1-2}}$$

$$h_{cond_{ext}}(T_{ext} - T_1) + h_{conv_{ext}}(T_{ext} - T_1) + h_{rad_{ext}}(T_{ext} - T_1) = h_{cond_{1-2}}(T_1 - T_2)$$

$$(h_{cond_{ext}})T_{ext} - (h_{cond_{ext}})T_1 + (h_{conv_{ext}})T_{ext} - (h_{conv_{ext}})T_1 + (h_{rad_{ext}})T_{ext} - (h_{rad_{ext}})T_1$$

$$= (h_{cond_{1-2}})T_1 - (h_{cond_{1-2}})T_2$$

$$(h_{conv_{ext}} + h_{cond_{ext}} + h_{rad_{ext}})T_{ext} =$$

$$(h_{cond_{ext}} + h_{cond_{1-2}} + h_{conv_{ext}} + h_{rad_{ext}})T_1 - (h_{cond_{1-2}})T_2 \tag{3.7}$$

Como se observa en el balance realizado para el elemento en contacto con el ambiente interior, se tiene ahora el flujo radiativo, por lo que la ecuación queda finalmente como:

$$q_{cond_{1-2}} = q_{cond_{int}} + q_{conv_{int}} + q_{rad_{int}}$$

$$h_{cond_{1-2}}(T_1 - T_2) = h_{cond_{int}}(T_2 - T_{int}) + h_{conv_{int}}(T_2 - T_{int}) + h_{rad_{int}}(T_2 - T_{int})$$

$$(h_{cond_{1-2}})T_1 - (h_{cond_{1-2}})T_2 =$$

$$(h_{cond_{int}} + h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}})T_2 - (h_{cond_{int}} + h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}})T_{int}$$

$$(h_{cond_{int}} + h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}})T_{int} =$$

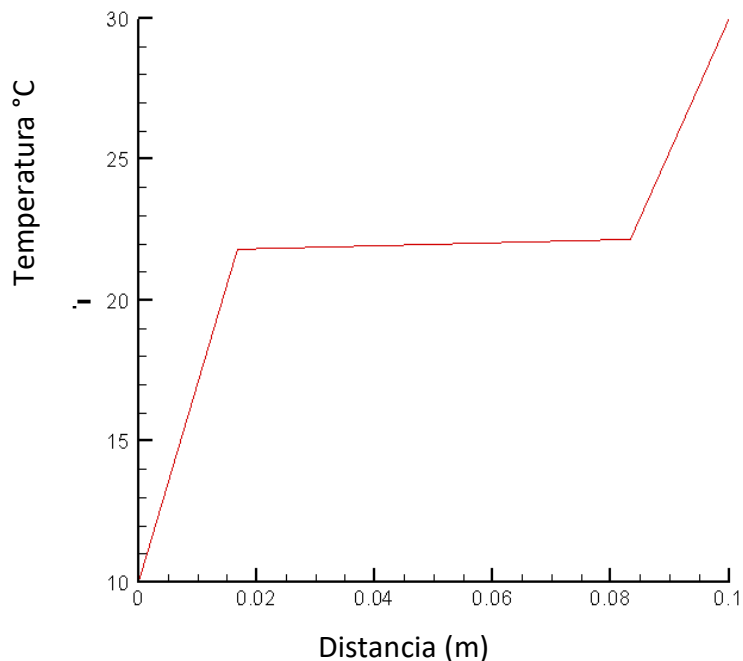
$$(h_{cond_{int}} + h_{cond_{1-2}} + h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}})T_2 - (h_{cond_{1-2}})T_1 \quad (3.8)$$

Del balance realizado resultan dos ecuaciones con dos incógnitas siendo la temperatura interior y exterior valores conocidos por lo que las ecuaciones (3.5) y (3.6) en forma matricial quedan como:

$$\begin{bmatrix} [h_{cond_{ext}} + h_{cond_{1-2}} + h_{conv_{ext}} + h_{rad_{ext}}] & - [h_{cond_{1-2}}] \\ -[h_{cond_{1-2}}] & + [h_{cond_{int}} + h_{cond_{1-2}} + h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix}$$

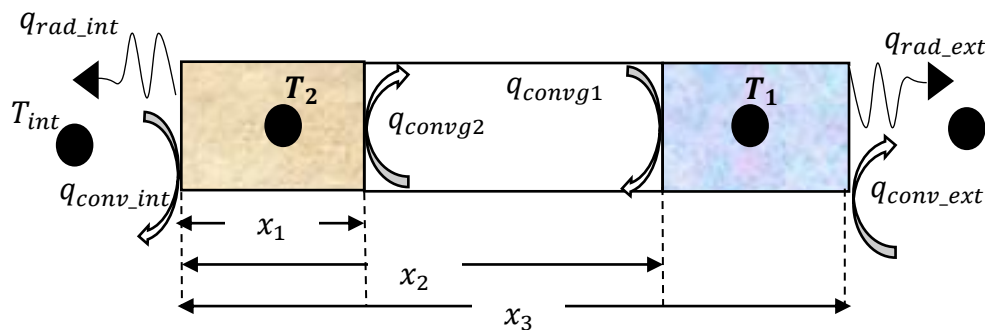
$$= \begin{bmatrix} (h_{conv_{ext}} + h_{cond_{ext}} + h_{rad_{ext}})T_{ext} \\ (h_{cond_{int}} + h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}})T_{int} \end{bmatrix}$$

De la Figura 3.6 se observa el comportamiento de la losa compuesta en la cual el coeficiente convectivo y radiativo son mayores en la parte exterior por lo que el sistema tiende a la temperatura del exterior. Siendo las temperaturas  $T_1$  y  $T_2$  igual a  $22.14$  y  $21.78^\circ\text{C}$ , respectivamente. Como se observa, al considerar el efecto de los flujos convectivos y radiativos el sistema tiene un comportamiento distinto al mostrado en la Figura 3.3a, teniendo en ambos casos las mismas consideraciones, siendo el largo de la losa igual a  $0.1\text{m}$  y el coeficiente de transferencia de calor por conducción igual a  $15\text{W}/\text{m}^2$ , sin embargo, al tener flujos convectivos y radiativos los resultados fueron diferentes, siendo dichos coeficientes al interior igual  $0.68\text{W}/\text{m}^2$ , mientras que, para los flujos convectivos y radiativos al ambiente exterior se consideran ambos de  $6.8\text{W}/\text{m}^2$  estos tuvieron un efecto en el perfil de temperaturas, arrojando resultados con tendencia hacia el exterior por lo que se puede notar la importancia de estos coeficientes para la ganancia o pérdida de energía en un sistema. Por lo que para este tema de tesis estos efectos son considerados. siendo estos coeficientes posteriormente calculados de relaciones reportados en la literatura. Para este ejercicio se consideraron las mismas temperaturas interior y exterior que el ejercicio anterior.



**Figura 3.6.-** Perfil de temperatura considerando flujos convectivos y radiativos 1-D.

Para el problema siguiente se considera ambos materiales con una separación entre ellas igual a  $b = x_2 - x_1$ , siendo este separado por un fluido (aire), por lo cual son considerados los flujos convectivos entre el material 1 y 2, esto debido a su importancia como se observó en el ejercicio anterior, teniendo este un efecto en la ganancia o pérdida de energía, y los sólidos son considerados muy delgados y despreciables por lo que el modelo físico queda como Figura 3.7. El análisis se realizó en 1-D. Cabe mencionar que, los flujos convectivos y radiativos tanto al interior como el exterior son también considerados para este problema.



*Figura 3.7.- Losa separada por un fluido 1-D.*

Como se mencionó anteriormente los espesores de las placas se consideran como muy pequeñas y despreciables, por lo que, el balance de energía se realiza solo considerando los efectos convectivos y radiativos ya mencionados, teniendo como resultado las ecuaciones (3.7) y (3.8), respectivamente. Como se observa en el balance de energía para el elemento 1, la energía que entra al sistema considera los flujos convectivos y radiativos, mientras que la energía que sale del solo considera los flujos convectivos, esto debido a las consideraciones echas.

$$q_{conv_{ext}} + q_{rad_{ext}} = q_{conv_{g1}}$$

$$h_{conv_{ext}}(T_{ext} - T_1) + h_{rad_{ext}}(T_{sky} - T_1) = h_{conv_{g1}}(T_1 - T_2)$$

$$(h_{conv_{ext}})T_{ext} - (h_{conv_{ext}})T_1 + (h_{rad_{ext}})T_{sky} - (h_{rad_{ext}})T_1 =$$

$$(h_{conv_{g1}})T_1 - (h_{conv_{g1}})T_2$$

$$h_{conv_{ext}}(T_{ext}) + h_{rad_{ext}}(T_{sky}) =$$

$$[h_{rad_{ext}} + h_{conv_{ext}} + h_{conv_{g1}}] T_1 - [h_{conv_{g1}}] T_2 \tag{3.9}$$

Como se observa para el elemento 2, la entrada de energía considera el flujo convectivo debido al fluido que separa ambos materiales, y a la salida es considerado tanto el flujo convectivo como el radiativo siendo la ecuación resultante igual a:

$$q_{conv_{int}} + q_{rad_{int}} = q_{conv_{g2}}$$

$$h_{conv_{g2}}(T_1 - T_2) = h_{conv_{int}}(T_2 - T_{int}) + h_{rad_{int}}(T_2 - T_{int})$$

$$(h_{conv_{g2}})T_1 - (h_{conv_{g2}})T_2 = (h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}})T_2 - (h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}})T_{int}$$

$$(h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}})T_{int} =$$

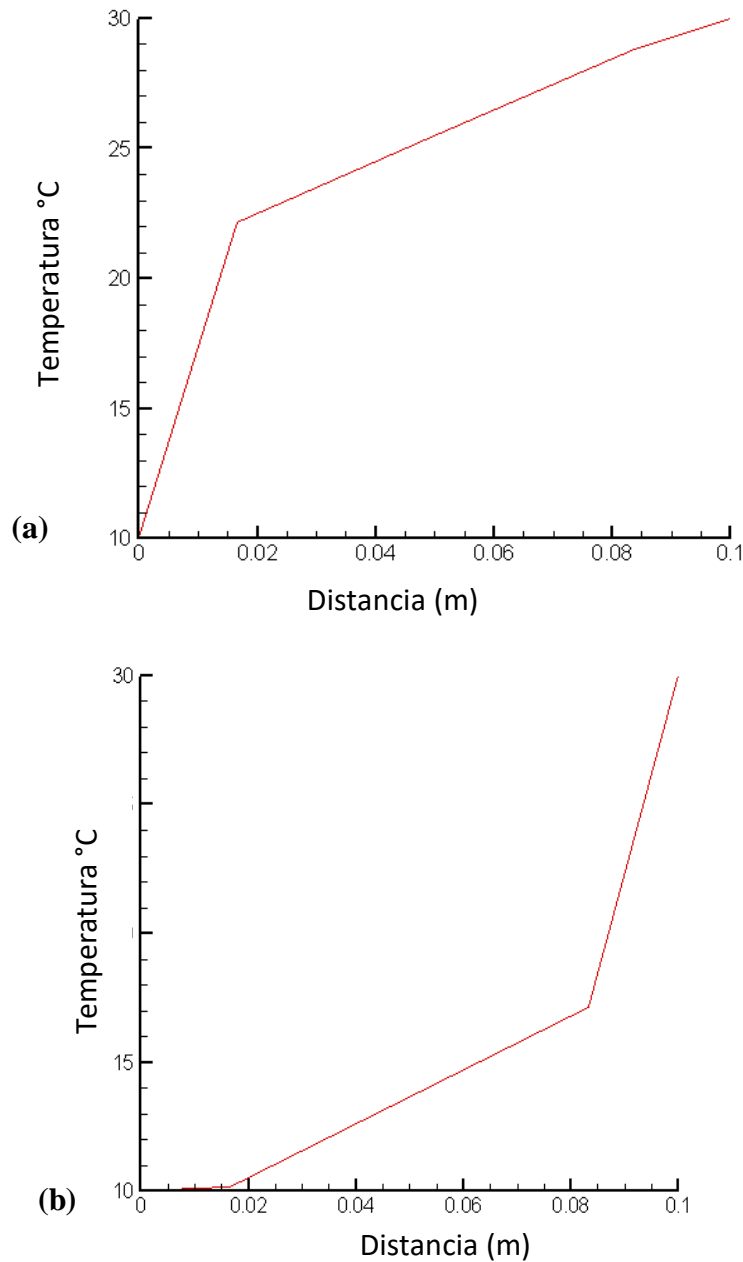
$$[h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}} + h_{conv_{g2}}] T_2 - [h_{conv_{g2}}] T_1 \tag{3.10}$$

Del planteamiento anterior nuevamente se obtiene dos ecuaciones con dos incógnitas, sin embargo, para este caso, no es considerado el coeficiente de transferencia de calor por conducción, por lo que, existe una modificación las ecuaciones, re-acomodando las ecuaciones (3.9) y (3.10) obtenidas del balance de energía en forma matricial se tiene:

$$\begin{bmatrix} [h_{rad_{ext}} + h_{conv_{ext}} + h_{conv_{g1}}] & - [h_{conv_{g1}}] \\ - [h_{conv_{g2}}] & + [h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}} + h_{conv_{g2}}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{conv_{ext}}(T_{ext}) + h_{rad_{ext}}(T_{sky}) \\ (h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}})T_{int} \end{bmatrix}$$

En la Figura 3.8. se observa el comportamiento de la temperatura en el sistema teniendo un fluido entre los dos sólidos, para este problema son considerados dos casos: para el caso 1 se considera un coeficiente de transferencia de calor en el exterior más altos, siendo estos de  $6.8\text{W/m}^2$ , mientras que en el interior es considerado a  $0.68\text{W/m}^2$ , los coeficientes convectivos tanto para el material 1 y 2 se mantienen constantes a  $5\text{W/m}^2$ , en la Figura 3.8.a se observa la tendencia de la temperatura es hacía la temperatura ambiente siendo esta de  $T_1=30^\circ\text{C}$ , mientras que para la temperatura al interior se considera a  $T_2=10^\circ\text{C}$ , estas temperaturas son las mismas empleadas para ambos casos. Las temperaturas obtenidas para el caso 1 son:  $T_1=28.7^\circ\text{C}$  y  $T_2=22.16^\circ\text{C}$ . Para el caso 2, se considera que los coeficientes convectivos y radiativos al exterior son más pequeños que al interior, siendo los coeficientes al exterior igual a  $0.68\text{W/m}^2$ , mientras que, para los coeficientes convectivos y radiativos al interior son considerados de  $6.8\text{W/m}^2$ , los coeficientes convectivos tanto para el elemento 1 y 2 entre los dos materiales es considerado nuevamente constante a  $5\text{W/m}^2$ , las temperaturas obtenidas para este caso son de  $T_1=17.83^\circ\text{C}$  y  $T_2=11.21^\circ\text{C}$ , por lo que se comprueba la importancia de los flujos convectivos y radiativos en el análisis de transferencia de calor. Tal y como se

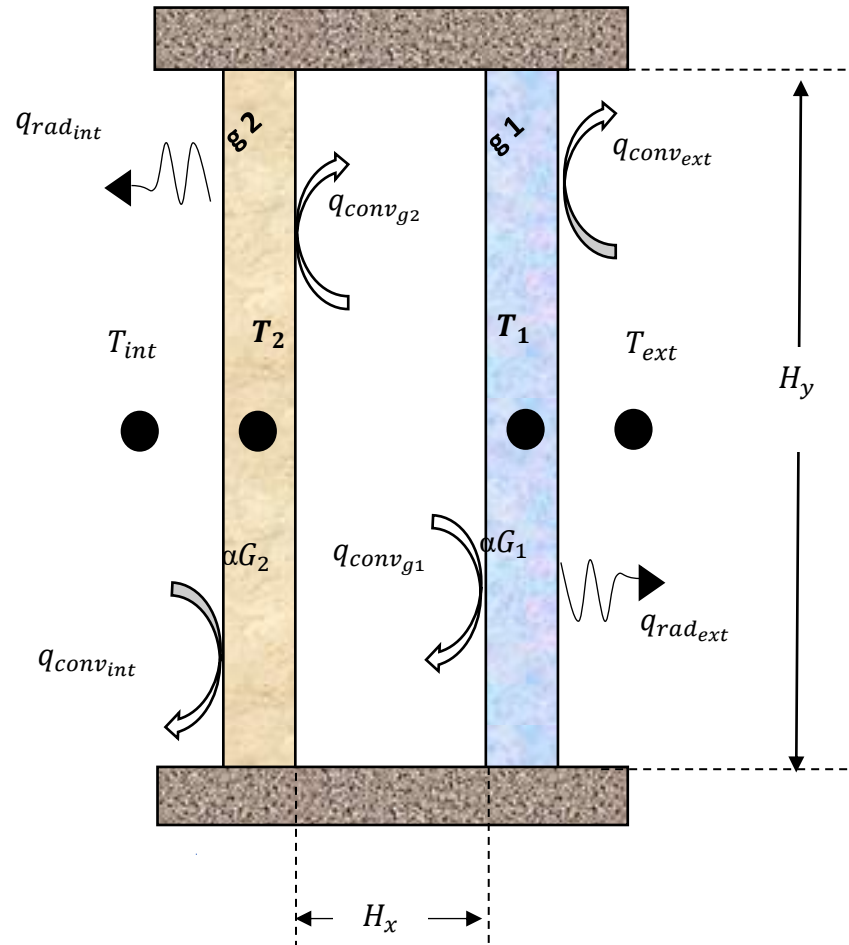
muestran en las figuras 3.8a y 3.8b, el perfil de temperatura tiene a la temperatura exterior e interior, respectivamente, dependiendo de los coeficientes convectivos empleados. Hasta aquí los coeficientes se suponen como valores constantes y propuestos con la única finalidad de observar su importancia en el estudio de la transferencia de calor.



**Figura 3.8.-** Perfil de temperaturas, (a) caso 1, (b) caso 2 en 1-D.



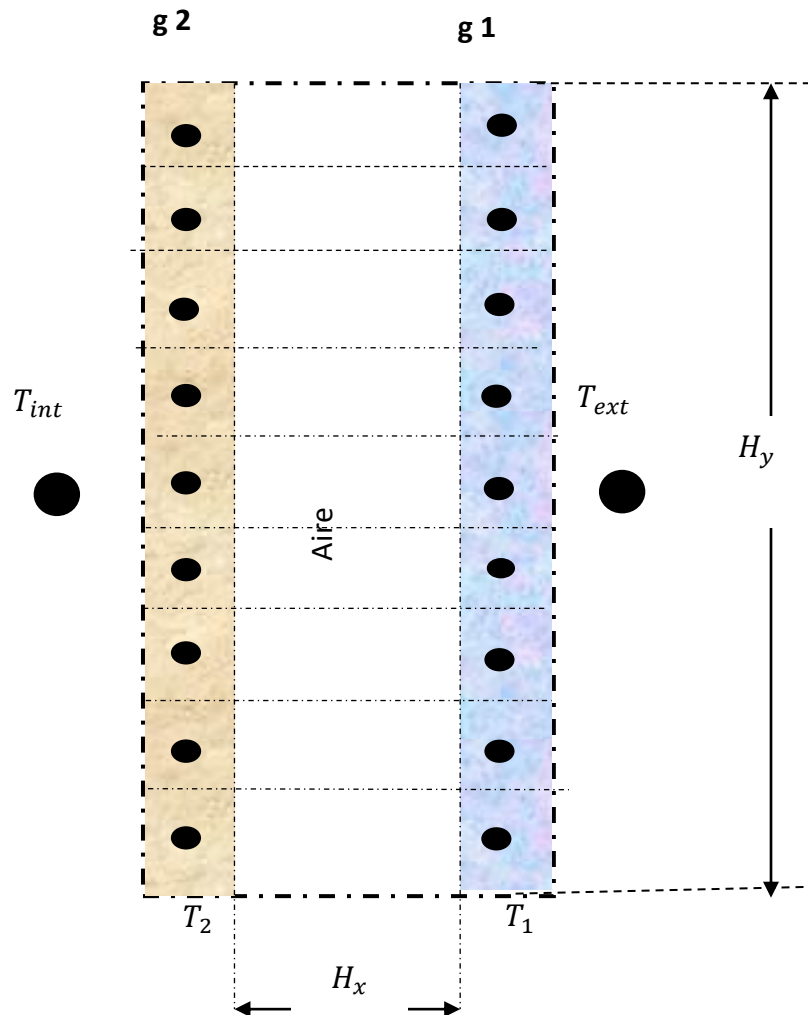
Del modelo analizado anteriormente en la Figura 3.7 esta se expande a dos dimensiones, siendo el nuevo modelo físico el obtenido en la Figura 3.9. El cual representa la ventana de vidrio doble con el que se llevará a cabo el tema de tesis.



**Figura 3.9.-** Modelo bidimensional (ventana de vidrio doble).

Debido a la forma en la que se realiza el método de balance de global (en cada elemento del sistema), como se observa en la Figura 3.10. Para el análisis bidimensional el desarrollo matemático da como resultado nuevamente dos ecuaciones con dos incógnitas y al considerar

las mismas condiciones que en el ejercicio anterior mostrado en la Figura 3.7, las ecuaciones que resultan de dicho balance son las mismas obtenidas en las ecuaciones (3.9) y (3.10), pero debido a que es realizada de manera bidimensional esta se repite  $n$  veces de manera vertical obteniendo así el perfil de temperaturas para el sistema.



*Figura 3.10.- Representación de los nodos computacionales en 2-D.*

Por lo tanto, realizando el balance de energía de manera unidimensional y re-acomodando dichas ecuaciones de forma matricial, de tal forma que pueda obtenerse las temperaturas en cada elemento y siendo está calculada a lo largo de  $H_y$ :

$$\begin{bmatrix} [h_{rad_{ext}} + h_{conv_{ext}} + h_{conv_{g1}}] & -[h_{conv_{g1}}] \\ -[h_{conv_{g2}}] & +[h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}} + h_{conv_{g2}}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{conv_{ext}}(T_{ext}) + h_{rad_{ext}}(T_{sky}) \\ (h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}})T_{int} \end{bmatrix}$$

En el problema anterior analizado de forma unidimensional fueron considerados dos casos en los cuales se observó el efecto de los flujos radiativos así como los flujos convectivos tanto al exterior como al interior de la habitación, los coeficientes convectivos entre los sólidos se consideraron como constante a  $5W/m^2$ , sin embargo para este ejercicio se analiza el efecto de los flujos convectivos en la cavidad formada por las placas, por lo que se consideran nuevamente 2 casos: caso 1 los coeficientes convectivos y radiativos tanto en el ambiente exterior como interior se consideren constantes a  $6.8W/m^2$ , mientras que el coeficiente convectivo denominado como  $h_{conv_{g2}}$  para el vidrio 2 en contacto con el ambiente interior se considera a  $5W/m^2$  y el coeficiente convectivo denominado  $h_{conv_{g1}}$  en contacto con el ambiente exterior se considera a  $0.5W/m^2$ , en la figura 3.11a se observa dicho perfil de temperaturas, siendo las temperaturas en cada elemento del sistema iguales a  $T_1=29.57^\circ C$  y  $T_2=10^\circ C$ , para la temperatura en el vidrio 1 y 2, respectivamente. Para el caso 2 se considera nuevamente los coeficientes convectivos y radiativos constantes al ambiente interior y exterior, siendo estos valores los empleados en el caso1, para el coeficiente convectivo en contacto con el vidrio 2 el cual da hacia el ambiente interior, para este caso se considera de  $0.5W/m^2$  y para el coeficiente convectivo 1 el cual está en contacto con el vidrio 1 es considerado a  $5W/m^2$ , siendo para este caso los valores obtenidos  $T_1$  y  $T_2$  iguales a 30 y

9.57°C, respectivamente por lo que se aprecia el efecto de los coeficientes en la cavidad. En la Figura 3.11b se observa el perfil de temperaturas para el caso 2, siendo la diferencia entre la temperatura para el vidrio 1 del caso 1 y 2 casi iguales, de igual forma para las temperaturas en los vidrios T<sub>2</sub> son casi iguales para ambos casos, por lo que ambas graficas son similares.

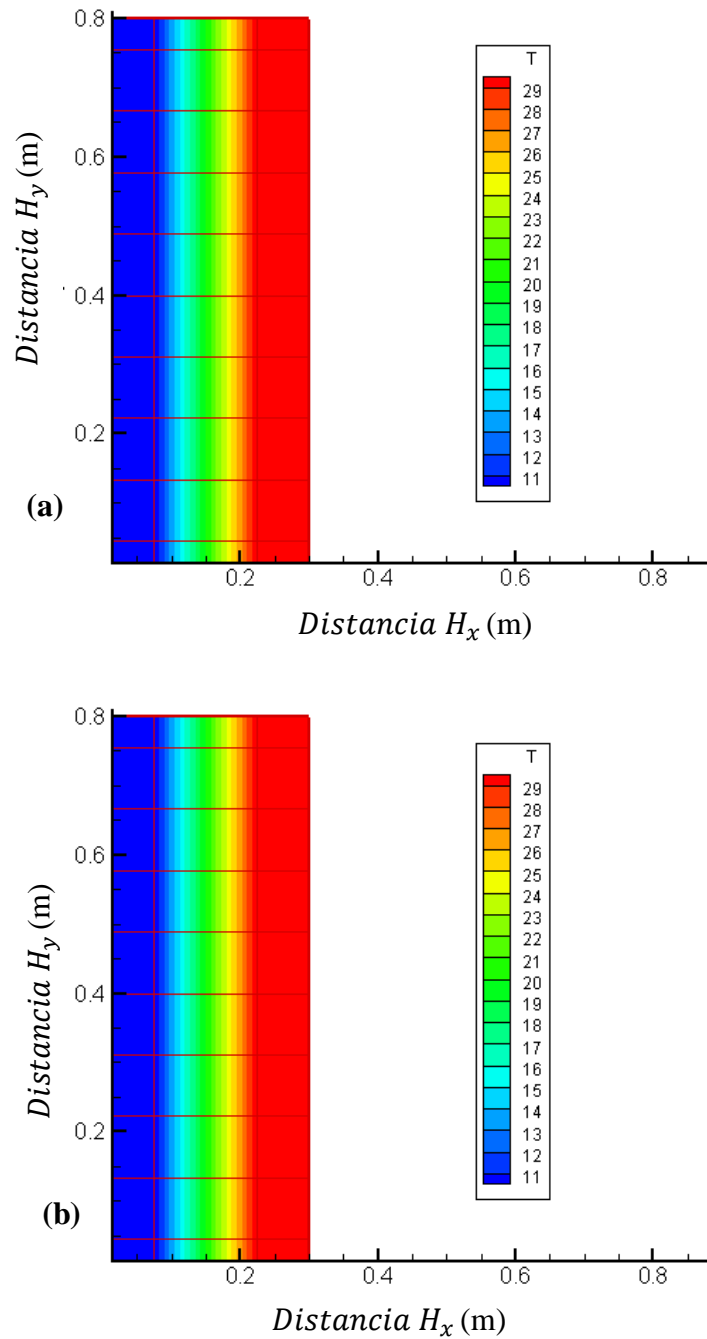
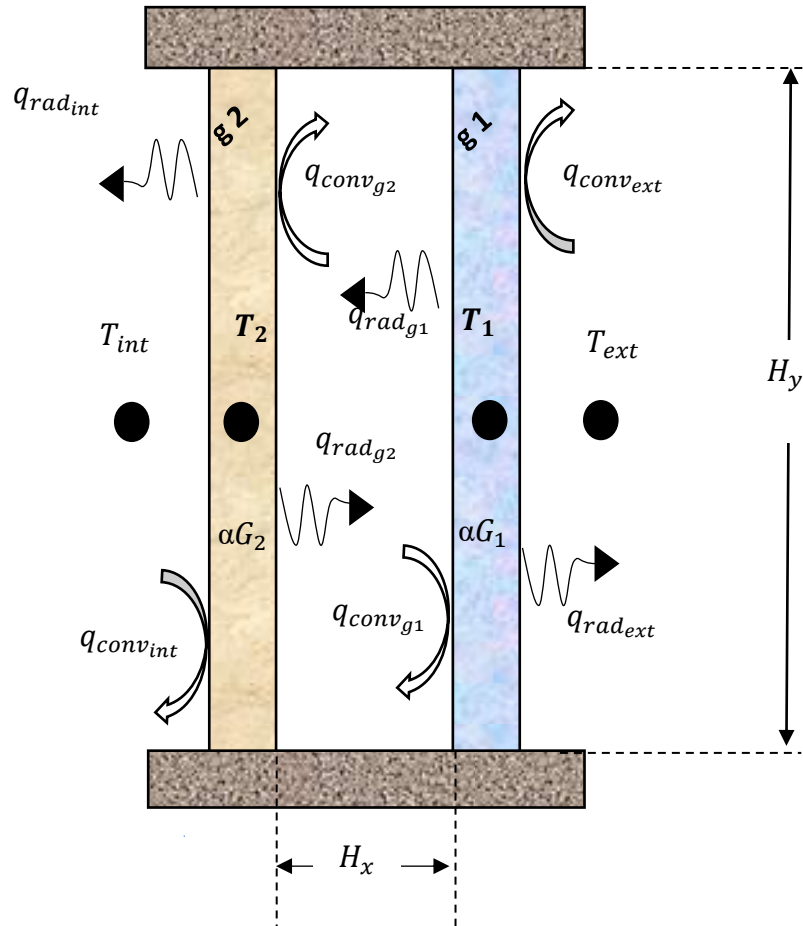


Figura 3.11.- Perfil de temperaturas bidimensional (a) caso 1, (b) caso 2.

