



**EDUCACIÓN**

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

# Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

## Tesis de Maestría

EVALUACIÓN TÉRMICA DE UNA FACHADA DE  
VIVIENDA TÍPICA DE MÉXICO

presentada por

**Ing. Gabriela Pedraza Jiménez**

como requisito para la obtención del grado de

**Maestra en Ciencias en Ingeniería  
Mecánica**

Director de tesis

**Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor †**

Cuernavaca, Morelos, México. Enero de 2022





Cuernavaca, Mo.  
No. De Oficio  
Asunto

01/febrero/2022  
SAC/31/2022  
Autorización de  
Impresión de tesis

**GABRIELA PEDRAZA JIMENEZ  
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS  
EN INGENIERIA MECANICA  
PRESENTE**

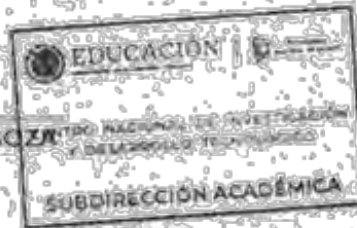
Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutoral asignado a su trabajo de tesis titulada "EVALUACIÓN TÉRMICA DE UNA FACHADA DE VIVIENDA TÍPICA DE MÉXICO" ha informado a esta Subdirección Académica que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

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

**ATENTAMENTE**

Experiencia en Educación Tecnológica  
Educación Tecnológica al Servicio de México

**DR. CARLOS MANUEL ASTORCA ZARAGOZA  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



C. I. D. Departamento de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Servicios Escribares  
Departamento de Comunicación y Eventos  
Departamento de Recursos Materiales  
CMAZ/CHO







**EDUCACIÓN**



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico  
Departamento de Ingeniería Mecánica

Cuernavaca, Mor., **01/febrero/2022**

No. Oficio: DIM/41/2022

Asunto: **Autorización de impresión de tesis**

**ING. GABRIELA PEDRAZA JIMÉNEZ**  
**CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN ING. MECÁNICA**  
**P R E S E N T E.**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **EVALUACIÓN TÉRMICA DE UNA FACHADA DE VIVIENDA TÍPICA DE MÉXICO** han informado, que están de acuerdo con el documento presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su documento 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"



CENTRO NACIONAL DE  
INVESTIGACIÓN Y  
DESARROLLO  
TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE  
INGENIERÍA MECÁNICA

  
**DR. MARIO ALEJANDRO GÓMEZ JIMÉNEZ**  
**JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

C.c.p. Depto. de Servicios Escolares Lic. Silvia Del Carmen Ortiz Fuentes  
Expediente  
MAGJ/RMA

**cenidet**  
Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico



Interoce Interoceste Patricia S/N, Col. Patrocinio, C. A., 62490, Cuernavaca, Morelos.  
Tel. 01 (777) 3627777, ext. 1486, e-mail: [dim@cenidet.tecnm.mx](mailto:dim@cenidet.tecnm.mx) | [cenidet@tecnm.mx](mailto:cenidet@tecnm.mx)



**2022** Ricardo  
Flores  
Mañón





## Dedicatoria

Esta tesis está dedicada a la memoria del Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor. Iniciamos juntos este proyecto con objetivos establecidos, con motivación y entusiasmo, y hoy después mucho trabajo está terminado.

Agradezco infinitamente todo su apoyo, me pesa de todo corazón no haberlo dicho cuando tuve la oportunidad. Usted será siempre un ejemplo a seguir.

**Q.D.P. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor**





## Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico y seguro médico que hizo posibles mis estudios de posgrado.

Al Tecnológico Nacional de México campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por haberme permitido realizar mis estudios de posgrado en esta honorable institución, con los mejores profesores de México.

A Dios porque me ha puesto en este camino, me ha rodeado con personas increíbles y dispuestas apoyarme en todo lo que me propongo. Porque me dio fuerza cuando lo necesite y esperanza cuando ya la había perdido.

A mis padres, Gabriel Pedraza y Rafaela Jiménez, quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han ayudado a cumplir este sueño, gracias por inculcarme que el esfuerzo y el trabajo duro siempre será recompensado. A mi hermano Rafael Pedraza, que me ha enseñado que los estudios son lo más importante y que cada desvelo vale la pena. A Elí Chagolla, por estar conmigo en las buenas y en las malas y apoyarme en todas las locuras que se me ocurren. Los quiero.

Al Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda quien me apoyó en todo momento y estuvo dispuesto a ayudarme cuando me sentí pérdida. Muchas gracias por todos sus consejos y la confianza que me brindó.

A Carlos E. Torres para mi tu fuiste un hermano mayor que el CENIDET y el Dr. Xamán me dieron. Siempre estuviste para mí, para darme consejos y explicarme lo que no entendía, gracias por la paciencia y apoyo que siempre me brindaste.

Al comité revisor, la Dra. Yvonne Chávez Chena, el Dr. Jesús Arce Landa, el Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda, porque todos sus comentarios y sugerencias

en la revisión de este documento fueron acertadas, mejorando la calidad de este documento.

A todas las personas que de manera directa o indirecta me ayudaron a cumplir esta meta.

## Contenido

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos.....	ii
Lista de figuras .....	vii
Lista de tablas .....	ix
Nomenclatura.....	xiii
Resumen .....	xv
Abstract.....	xvii
Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1. Estado del arte.....	3
1.1.1. Conclusión de la revisión bibliográfica .....	15
1.2. Planteamiento del problema.....	15
1.3. Objetivo general.....	16
1.3.1. Objetivos específicos.....	16
1.4. Alcance .....	17
1.5. Limitaciones.....	17
Capítulo 2: Modelo físico y matemático de una pared con una ventana.....	18
2.1. Fundamentos teóricos .....	18
2.1.1. Principios generales de transferencia de calor.....	19
2.1.2. Circuitos térmicos.....	20
2.1.3. Balances de energía .....	22
2.2. Radiación solar .....	23
2.2.1. Ángulo de incidencia.....	24
2.2.2. Radiación solar incidente sobre una superficie inclinada.....	26
2.3. Datos climáticos de Mérida .....	27
2.4. Modelo físico .....	29
2.5. Modelo matemático .....	31
2.5.1. Modelo matemático para los muros .....	32
2.5.1.1. Coeficientes de transferencia de calor en los muros .....	34

2.5.2. Modelo matemático para la ventana.....	34
2.5.2.1. Coeficientes de transferencia de calor en la ventana.....	36
2.5.3. Diagrama de flujo computacional .....	37
Capítulo 3. Metodología de solución numérica y verificación.....	40
3.1. Ejercicio de verificación uno: fronteras de primera clase.....	40
3.1.1. Solución analítica .....	41
3.1.2. Balance de energía.....	41
3.2. Ejercicio de verificación dos: una frontera de primera clase y una de tercera clase .....	44
3.2.1. Solución analítica .....	45
3.2.2. Balance de energía.....	45
3.3. Ejercicio de verificación tres: fronteras de tercera clase .....	49
3.3.1. Solución analítica .....	49
3.3.2. Balance de energía.....	49
3.4. Ejercicio de verificación cuatro: fronteras de primera clase en estado transitorio	53
3.4.1. Solución analítica .....	54
3.4.2. Balance de energía.....	54
Capítulo 4: Resultados.....	58
4.1. Estudio paramétrico .....	58
4.2. Independencia temporal.....	60
4.3. Análisis de temperaturas .....	62
4.4. Análisis de flujos de calor.....	65
4.5. Análisis de ganancias térmicas .....	67
4.6. Análisis económico.....	72
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones .....	76
5.1. Conclusiones.....	76
5.2. Recomendaciones para trabajos futuros .....	77
Referencias bibliográficas .....	79
Anexos.....	88
Anexo A: Coeficientes convectivos .....	88
Anexo B: Resultados (temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica).....	96

Anexo C: Análisis económico ..... 161  
Apéndice..... 169

## Lista de figuras

Figura 1. Consumo de energía por fuente.....	1
Figura 2. Clasificación de los sistemas de climatización pasivos. ....	3
Figura 3. Analogía entre circuito térmico y circuito eléctrico.....	20
Figura 4. Flux de calor en una pared plana.....	21
Figura 5. Flux de calor convectivo de una superficie hacia su alrededor.....	21
Figura 6. Flux de calor radiativo de una superficie hacia su alrededor. ....	22
Figura 7. Interacción energética entre la superficie exterior de una casa y sus alrededores. ....	23
Figura 8. Radiación global, directa y difusa del día más cálido (25/07/2018). ....	28
Figura 9. Radiación incidente para cada orientación del día más cálido (25/07/2018).....	28
Figura 10. Temperatura del día más cálido (25/07/2018). ....	28
Figura 11. Velocidad del viento del día más cálido (25/07/2018).....	28
Figura 12. Radiación global, directa y difusa del día más frío (05/01/2018). ....	29
Figura 13. Radiación incidente para cada orientación del día más frío (05/01/2018).....	29
Figura 14. Temperatura del día más frío (05/01/2018). ....	29
Figura 15. Velocidad del viento del día más frío (05/01/2018).....	29
Figura 16. Modelo físico de una fachada. ....	30
Figura 17. Modelo físico (muros).....	32
Figura 18. Modelo físico (ventana). ....	35
Figura 19. Diagrama de flujo del código de cómputo. ....	38
Figura 20. Diagrama de flujo del código de cómputo (ciclo iterativo). ....	39
Figura 21. Modelo físico ejercicio de verificación uno.....	40
Figura 22. Modelo físico ejercicio de verificación uno (balance de energía). ....	41
Figura 23. Perfil de temperatura (ejercicio de verificación uno).....	44
Figura 24. Modelo físico ejercicio de verificación dos. ....	45
Figura 25. Modelo físico ejercicio de verificación dos (balance de energía).....	46
Figura 26. Perfil de temperatura (ejercicio de verificación dos). ....	48
Figura 27. Modelo físico del ejercicio de verificación tres. ....	49
Figura 28. Modelo físico ejercicio de verificación tres (balance de energía).....	50

Figura 29. Perfil de temperaturas (ejercicio de verificación tres). .....	52
Figura 30. Modelo físico del ejercicio de verificación cuatro. ....	53
Figura 31. Perfil de temperaturas (ejercicio de verificación cuatro). ....	57
Figura 32. Independencia temporal (muros). ....	61
Figura 33. Independencia temporal (ventana). ....	61
Figura 34. Perfiles de temperatura del “Caso 5” en las cuatro orientaciones del día más cálido de año (25/julio/2018). ....	64
Figura 35. Ganancia de calor en la orientación Norte .....	69
Figura 36. Ganancia de calor en la orientación Sur. ....	70
Figura 37. Ganancia de calor en la orientación Este. ....	71
Figura 38. Ganancia de calor en la orientación Oeste. ....	71
Figura 39. Costo energético anual de climatización. ....	74
Figura 40. Coeficientes convectivos para muros del día más cálido (25/Julio/2018). ....	89
Figura 41. Coeficientes convectivos para muros del día más frío (05/Enero/2018). ....	89
Figura 42. Perfil de temperatura de la superficie exterior del muro inferior del día más frío (05/Enero/2018). ....	90
Figura 43. Perfil de temperatura de la superficie exterior del muro inferior del día más cálido(25/Julio/2018). ....	90
Figura 44. Perfil de temperatura de la superficie exterior del muro superior del día más frío (05/Enero/2018). ....	90
Figura 45. Perfil de temperatura de la superficie exterior del muro superior del día más cálido(25/Julio/2018). ....	90
Figura 46. Coeficientes convectivos para ventanas del día más cálido (25/Julio/2018). ....	91
Figura 47. Coeficientes convectivos para ventanas del día más frío (05/Enero/2018). ....	91
Figura 48. Perfil de temperatura de la superficie exterior de la ventana del día más cálido (25/Julio/2018). ....	92
Figura 49. Perfil de temperatura de la superficie exterior de la ventana de día más frío (05/Enero/2018). ....	92

## Lista de tablas

Tabla 1. Número del día del año. ....	24
Tabla 2. Día más cálido y más frío de cada mes (Mérida, Yucatán).....	27
Tabla 3. Propiedades físicas, térmicas y ópticas de los materiales considerados.....	30
Tabla 4. Resultados del ejercicio de verificación uno.....	43
Tabla 5. Resultados del ejercicio de verificación dos. ....	48
Tabla 6. Resultados del ejercicio de verificación tres. ....	52
Tabla 7. Resultados del ejercicio de verificación cuatro.....	56
Tabla 8. Razones de aspecto muro-ventana (WWR) evaluadas.....	59
Tabla 9. Datos considerados para la independencia temporal.....	60
Tabla 10. Resultados de la independencia temporal. ....	62
Tabla 11. Temperaturas superficiales de la fachada para el día más cálido del año (25/Julio/2018) con orientación Norte.....	63
Tabla 12. Temperaturas superficiales de la fachada para el día más frío del año (05/Enero/2018) con orientación Norte.....	63
Tabla 13. Flujos de calor máximos y mínimos al interior para el día más cálido del año (25/Julio/2018) en las cuatro orientaciones.....	66
Tabla 14. Flujos de calor máximos y mínimos al interior para el día más frío del año (05/Enero/2018) en las cuatro orientaciones. ....	67
Tabla 15. Ganancia térmica al interior para el día más cálido del año (25/Julio/2018) en las cuatro orientaciones.....	68
Tabla 16. Ganancia térmica al interior para el día más frío del año (05/Enero/2018) en las cuatro orientaciones.....	68
Tabla 17. Costo del kWh para Mérida, Yucatán. ....	73
Tabla 18. Coeficientes convectivos para la ventana al exterior. ....	90
Tabla 19. Coeficientes convectivos para muros al exterior.....	93
Tabla 20. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 1" en la orientación Norte. ....	97