De los ejercicios anteriores, se observó la importancia de considerar los flujos convectivos y radiativos. Hasta el momento se ha considerado estos flujos hacia el exterior e interior de la habitación, sin embargo, en el canal formado por las hojas de vidrio también se encuentran presentes estos flujos, siendo de gran importancia para el tema de estudio. Por lo tanto, el modelo físico considerando intercambio radiativo entre placas queda como (Figura 3.12):



**Figura 3.12.-** Modelo de ventana doble con intercambio radiativo entre placas.

Aplicando un balance de energía elemento 1 el cual corresponde al vidrio en contacto con el ambiente exterior. Como se observa en las siguientes ecuaciones, la energía que entra y sale del sistema considera los flujos convectivos, así como las radiativos, siendo estos también considerados en la salida del volumen de control por lo que la ecuación resultante es la ecuación (3.11).

$$q_{conv_{ext}} + q_{rad_{ext}} = q_{conv_{g1}} + q_{rad_{g1}}$$

$$h_{conv_{ext}}(T_{ext} - T_1) + h_{rad_{ext}}(T_{sky} - T_1) = h_{conv_{g1}}(T_1 - T_2) + h_{rad_{g1}}(T_1 - T_2)$$

$$(h_{conv_{ext}})T_{ext} - (h_{conv_{ext}})T_1 + (h_{rad_{ext}})T_{sky} - (h_{rad_{ext}})T_1 =$$

$$(h_{conv_{g1}})T_1 - (h_{conv_{g1}})T_2 + (h_{rad_{g1}})T_1 - (h_{rad_{g1}})T_2$$

$$h_{conv_{ext}}(T_{ext}) + h_{rad_{ext}}(T_{sky}) =$$

$$[h_{rad_{ext}} + h_{conv_{ext}} + h_{conv_{g1}} + h_{rad_{g1}}] T_1 - [h_{conv_{g1}} + h_{rad_{g1}}] T_2 \quad (3.11)$$

De manera análoga se lleva a cabo el balance de energía, en esta ocasión para el vidrio 2, el cual está en contacto con el ambiente interior, se nota nuevamente que en la entra y salidas del volumen de control son considerados los flujos radiativos no considerados anteriormente obteniendo así la ecuación (3.12).

$$q_{conv_{g2}} + q_{rad_{g2}} = q_{conv_{int}} + q_{rad_{int}}$$

$$h_{conv_{g2}}(T_1 - T_2) + h_{rad_{g2}}(T_1 - T_2) = h_{conv_{int}}(T_2 - T_{int}) + h_{rad_{int}}(T_2 - T_{int})$$

$$(h_{conv_{g2}})T_1 - (h_{conv_{g2}})T_2 + (h_{rad_{g2}})T_1 - (h_{rad_{g2}})T_2 =$$

$$(h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}})T_2 - (h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}})T_{int}$$

$$(h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}})T_{int} =$$

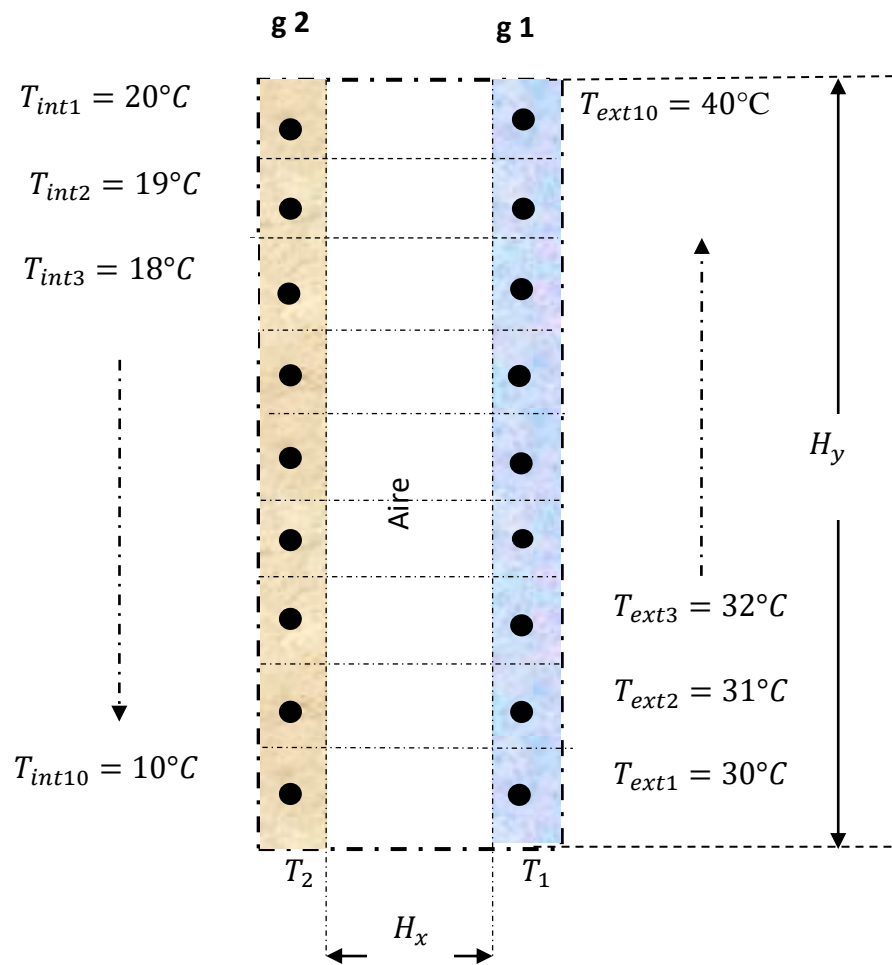
$$[h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}} + h_{conv_{g2}} + h_{rad_{g2}}] T_2 - [h_{conv_{g2}} + h_{rad_{g2}}] T_1 \quad (3.12)$$

Re-acomodando las ecuaciones (3.11) y (3.12) en forma matricial, las cuales nos ayudaran a encontrar las temperaturas en los elementos analizados, tenemos que:

$$\begin{bmatrix} [h_{rad_{ext}} + h_{conv_{ext}} + h_{conv_{g1}} + h_{rad_{g1}}] & - [h_{conv_{g1}} + h_{rad_{g1}}] \\ -[h_{conv_{g2}} + h_{rad_{g2}}] & + [h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}} + h_{conv_{g2}} + h_{rad_{g2}}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{conv_{ext}}(T_{ext}) + h_{rad_{ext}}(T_{sky}) \\ (h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}})T_{int} \end{bmatrix}$$

En el nuevo modelo matemático es considerado finalmente los flujos radiativos entre las placas teniendo este un efecto en la ganancia o pérdida de energía. Para este problema son considerados dos casos: caso 1 se consideran todos los flujos tanto radiativos como convectivos constantes a  $6.8\text{W/m}^2$ , por lo que en esta ocasión las temperaturas en la ventana 1 y 2 se aproximan a las temperaturas del ambiente exterior e interior, respectivamente.

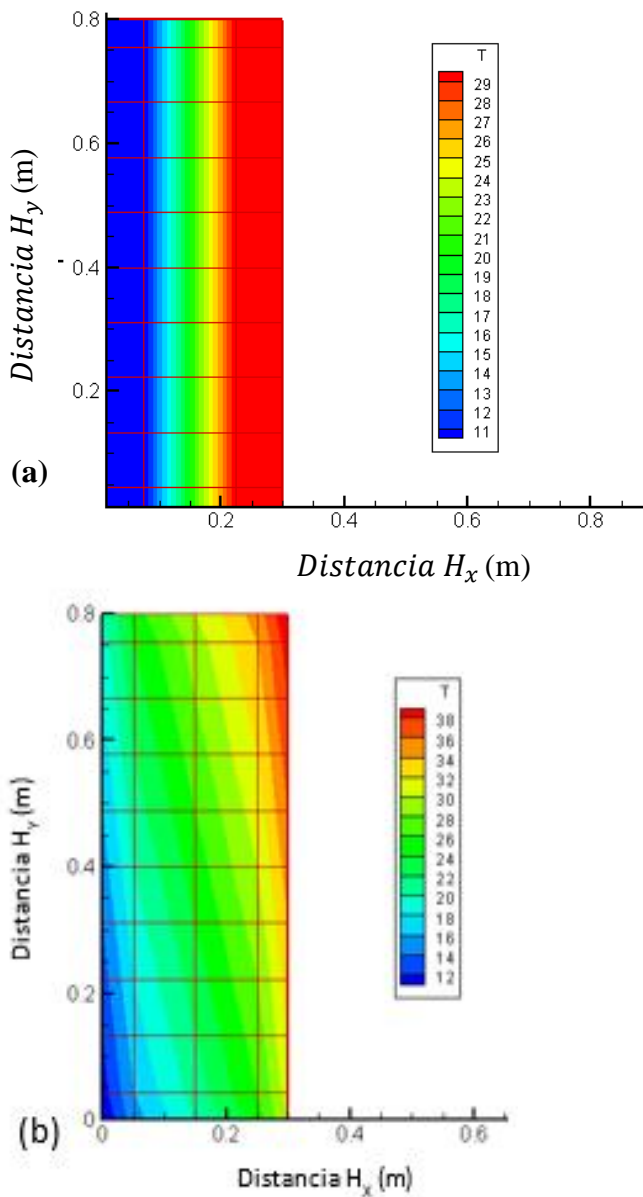
En todos los casos anteriores la temperatura exterior e interior fueron consideradas constantes, siendo estas de  $T_{int}=10^\circ\text{C}$  mientras que la temperatura en el ambiente exterior fue considerada a  $T_{ext}=30^\circ\text{C}$ . Para el caso 2 se considera una variación en las temperaturas, tal como se muestran en la Figura 3.13



**Figura 3.13.-** Variación de la temperatura a lo largo de la ventana.

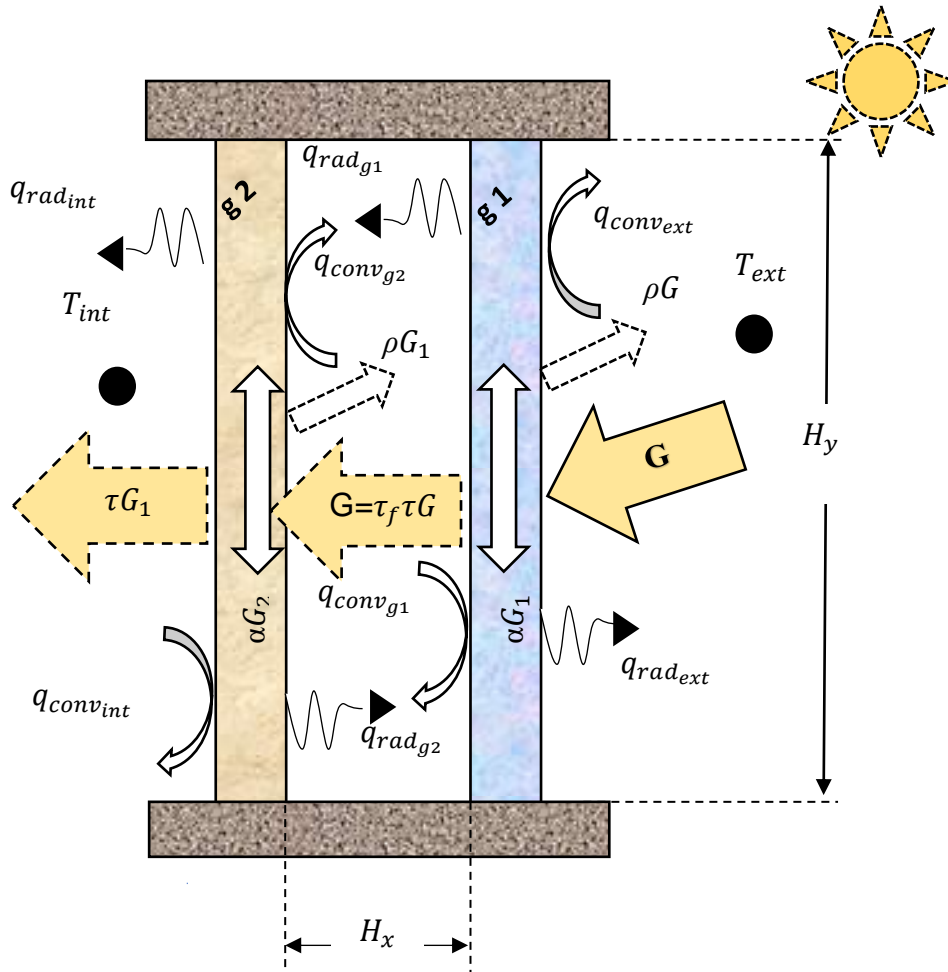
Para el caso 2 los flujos convectivos y radiativos son tomados nuevamente constantes siendo estos los mismos considerados para el caso 1, sin embargo, en la Figura 3.14(b) se observa un comportamiento distinto al mostrado en la figura 3.14a esto debido a la variación de la temperatura a lo largo de  $H_y$ .





**Figura 3.14.-** Perfil de temperaturas (a) Temperatura constante, (b) Temperatura variable.

La radiación solar que incide de manera normal a la superficie tiende a elevar la temperatura del cuerpo, esto dependiendo de la cantidad de energía que le llega al sistema, así como la cantidad de energía que absorbe, por lo que, en este tema de tesis se considera la radiación solar incidente tal como se muestra en el modelo físico de la Figura 3.15.



**Figura 3.15.-** Radiación solar incidente en la ventana de vidrio doble.

Para el balance de energía se considero la energía que le llega del sol, y debido a las propiedades ópticas del vidrio este deja pasar parte de esa energía hacia el vidrio 2 el cual absorbe parte de dicha energía. Como se observa en las ecuaciones siguientes, la cantidad de energía absorbida por el vidrio 1 se considero en la parte de energía que entra al nodo 1 siendo este el que está en contacto con el medio ambiente, obteniendo así la ecuación (3.13).

$$q_{abs1} + q_{conv_{ext}} + q_{rad_{ext}} = q_{conv_{g1}} + q_{rad_{g1}}$$

$$\alpha_1 \mathbf{G} + h_{conv_{ext}}(T_{ext} - T_1) + h_{rad_{ext}}(T_{sky} - T_1) = h_{conv_{g1}}(T_1 - T_2) + h_{rad_{g1}}(T_1 - T_2)$$

$$\alpha_1 \mathbf{G} + (h_{conv_{ext}})T_{ext} - (h_{conv_{ext}})T_1 + (h_{rad_{ext}})T_{sky} - (h_{rad_{ext}})T_1 =$$

$$(h_{conv_{g1}})T_1 - (h_{conv_{g1}})T_2 + (h_{rad_{g1}})T_1 - (h_{rad_{g1}})T_2$$

$$\alpha_1 \mathbf{G} + h_{conv_{ext}}(T_{ext}) + h_{rad_{ext}}(T_{sky}) =$$

$$[h_{rad_{ext}} + h_{conv_{ext}} + h_{conv_{g1}} + h_{rad_{g1}}] T_1 - [h_{conv_{g1}} + h_{rad_{g1}}] T_2 \quad (3.13)$$

De la energía que se trasmite del vidrio 1 y llega finalmente al vidrio 2, este absorbe parte de esa energía por lo que tiende a aumentar su temperatura, por lo tanto, es considerada como energía que entra al nodo 2, tal y como se observa en las ecuaciones siguientes. Realizando el balance finalmente se tiene la ecuación (3.14).

$$q_{abs2} + q_{conv_{g2}} + q_{rad_{g2}} = q_{conv_{int}} + q_{rad_{int}}$$

$$\alpha_2 \mathbf{G} + h_{conv_{g2}}(T_1 - T_2) + h_{rad_{g2}}(T_1 - T_2) = h_{conv_{int}}(T_2 - T_{int}) + h_{rad_{int}}(T_2 - T_{int})$$

$$\alpha_2 \mathbf{G} + (h_{conv_{g2}})T_1 - (h_{conv_{g2}})T_2 + (h_{rad_{g2}})T_1 - (h_{rad_{g2}})T_2 =$$

$$(h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}})T_2 - (h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}})T_{int}$$

$$(h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}})T_{int} + \alpha_2 \mathbf{G} =$$

$$[h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}} + h_{conv_{g2}} + h_{rad_{g2}}] T_2 - [h_{conv_{g2}} + h_{rad_{g2}}] T_1 \quad (3.14)$$

Re-acomodando las ecuaciones (3.13) y (3.14) en forma matricial, los cuales contienen el efecto de la radiación solar incidente, la matriz a resolver queda como:

$$\begin{bmatrix} [h_{rad_{ext}} + h_{conv_{ext}} + h_{conv_{g1}} + h_{rad_{g1}}] & - [h_{conv_{g1}} + h_{rad_{g1}}] \\ -[h_{conv_{g2}} + h_{rad_{g2}}] & + [h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}} + h_{conv_{g2}} + h_{rad_{g2}}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} \\
 = \begin{bmatrix} \alpha_1 \mathbf{G} + h_{conv_{ext}}(T_{ext}) + h_{rad_{ext}}(T_{sky}) \\ \alpha_2 \mathbf{G} + (h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}})T_{int} \end{bmatrix}$$

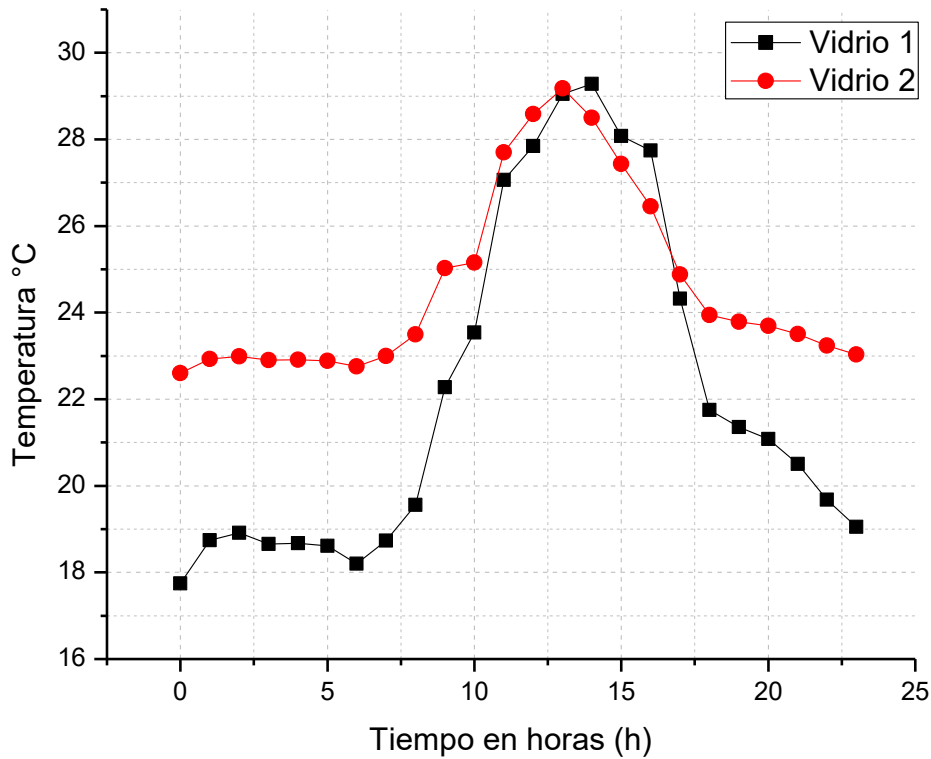
El arreglo matricial mostrado anteriormente se uso para el cálculo de las temperaturas en el vidrio 1 y 2 de la ventana de vidrio doble en estado permanente, el cual contiene los flujos de calor convectivos y radiativos así como el efecto de la radiación solar incidente. Los datos meteorológicos empleados para para este ejercicio fueron los registrados en una base de datos para la ciudad de Chetumal.

En la Tabla 3.1 se muestran los datos meteorológicos necesarios para el cálculo, los cuales corresponden al día más cálido del mes de enero del 2014. La radiación solar tabulada corresponde a la radiación vertical orientada hacia el sur.

**Tabla 3.1.- Datos meteorológicos del 6 de enero.**

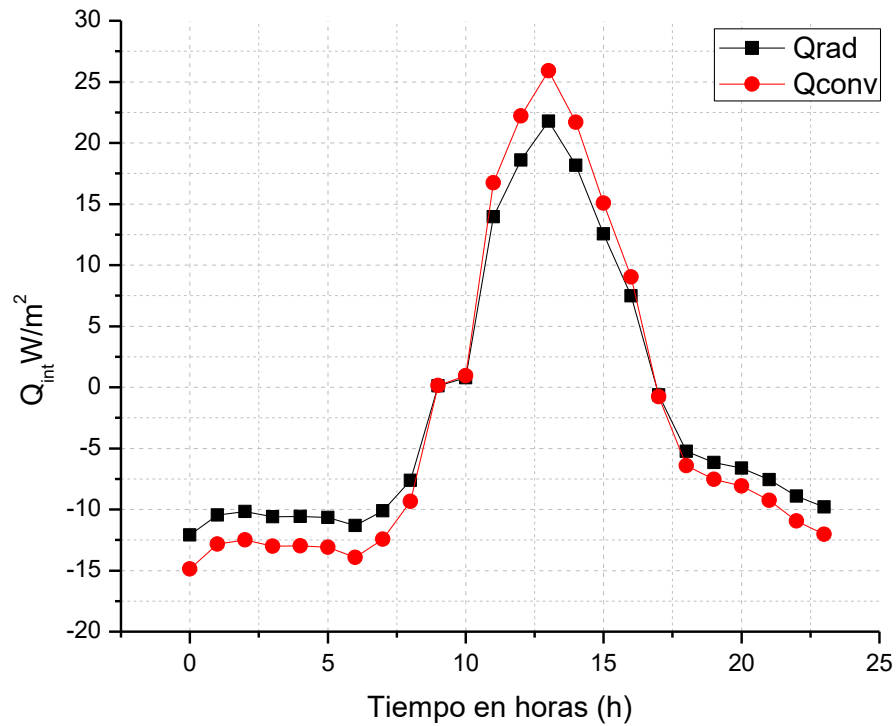
Hora	$G_{solar}(W/m^2)$	$T_{amb}(^{\circ}C)$	$V_{wind}(m/s)$
00:00	0	21	0.8
01:00	0	22	1
02:00	0	22.2	1
03:00	0	21.9	1
04:00	0	21.7	1.3
05:00	0	21.7	1.2
06:00	0	21.3	1.1
07:00	19.2	21.3	1.9
08:00	84.32	22	1.7
09:00	264.42	24.1	1.8
10:00	182.34	25.9	1.9
11:00	573.04	27.8	2.7
12:00	751.49	27.9	3.3
13:00	807.22	29	2.9
14:00	586.12	30.2	2.7
15:00	396.79	29.7	2.6
16:00	148.96	30.4	2.6
17:00	29.34	26.6	4
18:00	6.55	24.4	2.6
19:00	0	23.9	2.8
20:00	0	23.6	2.8
21:00	0	22.6	3.8
22:00	0	22	2.9
23:00	0	21.2	3.5

Las dimensiones de la ventana para este ejercicio son: 0.8m de altura, un ancho de la cavidad de 2cm, los vidrios modelados tienen un espesor de 6 mm, se consideró una temperatura en el interior de la habitación de 25 °C con un coeficiente convectivo interior igual a 6.2 W/m<sup>2</sup>K. los valores para la emisividad, transmisividad y absorptividad del vidrio fueron los reportados por Aguilar et al (2005). Los cuales fueron:  $\tau^* = 0.839$ ,  $\rho^* = 0.09$ ,  $\alpha^* = 0.071$ ,  $\varepsilon = 0.85$  estos valores corresponden a las propiedades ópticas de un vidrio claro. En la Figura 3.16 se aprecia las temperaturas obtenidas para cada vidrio.



*Figura 3.16.- Perfil de temperatura en la ventana doble.*

Como se puede observar la temperatura en el vidrio 1 es menor durante las primeras horas donde no existe la influencia de la radiación solar, además que la temperatura en el ambiente exterior es menor que la temperatura al interior, mientras que la temperatura en el vidrio 2 es cercana a la temperatura al interior de la habitación. Conforme pasan las horas ambos vidrios reciben influencia de la radiación solar, por lo que se aprecia el aumento en la temperatura para ambos vidrios. Esta influencia de la radiación solar afecta de igual forma a los flujos de calor convectivos y radiativos, en la Figura 3.17 se aprecia los valores de estos coeficientes a lo largo del día.



**Figura 3.17.-** Flujos de calor al interior.

El tema de tesis se lleva a cabo en estado transitorio por lo que es necesario establecer un modelo matemático capaz de resolver el sistema en el tiempo, para esto se considera el término transitorio con propiedades constantes para un pequeño volumen de control.

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} V$$

Reescribiendo la ecuación (3.13) y considerando el término transitorio se tiene la nueva ecuación (3.14), donde  $V$  es el volumen de control del nodo donde se realiza el balance de energía, y puede ser escrita como:  $V = A * \delta_x$ , siendo  $A$  y  $\delta_x$  el área y el espesor del volumen de control, respectivamente.

$$\frac{\partial(\rho C_p T_1)}{\partial t} \mathbf{A} \delta_x = \mathbf{q}_{abs1} \mathbf{A} + q_{conv_{ext}} \mathbf{A} + q_{rad_{ext}} \mathbf{A} - q_{conv_{g1}} \mathbf{A} - q_{rad_{g1}} \mathbf{A} \quad (3.15)$$

Dividiendo entre el área e integrando en el tiempo se tiene que:

$$\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial(\rho C_p T_1)}{\partial t} \delta_x dt =$$

$$\int_t^{t+\Delta t} [\alpha_1 \mathbf{G} + h_{conv_{ext}}(T_{ext} - T_1) + h_{rad_{ext}}(T_{sky} - T_1) - h_{conv_{g1}}(T_1 - T_2) - h_{rad_{g1}}(T_1 - T_2)] dt$$

$$\rho C_p \int_t^{t+\Delta t} \partial(T_1) \frac{\delta_x}{\Delta t} =$$

$$\alpha_1 \mathbf{G} + h_{conv_{ext}}(T_{ext} - T_1) + h_{rad_{ext}}(T_{sky} - T_1) - h_{conv_{g1}}(T_1 - T_2) - h_{rad_{g1}}(T_1 - T_2)$$

$$\rho C_p \left[ \frac{T_1 - T_1^{old}}{\Delta t} \right]_t^{t+\Delta t} \delta_x =$$

$$\alpha_1 \mathbf{G} + h_{conv_{ext}}(T_{ext} - T_1) + h_{rad_{ext}}(T_{sky} - T_1) - h_{conv_{g1}}(T_1 - T_2) - h_{rad_{g1}}(T_1 - T_2)$$

$$\frac{\rho C_p \delta_x}{\Delta t} T_1 - \frac{\rho C_p \delta_x}{\Delta t} T_1^{old} =$$

$$\alpha_1 \mathbf{G} + h_{conv_{ext}}(T_{ext} - T_1) + h_{rad_{ext}}(T_{sky} - T_1) - h_{conv_{g1}}(T_1 - T_2) - h_{rad_{g1}}(T_1 - T_2)$$



Donde  $T_1^{old}$  es la temperatura en el tiempo anterior ( $t$ ) y  $T_1$  es la temperatura en el nuevo tiempo ( $t + \Delta t$ )

$$\alpha_1 \mathbf{G} + (h_{conv_{ext}})(T_{ext}) + (h_{rad_{ext}})(T_{sky}) + \frac{\rho C_p \delta_x}{\Delta t} T_1^{old} =$$

$$[h_{rad_{ext}} + h_{conv_{ext}} + h_{conv_{g1}} + h_{rad_{g1}} + \frac{\rho C_p \delta_x}{\Delta t}] T_1 - [h_{conv_{g1}} + h_{rad_{g1}}] T_2 \quad (3.16)$$

De manera análoga para el vidrio 2 en contacto con la temperatura ambiente, donde se tienen que:

$$\frac{\partial(\rho C_p T_2)}{\partial t} \mathbf{A} \delta_x = \mathbf{q}_{abs2} + q_{rad_{g2}} \mathbf{A} + q_{conv_{g2}} \mathbf{A} - q_{conv_{int}} \mathbf{A} - q_{rad_{int}} \mathbf{A}$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial(\rho C_p T_2)}{\partial t} \delta_x dt =$$

$$\int_t^{t+\Delta t} [\alpha_2 \mathbf{G} + h_{conv_{g2}}(T_1 - T_2) + h_{rad_{g2}}(T_1 - T_2) - h_{conv_{int}}(T_2 - T_{int})$$

$$- h_{rad_{int}}(T_2 - T_{int})] dt$$

$$\rho C_p \int_t^{t+\Delta t} \partial(T_2) \frac{\delta_x}{\Delta t} =$$

$$\alpha_2 \mathbf{G} h_{conv_{g2}}(T_1 - T_2) + h_{rad_{g2}}(T_1 - T_2) - h_{conv_{int}}(T_2 - T_{int}) - h_{rad_{int}}(T_2 - T_{int})$$

$$\rho C_p \left[ \frac{T_2 - T_2^{old}}{\Delta t} \right]_t^{t+\Delta t} \delta_x =$$

$$\alpha_2 \mathbf{G} h_{conv_{g2}}(T_1 - T_2) + h_{rad_{g2}}(T_1 - T_2) - h_{conv_{int}}(T_2 - T_{int}) - h_{rad_{int}}(T_2 - T_{int})$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\rho C_p \delta_x}{\Delta t} T_2 - \frac{\rho C_p \delta_x}{\Delta t} T_2^{old} = \\
 & \alpha_2 G h_{conv_{g2}} (T_1 - T_2) + h_{rad_{g2}} (T_1 - T_2) - h_{conv_{int}} (T_2 - T_{int}) - h_{rad_{int}} (T_2 - T_{int}) \\
 & \alpha_2 G + (h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}}) T_{int} + \frac{\rho C_p \delta_x}{\Delta t} T_1^{old} = \\
 & - [h_{conv_{g2}} + h_{rad_{g2}}] T_1 + [h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}} + h_{conv_{g2}} + h_{rad_{g2}} + \frac{\rho C_p \delta_x}{\Delta t}] T_2 \quad (3.17)
 \end{aligned}$$

Del balance de energía realizado en cada hoja de vidrio y considerando el termino transitorio se llega finalmente a las ecuaciones (3.16) y (3.17) las cuales nos permiten determinar las temperaturas en cada elemento del sistema, para ello se emplea un código computacional capaz de resolver dichas ecuaciones. Las propiedades de cada elemento son descritas en el capítulo siguiente y las propiedades del fluido, así como las ecuaciones empleadas para determinar cada coeficiente son las mencionadas anteriormente en el capítulo 2.

$$\begin{aligned}
 & \left[ \begin{array}{cc} [h_{rad_{ext}} + h_{conv_{ext}} + h_{conv_{g1}} + h_{rad_{g1}} + \frac{\rho C_p \delta_x}{\Delta t}] & - [h_{conv_{g1}} + h_{rad_{g1}}] \\ - [h_{conv_{g2}} + h_{rad_{g2}}] & + [h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}} + h_{conv_{g2}} + h_{rad_{g2}} + \frac{\rho C_p \delta_x}{\Delta t}] \end{array} \right] \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} \\
 & = \left[ \begin{array}{c} \alpha_1 G + h_{conv_{ext}} (T_{ext}) + h_{rad_{ext}} (T_{sky}) + \frac{\rho C_p \delta_x}{\Delta t} T_1^{old} \\ \alpha_2 G + (h_{conv_{int}} + h_{rad_{int}}) T_{int} + \frac{\rho C_p \delta_x}{\Delta t} T_2^{old} \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

En la Figura 3.10 se tiene el diagrama de flujo que resuelve el problema en estado transitorio, donde se resuelve en cada paso de tiempo para poder determinar el comportamiento a lo largo del día o en su caso a lo largo del tiempo establecido.

El sistema alcanza la condición de equilibrio cuando este muestra un comportamiento dinámico constante en el tiempo, sin embargo, también existen fenómenos que alcanzan un estado permanente oscilatorio o sistemas que no alcanzan dicha condición de equilibrio, esto debido a la dependencia de la incógnita con respecto al tiempo, por lo que el comportamiento del sistema es siempre cambiante a lo largo del tiempo. Con el fin de comprobar que las modificaciones hechas en el código computacional se realizaron de la manera adecuada se resolvió el problema anterior de manera transitoria, anexando los nuevos términos obtenidos en los coeficientes correspondientes, así como en el término fuente.

Los resultados obtenidos al emplear el código de manera transitoria fueron los mismos obtenidos anteriormente. En las Figuras 3.19(a) y 3.19(b) se observa la evolución de la temperatura en el tiempo hasta alcanzar un estado permanente, la figura de la derecha corresponde a la temperatura en el vidrio 2 en contacto con el ambiente interior, mientras que la gráfica de la izquierda corresponde a la temperatura en el vidrio 1 en contacto con el ambiente exterior, por lo que se concluye que el código computacional, es capaz de resolver la ecuación de forma transitoria. Cabe mencionar que la temperatura mostrada en la Figura 3.19(a) y 3.19(b) corresponde a las 7:00horas del día 6 de enero del 2014.

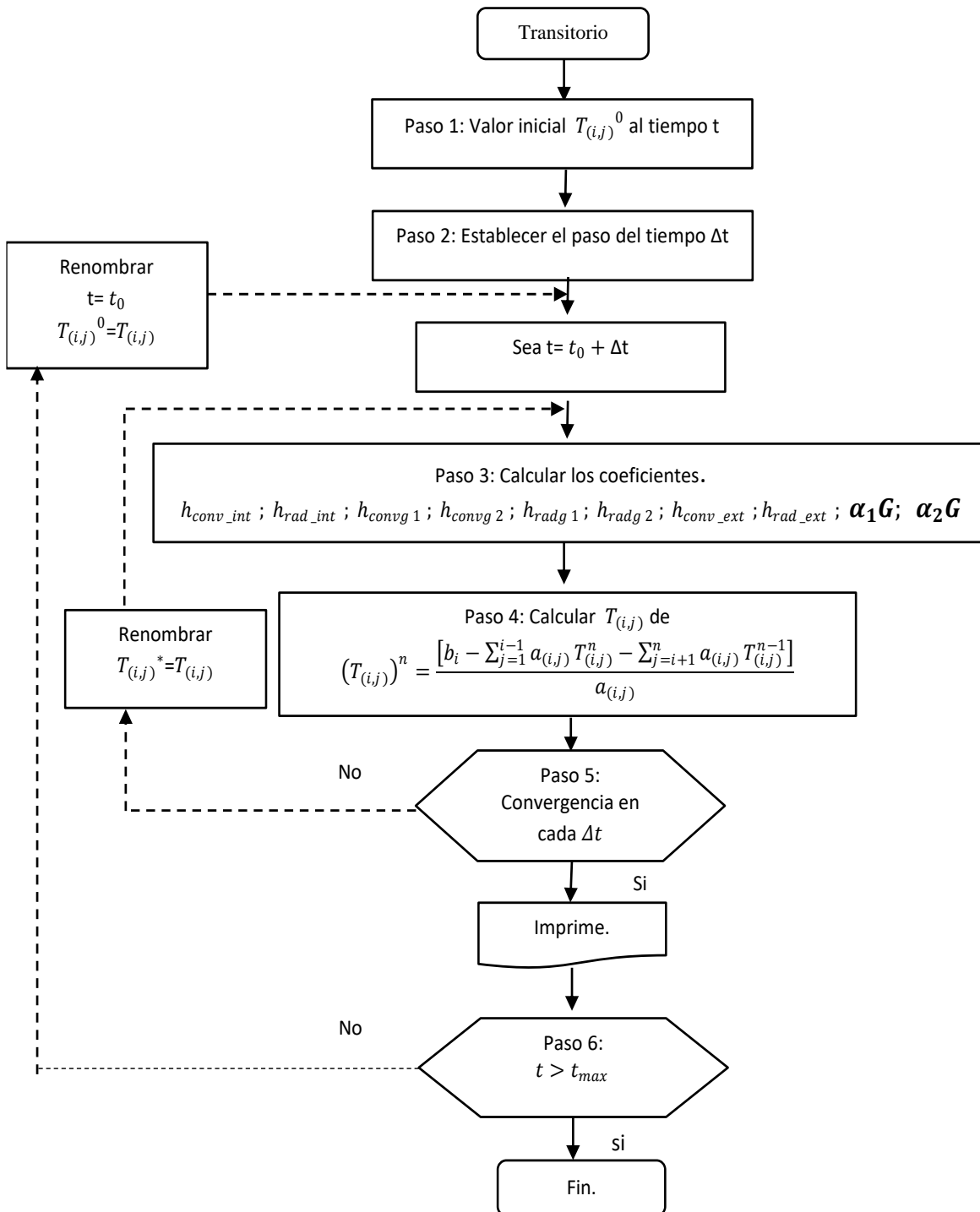
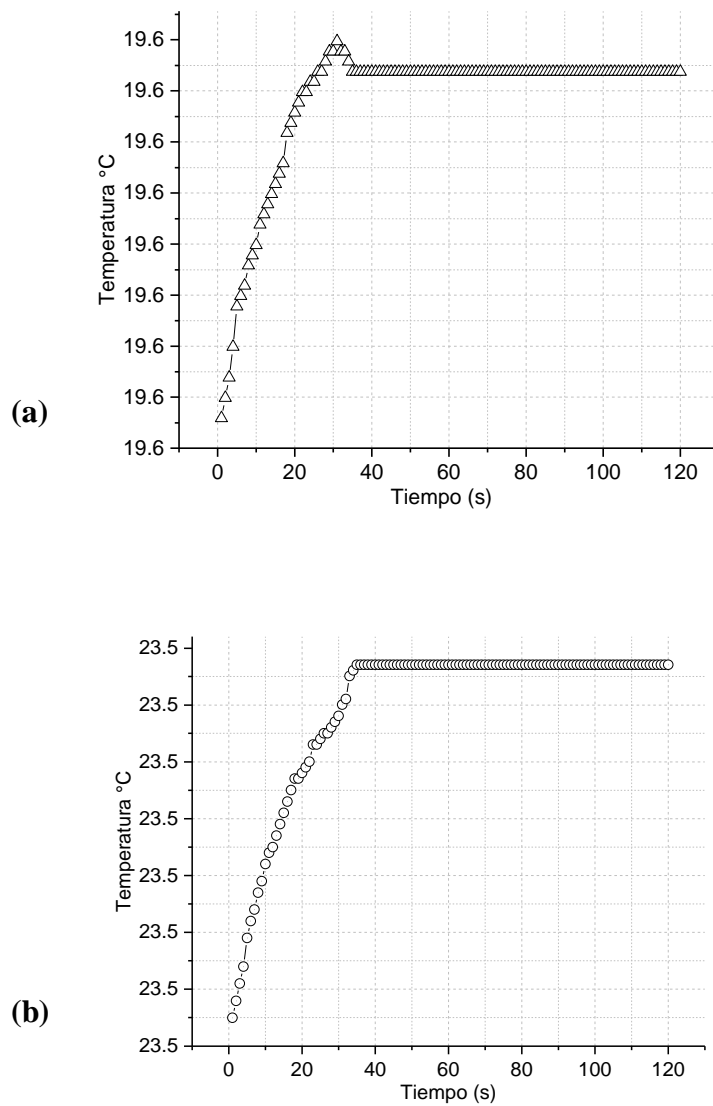


Figura 3.18.- Diagrama de flujo, análisis transitorio.



**Figura 3.19.-** Evolución de la temperatura en el tiempo, (a) vidrio1, (b) vidrio2.

Los datos meteorológicos usados en este ejercicio se consideraron constantes e independientes del tiempo, sin embargo, en la realidad esto no ocurre de esta forma, por lo que para el análisis se hace uso de funciones, las cuales describen el comportamiento de la radiación solar, así como de la temperatura en el ambiente exterior. Para la velocidad del viento se considera un promedio del mismo en cada paso de tiempo.

# Capítulo 4

## 4 Resultados

En este capítulo se presenta los resultados obtenidos de las simulaciones, esto para cada configuración mencionada anteriormente, así como para los climas fríos y cálidos seleccionados. Para el estudio se considera la orientación hacia el sur, siendo el estudio en estado transitorio. Los resultados son presentados de manera gráfica, así como tabulados y posteriormente comparados para obtener la mejor configuración.

### 4.1 Temperatura y radiación solar incidente en función del tiempo

La radiación solar, así como la temperatura ambiente son cambiantes en el tiempo, por lo que, para llevar a cabo el análisis en estado transitorio fue necesario obtener funciones que describan el comportamiento de dichos parámetros a lo largo del tiempo. Para el estudio se consideraron tres ciudades de la república Mexicana: Cd. Juárez, Cd. de México y Cd. de Mérida, abarcando así el norte, centro y sur del país. Para cada región seleccionada se tomaron los días más fríos y más cálidos del año. En la Tabla 4.1 se muestran los meses más cálidos y más fríos del año para cada una de las ciudades, los cuales corresponden a los datos meteorológicos registrados en el año 2014 de acuerdo al INEGI. Con el fin de facilitar la selección de los días, se tomaron tres meses del año, en los cuales se registran las temperaturas más extremas para cada región y posteriormente se eligió el mes con la temperatura más baja y más alta, finalmente fueron seleccionados los días con las cuales se lleva a cabo la modelación. En la Figura 4.2 a la 4.4 se muestran los datos meteorológicos para cada día analizado.

En la Tabla 4.2. se presentan los valores instantáneos de temperatura, radiación solar y velocidad del viento reportados en cada hora para Ciudad Juárez; sin embargo, los datos meteorológicos para la modelación dinámica de la ventana se requieren a intervalos de tiempo mucho más cortos, de hecho menores a un minuto, por lo que fue necesario obtener funciones de tiempo para interpolar los valores de las variables ambientales además de

obtener la radiación solar incidente sobre la ventana para diferentes orientaciones a una inclinación de 90°, es decir, para una superficie vertical.

**Tabla 4.1.- Mes más frío y más cálido de cada ciudad.**

Ciudad	Meses más cálidos	Meses mas friós
Juárez	Mayo	Diciembre
	Junio	Enero
	Julio	Febrero
México	Marzo	Enero
	Abril	Febrero
	Mayo	Marzo
Mérida	Abril	Diciembre
	Mayo	Enero
	Junio	Febrero

**Tabla 4.2.- Datos meteorológicos para la Cd. Juárez.**

Día frio 4 de Febrero del 2014				Día cálido 14 de Julio del 2014		
Hora	$T_{amb}$ (°C)	$G_{sol}$ (W/m <sup>2</sup> )	$V_{wind}$ (m/s)	$T_{amb}$ (°C)	$G_{sol}$ (W/m <sup>2</sup> )	$V_{wind}$ (m/s)
00:00	0.1	0	0	34.3	0	3.1
01:00	1.3	0	1.6	33.5	0	3.6
02:00	0.1	0	0.9	32.6	0	3.3
03:00	-0.2	0	1.4	32.2	0	4
04:00	-0.5	0	1.1	30.1	0	1.1
05:00	0.3	0	1.8	29.4	0	2
06:00	-1	0	1.3	28.3	0	2.6
07:00	-2.2	0	0.8	28.1	17.187	2.2
08:00	-2.7	1.2	1.5	30.2	31.914	3.7
09:00	-1.7	18.6	1.2	31	176.985	5.1
10:00	0.7	355.257	3.5	33.2	232.883	4.5
11:00	3.5	602.983	3.1	35.9	271.448	3.8
12:00	5.8	785.797	2.3	39.3	283.203	2.8
13:00	7.9	885.232	1.2	41	310.700	3.4
14:00	9.4	917.217	1.1	42.5	284.883	2.7
15:00	9.2	877.176	1.8	45.4	220.250	1.9
16:00	10.5	704.151	1.8	45.1	176.454	2.1
17:00	10.8	495.723	1.3	44.4	136.629	2.6
18:00	8.4	0	1.2	44.8	81.115	1.8
19:00	7	0	0.9	42.8	7.235	2.4
20:00	5.9	0	0.8	39.9	0	3
21:00	5	0	0.9	36.8	0	1.2
22:00	2.9	0	0.7	33.6	0	0.8
23:00	3.8	0	1.4	35	0	2.2
24:00:00	2.1	0	0.7	34.7	0	2

De manera similar en la Tabla 4.3 se muestran los datos meteorológicos correspondientes a la ciudad de México para el día más cálido y más frío del año.

**Tabla 4.3.- Datos meteorológicos para la Cd. de México.**

Día frío 18 de Enero del 2014				Día cálido 14 de Abril del 2014		
Hora	$T_{amb}$ (°C)	$G_{sol}$ ( $W/m^2$ )	$V_{wind}$ (m/s)	$T_{amb}$ (°C)	$G_{sol}$ ( $W/m^2$ )	$V_{wind}$ (m/s)
00:00	7.2	0	1.4	21.7	0	0.6
01:00	6.3	0	1.4	21	0	1.3
02:00	5.7	0	1.7	20.1	0	0.6
03:00	5.1	0	1.8	19.9	0	1.3
04:00	5	0	1.2	19.1	0	0.8
05:00	4.7	0	0.9	18.5	0	0.8
06:00	4.8	0	0.8	17.7	0	1.2
07:00	4.9	0	0.7	18	55.646	0.1
08:00	6.1	78.403	0.5	22	126.846	0.6
09:00	8.7	340.904	0.6	24.1	198.312	1.3
10:00	11.7	521.574	0.8	25.5	263.915	0.3
11:00	15	617.111	0.8	26.5	310.997	0
12:00	15.8	717.793	0.5	27.7	316.453	1.1
13:00	16.8	716.238	0.5	28.5	303.806	0.9
14:00	18.2	688.342	0.9	29.2	271.933	1.1
15:00	19	637.345	0.1	30.5	217.907	1.7
16:00	19.1	529.955	0.3	28.7	20.253	1.2
17:00	18.2	92.050	1.6	24.8	0.609	2.9
18:00	17.3	0	0.9	21.4	0	3
19:00	15.5	0	0.5	19.4	0	2.2
20:00	14	0	0.5	19.4	0	1.4
21:00	12.8	0	1.8	18.3	0	1
22:00	11.6	0	1.9	17.4	0	2.5
23:00	10.5	0	2.3	16.4	0	4.3
24:00:00	9.9	0	2	16.8	0	1.3

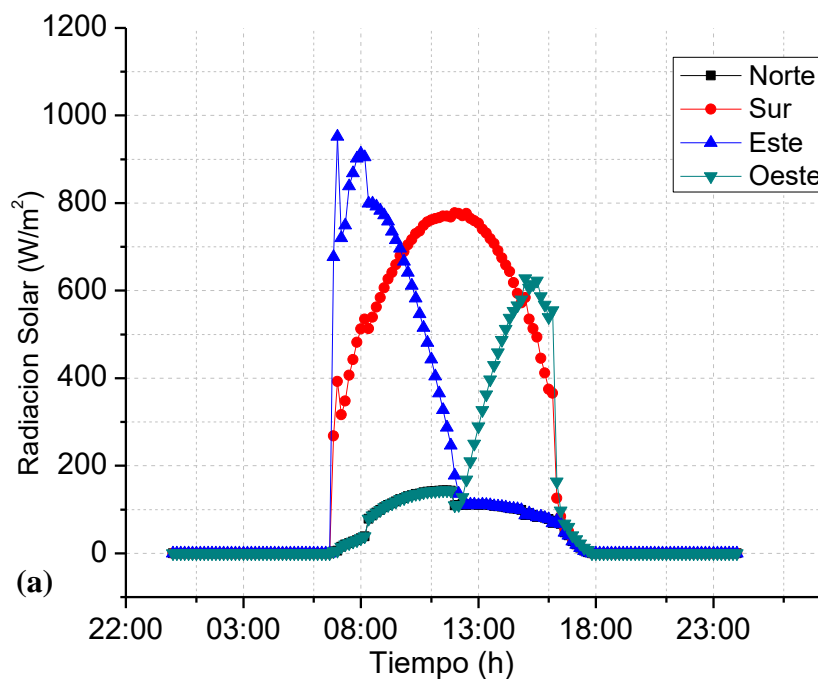


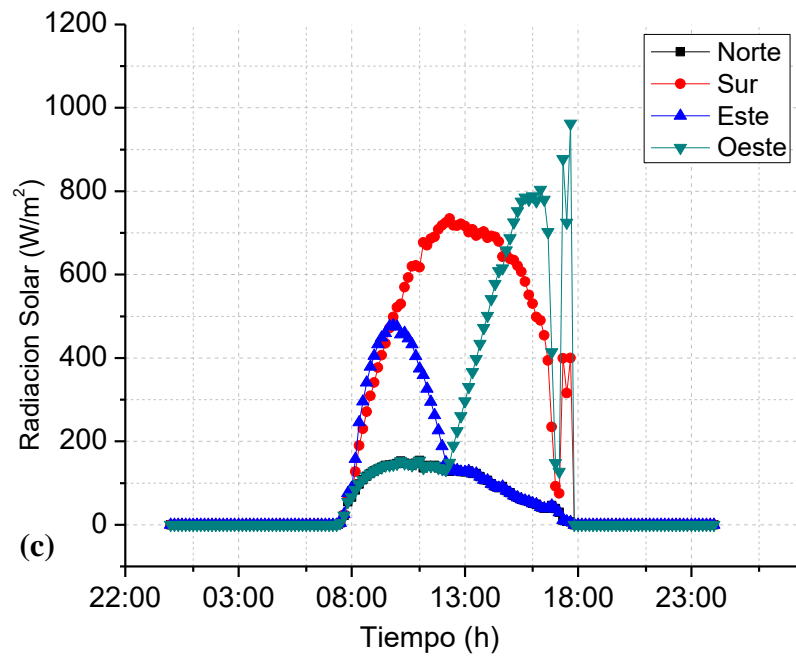
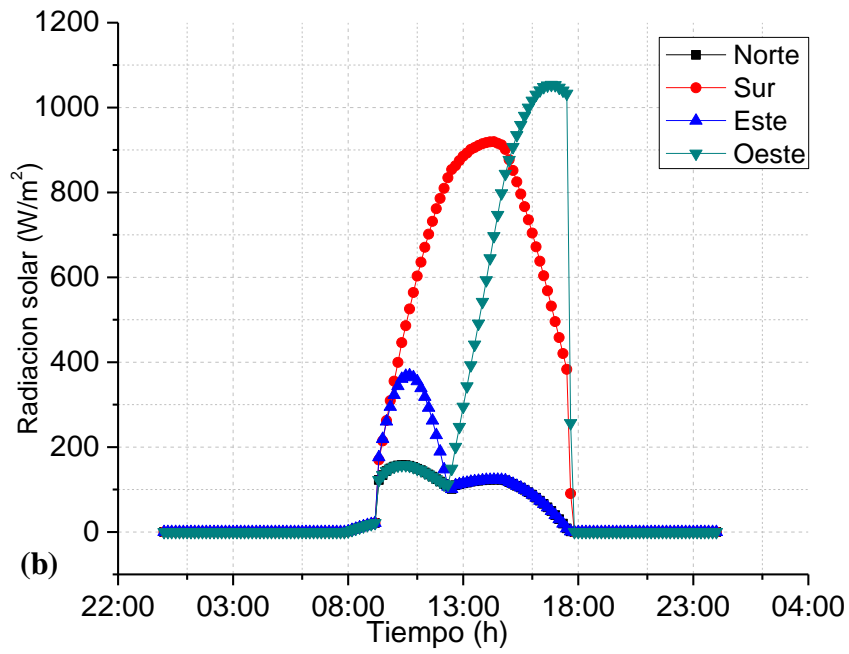
La Tabla 4.4 muestra los datos meteorológicos para la ciudad de Mérida, nuevamente para el día más frío y más cálido del año.

**Tabla 4.4.- Datos meteorológicos para la Cd. de Mérida.**

Día frío 23 de Enero del 2014				Día cálido 7 de Abril del 2014		
Hora	$T_{amb}$ (°C)	$G_{sol}$ ( $W/m^2$ )	$V_{wind}$ (m/s)	$T_{amb}$ (°C)	$G_{sol}$ ( $W/m^2$ )	$V_{wind}$ (m/s)
00:00	17.6	0	3.5	26.6	0	3.4
01:00	17.1	0	3.3	25.8	0	3.8
02:00	16.3	0	2.5	25.4	0	4
03:00	16.3	0	2.6	25.3	0	3.9
04:00	16.3	0	2.4	25.1	0	3.4
05:00	16.2	0	2.8	24.8	0	3.5
06:00	16.4	0	2.7	24.5	2.076	3.5
07:00	16.7	392.532	2.2	26.2	54.943	4.7
08:00	19.1	512.719	3.3	29.3	159.107	4.8
09:00	21.8	606.183	4.1	31.5	255.522	5.4
10:00	24.8	704.802	3.4	34.6	334.354	4.5
11:00	26.1	761.096	3.5	36.3	380.775	3.6
12:00	27.1	777.444	3.1	37.9	376.205	2.9
13:00	27.5	754.038	3.2	39.2	359.157	1.5
14:00	28.4	674.952	2.8	39.9	309.519	1.5
15:00	28.8	584.242	3.3	41.5	233.700	1.4
16:00	28.5	374.737	2.8	40.3	148.727	2.2
17:00	25	33.732	4.1	37.9	68.104	4.2
18:00	23.5	0	4	32.2	5.5188	5
19:00	22.8	0	4.2	29.8	0	3.2
20:00	22.4	0	3.7	28.6	0	3.5
21:00	22	0	3.7	28.2	0	3
22:00	21.6	0	4.4	28	0	2
23:00	21.4	0	4.3	28.2	0	2.4
24:00:00	21	0	4.3	28.1	0	1.5

Los días seleccionados corresponden a aquellos donde se registraron las temperaturas más bajas y más altas, los cuales fueron: para Cd. Juárez el 4 de febrero para el día más frío y el 14 de julio para el día más cálido; para Cd. de México el día más frío seleccionado corresponde al 18 de enero y el día más cálido al 14 de abril; finalmente el día más frío seleccionado para la Cd. de Mérida corresponde al 23 de enero y el más cálido al 7 de abril. Dado que el dato de radiación solar proporcionado por INEGI corresponde a la radiación solar incidente sobre una superficie horizontal, se procedió a calcular con base en este dato, la radiación incidente sobre una superficie vertical para las orientaciones Norte, Sur, Este y Oeste. La Figura 4.1 muestra los valores para el día frío de cada una de las ciudades seleccionadas: Cd. Juárez (a) Cd. de México (b) y Cd. de Mérida (c).





**Figura 4.1.-** Radiación solar en las diferentes orientaciones, (a) Cd. Juárez, (b) Cd. de México, (c) Cd. de Mérida.

Tal como se esperaba, dada la inclinación de la tierra y la latitud de la República Mexicana, la orientación Sur recibe la mayor cantidad de radiación solar para el día frío, el cual se presenta en invierno, esto a lo largo de todo el día y para cualquiera de las tres ciudades, tal como se muestra en la Figura 4.1. Por lo anterior, se elige la orientación Sur para la modelación dinámica de la ventana.

Adicionalmente, se requiere de información meteorológica a intervalos cortos de tiempo, por lo que fue necesario ajustar una función de interpolación que nos permitiera calcular los datos a intervalos de tiempo menores a un minuto a partir de los datos horarios.

Debido al comportamiento irregular de la radiación solar, no fue posible realizar un ajuste con una sola ecuación, por lo que se dividió el tiempo en diferentes intervalos considerando únicamente las horas en las que existe radiación solar. Como consecuencia se obtuvieron diferentes ecuaciones de ajuste, una para cada intervalo de tiempo, los cuales se definieron en función del comportamiento de la radiación solar para cada ciudad y día de modelación (día frío o día cálido); dichas funciones se muestran en las Tablas 4.5 a 4.7 para Ciudad Juárez, Ciudad de México y Mérida respectivamente.