Tabla 21. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 1" en la orientación Sur.....	99
Tabla 22. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 1" en la orientación Este. ....	101
Tabla 23. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 1" en la orientación Oeste. ....	103
Tabla 24. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 2" en la orientación Norte. ....	105
Tabla 25. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 2" en la orientación Sur.....	107
Tabla 26. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 2" en la orientación Este. ....	109
Tabla 27. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 2" en la orientación Oeste. ....	111
Tabla 28. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 3" en la orientación Norte. ....	113
Tabla 29. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 3" en la orientación Sur.....	115
Tabla 30. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 3" en la orientación Este. ....	117
Tabla 31. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 3" en la orientación Oeste. ....	119
Tabla 32. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 4" en la orientación Norte. ....	121
Tabla 33. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 4" en la orientación Sur.....	123
Tabla 34. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 4" en la orientación Este. ....	125
Tabla 35. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 4" en la orientación Oeste. ....	127

Tabla 36. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 5" en la orientación Norte. ....	129
Tabla 37. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 5" en la orientación Sur.....	131
Tabla 38. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 5" en la orientación Este. ....	133
Tabla 39. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 5" en la orientación Oeste. ....	135
Tabla 40. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 6" en la orientación Norte. ....	137
Tabla 41. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 6" en la orientación Sur.....	139
Tabla 42. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 6" en la orientación Este. ....	141
Tabla 43. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 6" en la orientación Oeste. ....	143
Tabla 44. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 7" en la orientación Norte. ....	145
Tabla 45. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 7" en la orientación Sur.....	147
Tabla 46. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 7" en la orientación Este. ....	149
Tabla 47. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 7" en la orientación Oeste. ....	151
Tabla 48. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 8" en la orientación Norte. ....	153
Tabla 49. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 8" en la orientación Sur.....	155
Tabla 50. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 8" en la orientación Este. ....	157

Tabla 51. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 8" en la orientación Oeste. ....	159
Tabla 52. Costo eléctrico mensual y anual para climatización para la orientación Norte (Caso 1-4). ....	161
Tabla 53. Costo eléctrico mensual y anual para climatización para la orientación Norte (Caso 5-8). ....	162
Tabla 54. Costo eléctrico mensual y anual para climatización para la orientación Sur (Caso 1-4). ....	163
Tabla 55. Costo eléctrico mensual y anual para climatización para la orientación Sur (Caso 5-8). ....	164
Tabla 56. Costo eléctrico mensual y anual para climatización para la orientación Este (Caso 1-4). ....	165
Tabla 57. Costo eléctrico mensual y anual para climatización para la orientación Este (Caso 5-8). ....	166
Tabla 58. Costo eléctrico mensual y anual para climatización para la orientación Oeste (Caso 1-4). ....	167
Tabla 59. Costo eléctrico mensual y anual para climatización para la orientación Oeste (Caso 5-8). ....	168

## Nomenclatura

$A$	Área (m <sup>2</sup> )
$cp$	Calor específico (J/kgK)
$E$	Energía (W)
$eps$	Criterio de convergencia (-)
$G$	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
$G_o$	Radiación extraterrestre (W/m <sup>2</sup> )
$G_{sc}$	Constante solar (W/m <sup>2</sup> )
$H$	Dimensión (m)
$h$	Coefficiente de transferencia de calor (W/m <sup>2</sup> K)
$kT$	Índice de claridad (-)
$Ll$	Longitud local (°)
$Ls$	Longitud estándar (°)
$n$	Número del día del año (-)
$Q$	Flujo de calor (W)
$q$	Flux de calor (W/m <sup>2</sup> )
$R$	Resistencia térmica (mK/W)
$T$	Temperatura (°C o K)
$t$	Tiempo (s)
$V_{loc}$	Velocidad del viento local (m/s)

### Letras griegas

$\alpha$	Absortancia (%)
$\beta$	Ángulo de inclinación de la superficie (°)
$\gamma$	Ángulo azimutal de superficie (°)
$\delta$	Declinación solar (°)
$\Delta t$	Paso de tiempo (s)
$\Delta x$	Espesor del volumen de control (m)
$\varepsilon$	Emitancia (%)
$\theta$	Ángulo de incidencia (°)

$\lambda$	Conductividad térmica (W/mK)
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann (W/m <sup>2</sup> K)
$\rho$	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
$\phi$	Latitud (°)
$\omega$	Ángulo horario (°)

## Subíndices

<i>amb</i>	Ambiente
<i>b</i>	Directa
<i>cielo</i>	Cielo
<i>cond</i>	Conductivo
<i>conv</i>	Convectivo
<i>d</i>	Difusa
<i>e</i>	Eléctrica
<i>emitida</i>	Emitida
<i>entra</i>	Entra
<i>ext</i>	Exterior
<i>int</i>	Interior
<i>p</i>	Punto de análisis
<i>rad</i>	Radiativa
<i>s</i>	Superficie
<i>sale</i>	Sale
<i>sistema</i>	Sistema
<i>solar</i>	Solar
<i>x</i>	Eje X
<i>y</i>	Eje Y

## Superíndices

<i>t</i>	Tiempo actual
<i>t-1</i>	Tiempo anterior

## Resumen

Se modeló numéricamente el comportamiento dinámico de una fachada (muro con ventana) bajo las condiciones climáticas de Mérida, Yucatán, México. Se evaluó la transferencia de calor a través de la fachada variando su orientación y la razón de aspecto muro-ventana (WWR, por sus siglas en inglés) con el propósito de conocer el efecto de la orientación sobre las ganancias de calor al interior, así como la WWR con la que menor ganancia térmica se obtiene.

Se modeló la fachada en las orientaciones Norte, Sur, Este y Oeste, considerando los datos climáticos del día más cálido y más frío de cada mes de un año típico de Mérida, Yucatán. Se consideraron ocho WWR, en el “Caso 1” se consideró una WWR de 0%, en el “Caso 2” de 7.7%, en el “Caso 3” de 15.4%, en el “Caso 4” de 23.1%, en el “Caso 5” de 30.8%, en el “Caso 6” de 38.5%, en el “Caso 7” de 46.2% y en el “Caso 8” de 53.8%. Se planteó el modelo matemático mediante balances de energía y se desarrolló un código computacional en lenguaje ANSI C99. Se obtuvieron las ganancias térmicas a través de la fachada y se realizó un análisis económico para obtener el consumo anual de energía para climatización.

Los resultados mostraron que para las orientaciones Norte y Sur el caso con mayor consumo eléctrico fue el “Caso 2” que muestra un costo anual para climatización de \$336.94 y \$370.22, respectivamente. Mientras que el caso con menor consumo energético fue el “Caso 8” con un costo anual para climatización de \$335.63 para el Norte y \$366.96 para la orientación Sur. Para la orientación Este el caso con mayor consumo eléctrico fue el “Caso 6” con un costo anual \$379.43, mientras que el caso con menor consumo energético fue el “Caso 7” con un costo anual para climatización de \$373.27. Finalmente, para la orientación Oeste el caso con mayor consumo eléctrico se presentó en el “Caso 7” que muestra un costo anual \$381.11, mientras que el caso con menor consumo energético es el “Caso 6” con un costo anual de \$369.78.

Se concluyó que la orientación de la fachada tiene diferentes efectos en la ganancia de calor al interior del edificio, por lo que un adecuado diseño y construcción contribuye a disminuir el consumo energético del edificio. Para la ciudad de Mérida, Yucatán, la orientación con menor ganancia de calor es la orientación Sur. Las WWR que logran reducir el costo energético para climatización para cada orientación son: 53.8% (“Caso 8”) para el Norte, 53.8% (“Caso 8”) para el Sur, 46.2% (“Caso 7”) para el Este, 38.5% (“Caso 6”) para el Oeste.

## Abstract

The dynamic behavior of a façade (wall with window) was numerically modeled under the climatic conditions of Mérida, Yucatán, México. The heat transfer through the façade was evaluated by varying its orientation and the window to wall ratio (WWR) in order to know the effect of the orientation on the heat gains to the interior, thus as the WWR with which the lowest thermal gain is obtained.

The façade was modeled in the North, South, East and West orientations, considering the climatic data of the warmest and coldest day of each month of a typical year in Mérida, Yucatán. Eight WWR were considered, in “Case 1” a WWR of 0% was considered, in “Case 2” of 7.7%, in “Case 3” of 15.4%, in “Case 4” of 23.1%, in the “Case 5” of 30.8%, in the “Case 6” of 38.5%, in the “Case 7” of 46.2% and in the “Case 8” of 53.8%. The mathematical model was proposed using energy balances and a computer code was developed in ANSI C99 language. The thermal gains were obtained through the façade and an economic analysis was carried out to obtain the annual energy consumption for air conditioning.

The results showed that for the North and South orientations, the case with the highest electricity consumption was “Case 2”, which shows an annual cost for climatization of \$ 336.94 and \$ 370.22, respectively. While the case with the lowest energy consumption was “Case 8” with an annual cost for air conditioning of \$ 335.63 for the North and \$ 366.96 for the South. For this orientation, the case with the highest electricity consumption was “Case 6” with an annual cost of \$ 379.43, while the case with the lowest energy consumption was “Case 7” with an annual cost for air conditioning of \$ 373.27. Finally, for the West orientation, the case with the highest electricity consumption was presented in "Case 7" which shows an annual cost of \$ 381.11, while the case with the lowest energy consumption is "Case 6" with an annual cost of \$ 369.78.

It was concluded that the orientation of the façade has different effects on the heat gain inside the building, so proper design and construction contributes to reducing the building's energy consumption. For the city of Mérida, Yucatán, the orientation with the



lowest heat gain is the South orientation. The WWR that manage to reduce the energy cost for air conditioning for each orientation are: 53.8% (“Case 8”) for the North, 53.8% (“Case 8”) for the South, 46.2% (“Case 7”) for the East, 38.5% (“Case 6”) for the West.

## Capítulo 1: Introducción

La población mundial está creciendo a un ritmo acelerado. De acuerdo con las Naciones Unidas, en la actualidad se estima una población mundial de alrededor de 7700 millones de personas, y para el 2050 se espera llegar a los 9700 millones de habitantes (Organización de las Naciones Unidas, 2019). A consecuencia del crecimiento demográfico, se espera que la demanda de energía incremente considerablemente en los siguientes años (International Energy Agency, 2007).

El crecimiento de la demanda energética es provocado por los cambios actuales en el estilo de vida a nivel mundial. La mayor parte de la energía consumida mundialmente, es generada a partir de fuentes no renovables. A nivel mundial, en el 2018, se presentó un consumo energético total de 9938 millones de toneladas equivalentes de petróleo, donde el 41% es debido al petróleo y sus derivados, el 19% a la electricidad, el 16% al gas natural, 10% a carbón mineral, 10% a biomasa y 4% a energías renovables, como se observa en la Figura 1 (Key World Energy Statistics, 2020). A consecuencia del aumento de la demanda energética, la emisión de gases de efecto invernadero también aumenta.

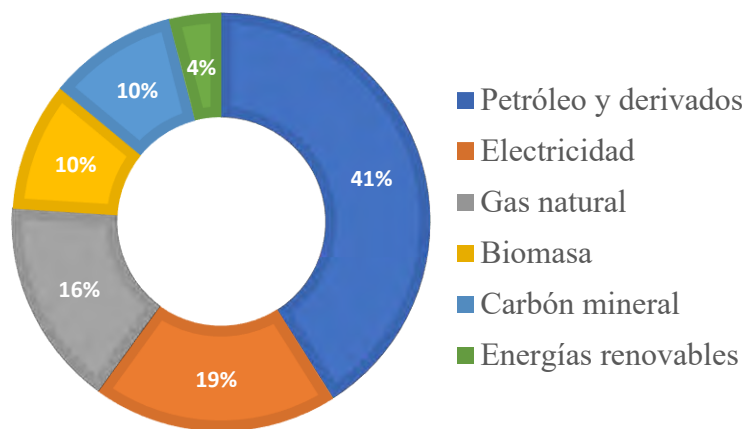


Figura 1. Consumo de energía por fuente.