Todas las funciones que se generaron para cada intervalo de tiempo, día de modelación y ciudad fueron validadas con los valores horarios proporcionados por INEGI, es decir, para los datos horarios, los valores de las variables coincidieron adecuadamente. Las funciones obtenidas tienen una desviación cuadrática menor al 5% por lo que se concluye que son adecuadas para obtener los valores de la radiación en cada paso de tiempo a 30 segundos.

**Tabla 4.5.- Función de radiación solar para el día cálido y el día frío de Cd. Juárez.**

Cd. Juárez		
Clima	Horario	Función
Cálido	6:00 a 8:00horas	$G_{sol}(t) = -3.63258^{-15}(t^4) + 2.75112^{-10}(t^3) - 6.83838^{-6}(t^2) + 0.55959(t) + 1.97603$
	8:00 a 9:00horas	$G_{sol}(t) = -4.02397^{-14}(t^4) + 4.35682^{-9}(t^3) - 1.52201^{-4}(t^2) + 1.73224(t) - 15.43436$
	9:00 a 12:00horas	$G_{sol}(t) = -4.59102^{-16}(t^4) + 2.66429^{-11}(t^3) + 6.68267^{-8}(t^2) - 0.00905(t) + 0.1397$
	12:00 a 15:00horas	$G_{sol}(t) = 1.93618^{-15}(t^4) - 3.16795^{-10}(t^3) + 1.68025^{-5}(t^2) - 0.28435(t) + 0.4007$
	15:00 a 19:00horas	$G_{sol}(t) = -4.0713^{-16}(t^4) + 7.06002^{-11}(t^3) - 4.3103^{-6}(t^2) + 0.09489(t) + 1.72779$
Frío	8:00 a 9:00horas	$G_{sol}(t) = 2.88984^{-15}(t^4) - 2.77925^{-10}(t^3) + 9.02992^{-6}(t^2) - 0.09853(t) - 0.05786$
	9:00 a 13:00horas	$G_{sol}(t) = 3.66084^{-15}(t^4) - 5.42375^{-10}(t^3) + 2.68391^{-5}(t^2) - 0.42428(t) - 6.83895$
	13:00 a 17:00horas	$G_{sol}(t) = 2.69007^{-15}(t^4) - 4.88713^{-10}(t^3) + 2.83721^{-5}(t^2) - 0.51455(t) + 6.51616$
	17:00 a 18:00horas	$G_{sol}(t) = -2.49866^{-14}(t^4) + 3.07779^{-9}(t^3) - 9.46487(t^2) - 4.55094(t) - 13.40028$

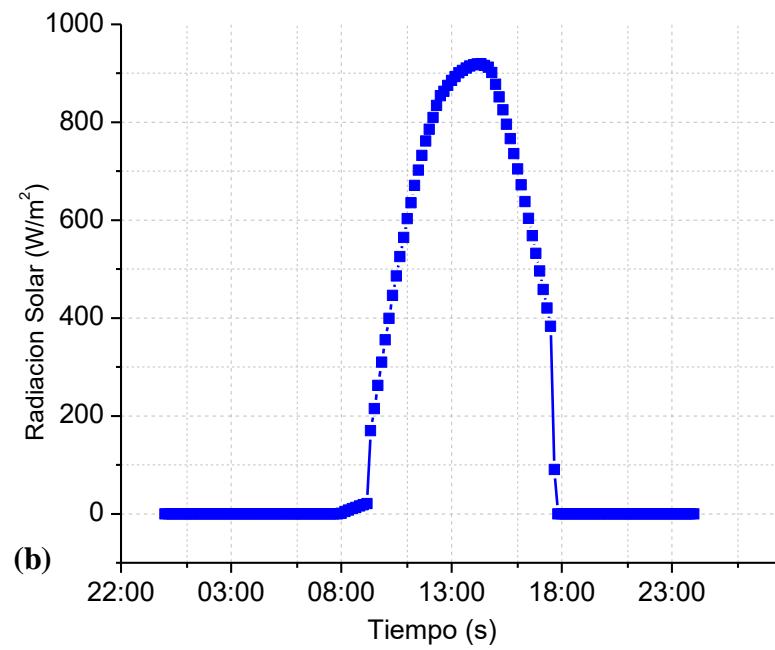
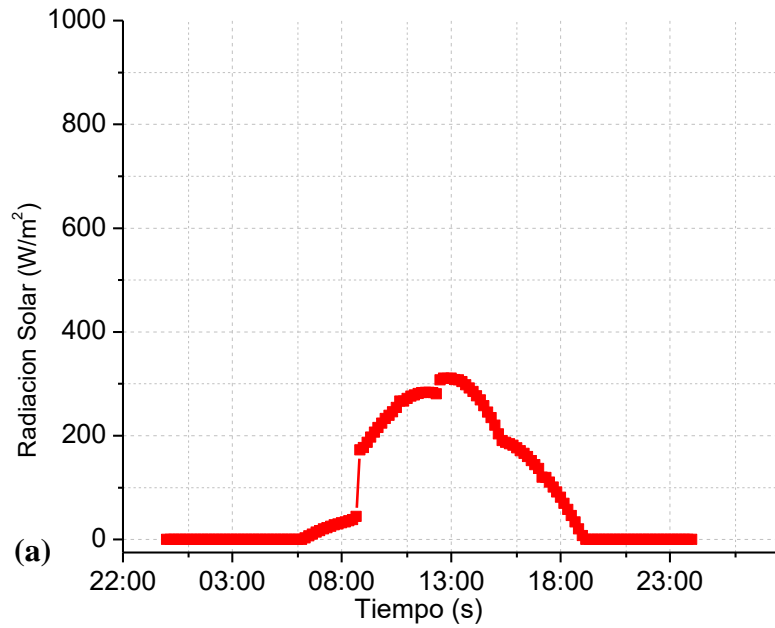
**Tabla 4.6.- Función de radiación solar para el día cálido y el día frío de Cd. de México.**

Cd. de México		
Clima	Horario	Función
Cálido	6:00 a 8:00horas	$G_{sol}(t) = -3.63258^{-14}(t^4) + 2.75112^{-9}(t^3) - 6.83838^{-5}(t^2) + 0.55959(t) + 1.97603$
	8:00 a 12:00horas	$G_{sol}(t) = -6.2671^{-16}(t^4) + 3.9197^{-11}(t^3) - 1.43478^{-7}(t^2) - 0.00904(t) + 0.31895$
	12:00 a 15:00horas	$G_{sol}(t) = 6.93656^{-15}(t^4) - 1.01225^{-9}(t^3) + 4.87534^{-5}(t^2) - 0.76907(t) + 4.3711$
	15:00 a 17:00horas	$G_{sol}(t) = 1.10531^{-14}(t^4) - 1.78369^{-9}(t^3) + 9.47746^{-5}(t^2) - 1.65289(t) - 13.47421$
Frío	7:00 a 9:00horas	$G_{sol}(t) = -5.77208^{-14}(t^4) + 5.15487^{-9}(t^3) - 1.5111^{-4}(t^2) + 1.45844(t) - 3.3139$
	9:00 a 13:00horas	$G_{sol}(t) = 7.44089^{-16}(t^4) - 1.52016^{-10}(t^3) + 8.82532^{-6}(t^2) - 0.14103(t) - 1.87625$
	13:00 a 17:00horas	$G_{sol}(t) = -9.07247^{-15}(t^4) + 1.41183^{-9}(t^3) - 7.35507^{-5}(t^2) + 1.29559(t) - 18.99171$
	17:00 a 18:00horas	$G_{sol}(t) = 3.75749^{-15}(t^4) - 2.38339^{-9}(t^3) + 2.55138^{-4}(t^2) - 7.54822(t) - 74.40127$

**Tabla 4.7.- Función de radiación solar para el día cálido y el día frío de la Cd. De México.**

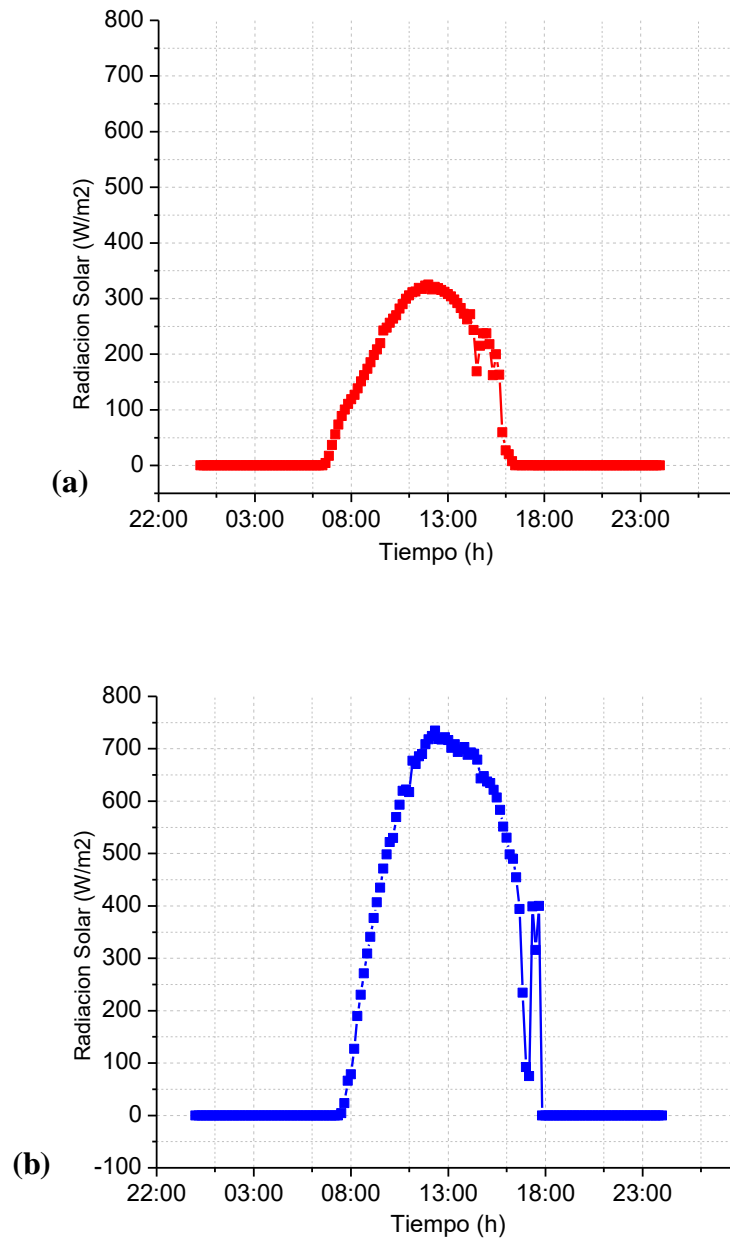
Cd. de Mérida		
Clima	Horario	Función
Cálido	6:00 a 12:00horas	$G_{sol}(t) = -2.1721^{-15}(t^4) + 1.81845^{-10}(t^3) - 4.30487^{-6}(t^2) + 0.02989(t) + 8.72056$
	12:00 a 18:00horas	$G_{sol}(t) = 9.87561^{-16}(t^4) - 1.58225^{-10}(t^3) + 7.93423^{-6}(t^2) - 0.11836(t) - 1.87304$
Frío	6:00 a 10:00horas	$G_{sol}(t) = 1.23053^{-14}(t^4) - 1.24283^{-9}(t^3) + 4.19733^{-5}(t^2) - 0.4549(t) + 17.45989$
	10:00 a 15:00horas	$G_{sol}(t) = 5.26322^{-16}(t^4) - 9.6714^{-11}(t^3) + 4.95613^{-6}(t^2) - 0.05808(t) + 2.21661$
	15:00 a 16:00horas	$G_{sol}(t) = -3.99916^{-14}(t^4) + 6.68283^{-9}(t^3) - 3.73305^{-4}(t^2) + 6.97932(t) - 5.3502$
	16:00 a 18:00horas	$G_{sol}(t) = -5.65115^{-14}(t^4) + 1.06149^{-8}(t^3) - 6.6455^{-4}(t^2) + 13.86681(t) + 5.1857$

Con las funciones de ajuste se calcularon los valores de radiación a intervalos de 30 segundos para el día cálido y el día frío de cada ciudad del estudio. Las Figuras 4.2 (a) y (b) muestran el comportamiento que describen la radiación solar a lo largo del día cálido y frío respectivamente para Ciudad Juárez.



**Figura 4.2.-** Comportamiento de la radiación solar para Cd. Juárez (a) clima cálido, (b) clima frío.

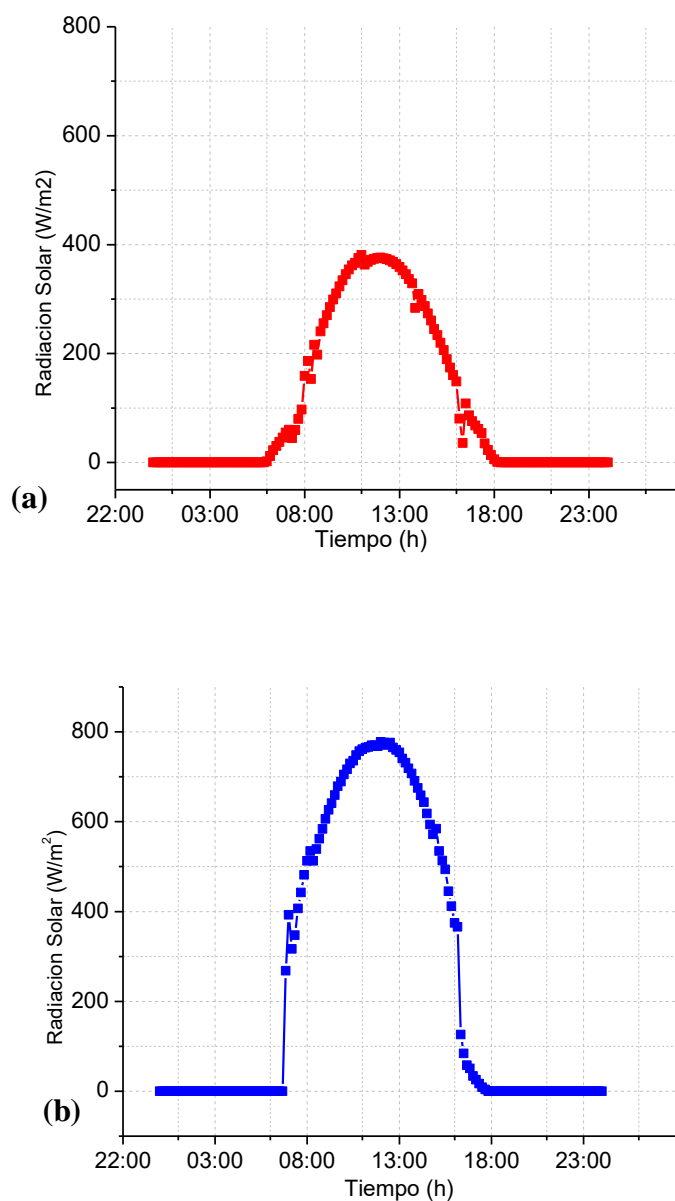
De manera similar para la radiación solar registrada en la ciudad de México, las Figuras 4.3 (a) y (b) muestran el comportamiento de la radiación solar para el día cálido y frío, calculadas mediante las correspondientes funciones de ajuste.



**Figura 4.3.-** Comportamiento de la radiación solar para Cd. de México a) clima cálido b) clima frío.



Finalmente, en la Figura 4.4 (a) y (b) se muestra el comportamiento de la radiación solar para la ciudad de Mérida correspondientes al día cálido y frío respectivamente, calculadas con sus propias funciones de ajuste.



**Figura 4.4.-** Comportamiento de la radiación solar para Cd. de Mérida a) Clima cálido b) clima frío.

Al igual que con la radiación solar, se definieron funciones de ajuste para la interpolación de los valores horarios de la temperatura ambiente, con el fin de obtener valores a intervalos de tiempo más cortos. De manera similar, las funciones de ajuste se determinaron para diferentes intervalos de tiempo tanto para el día frío como para el día cálido.

En la Tabla 4.8 se presentan las funciones de ajuste de la temperatura ambiente para Cd. Juárez., de manera análoga a las funciones de la radiación, estas son seccionadas debido al comportamiento de la temperatura ambiente; sin embargo, a diferencia de la radiación solar los intervalos van desde las 0:00 a las 24:00 hr.

**Tabla 4.8.-Función de la temperatura para el día cálido y el día frío de Cd. Juárez.**

Cd. Juárez		
Clima	Horario	Función
Cálido	0:00 a 6:00horas	$T_{amb}(t) = 1.27707^{-16}(t^4) - 5.41114^{-12}(t^3) + 6.59655^{-8}(t^2) - 4.69199^{-4}(t) + 34.4557$
	6:00 a 12:00horas	$T_{amb}(t) = -3.222^{-17}(t^4) + 4.3188^{-12}(t^3) - 1.91594^{-7}(t^2) + 0.00373(t) + 0.08553$
	12:00 a 18:00horas	$T_{amb}(t) = -1.31473^{-17}(t^4) + 1.93362^{-12}(t^3) - 1.03306^{-7}(t^2) + 0.00283(t) + 0.17696$
	18:00 a 24:00horas	$T_{amb}(t) = 3.45355^{-17}(t^4) - 7.27159^{-12}(t^3) + 4.90449^{-7}(t^2) - 0.00995(t) - 0.2395$
Frío	0:00 a 6:00horas	$T_{amb}(t) = -3.45475^{-16}(t^4) + 1.47491^{-11}(t^3) - 1.94084^{-7}(t^2) + 7.65295^{-4}(t) - 0.21156$
	6:00 a 12:00horas	$T_{amb}(t) = -6.98521^{-17}(t^4) + 7.55221^{-12}(t^3) - 2.52839^{-7}(t^2) + 0.00259(t) - 0.09192$
	12:00 a 18:00horas	$T_{amb}(t) = -1.51165^{-17}(t^4) + 2.04901^{-12}(t^3) - 8.796^{-8}(t^2) + 0.00134(t) - 0.35045$
	18:00 a 24:00horas	$T_{amb}(t) = 3.02362^{-19}(t^4) + 9.23156^{-14}(t^3) - 2.38199^{-8}(t^2) + 0.0012(t) - 0.07782$

En Tabla 4.9. se presentan las funciones de ajuste para la interpolación de los valores de la temperatura ambiente para la Ciudad de México. De manera similar que en Ciudad Juárez, se generaron varias funciones de ajuste para diferentes intervalos del día, en este caso cinco para el día cálido y cuatro para el día frío.

**Tabla 4-9.-** Función de la temperatura para el día cálido y el día frío de Cd. de México.

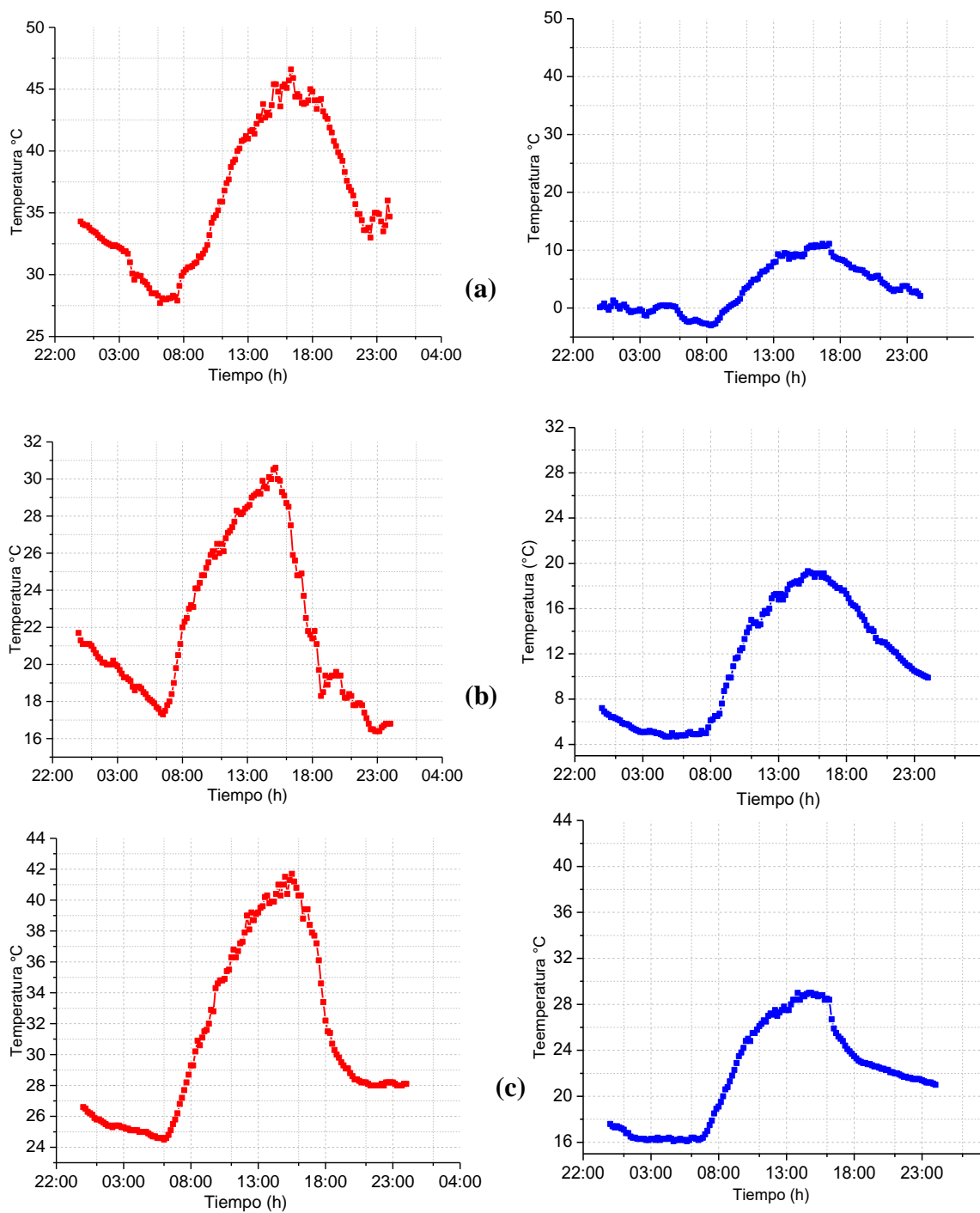
Cd. de México		
Clima	Horario	Función
Cálido	0:00 a 6:00horas	$T_{amb}(t) = 1.82498^{-17}(t^4) - 9.84734^{-13}(t^3) + 1.67005^{-8}(t^2) - 2.61513^{-4}(t) + 21.57262$
	6:00 a 12:00horas	$T_{amb}(t) = -1.34007^{-17}(t^4) + 1.01362^{-12}(t^3) - 2.80113^{-8}(t^2) + 0.00103(t) + 0.4037$
	12:00 a 18:00horas	$T_{amb}(t) = -1.0729^{-17}(t^4) + 1.07508^{-12}(t^3) - 3.58301^{-7}(t^2) + 0.00104(t) + 0.40164$
	18:00 a 20:00horas	$T_{amb}(t) = -4.00461^{-16}(t^4) + 8.44398^{-11}(t^3) - 5.93516^{-6}(t^2) + 0.13934(t) - 0.26559$
	20:00 a 24:00horas	$T_{amb}(t) = 2.06865^{-17}(t^4) - 4.65406^{-12}(t^3) + 3.41989^{-7}(t^2) - 0.00795(t) + 0.11004$
Frío	0:00 a 6:00horas	$T_{amb}(t) = 1.44075^{-19}(t^4) - 1.25419^{-11}(t^3) + 1.0379^{-8}(t^2) - 2.74449^{-4}(t) + 7.10248$
	6:00 a 12:00horas	$T_{amb}(t) = -1.13326^{-16}(t^4) + 1.13209^{-11}(t^3) - 3.58417^{-7}(t^2) + 0.00384(t) - 0.03607$
	12:00 a 18:00horas	$T_{amb}(t) = -2.60234^{-18}(t^4) + 1.23875^{-13}(t^3) + 5.06188^{-9}(t^2) + 1.23497^{-4}(t) - 0.0728$
	18:00 a 24:00horas	$T_{amb}(t) = -5.14694^{-18}(t^4) + 1.36382^{-12}(t^3) - 1.24458^{-7}(t^2) + 0.00401(t) - 0.02471$

Para la Cd. de Mérida se obtuvieron un total de 4 funciones para ambos días, las cuales se muestran en la Tabla 4.10.

**Tabla 4.10.-** Función de la temperatura para el día cálido y el día frío de Cd. de México.

Cd. de Mérida		
Clima	Horario	Función
Cálido	0:00 a 6:00horas	$T_{amb}(t) = 2.09033^{-17}(t^4) - 1.36979^{-12}(t^3) + 3.00714^{-8}(t^2) - 3.2132^{-4}(t) + 26.65449$
	6:00 a 12:00horas	$T_{amb}(t) = -2.72259^{-17}(t^4) + 2.78825^{-12}(t^3) - 1.03096^{-7}(t^2) + 0.00231(t) + 0.09283$
	12:00 a 18:00horas	$T_{amb}(t) = -4.49431^{-17}(t^4) + 6.72732^{-12}(t^3) - 3.46077^{-7}(t^2) + 0.00691(t) + 0.04411$
	18:00 a 24:00horas	$T_{amb}(t) = -1.85742^{-17}(t^4) + 4.53267(t^3) - 3.72595^{-7}(t^2) + 0.01066(t) - 0.03814$
Frío	0:00 a 6:00horas	$T_{amb}(t) = -1.46241^{-17}(t^4) + 2.47356^{-13}(t^3) + 9.88209^{-9}(t^2) - 2.50582^{-4}(t) + 17.67625$
	6:00 a 12:00horas	$T_{amb}(t) = -6.77857^{-17}(t^4) + 6.63021^{-12}(t^3) - 2.13499^{-7}(t^2) + 0.00293(t) - 0.23536$
	12:00 a 18:00horas	$T_{amb}(t) = 4.79457^{-18}(t^4) - 1.19619^{-12}(t^3) + 7.44707^{-8}(t^2) - 7.57246^{-4}(t) - 0.36804$
	18:00 a 24:00horas	$T_{amb}(t) = -1.88933^{-18}(t^4) + 5.20681^{-13}(t^3) - 5.15207^{-8}(t^2) + 0.00203(t) - 0.01156$

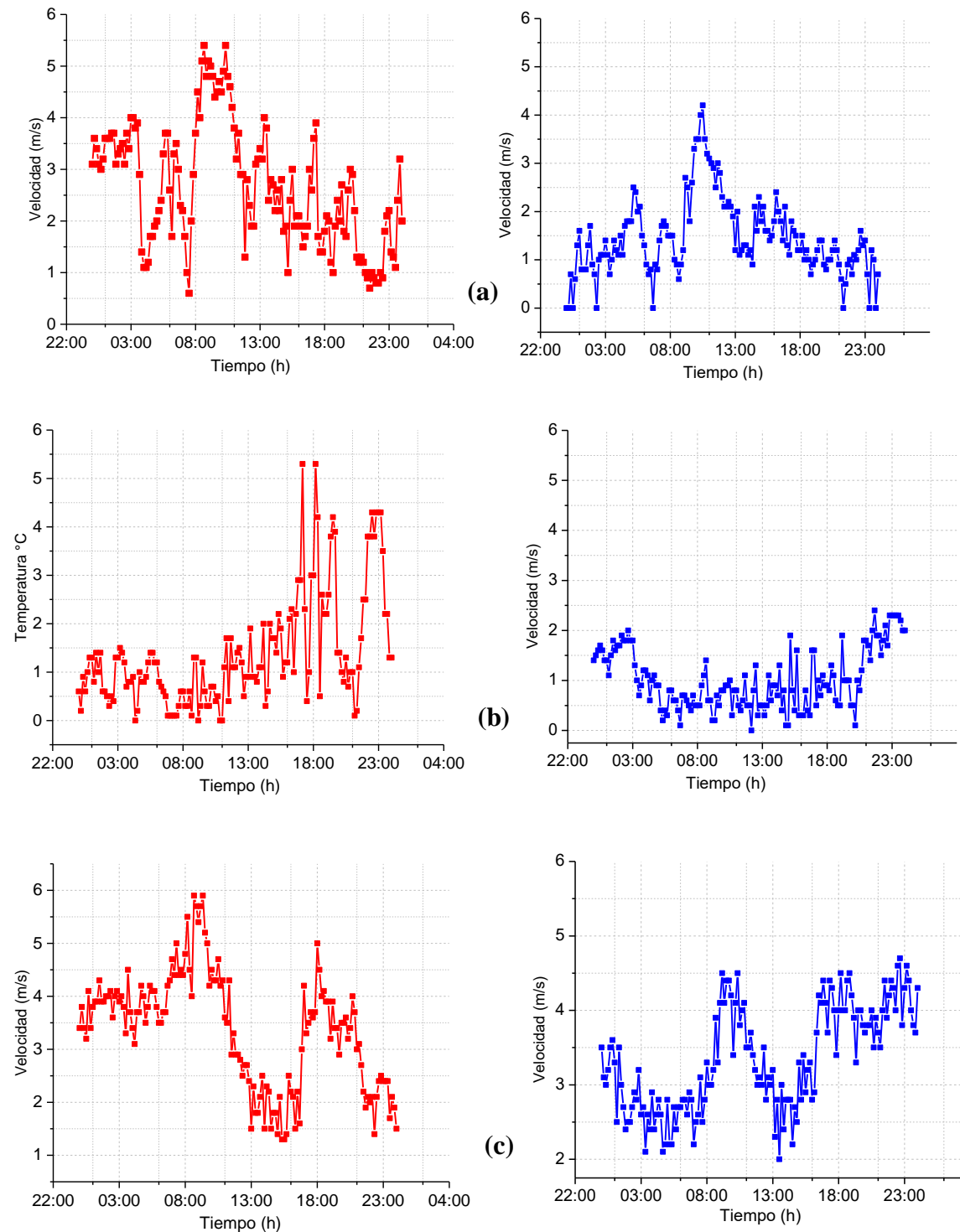
La Figura 4.5 describe el comportamiento de la temperatura a lo largo del día cálido en rojo y el día frío en azul para las tres ciudades del estudio. Estas gráficas se obtuvieron de las funciones de ajuste para la interpolación de los datos.



**Figura 4.5.-**Temperatura ambiente (a) Cd. Juárez, (b) Cd. de México, (c) Cd. de Mérida.

Debido al comportamiento errático de la velocidad de viento no fue posible generar funciones de ajuste para la interpolación de los datos, por lo que se calculó un promedio horario para

cada hora. En la Figura 4.6 se muestra el comportamiento de la velocidad del viento para el día cálido en rojo y para el día frío en azul para: (a) Cd. Juárez, (b) Cd. de México, (c) Cd. de Mérida.



**Figura 4.6.-** Velocidad del viento (a) Cd. Juárez, (b) Cd. de México, (c) Cd. de Mérida.

## 4.2 Parámetros de estudio.

Las propiedades ópticas de los vidrios, mostradas en la Tabla 4.11 se obtuvieron de mediciones realizadas por Aguilar et. al. (2015), los cuales son empleados para las configuraciones descritas en el Capítulo 2. Donde se presentas las propiedades físicas y ópticas de cada componente del sistema

**Tabla 4.11.-** Propiedades ópticas y termofísicas del vidriado disponible en la Republica Mexicana .

Descripción	Propiedades ópticas (%)				Propiedades físicas		
	$\tau^*$	$\rho^*$	$\alpha^*$	$\varepsilon$	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m·K)	$C_p$ (J/Kg·K)
Vidrio claro	83.9	9.0	7.1	0.85	2500	1.4	750
Vidrio reflectivo	7.7	30.1	62.2	0.837	2500	1.4	750
Vidrio low- $\varepsilon$	43.56	38.89	17.56	0.14	2500	1.4	750
Aire	--	--	--	--	1.2047	0.02563	1004

La modelación dinámica de la ventana de vidrio doble se realizó mediante el análisis de varias configuraciones para los vidrios, con el fin de realizar una comparación y obtener la configuración de ventana con el mejor desempeño. Las configuraciones que se analizaron son las siguientes con su respectiva nomenclatura.

Caso 1: Vidrio Claro simple.

Caso 2: Vidrio Claro + aire + Vidrio Claro.

Caso 3: Vidrio Claro + aire + Vidrio de baja emisividad.

Caso 4: Vidrio Claro + aire + Vidrio reflectivo.

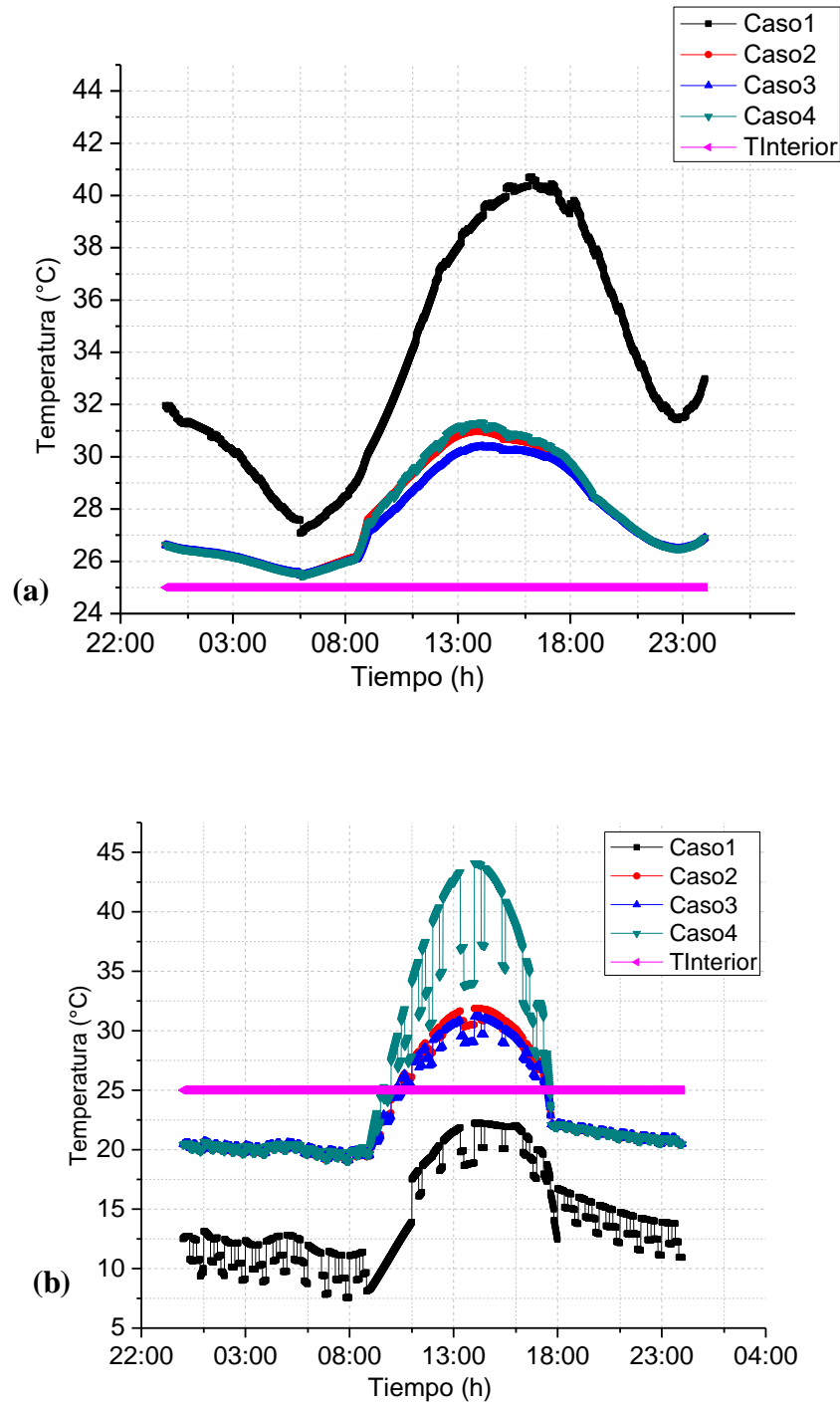
Cada caso mencionado es sometido a las diferentes condiciones climáticas para los tres estados seleccionados, esto con la finalidad de poder analizar cuál es la mejor combinación, siendo esta la que nos ayude a reducir la ganancia o pérdida de energía al interior de la habitación, sin olvidar que el estudio se realizó en estado transitorio, por lo que la temperatura, la radiación solar y la velocidad del viento son parámetros que cambian con el tiempo.

El comportamiento térmico de la ventana de vidrio doble se describe sin perder de vista que, para todas las configuraciones, el vidrio 1 corresponde al que se encuentra en contacto con el ambiente exterior, es decir con la temperatura exterior, la cual varía a lo largo del día, mientras que el vidrio 2 se encuentra en contacto con la temperatura del ambiente interior, la cual se mantiene constante a 25°C. Los resultados que se muestran en las siguientes gráficas describen la variación de la temperatura sobre la superficie del vidrio 2 en contacto con el ambiente interior.

En la Figura 4.7 se presenta la temperatura promedio en la superficie exterior del vidrio 2 para el día cálido y el día frío de Cd. Juárez. Como se puede observar en la Figura 4.7 (a) para el día cálido, el Caso 1 que corresponde al vidrio claro, muestra las temperaturas más altas durante todo el día, ya que, a lo largo de su evolución, ésta se encuentra muy por encima de las demás configuraciones. En los Casos 2,3 y 4, todos ellos de vidrio doble, se observa un descenso significativo en la temperatura del vidrio 2; sin embargo, el Caso 3 muestra ligeramente un mejor comportamiento. Este resultado indica que la ventana con un solo vidrio claro, permite el paso de la mayor cantidad posible de energía, lo cual se manifiesta en el incremento de la temperatura del vidrio 2, tal como se mencionó. Por el contrario, las ventanas de vidrio doble presentan una barrera para el paso de esa energía desde el exterior, por lo que la temperatura en el vidrio 2 es mucho menor, en particular para el Caso 3 que corresponde al vidrio de baja emisividad, alcanzado una diferencia de temperatura con respecto al Caso 1 uno de hasta 10°C. En todos los casos, la temperatura del vidrio se mantuvo por encima de la temperatura del ambiente interior a lo largo de todo el día.

En la Figura 4.7 (b), que describe el comportamiento de la temperatura del vidrio 2 para el día frío en Cd. Juárez, se puede observar que la temperatura para el Caso 1 oscila entre los 2°C y 22 °C a lo largo del día. Entre las primeras horas del día, la temperatura se mantiene entre los 2 y 12°C, mostrando un ligero incremento a partir de las 8:00 hr sin alcanzar la temperatura del ambiente interior, para luego, volver a descender después de las 18:00 hr.



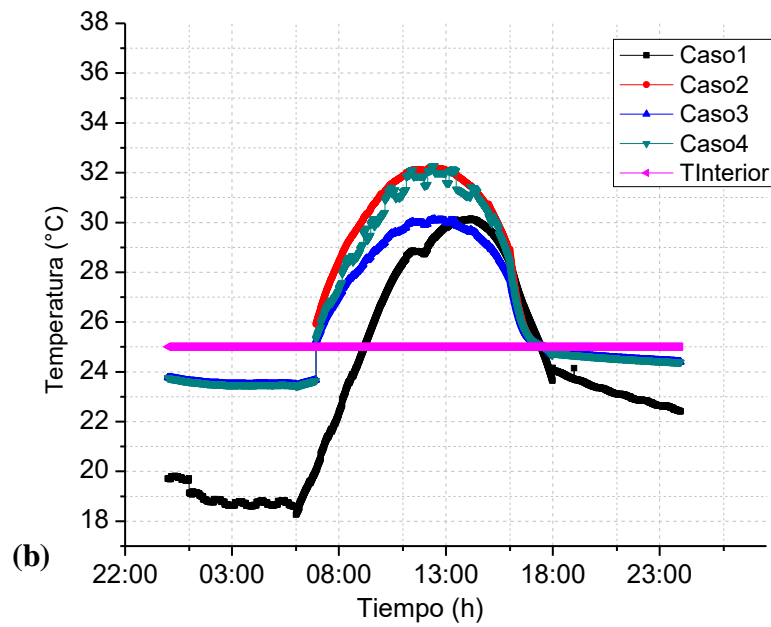
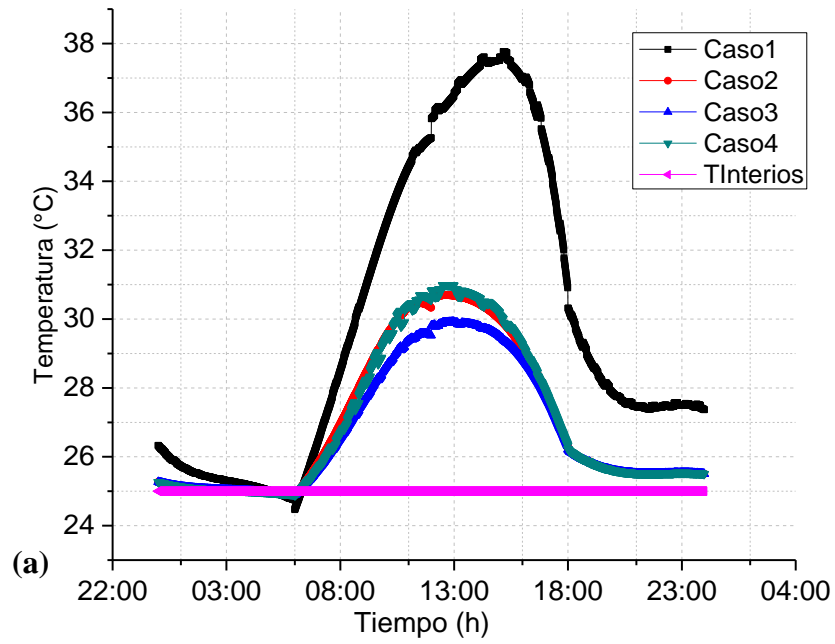


*Figura 4.7.- Temperatura en el vidrio 2 para los diferentes casos, Cd. Juárez.*

---

Por otro lado, los casos 2,3 y 4 que corresponden a las configuraciones de vidrio doble, registran una temperatura de 20°C durante las primeras horas del día, para luego mostrar un incremento mucho más significativo a partir de las 8:00 hr. En estos tres casos, la temperatura del vidrio 2 sí supera la del ambiente interior, alcanzando un pico alrededor de las 14:00 hr, para luego descender a las 18:00 hr. En particular el Caso 4 muestra un incremento significativamente mayor que los casos 2 y 3, ya que en estos últimos el vidrio alcanza una temperatura pico de 32°C, mientras que el caso 4, rebasa los 42°C. Este resultado nos muestra que, para un día frío, el vidrio claro permite la pérdida de la energía que se tiene al interior de la habitación; como consecuencia, la temperatura del vidrio 2 desciende muy por debajo de la temperatura del ambiente interior, mientras que las configuraciones de ventanas de vidrio doble ayudan a mantener la energía al interior de la habitación en un día frío. La máxima diferencia de temperatura entre el Caso 1 y los Casos 2 y 3 es de alrededor de 9°C; sin embargo, en particular el Caso 4, que corresponde al vidrio reflectivo, muestra un mejor comportamiento que los casos 2 y 3, con una diferencia de temperatura con respecto al Caso 1 de 21°C. Lo anterior nos permite asumir que la temperatura extrema en el día frío de Ciudad Juárez, intensifica el efecto del vidrio reflectivo, generando una brecha más grande en la diferencia de temperaturas entre los diferentes casos.

El análisis térmico para la Ciudad de Mérida, se muestra en la Figuras 4-8 (a) y (b) para el día cálido y frío respectivamente. En la Figura 4-8 (a) se puede observar que nuevamente el Caso 1 registra las temperaturas más altas, alcanzando un máximo de 38°C a las 14:00 hr. Por el contrario, los Casos 2, 3 y 4 muestran una temperatura muy por debajo del Caso 1, con máximos entre los 30 y 32°C, siendo el Caso 3 el que muestra el mejor comportamiento. Al igual que en Cd. Juárez, la ventana de un solo vidrio claro permite el paso de la energía del exterior al interior, generando un incremento en la temperatura del vidrio 2, mientras que las configuraciones de vidrio doble frenan el paso de esa energía en un día cálido impidiendo que el vidrio 2 alcance temperaturas tan altas. Nuevamente el Caso 3, que corresponde al vidrio de baja emisividad, muestra un mejor comportamiento que los Casos 2 y 4. En este caso, la temperatura del vidrio 2 también se mantuvo por encima de la temperatura del ambiente interior a lo largo de casi todo el día.



**Figura 4.8.-** Temperatura en el vidrio 2 para los diferentes casos, Cd. De Mérida.

El análisis térmico del día frío para Mérida se muestra en la Figura 4.8 (b), donde se observa que, para las primeras horas del día, el Caso 1 registra una temperatura menor a los 20°C en el vidrio 2, mientras que la temperatura en los Casos 2, 3 y 4 se encuentra muy cercana a los 24°C. A partir de las 7:00 hr, se registra un incremento en la temperatura del vidrio 2 para todos los casos, derivado de la radiación solar incidente sobre la ventana, alcanzando un máximo alrededor de las 13:00 hr; sin embargo, en los Casos 1 y 3, que corresponde al vidrio claro simple y de baja emisividad respectivamente, el vidrio 2 alcanza una temperatura de 30°C aproximadamente, mientras que los Casos 2 y 4, correspondientes a la ventana de doble vidrio claro y vidrio reflectivo respectivamente, la temperatura en el vidrio 2 es de 32°C. Contrario a lo que se observó para el día frío de Ciudad Juárez, la diferencia de temperaturas entre los diferentes casos no rebasó los 3°C, debido a que la temperatura ambiente exterior en el día frío de Mérida, supera en mucho la temperatura ambiente del día frío de Ciudad Juárez a lo largo de todo el día.

Los resultados del análisis térmico para la Ciudad de México se muestran en las Figuras 4.9 (a) y (b), para el día cálido y frío respectivamente. En la Figura 4.9 (a) se observa que, para todos los casos, la temperatura en el vidrio 2 inicia por debajo de la temperatura del ambiente interior a pesar de ser un día cálido; sin embargo, ésta se incrementa gradualmente a partir de las 7:00 hr, cuando la radiación comienza a incidir sobre la ventana, alcanzando valores máximos entre las 12:00 y 14:00 hr. Contrario a lo que ocurre en el análisis de Ciudad Juárez y Mérida, la temperatura en el vidrio 2 para el Caso 1 con respecto a los demás, no muestra una diferencia significativa, de hecho, éste se mantiene por debajo del Caso 4 que corresponde al vidrio reflectivo. Este comportamiento puede deberse al valor de la temperatura ambiente, ya que, para Ciudad Juárez y Mérida, el día cálido supera los 40°C, mientras que en la Ciudad de México el día cálido no rebasa los 30.6°C, lo cual indica que la energía que se transfiere es menor en un clima más templado como el de la Ciudad de México aun cuando se trate de la misma configuración.

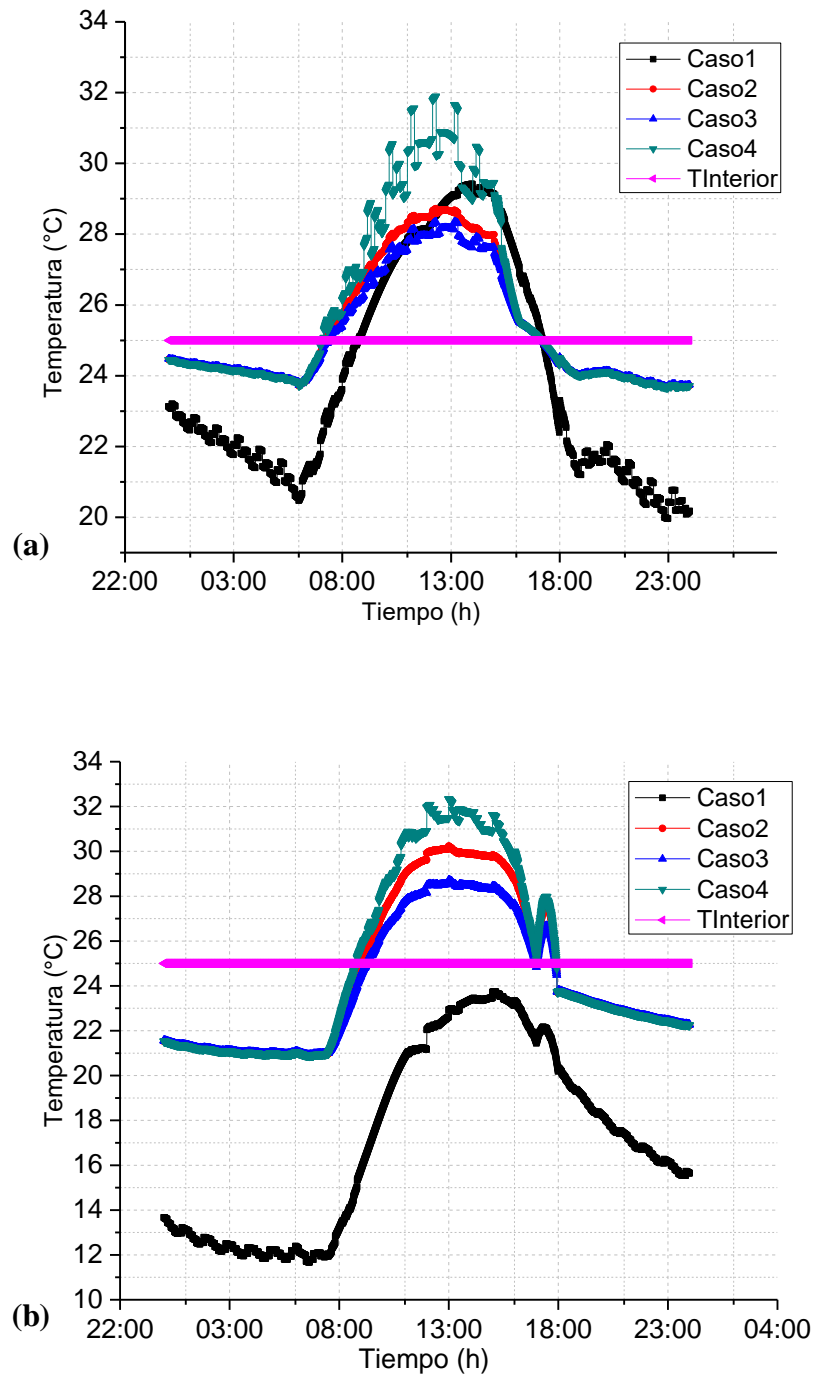


Figura 4.9.-Temperatura en el vidrio 2 para los diferentes casos, Cd. de México.

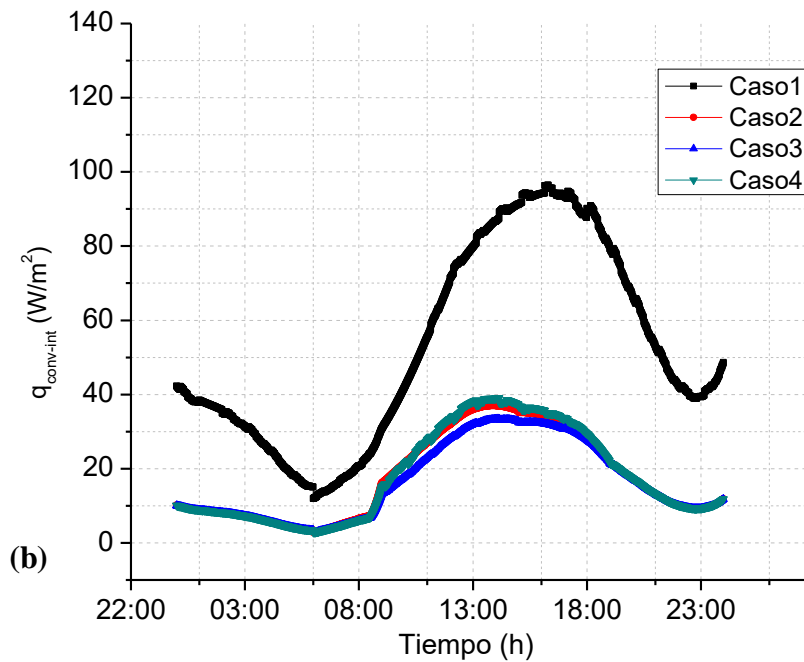
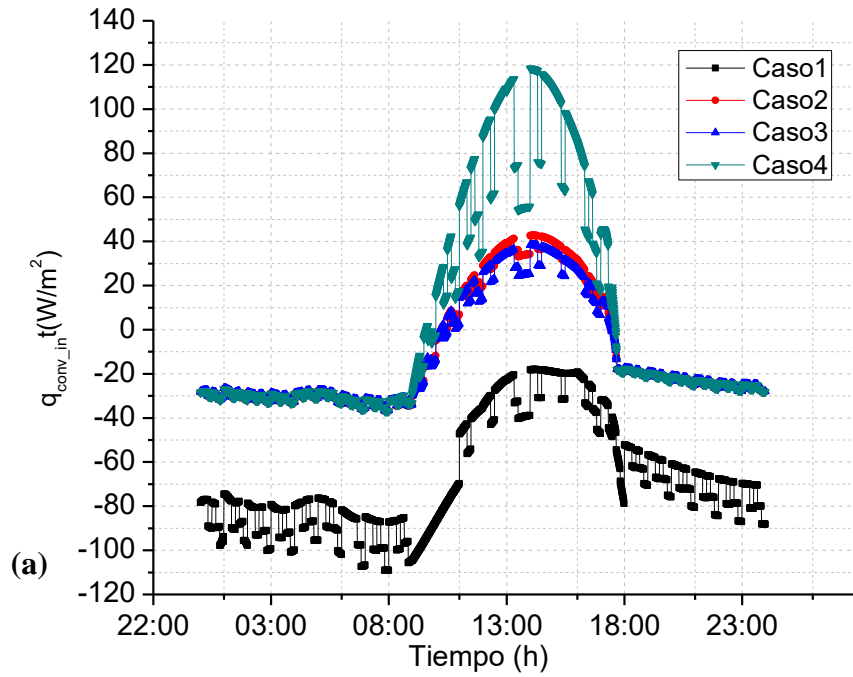
---

Por otro lado, el análisis térmico para el día frío, muestra un comportamiento muy similar al de Ciudad Juárez, donde la temperatura del vidrio 2 en todos los casos inicia por debajo de la temperatura del interior, con un incremento gradual a partir de las 8:00 hr, alcanzando un máximo alrededor de las 14:00 hr, para luego descender nuevamente por debajo de la temperatura interior. En particular el Caso 1 del vidrio claro simple, la temperatura del vidrio no alcanza en ningún momento la del ambiente interior. Por otro lado, los casos 2, 3 y 4, sí superan esta temperatura, y nuevamente el Caso 4 del vidrio reflectivo, muestra el mejor comportamiento, ya que al igual que en Ciudad Juárez, las bajas temperaturas intensifican el efecto del vidrio reflectivo.

### **4.3 Análisis de los flujos convectivos**

A continuación, se muestran los flujos convectivos al interior de la habitación para cada una de las configuraciones de las ventanas, en el día cálido y frío de las ciudades seleccionadas. En las Figuras 4.10 (a) y (b) se observan los flujos convectivos en el vidrio 2 para el día cálido y frío de Cd. Juárez respectivamente.

Como se observa en la Figura 4.10 (a) para el día cálido, el Caso 1 que corresponde a la ventana de vidrio claro simple, genera los mayores flujos convectivos, del orden de 2.5 veces comparado con los otros casos, esto debido a que la poca masa térmica del vidrio provoca una mayor transferencia de energía y por ende el flujo de calor convectivo al interior es mayor, de tal forma que se gana energía hacia la habitación incrementando su temperatura. En cuanto a los Casos 2, 3 y 4, el flujo de calor convectivo es cualitativamente muy similar, mostrando picos alrededor de las 13:00 hr. En la Figura 4.10(b) se observa que el panorama para el día frío es similar, pero a la inversa, es decir, el Caso 1 del vidrio claro simple presenta flujos convectivos pero éstos son siempre negativos, lo que significa que el calor del interior se pierde a través de la ventana hacia el exterior durante todo el día, situación no deseada cuando se tiene clima frío.