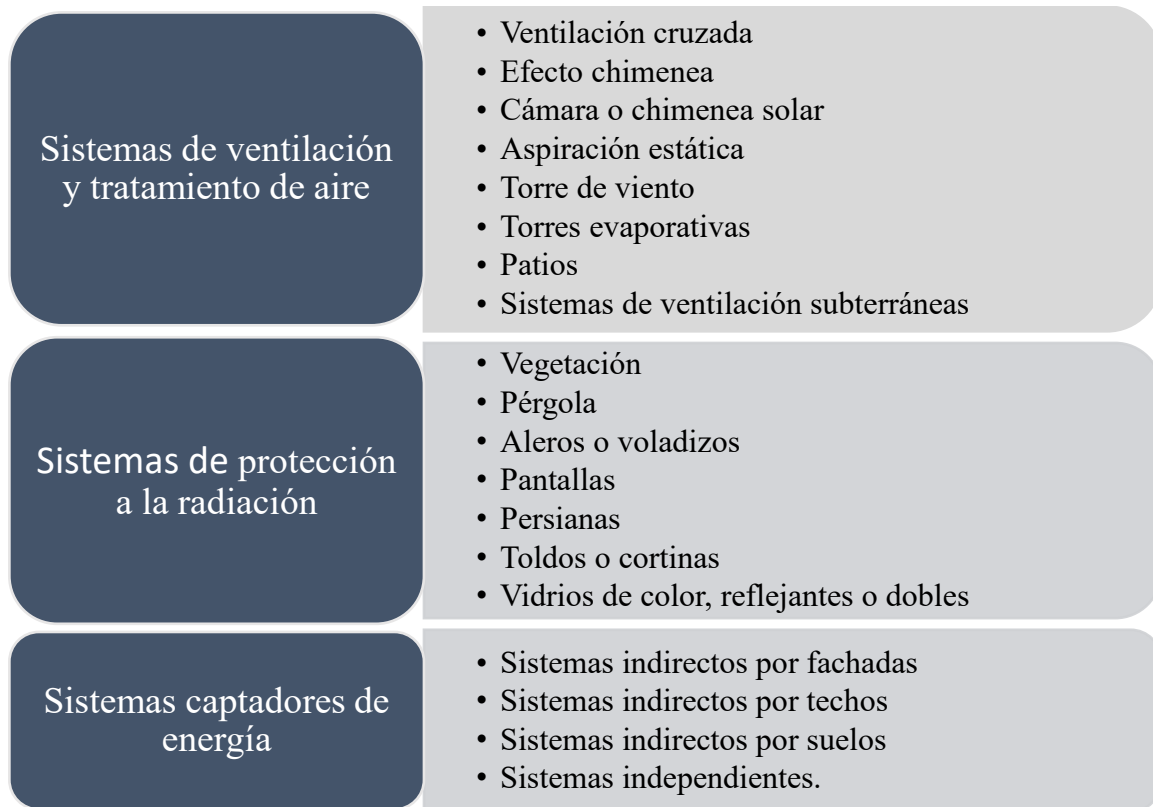
Para prevenir el crecimiento de emisiones de gases de efecto invernadero, es indispensable hacer uso de las energías renovables, así como el buscar un desarrollo sostenible. Nuevas tecnologías se han desarrollado para solucionar los problemas relacionados a la contaminación generada por la demanda de energía, entre estas soluciones esta (Dincer, 2000):

- El uso de energías renovables.
- El almacenamiento de energía.
- La reducción del consumo de energía.

Actualmente, estos tres conceptos se han estudiado ampliamente. Una de las principales estrategias para solucionar los problemas de contaminación generados por la producción de energías mediante combustibles fósiles, es la generación de energía a través de fuentes renovables. Algunos tipos de energías renovables son: la energía eólica, la energía hidráulica, la energía geotérmica y la energía solar.

La energía solar es la fuente de energía más antigua utilizada. Una de sus primeras aplicaciones fue el secado de alimentos para su conservación (Kalogirou, 2004). Hoy en día, la tecnología ha hecho que su aprovechamiento y aplicación sean mayores. La energía solar es una de las más viables de usar, ya que llega a toda la superficie terrestre. Una de sus aplicaciones, es a través de sistemas pasivos para reducir el consumo energético en edificaciones.

El término de sistema pasivo se aplica en edificios que incluyen en su diseño elementos que admiten, absorben, almacenan, y liberan energía para mantener un ambiente de confort sin necesidad de utilizar energías auxiliares (Kalogirou, 2014). Los sistemas de climatización pasivos se basan en la transformación de potenciales energéticos existentes, procedentes de fuentes naturales de energía, para el acondicionamiento de edificios, renunciando por completo a los sistemas activos (equipos mecánicos y electromecánicos de acondicionamiento) (Szokolay, 1976). Los sistemas de climatización pasivos se clasifican en tres subsistemas (Morrillón, 1993), como se muestra en la Figura 2.



**Figura 2. Clasificación de los sistemas de climatización pasivos.**

Siendo esta última clasificación el foco de interés de esta tesis: los sistemas indirectos por fachadas. Con el objetivo de reducir el consumo de energía en edificios se creó el concepto de edificios solares pasivos, donde se busca disminuir el uso de energías convencionales para climatización mediante el uso de los elementos propios de las edificaciones (orientación, tamaño de las ventanas, dispositivos de sombreado, materiales aislantes, entre otros).

### 1.1. Estado del arte

Se han realizado diferentes investigaciones con el fin de tener un desarrollo sostenible y contar con edificios solares pasivos, que aprovechen la energía ya existente mediante los elementos propios del edificio para disminuir el consumo energético convencional. A continuación, se muestran de forma cronológica algunos estudios relacionados con edificios solares pasivos.

1988

Diasty (1988) realizó un estudio teórico y experimental de un modelo de transferencias de calor tridimensional transitorio para calcular la ganancia o pérdida de energía a través de paneles de pared externos, mediante la metodología de diferencias finitas. El autor concluyó que el modelo demostró la utilidad del análisis térmico tridimensional en la evaluación del intercambio de calor.

2007

Bokel (2007) presentó un estudio teórico en el cual calculó la demanda de energía anual para calefacción, refrigeración e iluminación eléctrica en función de la posición, tamaño y forma de la ventana para un entorno de oficina en los Países Bajos. El autor concluyó que no solo las especificaciones técnicas de una fachada influyen en la demanda total de energía para calefacción, refrigeración e iluminación eléctrica, sino también el uso de dispositivos de sombreado.

2010

Hassouneh *et al.* (2010) presentaron un estudio teórico analizando la influencia de las ventanas (tamaño y tipo) sobre el desempeño energético en un edificio ubicado en Amman (Jordan). Los autores concluyeron que la mejor opción para las orientaciones Sur, Este y Oeste es una ventana doble transparente de 6 mm con una separación de 12mm y aire como fluido interno. También, concluyeron que al reducir el WWR tanto como sea posible para la orientación Norte resulta en un mayor ahorro de energía y dinero.

2011

Jiru *et al.* (2011) presentaron un estudio teórico y experimental en el cual realizaron una modelación numérica de flujo de aire y transferencia de calor para un sistema de fachada de doble capa (DSF, por sus siglas en inglés) equipado con una persiana veneciana con el fin de identificar la influencia del ángulo de apertura de la

2011

persiana ( $0^\circ$  a  $45^\circ$ ), así como la posición de esta en el espacio. Los autores concluyeron que, aunque hubo discrepancias en las predicciones cuantitativas del modelo numérico en comparación con los experimentos, las temperaturas del aire de la cavidad, el vidrio y las persianas predichas utilizando el modelo de modelación bidimensional siguieron la tendencia de los datos experimentales.