*Figura 4.10.- Flujo de calor convectivo en el vidrio 2, Cd. Juárez.*

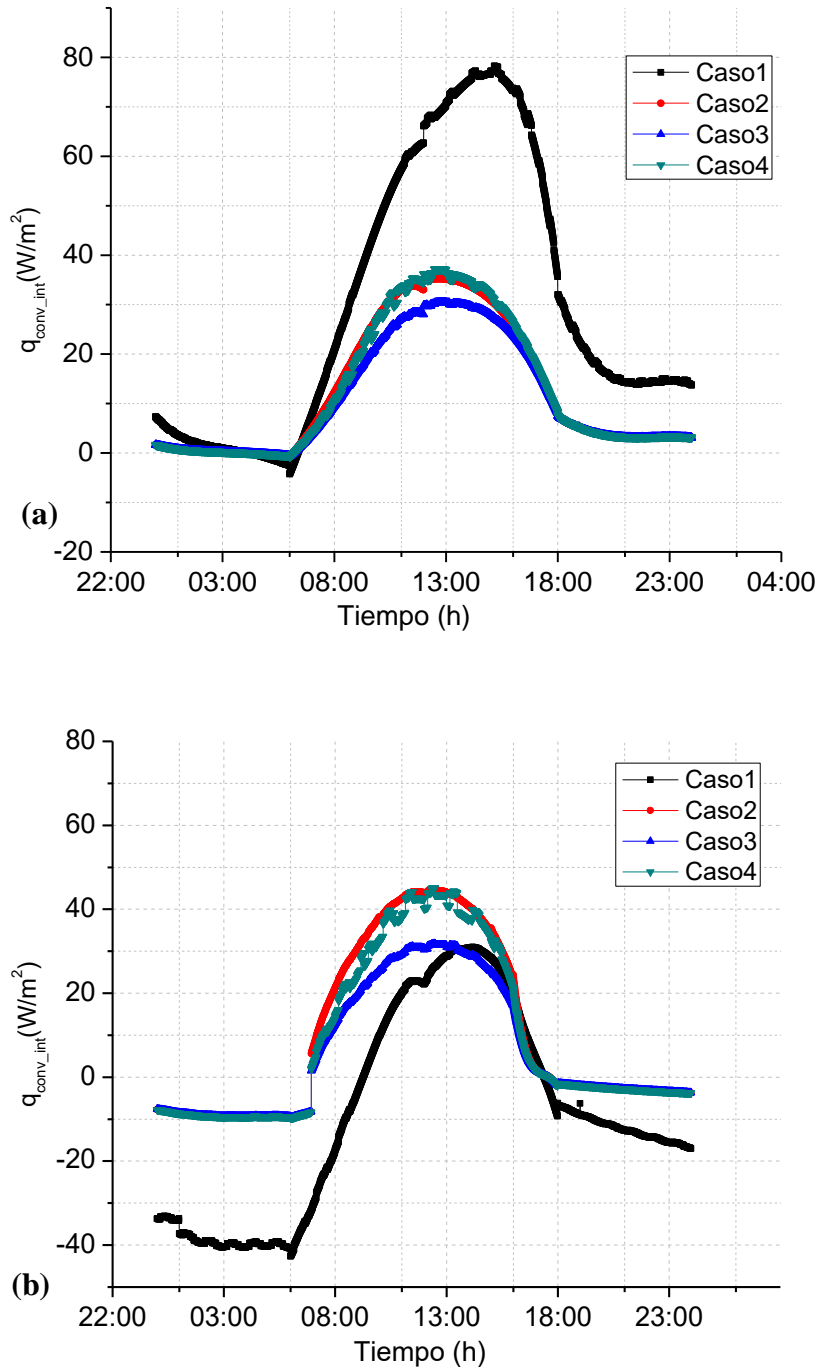
Por el contrario, en los Casos 2, 3 y 4 los flujos convectivos negativos durante las primeras horas del día, pero se vuelven positivos conforme la radiación solar incide sobre la ventana y la temperatura ambiente se incrementa. Para este día frío, el Caso 4 del vidrio reflectivo, es el que presenta valores más altos.

En las Figuras 4.11 (a) y (b) se muestran los flujos de calor convectivos en el vidrio 2 para el día cálido y frío de Mérida respectivamente. En la Figura 4.11(a) se observa que para el día cálido de Mérida, nuevamente el vidrio claro presenta los mayores flujos convectivos al interior, generando una ganancia de energía que se traduce en un incremento de temperatura, mientras que los Casos 2, 3 y 4 mantienen valores de flujo de calor convectivo mucho más bajos que el Caso 1 pero muy cercanos entre sí, con valores pico alrededor de las 13:00 hr. Para el día frío, como se observa en la Figura 4.11(b), los flujos de calor convectivo durante las primeras horas del día son negativos en todas las configuraciones, pero el Caso 1 se encuentra muy por debajo de los demás, lo que significa que durante la noche se pierde más energía con esta configuración. Conforme avanza el día, entre las 7:00 y 8:00 hr, los flujos de calor se vuelven positivos sin que alguno de ellos marque una diferencia significativa, dado que los Casos 1 y 3, correspondientes al vidrio claro simple y vidrio de baja emisividad, alcanzan los mismos valores pico con una diferencia de una hora, misma situación sucede con los Casos 2 y 4. En esta ocasión el Caso 1 no presentó el mismo comportamiento que en el día frío de Ciudad Juárez debido a que la temperatura ambiente para el día frío de Mérida está muy por encima. Los flujos de calor convectivo en el vidrio 2 para la ciudad de México se muestran en las Figuras 4.12 (a) y (b) para el día cálido y frío respectivamente.

Como se observa en la Figura 4.12 (a) del día cálido de la Ciudad de México, el comportamiento de las diferentes configuraciones difiere de las otras dos ciudades; es decir, el flujo convectivo para el día cálido del Caso 1 no muestra una diferencia significativa con respecto a las demás configuraciones, manteniéndose incluso por debajo del Caso 4 correspondiente al vidrio reflectivo. Esto puede deberse a la temperatura ambiente en la Ciudad de México, ya que ésta está muy por debajo de la máxima temperatura alcanzada



tanto en Ciudad Juárez como en Mérida, otorgándole al vidrio claro simple un mejor desempeño en día cálido comparado con las otras dos ciudades.



*Figura 4.11.- Flujo de calor convectivo en el vidrio 2, Cd. Mérida.*

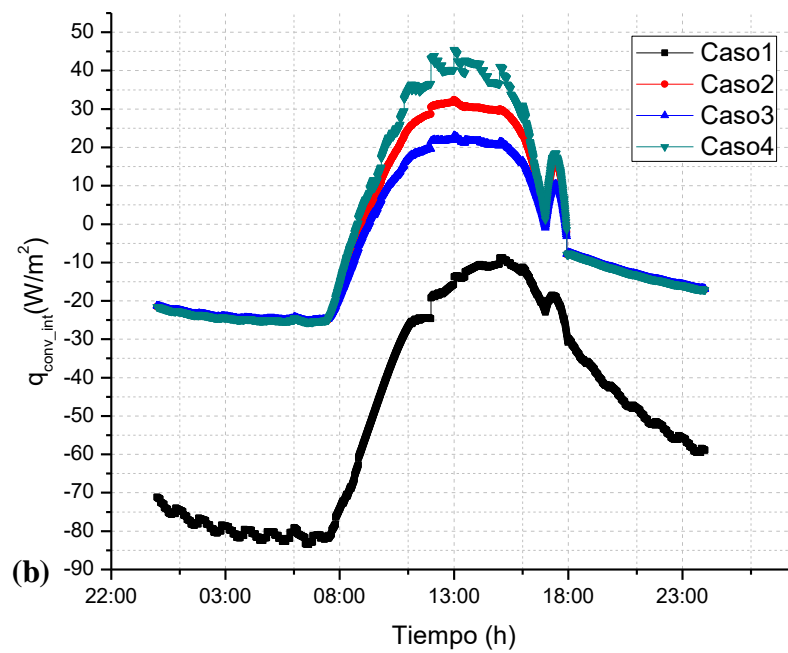
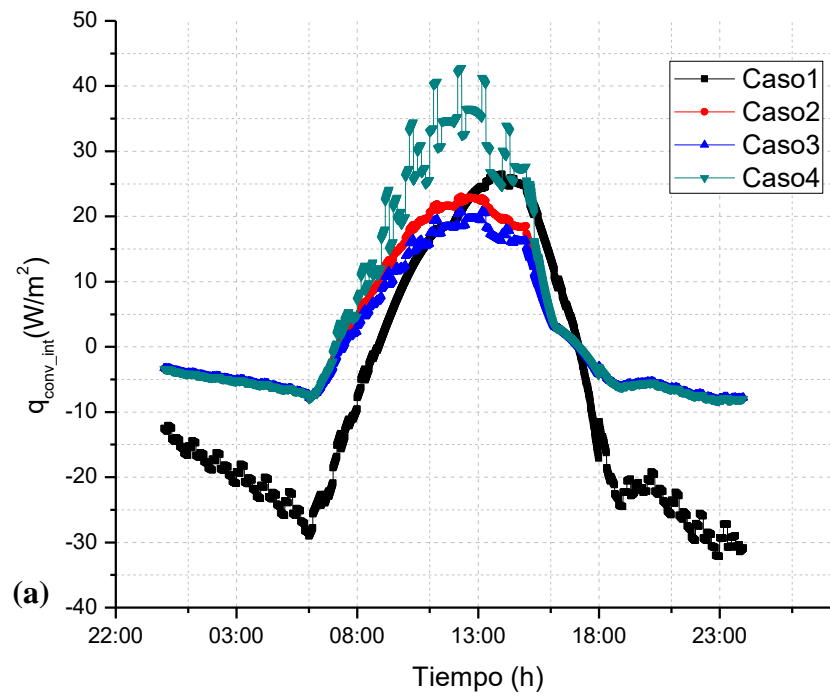


Figura 4.12.- Flujo de calor convectivo en el vidrio 2, Cd. México.

Sin embargo, para el día frío de la Ciudad de México, tal como se muestra en la Figura 4.12(b), el Caso 1 del vidrio claro simple, muestra flujos de calor convectivos negativo a lo largo de todo el día, mientras que en los Casos 2, 3 y 4, los flujos de calor convectivos son negativos las primeras horas del día pero se vuelven positivos pasadas las 8:00 hr, generando ganancia de calor al interior, alcanzando su pico alrededor de las 13:00 hr, donde el Caso 4 muestra el mejor desempeño, seguido del Caso 2 y Caso 3 respectivamente, sin mostrar alguna diferencia verdaderamente significativa.

#### **4.4 Análisis de los flujos radiativos**

Las Figuras 4.13 a 4.15 muestran los flujos de calor radiativos en el vidrio 2 del día cálido y frío para cada configuración y ciudad bajo estudio. La Figura 4.13(a) muestra los flujos radiativos para el día cálido de Ciudad Juárez, donde se aprecia que el Caso 1 correspondiente al vidrio claro simple muestra los valores más altos, mientras que el Caso 3 correspondiente a la ventana con vidrio de baja emisividad genera los valores de flujo de calor radiativo más bajos. Los Casos 2 y 4, de doble vidrio claro y vidrio reflectivo respectivamente, se mantienen en medio con valores muy cercanos entre sí.

La Figura 4.13(b) muestra los flujos radiativos del día frío para Cd. Juárez donde se aprecia el comportamiento del flujo radiativo al interior de la habitación. Se observa que el Caso 3 el cual corresponde a la configuración con vidrio de baja emisividad, presenta los flujos radiativos más bajos, mientras que el Caso 1 de vidrio claro simple tiene flujos negativos lo cual indica que el flujo es del interior hacia el exterior esto debido a la temperatura al exterior, así como a las propiedades termofísicas del vidrio, finalmente los Casos 2 y 4 del doble vidrio claro y reflectivo respectivamente, presentan flujos positivos en horarios de radiación solar esto debido a que tienen una mayor absorptividad aumentando de esta forma la temperatura en las hojas de vidrio y generando así mayores flujos al interior de la habitación.

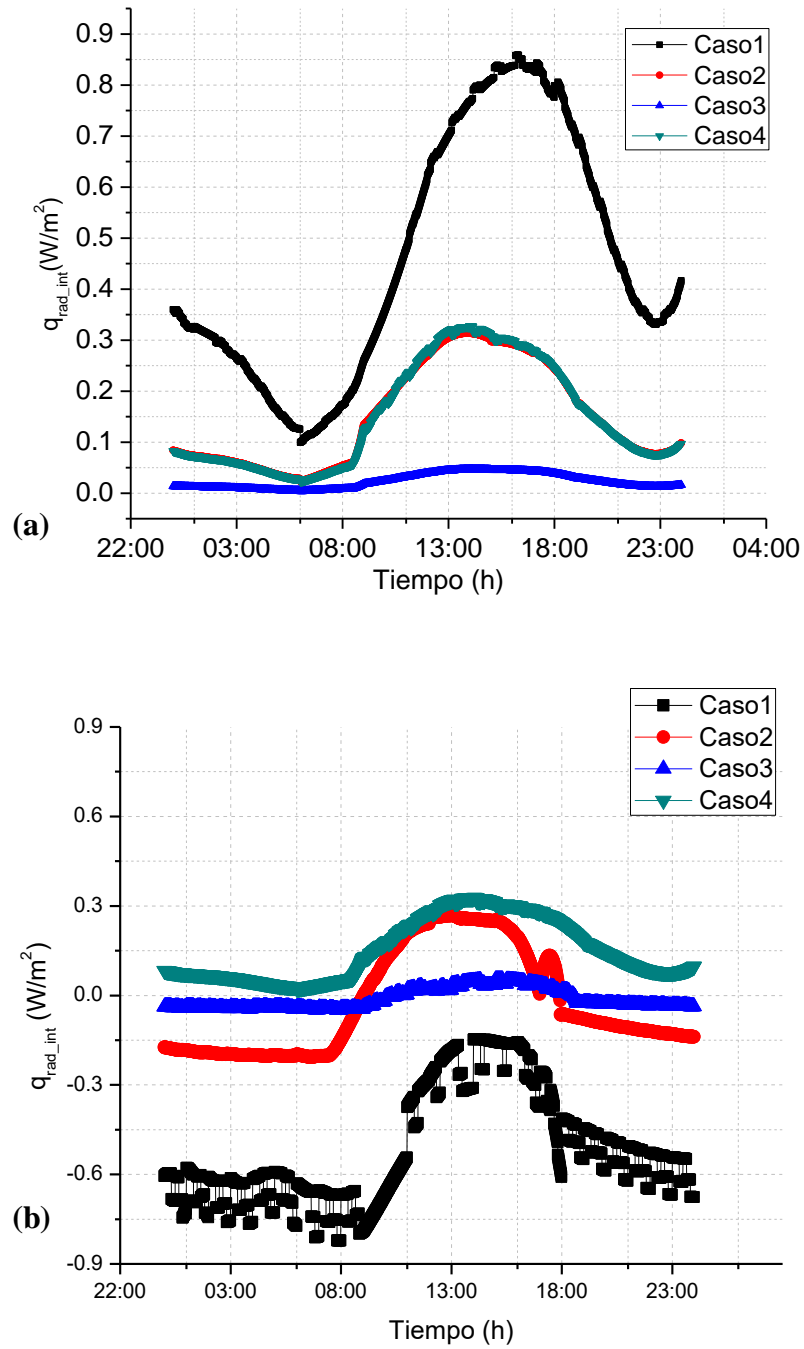
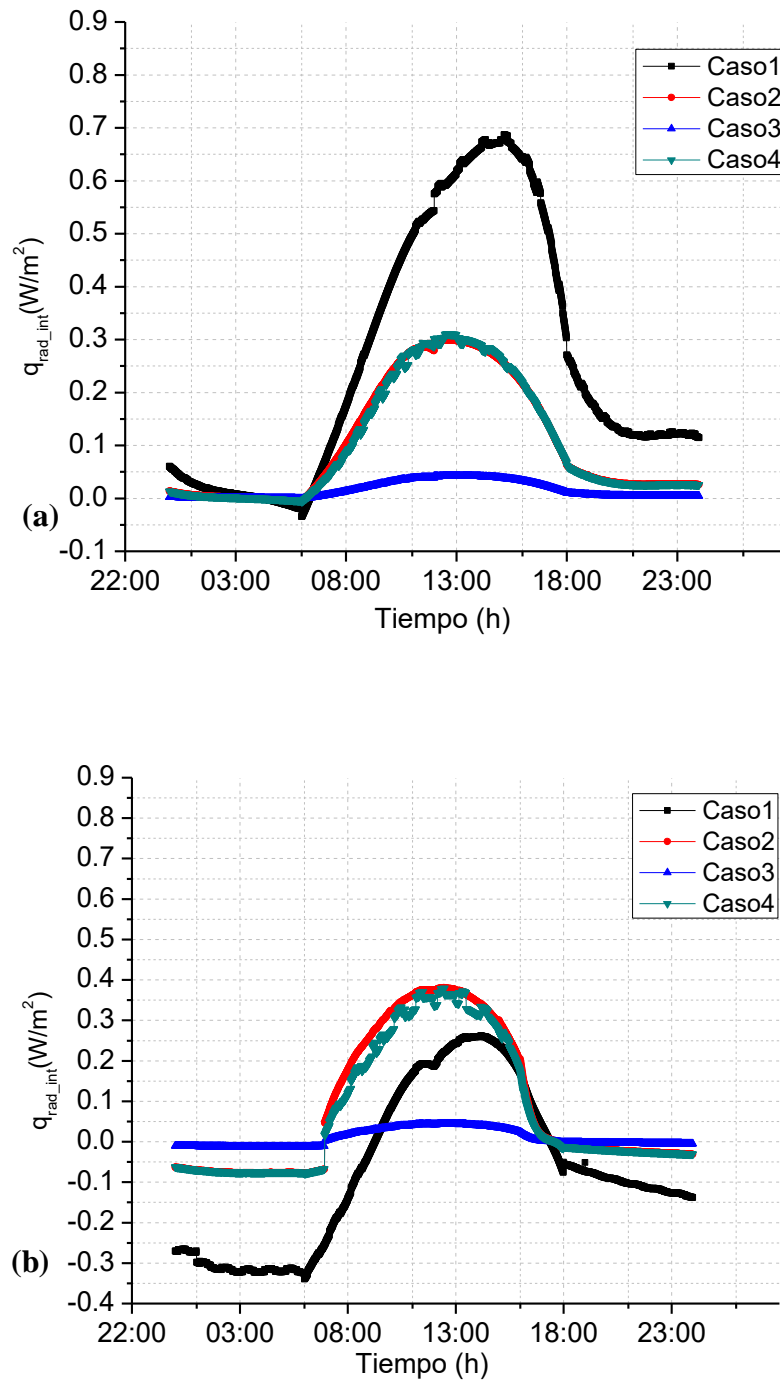


Figura 4.13.- Flujo de calor radiativo en el vidrio 2, Cd. Juárez.

Los flujos de calor radiativos sobre el vidrio 2 para el día cálido y el día frío de la Ciudad de Mérida se muestran en las Figuras 4.14 (a) y (b) respectivamente.



**Figura 4.14.-** Flujo de calor radiativo en el vidrio 2, Cd. de Mérida.

---

La Figura 4.14(a) muestra el flujo de calor radiativo para el día cálido de Mérida, donde se observa que, nuevamente el Caso 1 proporciona los valores más altos, mientras que el Caso 3 los valores más bajos, estas configuraciones corresponden al vidrio claro simple y de baja emisividad respectivamente; en tanto los Casos 2 y 4, con vidrio doble claro y reflectivo respectivamente, mantienen valores intermedios muy cercanos entre sí. Por otro lado, los flujos radiativos del día frío se muestran en la Figura 4.14(b), donde se observa que nuevamente el Caso 3, que corresponde a la configuración con vidrio de baja emisividad, presenta los flujos radiativos más bajos, seguido del Caso 1 de vidrio claro simple y finalmente a la par los Casos 2 y 4 del doble vidrio claro y reflectivo respectivamente.

En las Figuras 4.15(a) y (b) se muestran las gráficas con los flujos radiativos para el día cálido y frío de la Ciudad de México respectivamente. En estas gráficas se observa que al igual que en cd. Juárez y Cd. de Mérida el caso 3 presenta los menores flujos de calor radiativo al interior tanto para el día cálido como para el día frío. Para el día cálido, el flujo de calor radiativo del Caso 1 es negativo en las primeras horas del día, es decir, la energía radiativa se transmite del interior al exterior, debido principalmente a que la temperatura ambiente del día cálido en la Ciudad de México, no es tan elevada con el Ciudad Juárez o Mérida; sin embargo, a lo largo del día este flujo se vuelve positivo y alcanza el valor del flujo del Caso 2 y un poco más alto el Caso 4. Por otro lado, para el día frío, el Caso 1 siempre muestra valores negativos de flujos de calor radiativo, un indicativo de que se pierde energía al exterior a lo largo de todo el día. Los Casos 2 y 4 se mantienen a la par como los que generan los valores más altos de flujo radiativo, alcanzando un pico alrededor de las 13:00 hr. Este comportamiento puede deberse a las propiedades ópticas de los diferentes tipos de vidriados, en donde se observa que gran parte de la energía que llega al vidrio 2 es reflejada, otra parte es transmitida y otra parte se absorbe lo cual al incrementar la temperatura en las láminas de vidrio generan los flujos radiativos. Por lo que, los diferentes tipos de vidriado, así como los diferentes climas y el comportamiento de la radiación solar y la temperatura ambiente para cada lugar seleccionado nos arroja distintos resultados útiles para la mejor combinación.

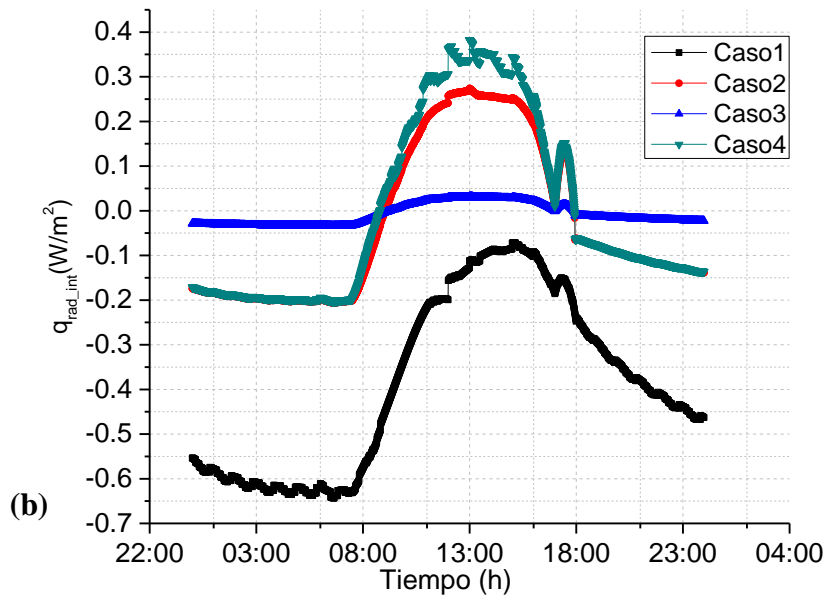
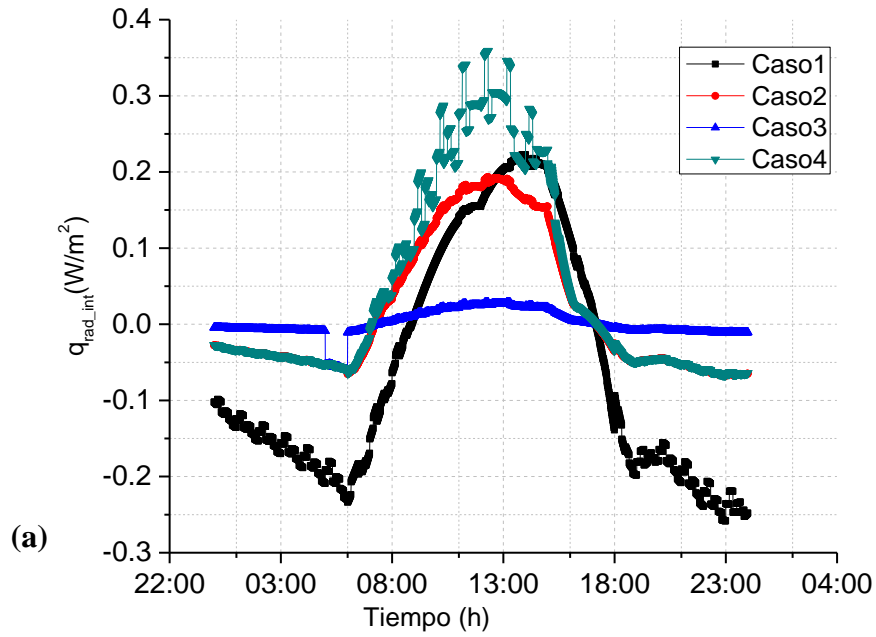


Figura 4.15.- Flujo de calor radiativo en el vidrio 2, Cd. de México.