2013

Susorova *et al.* (2013) desarrollaron un modelo matemático de una pared exterior cubierta con vegetación para evaluar los efectos térmicos de las plantas sobre la transferencia de calor a través de las fachadas de los edificios. Los resultados mostraron que los parámetros climáticos más importantes a considerar son: la radiación solar, la velocidad del viento, la humedad relativa y la temperatura exterior. Los autores concluyeron que estas mejoras son especialmente destacadas en climas predominantemente cálidos con alta radiación solar y baja velocidad del viento.

2014

Mandilaras *et al.* (2014) presentaron una evaluación comparativa entre el poliestireno expandido y el panel de aislamiento al vacío como sistemas compuestos de aislamiento térmico externo (ETICS, por sus siglas en inglés). Para realizar la evaluación se utilizaron técnicas experimentales y teóricas. Los autores concluyeron en que las paredes de paneles aislados al vacío muestran una resistencia térmica significativamente mayor al poliestireno expandido (123% mayor).

Voellinger *et al.* (2014) presentaron un estudio teórico y experimental enfocado en el desarrollo de elementos de fachada compuestos, delgados y de carga con un aislamiento térmico de alto rendimiento. Se realizó un estudio sobre las propiedades aislantes de los materiales, así como el grosor de la pared de la fachada. Los autores concluyeron que los paneles de aislamiento al vacío son una solución viable para crear elementos prefabricados más delgados que pueden ser utilizados en la construcción de viviendas y edificios

2015

Kull *et al.* (2015) presentaron un estudio teórico examinando el rendimiento energético de diferentes tipos de ventanas. Para ello realizaron el balance energético del acristalamiento de ventanas en diferentes orientaciones considerando un clima nórdico. Los resultados presentados indican que un acristalamiento con valores de

2015

transmitancia térmica ( $U$ ) de  $0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$  y una transmitancia solar ( $\tau$ ) de  $0.47$  tiene un balance energético positivo cuando la fachada está orientada al este y al oeste, acristalamientos con  $U= 0.69, 1.0$  y  $0.9 \text{ W/m}^2\text{K}$ , y  $\tau=0.62, 0.60$  y  $0.52$  permiten ganancias de energía para ventanas orientadas al sur, mientras que para la fachada norte el balance de energía siempre resulta en pérdidas. Los autores concluyeron que, para la maximización del rendimiento energético y eficiencia económica, se deben considerar ciertas condiciones en el diseño de edificaciones, como lo es el tipo de acristalamiento y orientación de las fachadas.

Yang *et al.* (2015) realizaron el análisis teórico sobre el impacto de diferentes WWR sobre la energía consumida para calefacción y enfriamiento, y la energía total consumida en un edificio residencial en tres ciudades distintas donde se presentan climas cálidos en verano y fríos en invierno. Los autores concluyeron que la disminución de la WWR reduce la energía total consumida para la climatización. También, se concluyó que el uso de ventanas de baja emisividad ayuda a reducir el consumo energético total del recinto.

2016

Amaral *et al.* (2016) realizaron un estudio paramétrico para conocer las dimensiones óptimas de una ventana basadas en el rendimiento térmico de una habitación de referencia ubicada en la región de Coimbra. Los resultados presentaron valores óptimos de WWR de  $35, 16, 2$  y  $14\%$  para las orientaciones Norte, Este, Sur y Oeste, respectivamente, considerando acristalamientos simples,  $44, 17, 2$  y  $14\%$  para acristalamientos dobles, y  $45, 2, 25$  y  $16\%$  para acristalamientos triples. Los autores concluyeron que, para esta ciudad, el tipo de ventana con mejor desempeño es de acristalamientos triples, especialmente en la orientación norte.

2017

Al-Ashwal y Hassan (2017) presentaron un estudio teórico para analizar el impacto de la WWR y el tipo de ventana sobre la energía total utilizada, la energía consumida por los sistemas de iluminación eléctrica y la evaluación de los posibles ahorros en el consumo de energía. Los resultados mostraron una reducción del  $40\%$  al  $54\%$  en el consumo de energía eléctrica para iluminación cuando el tamaño de la ventana aumenta. Para una WWR arriba de  $50\%$  se ve un aumento en el consumo de

energía. Así mismo, demostraron que cuando se utiliza un área de ventana pequeña (5-10%), la mayor reducción de energía es proporcionada por un tipo de ventana con alta transmitancia visible. Cuando se usan ventanas más grandes (20-50%), se puede lograr una reducción de energía de aproximadamente 18% a 19% con vidrio doble transparente de baja emisividad. Los autores concluyeron en que el consumo total de energía y los posibles ahorros de energía se ven muy afectados por el valor del coeficiente de sombreado del tipo de acristalamiento y que la selección del WWR adecuado está influenciada por el tipo de ventana.

2017 Aldawoud (2017) presentó el estudio teórico del comportamiento térmico y la efectividad de varios sistemas de fachadas de vidrio para mejorar el rendimiento energético de un edificio ubicado en una ciudad con clima cálido húmedo. Como resultados se obtuvo que las ventanas dobles de baja emisividad espectralmente selectiva de 3-13-6 mm y las ventanas dobles con absorción electrocrómica de 6-6-6 mm ambas con aire como fluido interno son las que generan mejor rendimiento energético, ahorrando hasta un 60% en comparación de las ventanas transparentes simple, siendo estas las que ofrecen un rendimiento energético más bajo. El autor concluyó que la cantidad de energía de calefacción y refrigeración consumida en los edificios depende en gran medida del tipo de ventana.

Alghoul *et al.* (2017) realizaron un estudio teórico investigando la influencia de la WWR y su orientación sobre el consumo energético total, el consumo para calefacción y el consumo para enfriamiento. Los resultados mostraron que al incrementar la WWR en las orientaciones Norte, Noreste y Noroeste reduce el consumo energético de calefacción. Para las orientaciones Sur, Sureste y Suroeste el aumento de la WWR aumenta el consumo energético para enfriamiento. Los autores concluyeron que el aumento de la WWR incrementa el consumo total de energía.

Feng *et al.* (2017) presentaron un estudio teórico en el cual determinaron la WWR y la orientación óptima en relación con el consumo de energía en edificios en ciudades de clima frío. Los resultados mostraron que para lograr un ahorro de energía en áreas muy frías la WWR debe ser de entre 10% y 15% para el Este y el Oeste, de 10-22.5% para el Sur y de ser posible disminuir la WWR en el Norte siempre y cuando



las condiciones de iluminación y ventilación lo permitan. Los autores concluyeron que las orientaciones con mayor impacto sobre el consumo de energía son las orientaciones Este y Oeste, seguidas por la Sur y finalmente la Norte.

2017 Koranteng *et al.* (2017) presentaron un estudio teórico analizando el efecto de la WWR sobre el rendimiento térmico de un edificio de oficinas ubicado en Ghana. Los resultados mostraron que, para cuatro orientaciones, el valor de temperatura menor al interior se obtuvo cuando la WWR es de 30%. Para tres orientaciones, el valor menor de la temperatura se alcanzó con un WWR de 20% y para dos orientaciones el valor menor de temperatura se alcanza con un WWR de 20%, siendo temperaturas mayores a 40°C. Los autores concluyeron que se deben considerar las propiedades del acristalamiento, la orientación del edificio y un diseño sustentable para disminuir la temperatura al interior.

Marino *et al.* (2017) presentaron un estudio teórico calculando WWR óptima para minimizar el consumo energético de un edificio típico para oficinas ubicado en Italia. Los resultados mostraron que la WWR óptima considerando diferentes climas es de 23.5% para un edificio sin aislamiento térmico, WWR de 25.9% para edificios con aislamiento reforzado y transmitancia solar de la ventana de 0.634 y WWR de 31.6% para un edificio con aislamiento reforzado y transmitancia solar de 0.4. Los autores concluyeron que, aunque el consumo de energía demostró estar influenciado por las condiciones climáticas, las características de aislamiento de los edificios, la configuración de la fachada y la presencia de dispositivos de sombreado, la WWR óptima no varía notablemente si el efecto de cada factor se evalúa individualmente.

2018 Cesari *et al.* (2018) evaluaron el impacto de la WWR y tipos de acristalamiento sobre el consumo energético para calefacción y enfriamiento de un edificio. Los resultados mostraron que una WWR de 77% con ventana con transmitancia de 0.5 W/m<sup>2</sup>K y coeficiente de ganancia de calor solar de 0.45 resultó en un ahorro de energía en temporadas de calor. Una transmitancia de 3 W/m<sup>2</sup>K y coeficiente global de 0.65 presentó el mayor ahorro de energía en temporadas frías. Los autores concluyeron que un acristalamiento óptimo se tiene usando

acristalamientos con valores de transmitancia entre 1 y 2 W/m<sup>2</sup>K y coeficiente de ganancia de 0.55.

2018

Zhai *et al.* (2018) determinaron la WWR óptima considerando el consumo de energía, el confort térmico y visual de una habitación ubicada en China. Los resultados mostraron que WWR óptimas para cada orientación son: 30% Norte, 60% Sur, 50% Este y 40% Oeste. Los autores concluyeron que con este estudio se pueden tener diferentes opciones de diseño para la ventana que disminuyan el consumo energético mientras aumentan el confort térmico y visual.

Alhagla *et al.* (2019) evaluaron el impacto de la WWR sobre el consumo energético para iluminación, calefacción y enfriamiento. Se observó que para una WWR de 44.55% se obtiene la mayor iluminación natural cuando se considera vidrio claro simple. El consumo energético menor para calefacción y enfriamiento se obtiene con un vidrio doble de argón con baja emisividad. Los autores concluyeron que la variación del WWR disminuye en gran medida el uso la energía para iluminación. Sin embargo, esto aumenta el uso de energía para climatización por lo que es importante considerar las propiedades del acristalamiento.

2019

Alwetaishi (2019) presentó una investigación teórica y experimental con el objetivo de encontrar la influencia de la WWR en diferentes regiones considerando tres tipos de climas: cálido seco, cálido húmedo y moderado. Los resultados mostraron que en verano es benéfico tener áreas alargadas de ventana en lugares cálidos húmedos. En invierno no es recomendable tener WWR grandes para ninguno de los climas considerados. El autor concluyó que WWR óptimas para climas cálidos secos y cálidos húmedos no debe ser mayor del 10%. Para climas moderados la WWR no debe exceder el 20%.

Alwetaishi *et al.* (2019) publicaron un estudio teórico para examinar el impacto del aislamiento térmico, los dispositivos de sombreado, la WWR y una combinación de estos factores sobre el comportamiento energético de un edificio escolar en un clima cálido seco. Los resultados mostraron una reducción en el consumo energético cuando se considera una transmitancia de 0.32 W/m<sup>2</sup>K y un

aislamiento térmico de 90 mm. Las WWR óptimas para cada orientación son: menor al 35% para el Noroeste, menor al 20% para el Suroeste y menor al 25% para el Sureste. Los autores concluyeron que la orientación podría afectar significativamente el rendimiento térmico, especialmente en las habitaciones orientadas al Sur.

Bhandari y Sundaram (2019) evaluaron el impacto de la WWR sobre el consumo energético para iluminación, calefacción y enfriamiento. Los resultados mostraron que el menor consumo energético se tiene cuando la WWR es de 20% (sin considerar dispositivo de sombreado) y 60% (considerando los dispositivos de sombreado). Los autores concluyeron que el factor más importante a considerar es el tipo de acristalamiento, seguido por la WWR y el uso de dispositivos de sombreado.

2019 Elghamry y Hassan (2019) presentaron un estudio teórico y experimental investigando el impacto de los parámetros de las ventanas (forma, diseño, tamaño, posición y orientación) sobre el confort térmico y el consumo energético de un edificio ubicado en un clima cálido semiárido. Los resultados obtenidos mostraron que las orientaciones Este y Oeste presentan gran similitud. Sin embargo, se aprecian diferencias sobre las paredes con orientación Norte y Sur. La pared orientada al Norte presenta el consumo energético mínimo, mientras que la pared orientada al Sur presenta el consumo energético máximo. Los autores concluyeron que se puede reducir hasta un 24% del consumo energético con WWR de entre 20% a 30%, y controlando la orientación, la relación de ventana ancho/alto y la posición de la ventana respecto a la pared.

Pathirana *et al.* (2019) presentaron un estudio teórico evaluando los efectos de forma, zona, orientación y WWR sobre la energía requerida para iluminación y el confort térmico en casas naturalmente ventiladas ubicadas un clima cálido húmedo. Los resultados mostraron que el efecto de la forma del edificio sobre el confort térmico no presenta una diferencia significativa. No obstante, se tuvo que una WWR de 20% ofrece el mejor confort térmico. Una WWR de entre 60% y 80% disminuye el consumo energético para iluminación. Los autores concluyeron que un edificio de forma rectangular con escaleras en el centro proporcionará el confort térmico más alto cuando se tiene una WWR de 20%.