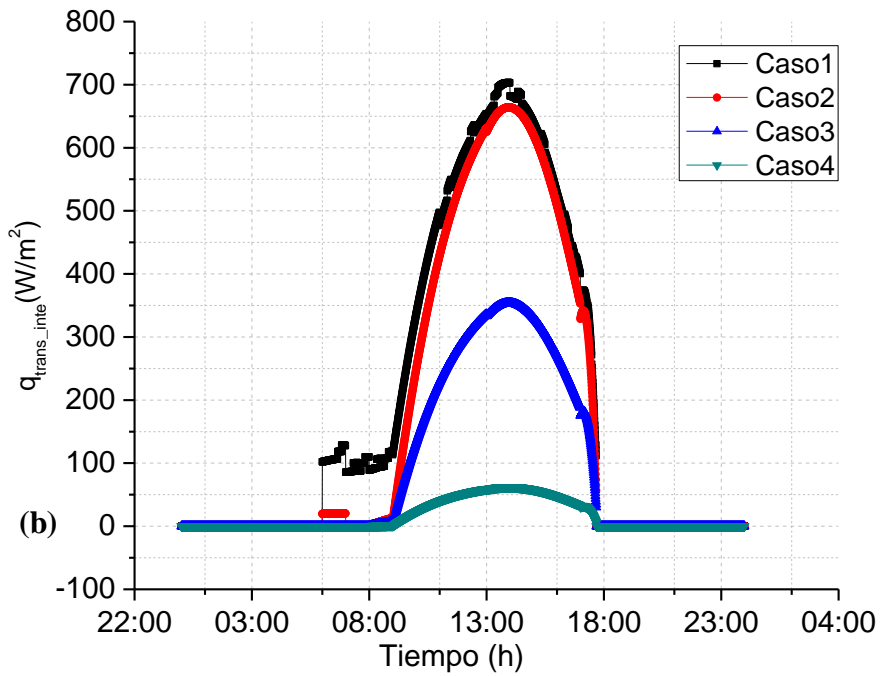
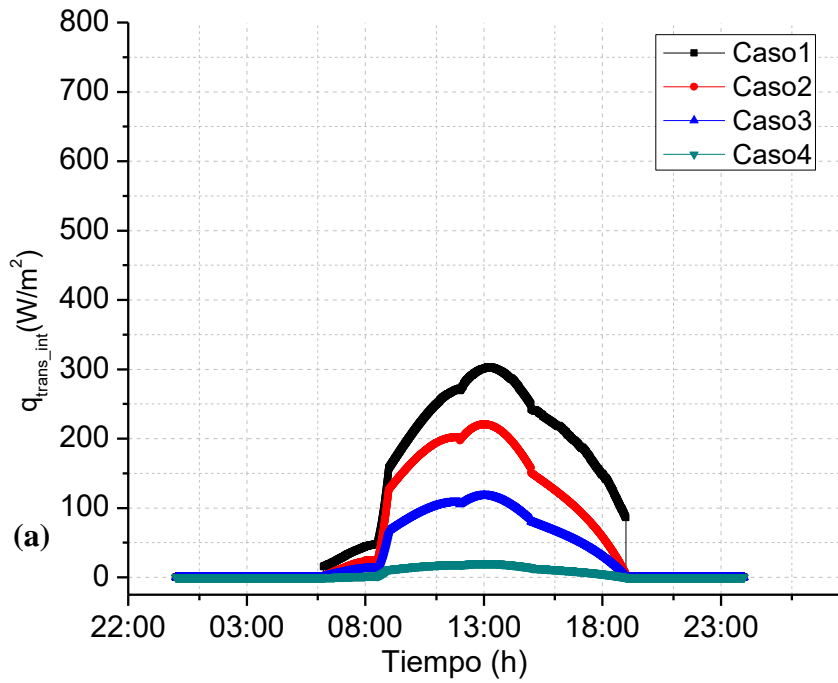
---

#### 4.5 Análisis de los flujos transmitidos

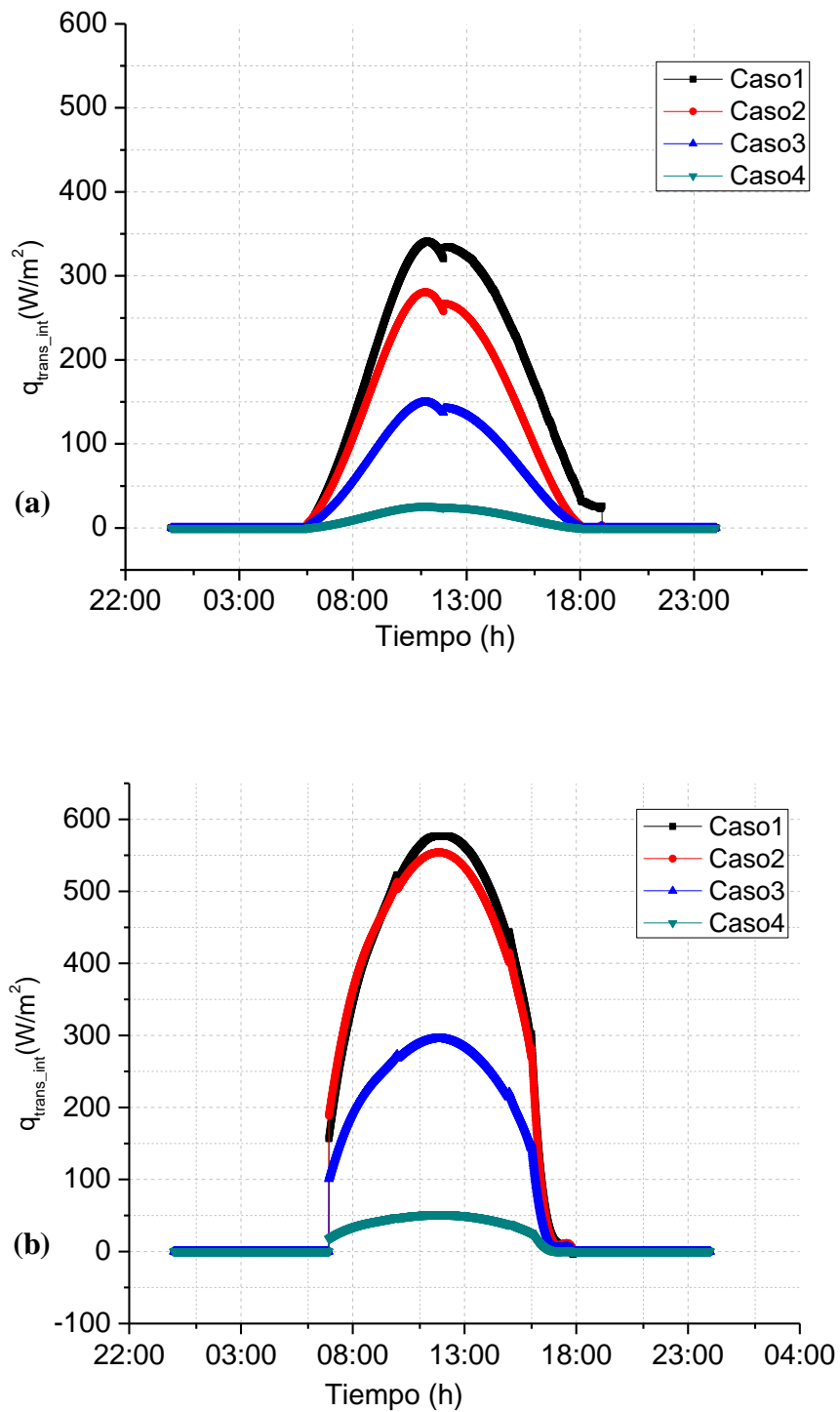
La radiación solar que se transmite a través de las superficies semitransparentes desempeña un papel muy importante en la ganancia o pérdida de calor al interior de una edificación. En este punto en particular, las ventanas son los elementos “más débiles” de la envolvente, ya que permiten el paso de la mayor cantidad de la energía que proviene del sol debido a su poca masa térmica y las propiedades ópticas de los acristalamientos, en particular la transmisividad. Entre mayor sea la transmitancia, mayor es la energía que de manera directa ingresa a la edificación, por lo que el control de ese parámetro puede ser de gran beneficio para el ahorro de energía, sin perder de vista que no se puede sacrificar totalmente la iluminación natural que proporciona la condición traslúcida de estos materiales. Entre las medidas que se han probado para el control de la transmisividad en los diferentes vidriados están: el uso de ventanas de vidrio doble, películas de control solar sobre los acristalamientos, películas reflectivas o de baja emisividad, entre otros, los cuales han probado ser elementos que ayudan en el comportamiento térmico de una edificación. En las Figuras 4.16 (a) y (b) se observa el flujo de calor transmitido al interior para el día cálido y el día frío de Cd. Juárez, respectivamente.

En la Figura 4.16 (a) se observa que para un día cálido, el Caso 1 correspondiente al vidrio claro simple, permite la mayor cantidad de energía transmitida al interior, seguido consecutivamente del Caso 2 de doble vidrio claro, el Caso 3 de vidrio de baja emisividad y finalmente el Caso 4 del vidrio reflectivo, este último es el que permitió la menor cantidad de flujo de calor transmitido al interior. Para este día en particular, el Caso 4 parece ser la mejor opción, ya que para un día caluroso lo que menos se desea es ganar más calor al interior. Los flujos de calor al interior para el día frío se muestran en la Figura 4.16(b), donde se observa que las configuraciones tienen casi el mismo comportamiento que para el día cálido a excepción del Caso 2 que se encuentra muy cercano al Caso 1.





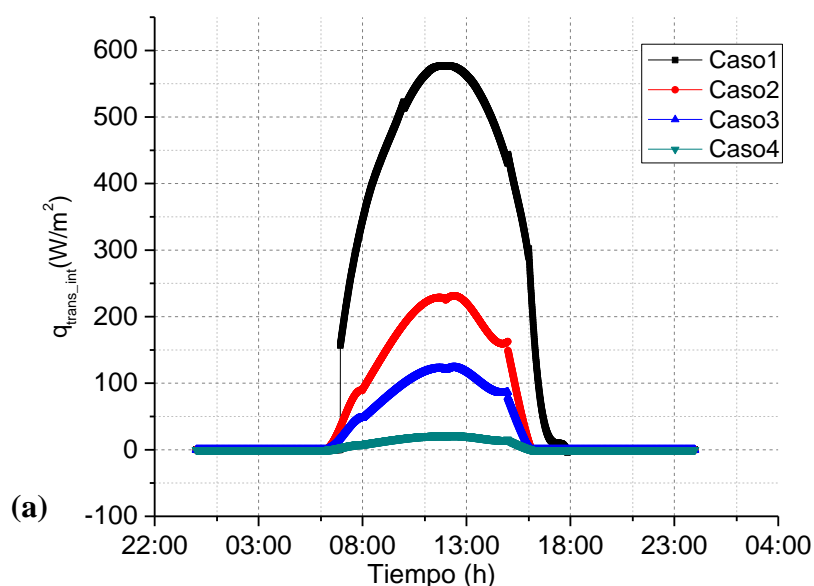
**Figura 4.16.-** Flujo de calor transmitido, Cd. Juárez.

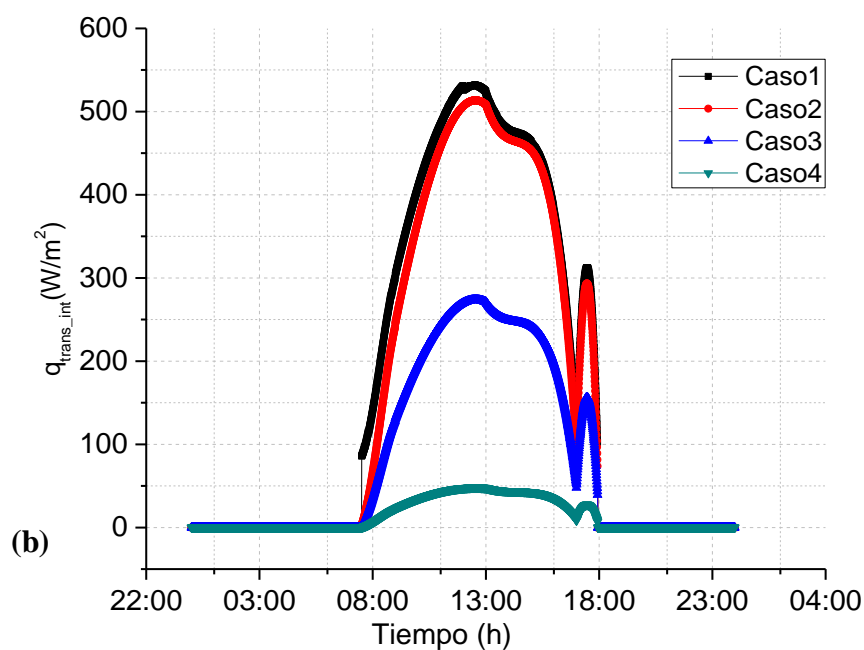


*Figura 4.17.-Flujo de calor transmitido, Cd. de Mérida.*

Los flujos de calor para la Ciudad de Mérida se muestran en las Figuras 4.17(a) y (b) para el día cálido y el día frío respectivamente, donde se observa que nuevamente que el Caso 1 permite cantidad de energía transmitida al interior, y el Caso 4 es la configuración que los valores más bajos tanto en el día cálido como en el día frío, dejando los Casos 2 y 4 en medio. Finalmente, el flujo de calor transmitido al interior de la habitación para la Cd. de México se muestran en las Figuras 4.18 (a) y (b) para el día cálido y frío respectivamente. Al igual que en Ciudad Juárez y Mérida, el comportamiento de las diferentes configuraciones es cualitativamente similar en los días fríos de cada ciudad y entre los días cálidos.

El comportamiento de la energía transmitida al interior mostrado en las gráficas para cada una de las ciudades es similar para los días fríos y de igual forma entre los días cálidos, la razón de esta similitud obedece al hecho de que, como se mencionó al principio, la energía transmitida depende de la transmisividad de la superficie traslúcida. Es pertinente observar que para el día frío los valores de la energía transmitida son aún mayores que para el día cálido; ello se debe a que la orientación de la ventana es hacia el sur, y debido a la inclinación de la tierra combinado con la trayectoria aparente del sol, las superficies verticales orientadas hacia el sur reciben mayor cantidad de radiación durante el invierno.





*Figura 4.18.- Flujo de calor transmitido, Cd. de México.*

#### 4.6 Integración numérica para el flujo de calor

EL cálculo de las cargas térmicas al interior de la habitación, se realizó mediante una integración numérica en el tiempo de los flujos de calor, las cuales se presentan de forma cuantitativa en las Tablas 4.12 al 4.17. Esta integración se realizó mediante el método trapezoidal compuesto de la ecuación 4.1

$$\int_{t=1}^{t=n} q_{Tot_{int}}(t) dt = \frac{\Delta t}{2} \left[ q_{Tot_{int}}(1) + \sum_{t=2}^{t=n-1} 2 * q_{Tot_{int}}(t) + q_{Tot_{int}}(n) \right] \quad (4.1)$$

En las Tablas 4.12 a 4.17 se muestran los flujos de calor obtenidos para cada hora empleando las diferentes configuraciones, esto con la finalidad de observar de manera clara la configuración que presenta el mejor desempeño térmico, así como como los valores de flujo obtenidos al realizar la integración durante las horas en las que incide la radiación solar sobre

la ventana. Nuevamente se observa la influencia del tipo de vidriado en la ganancia de energía. En las Tablas 4.12, 4.14 y 4.16 se muestran los resultados para los días cálidos de Ciudad Juárez, Mérida y Ciudad de México, respectivamente, donde se observa que los Casos 3 y 4 presentan los mejores resultados para condiciones de clima cálido, ya que son los que permiten la menor cantidad de energía al interior en las tres ciudades. Para estas condiciones es el resultado ideal ya que lo que no se desea es mayor ganancia térmica al interior de una edificación. En particular para Ciudad Juárez, todos los flujos de calor son positivos para el día cálido, indicativo de que se está ganando calor al interior durante todo el día, con sus respectivos valores para cada Caso. Para Mérida y la Ciudad de México, durante las primeras horas del día algunos flujos son negativos, pero éstos se vuelven positivos en cuando inicia la radiación solar que incide sobre las ventanas; sin embargo, el balance global fortalece el resultado discutido.

Por otro lado, las Tablas 4.13, 4.15 y 4.17 muestran los resultados para los días fríos de Ciudad Juárez, Mérida y Ciudad de México respectivamente. En estas tablas se observa que el mismo comportamiento para todas las configuraciones, es decir los Casos 3 y 4 presentan los menores flujos de calor al interior, mientras que los Casos 1 y 2 permiten los flujos de calor más altos. Como se observa en las Tablas para los días fríos, los flujos de calor son negativos durante las primeras y últimas horas del día, esto indica que se está perdiendo calor desde el interior de la edificación; sin embargo, el balance total nos arroja que nuevamente, el Caso 4 del vidrio reflectivo es la mejor opción para reducir las ganancias o pérdidas de energía a través de las ventanas.

**Tabla 4.12.- flujos de calor al interior ( $W \cdot h/m^2$ ) Cd. Juárez, clima cálido.**

Hora	Caso 1				Caso 2				Caso 3				Caso 4			
	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$
12:00:00 a. m.	42.23	0.36	0.00	42.59	10.12	0.08	0.00	10.21	10.05	0.01	0.00	10.06	10.12	0.08	0.00	10.20
01:00:00 a. m.	38.44	0.33	0.00	38.76	8.88	0.07	0.00	8.96	8.82	0.01	0.00	8.83	8.88	0.07	0.00	8.96
02:00:00 a. m.	34.96	0.30	0.00	35.25	8.23	0.07	0.00	8.30	8.17	0.01	0.00	8.18	8.23	0.07	0.00	8.30
03:00:00 a. m.	31.25	0.26	0.00	31.51	7.31	0.06	0.00	7.37	7.26	0.01	0.00	7.27	7.31	0.06	0.00	7.37
04:00:00 a. m.	25.40	0.21	0.00	25.62	5.90	0.05	0.00	5.94	5.86	0.01	0.00	5.87	5.90	0.05	0.00	5.94
05:00:00 a. m.	18.76	0.16	0.00	18.92	4.33	0.04	0.00	4.36	4.31	0.01	0.00	4.31	4.33	0.04	0.00	4.36
06:00:00 a. m.	11.94	0.10	0.00	12.04	2.82	0.02	0.00	2.85	2.82	0.00	0.00	2.83	2.82	0.02	0.00	2.85
07:00:00 a. m.	15.68	0.13	14.73	30.54	4.56	0.04	12.37	16.96	4.25	0.01	6.59	10.85	4.34	0.04	1.16	5.53
08:00:00 a. m.	20.56	0.17	28.59	49.32	6.56	0.05	24.01	30.63	5.97	0.01	12.80	18.78	6.17	0.05	2.24	8.46
09:00:00 a. m.	30.75	0.26	150.60	181.61	16.06	0.13	126.50	142.70	13.10	0.02	67.43	80.55	15.01	0.12	11.82	26.96
10:00:00 a. m.	41.93	0.36	197.57	239.86	21.51	0.18	165.96	187.65	17.78	0.02	88.46	106.26	21.26	0.18	15.51	36.95
11:00:00 a. m.	55.42	0.48	230.59	286.49	26.92	0.23	193.70	220.85	23.07	0.03	103.25	126.35	27.78	0.23	18.10	46.11
12:00:00 p. m.	71.31	0.62	234.95	306.88	31.76	0.27	197.36	229.39	28.10	0.04	105.20	133.34	33.36	0.28	18.44	52.08
01:00:00 p. m.	79.77	0.70	262.51	342.98	35.92	0.30	220.51	256.73	31.93	0.04	117.54	149.51	38.08	0.32	20.61	59.00
02:00:00 p. m.	86.62	0.77	241.73	329.12	36.99	0.31	203.06	240.36	33.37	0.05	108.24	141.65	39.17	0.33	18.98	58.47
03:00:00 p. m.	91.22	0.81	179.37	271.40	35.13	0.30	150.67	186.10	32.44	0.05	80.31	112.79	36.79	0.31	14.08	51.18
04:00:00 p. m.	94.16	0.84	149.86	244.85	34.53	0.29	125.88	160.70	32.26	0.04	67.10	99.40	35.94	0.30	11.76	48.01
05:00:00 p. m.	93.36	0.83	115.46	209.64	32.73	0.28	96.99	130.00	30.95	0.04	51.70	82.68	33.80	0.28	9.06	43.15
06:00:00 p. m.	90.18	0.80	69.97	160.95	28.93	0.24	58.77	87.94	27.77	0.04	31.33	59.14	29.52	0.24	5.49	35.25
07:00:00 p. m.	79.31	0.70	0.00	80.01	21.61	0.18	0.00	21.79	21.45	0.03	0.00	21.48	21.61	0.18	0.00	21.79
08:00:00 p. m.	66.36	0.58	0.00	66.94	17.43	0.15	0.00	17.57	17.30	0.02	0.00	17.33	17.43	0.14	0.00	17.57
09:00:00 p. m.	52.82	0.45	0.00	53.28	13.21	0.11	0.00	13.32	13.11	0.02	0.00	13.13	13.21	0.11	0.00	13.31
10:00:00 p. m.	42.38	0.36	0.00	42.74	10.16	0.08	0.00	10.25	10.09	0.01	0.00	10.10	10.16	0.08	0.00	10.25
11:00:00 p. m.	39.35	0.33	0.00	39.69	9.35	0.08	0.00	9.42	9.28	0.01	0.00	9.29	9.35	0.08	0.00	9.42
11:59:30 p. m.	48.65	0.42	0.00	49.07	11.86	0.10	0.00	11.96	11.78	0.02	0.00	11.79	11.86	0.10	0.00	11.96
$\int_0^{11:59} q(t)dt$				2690.59				1893.94				1128.16				479.16

**Tabla 4.13.- flujos de calor al interior ( $W \cdot h/m^2$ ) Cd. Juárez, clima frío.**

Hora	Caso 1				Caso 2				Caso 3				Caso 4			
	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$
12:00:00 a. m.	-78.37	-0.61	0.00	-78.97	-28.53	-0.23	0.00	-28.76	-28.19	-0.04	0.00	-28.23	-28.53	-0.23	0.00	-28.75
01:00:00 a. m.	-74.52	-0.58	0.00	-75.10	-26.88	-0.22	0.00	-27.10	-26.55	-0.04	0.00	-26.58	-26.87	-0.21	0.00	-27.09
02:00:00 a. m.	-78.62	-0.61	0.00	-79.23	-28.60	-0.23	0.00	-28.83	-28.26	-0.04	0.00	-28.29	-28.59	-0.23	0.00	-28.82
03:00:00 a. m.	-79.30	-0.61	0.00	-79.91	-28.90	-0.23	0.00	-29.13	-28.56	-0.04	0.00	-28.60	-28.90	-0.23	0.00	-29.13
04:00:00 a. m.	-79.84	-0.62	0.00	-80.46	-29.20	-0.23	0.00	-29.44	-28.86	-0.04	0.00	-28.90	-29.20	-0.23	0.00	-29.43
05:00:00 a. m.	-76.45	-0.59	0.00	-77.04	-27.71	-0.22	0.00	-27.93	-27.37	-0.04	0.00	-27.41	-28.05	-0.22	0.00	-28.27
06:00:00 a. m.	-81.75	-0.63	0.00	-82.38	-30.00	-0.24	0.00	-30.24	-29.65	-0.04	0.00	-29.69	-29.99	-0.24	0.00	-30.23
07:00:00 a. m.	-84.97	-0.65	0.00	-85.62	-31.49	-0.25	0.00	-31.74	-31.13	-0.04	0.00	-31.17	-31.48	-0.25	0.00	-31.73
08:00:00 a. m.	-87.20	-0.67	1.12	-86.75	-32.48	-0.26	0.94	-31.79	-32.11	-0.04	0.50	-31.65	-32.34	-0.26	0.09	-32.51
09:00:00 a. m.	-104.67	-0.79	9.40	-96.06	-30.34	-0.24	7.89	-22.69	-29.93	-0.04	4.21	-25.76	-29.30	-0.23	0.74	-28.79
10:00:00 a. m.	86.97	-0.67	295.37	381.67	-5.16	-0.04	248.11	242.91	-4.35	-0.01	132.25	127.89	14.98	0.12	23.19	38.29
11:00:00 a. m.	47.34	-0.38	510.57	557.53	14.99	0.12	428.88	443.99	14.29	0.02	228.60	242.91	55.89	0.47	40.08	96.44
12:00:00 p. m.	34.65	-0.28	657.72	692.10	28.95	0.24	552.49	581.68	26.04	0.04	294.49	320.57	87.13	0.76	51.63	139.52
01:00:00 p. m.	22.83	-0.18	743.78	766.42	38.77	0.33	624.77	663.87	34.29	0.05	333.02	367.36	107.93	0.95	58.39	167.27
02:00:00 p. m.	18.19	-0.15	790.33	808.37	42.59	0.36	663.87	706.82	38.35	0.05	353.86	392.26	118.43	1.06	62.04	181.53
03:00:00 p. m.	19.12	-0.16	738.49	757.45	39.86	0.34	620.33	660.53	35.14	0.05	330.65	365.84	108.76	0.96	57.97	167.69
04:00:00 p. m.	19.21	-0.16	605.63	624.69	31.77	0.27	508.73	540.77	27.72	0.04	271.17	298.93	85.25	0.74	47.54	133.53
05:00:00 p. m.	32.09	-0.26	391.23	423.06	13.92	0.12	328.63	342.66	12.19	0.02	175.17	187.38	43.02	0.36	30.71	74.10
06:00:00 p. m.	-52.25	-0.41	0.00	-52.66	-17.57	-0.14	0.00	-17.71	-17.29	-0.02	0.00	-17.31	-17.56	-0.14	0.00	-17.70
07:00:00 p. m.	-56.67	-0.45	0.00	-57.11	-19.36	-0.16	0.00	-19.52	-19.08	-0.03	0.00	-19.10	-19.36	-0.15	0.00	-19.51
08:00:00 p. m.	-60.86	-0.48	0.00	-61.34	-21.09	-0.17	0.00	-21.26	-20.79	-0.03	0.00	-20.82	-21.09	-0.17	0.00	-21.25
09:00:00 p. m.	-64.60	-0.51	0.00	-65.10	-22.65	-0.18	0.00	-22.83	-22.34	-0.03	0.00	-22.37	-22.65	-0.18	0.00	-22.83
10:00:00 p. m.	-67.64	-0.53	0.00	-68.17	-23.93	-0.19	0.00	-24.13	-23.90	-0.03	0.00	-23.93	-23.93	-0.19	0.00	-24.12
11:00:00 p. m.	-69.73	-0.54	0.00	-70.27	-24.82	-0.20	0.00	-25.02	-24.50	-0.03	0.00	-24.54	-24.82	-0.20	0.00	-25.02
11:59:30 p. m.	-88.13	-0.68	0.00	-88.81	-28.18	-0.23	0.00	-28.41	-27.92	-0.04	0.00	-27.95	-28.18	-0.22	0.00	-28.40
$\int_0^{11:59} q(t) dt$				<b>4904.59</b>				<b>4111.44</b>				<b>2272.34</b>				<b>857.06</b>

**Tabla 4.14.- flujos de calor al interior ( $W \cdot h/m^2$ ) Cd. de Mérida, clima cálido.**

Hora	Caso 1				Caso 2				Caso 3				Caso 4			
	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$
12:00:00 a. m.	7.30	0.06	0.00	7.36	1.66	0.01	0.00	1.67	1.67	0.0022	0.00	1.67	10.12	0.08	0	10.20
01:00:00 a. m.	3.57	0.03	0.00	3.60	0.81	0.01	0.00	0.82	0.83	0.0011	0.00	0.83	8.88	0.07	0	8.96
02:00:00 a. m.	1.85	0.02	0.00	1.86	0.42	0.00	0.00	0.42	0.44	0.0006	0.00	0.45	8.23	0.07	0	8.30
03:00:00 a. m.	0.97	0.01	0.00	0.98	0.22	0.00	0.00	0.22	0.25	0.0003	0.00	0.25	7.31	0.06	0	7.37
04:00:00 a. m.	0.15	0.00	0.00	0.15	0.04	0.00	0.00	0.04	0.07	0.0005	0.00	0.07	5.90	0.05	0	5.94
05:00:00 a. m.	-1.01	-0.01	0.00	-1.02	-0.23	0.00	0.00	-0.23	-0.19	-0.0007	0.00	-0.19	4.33	0.04	0	4.36
06:00:00 a. m.	-4.25	-0.03	5.04	0.75	-0.66	-0.01	4.23	3.57	-0.72	-0.0009	2.26	1.53	2.82	0.02	0	2.85
07:00:00 a. m.	7.78	0.06	53.27	61.11	4.90	0.04	44.75	49.69	3.82	0.0051	23.85	27.68	4.34	0.04	1.155	5.53
08:00:00 a. m.	20.75	0.17	126.42	147.34	12.17	0.10	106.19	118.46	9.58	0.0130	56.60	66.20	6.17	0.05	2.24	8.46
09:00:00 a. m.	34.21	0.29	211.91	246.41	20.31	0.17	178.00	198.48	16.08	0.0220	94.88	110.98	15.01	0.12	11.82	26.96
10:00:00 a. m.	47.05	0.40	289.76	337.21	27.93	0.24	243.40	271.57	22.42	0.0309	129.74	152.19	21.26	0.18	15.51	36.95
11:00:00 a. m.	57.48	0.50	332.59	390.56	33.02	0.28	279.38	312.67	27.19	0.0376	148.92	176.14	27.78	0.23	18.10	46.11
12:00:00 p. m.	66.12	0.57	317.85	384.54	35.00	0.30	266.99	302.29	29.82	0.0414	142.31	172.18	33.36	0.28	18.44	52.08
01:00:00 p. m.	70.74	0.62	300.92	372.28	35.18	0.30	252.77	288.25	30.33	0.0421	134.74	165.11	38.08	0.32	20.61	59.00
02:00:00 p. m.	75.19	0.66	255.74	331.59	33.92	0.29	214.82	249.02	29.83	0.0414	114.50	144.38	39.17	0.33	18.98	58.47
03:00:00 p. m.	77.20	0.68	190.32	268.20	30.92	0.26	159.87	191.05	27.87	0.0386	85.22	113.13	36.79	0.31	14.08	51.18
04:00:00 p. m.	73.79	0.65	116.08	190.51	25.78	0.22	97.51	123.51	23.86	0.0329	51.98	75.87	35.94	0.30	11.76	48.01
05:00:00 p. m.	61.30	0.53	47.79	109.62	18.09	0.15	40.14	58.39	17.22	0.0236	21.40	38.64	33.80	0.28	9.06	43.15
06:00:00 p. m.	32.02	0.27	3.59	35.88	7.66	0.06	3.01	10.73	7.53	0.0102	1.61	9.15	29.52	0.24	5.49	35.25
07:00:00 p. m.	22.17	0.19	0.00	22.35	5.07	0.04	0.00	5.11	5.04	0.0068	0.00	5.05	21.61	0.18	0.00	21.79
08:00:00 p. m.	16.55	0.14	0.00	16.69	3.76	0.03	0.00	3.80	3.75	0.0050	0.00	3.76	17.43	0.14	0.00	17.57
09:00:00 p. m.	14.28	0.12	0.00	14.40	3.24	0.03	0.00	3.27	3.23	0.0043	0.00	3.24	13.21	0.11	0.00	13.31
10:00:00 p. m.	14.15	0.12	0.00	14.27	3.21	0.03	0.00	3.23	3.20	0.00434	0.00	3.21	10.16	0.08	0.00	10.25
11:00:00 p. m.	14.59	0.12	0.00	14.71	3.31	0.03	0.00	3.34	3.30	0.00445	0.00	3.30	9.35	0.08	0.00	9.42
11:59:30 p. m.	13.73	0.11	0.00	13.85	3.11	0.03	0.00	3.14	3.11	0.00422	0.00	3.11	11.86	0.10	0.00	11.96
$\int_0^{11:59} q(t) dt$				<b>2868.84</b>				<b>2175.90</b>				<b>1250.88</b>				<b>452.20</b>



**Tabla 4.15.- flujos de calor al interior ( $W \cdot h/m^2$ ) Cd. de Mérida, clima frío.**

Hora Cd de Mérida frío	Caso 1				Caso 2				Caso 3				Caso 4			
	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$
12:00:00 a. m.	-33.75	-0.27	0.00	-34.02	-7.73	-0.06	0.00	-7.79	-7.62	-0.01	0.00	-7.63	-7.73	-0.06	0.00	-7.79
01:00:00 a. m.	-37.29	-0.30	0.00	-37.58	-8.61	-0.07	0.00	-8.68	-8.49	-0.01	0.00	-8.50	-8.61	-0.07	0.00	-8.67
02:00:00 a. m.	-39.44	-0.31	0.00	-39.75	-9.17	-0.07	0.00	-9.24	-9.04	-0.01	0.00	-9.05	-9.16	-0.07	0.00	-9.24
03:00:00 a. m.	-40.34	-0.32	0.00	-40.67	-9.43	-0.08	0.00	-9.51	-9.30	-0.01	0.00	-9.31	-9.43	-0.08	0.00	-9.50
04:00:00 a. m.	-40.37	-0.32	0.00	-40.70	-9.44	-0.08	0.00	-9.52	-9.31	-0.01	0.00	-9.32	-9.44	-0.08	0.00	-9.51
05:00:00 a. m.	-40.16	-0.32	0.00	-40.48	-9.38	-0.08	0.00	-9.45	-9.25	-0.01	0.00	-9.26	-9.38	-0.08	0.00	-9.45
06:00:00 a. m.	-42.68	-0.34	0.00	-43.02	-9.77	-0.08	0.00	-9.85	-9.63	-0.01	0.00	-9.65	-9.77	-0.08	0.00	-9.84
07:00:00 a. m.	-30.63	-0.25	240.95	210.08	6.83	0.06	202.40	209.29	2.39	0.00	107.89	110.27	2.96	0.02	18.92	21.90
08:00:00 a. m.	-17.41	-0.14	431.20	413.65	21.19	0.18	362.21	383.57	12.69	0.02	193.07	205.77	14.44	0.12	33.85	48.41
09:00:00 a. m.	-3.71	-0.03	533.79	530.06	30.55	0.26	448.39	479.19	19.72	0.03	239.00	258.75	24.25	0.20	41.90	66.35
10:00:00 a. m.	9.81	0.08	598.59	608.49	37.48	0.32	502.82	540.61	25.24	0.03	268.02	293.29	32.38	0.27	46.99	79.64
11:00:00 a. m.	20.06	0.17	646.15	666.38	42.56	0.36	542.76	585.69	29.36	0.04	289.31	318.71	38.62	0.32	50.72	89.66
12:00:00 p. m.	22.16	0.19	659.12	681.47	43.80	0.37	553.66	597.84	30.35	0.04	295.11	325.51	40.12	0.34	51.74	92.19
01:00:00 p. m.	28.66	0.24	635.24	664.14	43.88	0.37	533.61	577.86	30.96	0.04	284.43	315.43	40.96	0.34	49.87	91.17
02:00:00 p. m.	30.76	0.26	574.08	605.10	40.77	0.35	482.23	523.34	29.12	0.04	257.04	286.20	38.05	0.32	45.07	83.43
03:00:00 p. m.	28.53	0.24	494.25	523.03	35.57	0.30	415.17	451.04	25.51	0.04	221.30	246.84	32.59	0.27	38.80	71.67
04:00:00 p. m.	20.47	0.17	335.28	355.92	24.38	0.20	281.64	306.22	17.51	0.02	150.12	167.65	20.94	0.17	26.32	47.43
05:00:00 p. m.	4.71	0.04	14.49	19.24	1.92	0.02	12.17	14.10	1.63	0.00	6.49	8.13	1.66	0.01	1.14	2.81
06:00:00 p. m.	-6.16	-0.05	0.00	-6.21	-1.50	-0.01	0.00	-1.51	-1.45	0.00	0.00	-1.46	-1.50	-0.01	0.00	-1.51
07:00:00 p. m.	-6.24	-0.05	0.00	-6.30	-2.00	-0.02	0.00	-2.02	-1.95	0.00	0.00	-1.95	-2.00	-0.02	0.00	-2.02
08:00:00 p. m.	-10.93	-0.09	0.00	-11.02	-2.45	-0.02	0.00	-2.47	-2.39	0.00	0.00	-2.39	-2.45	-0.02	0.00	-2.47
09:00:00 p. m.	-12.65	-0.10	0.00	-12.75	-2.83	-0.02	0.00	-2.86	-2.77	0.00	0.00	-2.78	-2.83	-0.02	0.00	-2.86
10:00:00 p. m.	-14.17	-0.12	0.00	-14.28	-3.17	-0.03	0.00	-3.20	-3.11	0.00	0.00	-3.11	-3.17	-0.03	0.00	-3.20
11:00:00 p. m.	-15.56	-0.13	0.00	-15.68	-3.49	-0.03	0.00	-3.51	-3.42	0.00	0.00	-3.42	-3.49	-0.03	0.00	-3.51
11:59:30 p. m.	-16.99	-0.14	0.00	-17.13	-3.80	-0.03	0.00	-3.83	-3.73	-0.01	0.00	-3.73	-3.80	-0.03	0.00	-3.83
$\int_0^{11:59} q(t)dt$				<b>5154.42</b>				<b>4549.40</b>				<b>2475.22</b>				<b>693.05</b>

**Tabla 4.16.- flujos de calor al interior ( $W \cdot h/m^2$ ) Cd. de México, clima cálido.**

Hora	Caso 1				Caso 2				Caso 3				Caso 4			
	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$
12:00:00 a. m.	-12.52	-0.10	0.00	-12.63	-3.37	-0.03	0.00	-3.40	-3.26	0.00	0.00	-3.27	-3.37	-0.03	0.00	-3.39
01:00:00 a. m.	-15.24	-0.12	0.00	-15.36	-4.10	-0.03	0.00	-4.14	-3.99	-0.01	0.00	-3.99	-4.10	-0.03	0.00	-4.13
02:00:00 a. m.	-17.25	-0.14	0.00	-17.39	-4.65	-0.04	0.00	-4.69	-4.53	-0.01	0.00	-4.54	-4.65	-0.04	0.00	-4.69
03:00:00 a. m.	-19.15	-0.16	0.00	-19.31	-5.17	-0.04	0.00	-5.21	-5.04	-0.01	0.00	-5.05	-5.17	-0.04	0.00	-5.21
04:00:00 a. m.	-21.25	-0.17	0.00	-21.43	-5.75	-0.05	0.00	-5.80	-5.62	-0.01	0.00	-5.62	-5.75	-0.05	0.00	-5.79
05:00:00 a. m.	-23.62	-0.19	0.00	-23.81	-6.41	-0.05	0.00	-6.47	-6.41	-0.05	0.00	-6.47	-6.41	-0.05	0.00	-6.46
06:00:00 a. m.	-29.05	-0.23	0.00	-29.28	-8.00	-0.07	0.00	-8.07	-7.84	-0.01	0.00	-7.85	-8.00	-0.06	0.00	-8.06
07:00:00 a. m.	-18.57	-0.15	46.53	27.81	-2.19	-0.02	39.09	36.88	-2.64	0.00	20.83	18.19	-1.07	-0.01	3.65	2.57
08:00:00 a. m.	-7.80	-0.06	107.34	99.47	4.44	0.04	90.16	94.64	3.16	0.00	48.06	51.22	7.07	0.06	8.43	15.56
09:00:00 a. m.	1.22	0.01	169.33	170.56	10.95	0.09	142.23	153.28	8.86	0.01	75.81	84.69	16.53	0.14	13.29	29.96
10:00:00 a. m.	10.24	0.09	224.89	235.21	16.67	0.14	188.91	205.72	13.90	0.02	100.69	114.61	26.09	0.22	17.65	43.96
11:00:00 a. m.	16.82	0.14	262.97	279.93	20.60	0.17	220.90	241.67	17.43	0.02	117.74	135.20	32.92	0.27	20.64	53.84
12:00:00 p. m.	18.84	0.16	267.86	286.86	21.45	0.18	225.01	246.63	18.26	0.03	119.93	138.21	34.31	0.29	21.03	55.63
01:00:00 p. m.	24.19	0.20	262.51	286.90	22.59	0.19	220.51	243.29	19.58	0.03	117.54	137.15	35.79	0.30	20.61	56.70
02:00:00 p. m.	25.55	0.21	211.19	236.95	19.84	0.17	177.40	197.41	17.44	0.02	94.56	112.03	30.13	0.25	16.58	46.95
03:00:00 p. m.	24.10	0.20	177.50	201.79	17.39	0.15	149.10	166.63	15.34	0.02	79.47	94.83	25.57	0.21	13.93	39.71
04:00:00 p. m.	13.62	0.11	14.52	28.26	4.57	0.04	12.20	16.81	4.41	0.01	6.50	10.92	4.94	0.04	1.14	6.12
05:00:00 p. m.	2.24	0.02	0.00	2.26	0.63	0.01	0.00	0.63	0.69	0.00	0.00	0.69	0.63	0.01	0.00	0.64
06:00:00 p. m.	-11.47	-0.09	0.00	-11.57	-3.04	-0.02	0.00	-3.06	-2.93	0.00	0.00	-2.94	-3.03	-0.02	0.00	-3.06
07:00:00 p. m.	-22.32	-0.18	0.00	-22.50	-6.05	-0.05	0.00	-6.10	-5.92	-0.01	0.00	-5.92	-6.05	-0.05	0.00	-6.10
08:00:00 p. m.	-20.28	-0.16	0.00	-20.45	-5.48	-0.04	0.00	-5.52	-5.35	-0.01	0.00	-5.36	-5.48	-0.04	0.00	-5.52
09:00:00 p. m.	-23.53	-0.19	0.00	-23.72	-6.39	-0.05	0.00	-6.44	-6.25	-0.01	0.00	-6.25	-6.38	-0.05	0.00	-6.43
10:00:00 p. m.	-27.12	-0.22	0.00	-27.34	-7.41	-0.06	0.00	-7.48	-7.26	-0.01	0.00	-7.27	-7.41	-0.06	0.00	-7.47
11:00:00 p. m.	-29.28	-0.24	0.00	-29.52	-8.06	-0.07	0.00	-8.13	-7.90	-0.01	0.00	-7.91	-8.06	-0.06	0.00	-8.12
11:59:30 p. m.	-30.83	-0.25	0.00	-31.08	-7.93	-0.06	0.00	-8.00	-7.79	-0.01	0.00	-7.80	-7.93	-0.06	0.00	-8.00
$\int_0^{11:59} q(t)dt$				<b>1848.60</b>				<b>1603.21</b>				<b>895.09</b>				<b>342.94</b>

**Tabla 4.17.- flujos de calor al interior ( $W \cdot h/m^2$ ) Cd. de México, clima frío.**

Hora	Caso 1				Caso 2				Caso 3				Caso 4			
	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$	$q_{conv}^{int}$	$q_{rad}^{int}$	$q_{Tras}^{int}$	$q_{result}^{int}$
12:00:00 a. m.	-71.19	-0.55	0.00	-71.74	-21.53	-0.17	0.00	-21.70	-21.30	-0.03	0.00	-21.33	-21.53	-0.17	0.00	-21.70
01:00:00 a. m.	-74.58	-0.58	0.00	-75.16	-22.79	-0.18	0.00	-22.97	-22.55	-0.03	0.00	-22.58	-22.78	-0.18	0.00	-22.97
02:00:00 a. m.	-77.04	-0.60	0.00	-77.63	-23.71	-0.19	0.00	-23.90	-23.47	-0.03	0.00	-23.50	-23.71	-0.19	0.00	-23.90
03:00:00 a. m.	-78.71	-0.61	0.00	-79.32	-24.34	-0.20	0.00	-24.54	-24.10	-0.03	0.00	-24.13	-24.34	-0.19	0.00	-24.53
04:00:00 a. m.	-79.72	-0.62	0.00	-80.34	-24.73	-0.20	0.00	-24.93	-24.48	-0.03	0.00	-24.52	-24.72	-0.20	0.00	-24.92
05:00:00 a. m.	-80.21	-0.62	0.00	-80.83	-24.91	-0.20	0.00	-25.11	-24.67	-0.03	0.00	-24.70	-24.91	-0.20	0.00	-25.11
06:00:00 a. m.	-79.12	-0.61	0.00	-79.73	-24.49	-0.20	0.00	-24.68	-24.24	-0.03	0.00	-24.27	-24.48	-0.19	0.00	-24.68
07:00:00 a. m.	-81.01	-0.62	0.00	-81.63	-25.24	-0.20	0.00	-25.44	-24.99	-0.03	0.00	-25.02	-25.23	-0.20	0.00	-25.43
08:00:00 a. m.	-74.21	-0.58	77.96	3.18	-18.36	-0.15	65.49	46.98	-18.78	-0.03	34.91	16.11	-15.60	-0.12	6.12	-9.61
09:00:00 a. m.	-57.87	-0.45	291.66	233.33	-0.48	0.00	244.99	244.51	-3.06	0.00	130.59	127.53	4.34	0.04	22.90	27.27
10:00:00 a. m.	-40.77	-0.33	438.04	396.94	13.82	0.12	367.95	381.89	8.92	0.01	196.13	205.06	20.19	0.17	34.39	54.74
11:00:00 a. m.	-26.76	-0.22	544.89	517.92	24.68	0.21	457.71	482.60	17.18	0.02	243.97	261.17	34.82	0.29	42.78	77.89
12:00:00 p. m.	-19.27	-0.16	602.87	583.43	30.47	0.26	506.41	537.14	21.57	0.03	269.93	291.52	43.11	0.36	47.33	90.80
01:00:00 p. m.	-13.76	-0.11	605.60	591.73	32.43	0.27	508.70	541.41	23.06	0.03	271.15	294.24	45.50	0.38	47.54	93.42
02:00:00 p. m.	-10.96	-0.09	556.33	545.28	30.35	0.26	467.31	497.92	21.61	0.03	249.09	270.73	41.87	0.35	43.67	85.89
03:00:00 p. m.	-8.85	-0.07	539.75	530.83	29.96	0.25	453.39	483.60	21.41	0.03	241.67	263.11	41.10	0.34	42.37	83.82
04:00:00 p. m.	-11.21	-0.09	441.23	429.93	23.50	0.20	370.64	394.33	16.52	0.02	197.56	214.10	31.02	0.26	34.64	65.91
05:00:00 p. m.	-23.01	-0.19	106.78	83.58	0.56	0.00	89.69	90.26	-1.00	0.00	47.81	46.81	1.13	0.01	8.38	9.52
06:00:00 p. m.	-29.83	-0.24	0.00	-30.07	-7.57	-0.06	0.00	-7.64	-7.44	-0.01	0.00	-7.45	-7.57	-0.06	0.00	-7.63
07:00:00 p. m.	-36.97	-0.30	0.00	-37.26	-9.64	-0.08	0.00	-9.72	-9.48	-0.01	0.00	-9.49	-9.63	-0.08	0.00	-9.71
08:00:00 p. m.	-42.99	-0.34	0.00	-43.33	-11.60	-0.09	0.00	-11.70	-11.43	-0.02	0.00	-11.45	-11.60	-0.09	0.00	-11.70
09:00:00 p. m.	-47.99	-0.38	0.00	-48.37	-13.29	-0.11	0.00	-13.39	-13.10	-0.02	0.00	-13.12	-13.28	-0.11	0.00	-13.39
10:00:00 p. m.	-52.14	-0.41	0.00	-52.56	-14.71	-0.12	0.00	-14.83	-14.52	-0.02	0.00	-14.54	-14.71	-0.12	0.00	-14.83
11:00:00 p. m.	-55.70	-0.44	0.00	-56.14	-15.95	-0.13	0.00	-16.08	-15.75	-0.02	0.00	-15.77	-15.95	-0.13	0.00	-16.08
11:59:30 p. m.	-58.96	-0.46	0.00	-59.42	-17.11	-0.14	0.00	-17.25	-16.90	-0.02	0.00	-16.93	-17.11	-0.14	0.00	-17.24
$\int_0^{11:59} q(t)dt$				<b>4130.81</b>				<b>3902.11</b>				<b>2096.73</b>				<b>591.75</b>

# Capítulo 5

## 5 Conclusiones y Recomendaciones

En este apartado se presentan las conclusiones con base a los resultados obtenidos de las simulaciones mostrados en los capítulos anteriores, así como las recomendaciones para trabajos futuros con ventanas dobles, teniendo así un conocimiento más amplio acerca de este sistema pasivo de ahorro de energía.

### 5.1 Conclusiones

En cuanto al comportamiento térmico de las ventanas podemos concluir que el Caso 1 que corresponde al vidrio claro simple, mostró los valores más altos de temperatura para los días cálidos y los valores más bajos para el día frío, acentuándose más conforme más extrema es la temperatura, es decir, para los días más cálidos como los de Ciudad Juárez y Mérida, el Caso 1 mostró evidentemente los valores de temperatura más altos, mientras que para los días más fríos como Ciudad Juárez y Ciudad de México, el valor de la temperatura para el Caso 1 sobre el vidrio 2 fue el más bajo. En relación a los Casos 2, 3 y 4, su comportamiento térmico fue muy similar para el día cálido en todas las ciudades, con una ligera mejora para el Caso 4; sin embargo, para el día frío, el Caso 4 mostró las temperaturas más altas sobre el vidrio 2, seguido del Caso 2 y finalmente el Caso 3. Este comportamiento se vio acentuado también conforme la temperatura ambiente es menor.

Los flujos convectivos mostraron un comportamiento muy definido para climas extremos como el de Ciudad Juárez, donde para el día cálido, el Caso 1 del vidrio claro simple fue el que registró los valores más altos, mientras los casos 2, 3 y 4 se mantuvieron muy por debajo sin diferencias significativas entre sí. La Ciudad de Mérida también mostró el mismo comportamiento para el día cálido. Sin embargo, para el día frío en Ciudad Juárez, el Caso 1 mostró valores altos pero negativos, y el Caso 4 valores muy altos positivos, mientras que para Mérida y la Ciudad de México, con clima frío menos extremoso el Caso 4 no mostró la

misma diferencia con respecto a los Casos 2 y 3, a excepción del Caso 1 para la Ciudad de México, que sí se mantuvo con altos valores negativos.

En cuanto a los flujos radiativos, el Caso 3 del vidrio de baja emisividad, fue el que evidentemente mostró un comportamiento más estable, con valores bajos, mientras que el Caso 1 mostró valores muy altos positivos para los días cálidos de las tres ciudades y valores altos tanto positivos como negativos para los días fríos.

Los flujos de calor transmitidos, fueron mayores en el Caso 1 y menores en el Caso 4 para todos los Casos y en las tres ciudades, dado que los valores obtenidos dependen únicamente de las propiedades ópticas del vidrio.

En resumen, el balance total de las contribuciones de los flujos de calor convectivo, radiativo y transmitido nos mostraron que el Caso 4, que corresponde a la ventana de vidrio doble con un vidrio reflectivo, es la mejor opción para reducir la ganancia o pérdida de energía al interior de una edificación, mientras que el Caso 1 que corresponde a la ventana de vidrio claro simple, resultó la opción menos adecuada, ya que con esta configuración se obtuvieron los mayores flujos de calor, en tanto los Casos 2 y 3 tuvieron valores intermedios. Sin embargo, es necesario realizar un análisis económico para determinar la viabilidad en la implementación de este tipo de ventanas, para estar en posición de realizar un balance costo/beneficio considerando las cuatro configuraciones.

En este trabajo de tesis se llevó a cabo el estudio de la transferencia de calor conjugada en una ventana de vidrio doble, para lo cual se analizaron cuatro casos diferentes empleando vidriados disponibles en la República Mexicana, así como condiciones climatológicas para un día frío y un día cálido de Cd. Juárez, Cd. de México y Cd. de Mérida. De acuerdo a los resultados se concluye que:

- Al emplear una ventana de vidrio solo se tiene la mayor ganancia de energía al interior de la habitación, esto debido a sus propiedades ópticas ya que permite el paso de la radiación solar en hasta un 83.9% creando así un entorno de No-confort térmico.

- El uso de una ventana de vidrio doble reduce la ganancia de energía, esto debido a que el aire al interior de las dos placas de vidrio sirve como aislante térmico, lo cual reduce la ganancia de calor del ambiente exterior hacia el interior de la habitación.
- El uso de diferentes tipos de vidriado (vidrio reflectivo, vidrio de baja emisividad, etc.) para un sistema de ventanas de vidrio doble puede traer un mejor beneficio en la ganancia o pérdida de calor, esto dependiendo del tipo de clima al cual es sometido.
- La configuración del caso 4 en el cual se emplea un vidrio reflectivo tiene el mayor beneficio en el ahorro de la ganancia de energía al interior de la habitación para climas cálidos, esto debido a las propiedades ópticas del vidrio.

## **5.2 Recomendaciones**

A continuación, se presentan algunas recomendaciones acerca de este sistema pasivo de ahorro de energía con la finalidad de tener un conocimiento más amplio de este, así como para poder determinar los beneficios en cuanto ahorro en la ganancia o pérdida de energía.

- Realizar el estudio considerando el efecto del fluido entre las dos placas de vidrio.
- Considerar otro gas al interior de la cavidad formada por las hojas de vidrio.
- Realizar el estudio considerando todos los meses del año, seleccionando el día más frío y el más cálido de cada mes.
- Emplear materiales de cambio de fase con diferentes configuraciones.

## 6 Referencias.

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 785-79, (2015).

Aguilar J.O., Xaman J., Olazo-Gómez Y., Hernandez-Lopez I., Becerra G., Jaramillo O.A. Thermal performance of a room with a double-glazing window using glazing available in Mexican market. *Applied Thermal Engineering*, Vol.119, págs. 505-515, (2017)

Arce J. Rediseño, Construcción y Caracterización de un Colector Solar de Aire para un Sistema de Secado de Grano. CENIDET.2002.

Ahmadi M., Yousefi T. Numerical analysis of heat transfer in a double glass window, *Proceedings of the 7th IASME / WSEAS International Conference on heat transfer, thermal engineering and environment (hte '09)*, Págs.232-238, (2009).

Arici 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).

Arici M., Karabay H. Determination of optimum thickness of double-glazed windows for the climatic regions of Turkey. *Energy and Buildings*, Vol. 42, Págs.1773–1778, (2010).

Aydin O. Determination of optimum air-layer thickness in double-pane windows. *Energy and Buildings*, Vol. 32, Págs.303-308, (2000).

Aydin O. Conjugate heat transfer analysis of double pane windows. *Building and Environment* Vol.41, Págs.109-116, (2006).

ASHRAE, "Handbook of Fundamentals", American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, New York, 2005.

Buratti C., Moretti E.. Glazing system with silica aerogel for energy saving in Buildings. Applied Energy. Vol. 98, Págs. 396-403, (2012).

Chong S., Xianting L. Solar heat gain reduction of double glazing Windows with cooling pipes emnedded in venetian blinds by utilizing natural cooling. Energy and building. Vol.112, págs.173-183,(2016).

Changyu L., Yumeng Z., Dong L., Hanbing Q., Xiaoyan L.. A model to determine thermal performance of a Non-ventilated double glazing unit with PCM and experimental validation. Procedia Engineering. Vol. 157, Págs. 293-300, (2016).

Cortina C. Estudio de la trasferencia de calor en ventanas con vidrios Douvent. Tesis de maestría. CENIDET. 2000.

Carnahan B., H.A. Luther, James O. Wilkes. "Applied Numerical Methods", Krieger Publishing Company, 1969.

De Giorgi L., Bertola V., Cafaro E. Thermal convection in double glazed Windows with structured gap. Energy and buildings. Vol. 43, Págs.2034-2038, (2011).

Davies M.G. "Building Heat Transfer", John Wiley & Sons Ltd, 2004.

ElSherbiny S.M., Raithby G. D., Hollands K. G. T.. Heat Transfer by Natural Convection Across Vertical and Inclined Air Layers. Journal of Heat Transfer. Vol. 104, Págs.96-102, (1982).

Fracastoro V., Mutani G., Perino M. Experimental and theoretical analysis of natural ventilation by windows opening. Energy and Buildings, Vol.34, Págs.817-827, (2002).



Gan G. Thermal transmittance of multiple glazing computational fluid dynamics prediction. *Applied thermal engineering*. Vol 21, Págs. 1583-1592, (2001).

Gil-Lopez T., Gimenez-Molina C. Influence of double glazing Windows a circulating water chamber on the thermal energy saving in buildings. *Energy and building*. Vol.56, Págs. 56-65. (2013)

Ismail K.A.R, Salinas C.T, Henríquez J.R. A comparative study of naturally ventilated and gas filled windows for hot climates. *Energy Conversion and Management*, Vol.50, Págs.1691–1703, (2009).

Ismail K.A.R., Henríquez J.R. Two-dimensional model for the double glass naturally ventilated window. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, págs. 461–475, (2005).

Ismail K.A., Henríquez J.R.. Thermally effective Windows with moving phase change material curtains. *Applied Thermal Engineering*. Vol.21, Págs.1909-1923, (2001).

Ismail K.A., Henríquez J.R.. Simplified model for a ventilated glass windows under forced air flow condition. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 26, Págs.295-302, (2006)

Korpela S.A., Lee Y., Drummond J.E.. Heat transfer through a double pane windows. *Journal of heat transfer*. Vol.104, Págs. 539-544, (1982)

Karabay Hasan, Arıcı Müslüm. Multiple pane window applications in various climatic regions of Turkey. *Energy and Buildings*, Vol. 45, Pásg. 67–71, (2012).

Kara Y., Kurnuc. A. Performance of coupled novel triple glass unit and pcm wall. *Applied thermal engineering*. Vol. 35, Págs 243-246, (2012)

Mathur J, Mathur S, Anupma. Summer-performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation. *Energy and Building*. Vol.38, Págs.1156-1163, (2006).

Noh-Pat F., Xamán J. , Álvarez G., Chávez Y., Arce J. Thermal analysis for a double glazing unit with and without a solar control film (SnS–CuxS) for using in hot climates. *Energy and Buildings*, Vol.43, Págs. 704–712. (2011).

Nieves A, Domínguez F. C. “Métodos numéricos aplicados a la ingeniería”, Cecs, 1999

Nakamura S. “Métodos numéricos aplicados con Software”, Prentice Hall, 1992.

Ong K.S. A mathematical model of a solar chimney. *Renewable Energy*. Vol.28, Págs.1047-1060, (2003).

Ozisik N. “Heat transfer a Basic Approach”, McGraw Hill ,1985.

Pérez-Grande Isabel, Meseguer José, Alonso Gustavo. Influence of glass properties on the performance of double-glazed facades. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, Págs.3163-3175, (2005).

Reynoso E. Análisis Térmico de un Captador Solar de Aire Ubicado en el Techo de una Habitación con Fines de Ventilació. CENIDET.2011.

Shuhong L., Gaofeng S., Kaikai Z., Xiaosong Z. Experimental research on the dynamic thermal performance of a novel triple-pane building Windows filled with PCM. *Sustainable Cities and Society*. Vol.27, Págs.15-22, (2016).

Skaff M., Gosselin L. Summer performance of windows with absorbing or smart glazing. *Solar energy*. Vol.105, Págs.2-13,(2014).

Saeli M., Piccirillo R, Parkin I. P., Binions R., Ridley I. Energy modelling studies of thermochromic glazing. *Energy and buildings*, vol. 42, págs. 1666-1673, (2010)

SENER, “Balance Nacional de Energía 2015”, Dirección General de Planeación Energética, 30 Ene 2015.

Xamán J., Jiménez-Xamán C., Álvarez G., Zavala-Guillén I., Hernández-Pérez I., Aguilar J.O. Thermal performance of a double pane window with a solar control coating for warm climate of Mexico. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 106 , Págs. 257–265, (2016).

Xamán J., Olazo-Gómez Y., Zavala-Guillén I., Hernández-Pérez I., Aguilar J.O., Hinojosa J.F. Thermal evaluation of Room coupled with a double glazing windows with/without a solar control film for Mexico. *Applied Thermal Engineering*. Vol.110, Págs.805-820, (2017).

Xamán J., Olazo-Gómez Y., Chávez Y., Hinojosa J.F., Hernández-López I. Zavala-Guillén I. Computational fluid dynamics for thermal evaluation of a room with a double-glazing window with a solar control films. *Renewable Energy*. Vol.94, Págs.237-250, (2016).

Xamán J., Pérez-Nucamedi C., Arce J., Hinojosa J., Álvarez G., Zavala-Guillén I. Thermal analysis for a double pane window with a solar control films for using in cold and warm climate. *Energy and Buildings*. Vol. 76, Págs. 429-439, (2014).

Yin R., Xu P., Shen P. Case study: Energy savings from solar window film in two commercial buildings in Shanghai. *Energy and Buildings*. Vol.45, Págs.132–140, (2012)