Potrc *et al.* (2019) realizaron un estudio teórico para determinar la WWR óptima considerando las orientaciones Sur, Sureste y Suroeste de una casa familiar. Los resultados mostraron que las WWR óptimas son de 38-42% para el Sur, 0-20% para el Sureste y 0-24% para el Suroeste. Los autores concluyeron que mientras más bajo sea el valor de conductividad térmica del acristalamiento más área de ventana se puede tener en la fachada.

Shaeri *et al.* (2019) realizaron un estudio teórico para determinar la WWR óptima considerando diferentes orientaciones y tres climas diferentes: cálido húmedo, cálido seco y frío. El análisis de los resultados mostró que conforme la WWR aumenta también lo hacen las ganancias de calor en los tres climas. Los autores concluyeron que las WWR óptimas son: entre 20-30% para el Norte en las tres ciudades; 20-30%, 10-30% y 20-50% en la fachada Sur para la ciudad con clima cálido húmedo, cálido seco y frío respectivamente. Para las fachadas Este y Oeste en el clima cálido húmedo la WWR óptima es de entre 30-50%, para el clima cálido seco del 40-70% y para el clima frío del 20- 60% para el Este y del 40-70% en el Oeste.

Tao *et al.* (2019) publicaron un estudio teórico analizando el efecto del uso de diferentes tipos de ventanas en edificios residenciales basados en el uso de calentamiento intermitente. Los resultados mostraron que el consumo de electricidad anual aumenta cuando el coeficiente de transferencia de calor y la WWR aumentan. Los autores concluyeron que el efecto de la WWR sobre el consumo de energía es menor que el efecto del coeficiente de transferencia de calor de la ventana.

Troup *et al.* (2019) realizaron un estudio teórico analizando la influencia de la WWR sobre el consumo energético en un edificio de oficinas. Los resultados mostraron que el 35% de la energía total consumida por el edificio no se ve afectada por la WWR ya que esta depende del uso de artículos electrónicos, y que a mayor área de ventana mayor es el consumo energético para climatización. Los autores concluyeron que existe una relación entre la WWR y la iluminación, ventilación y consumo energético del edificio.

2019

Xue *et al.* (2019) publicaron un estudio teórico determinando la WWR óptima considerando el consumo energético para iluminación, calefacción y enfriamiento. En los resultados se observó que un escenario óptimo se obtiene cuando se utiliza un dispositivo de sombreado que cubra la ventana en sus cuatro lados llegando a utilizar WWR de 56%, 60%, 60% y 78% para la fachada Oeste, Norte, Este y Sur, respectivamente. Los autores concluyeron que las orientaciones Este y Oeste presentan mayor carga (155 kWh/m<sup>2</sup>), mientras que las orientaciones Norte y Sur presentan menor carga (140.2 kWh/m<sup>2</sup>). También, observaron que el dispositivo de sombreado con mejor desempeño es aquel que rodea por completo la ventana.

2020

Asfour (2020) presentó un estudio teórico investigando el impacto que tiene el uso de patios centrales y atrios sobre la iluminación natural y el rendimiento energético en edificios de oficinas, considerando diferentes WWR y uso de dispositivos de sombreado. Los resultados mostraron que las mayores ganancias de calor se obtenían cuando el edificio tenía un patio central con un valor de WWR del 50%. El autor concluye que la estrategia más eficiente considerando tanto la iluminación natural como el rendimiento energético es el uso de dispositivos de sombreado y una WWR de 30%.

Bas (2020) determinó la WWR óptima considerando el confort térmico y visual reduciendo el consumo energético de un edificio de oficinas. Los resultados mostraron que la WWR óptima para cada orientación es de 30% para el Sur, 60% para el Norte, 40% para el Este y 30% para el Oeste. Los autores concluyeron que para mejorar el confort visual dentro de la oficina se puede hacer uso de cortinas o persianas, siendo más fácil variar la luz artificial que la natural.

Chi *et al.* (2020) realizaron un estudio teórico para determinar la WWR óptima considerando el confort visual y térmico, así como la velocidad del aire en el interior de una vivienda típica china. Obtuvieron que la WWR óptima para un confort visual es de 35-90%, para el confort térmico de 10-53% y para una velocidad del viento confortable de 10-90%. Los autores concluyeron que una WWR óptima que cubra los tres objetivos es del 35 al 52%.

2020

Gastines y Pattini (2020) presentaron un estudio teórico investigando la influencia del tipo de ventana, locación, orientación, geometría del edificio WWR con el fin de identificar los factores con más influencia sobre las ganancias y pérdidas de energía a través de las ventanas. Los resultados mostraron que el factor principal que contribuye en el aumento de energía para climatización es el tipo de ventana. Los autores concluyeron que para aumentar la eficiencia energética de un edificio el factor más determinante es el tipo de ventana, seguido por la locación (clima del lugar), orientación, y las características envolventes del edificio.

Pilechiha *et al.* (2020) presentaron un estudio teórico evaluando la calidad de visión en edificios de oficinas, aplicando un método de optimización para minimizar el consumo de energía, maximizar la luz del día y el confort visual. Los resultados mostraron que se obtiene un consumo total de energía mínimo cuando se tiene una WWR óptima de 42.75% y una calidad de visión de 81.51%. Los autores concluyeron que deben hacerse estudios adicionales considerando el impacto de las estrategias de sombreado y control de la luz (persianas, cortinas, tipo de ventana, etc.).

Yeom *et al.* (2020) determinaron la WWR óptima considerando el desempeño de los trabajadores y el consumo energético en un edificio de oficinas. Los resultados mostraron que al aumentar la WWR también aumenta el desempeño laboral de los trabajadores, obteniendo WWR óptimas de 40.95% para el Norte, 50.58% para el Sur, 44.47% para el Este y 44.37% para el Oeste. Los autores concluyeron que el tener una adecuada WWR ayuda a los trabajadores a mejorar su desempeño, reduciendo el estrés, frustración y ayuda a tener una mejor noción del tiempo.

2021

Ahmed y Kurnitski (2021) desarrollaron una ecuación para la evaluación del aislamiento óptimo de la envolvente del edificio en diferentes climas. Se desarrolló un sistema de ecuaciones que ayudan a determinar la WWR, el tipo de acristalamiento y el costo energético óptimo válido para cuatro diferentes climas. Los autores concluyeron que el sistema de ecuaciones presenta un error de entre 5% y 7% considerando diversos climas.

2021

Sadafi *et al.* (2021) presentaron la evaluación del diseño de una fachada en un clima templado y húmedo con el fin de determinar el diseño óptimo para ahorrar energía. Los resultados indicaron que las fachadas de edificio construidos con marcos ligeros de acero, paneles 3D y bloques de hormigón celular esterilizados en autoclaves son más efectivos que los otros materiales investigados, reduciendo hasta en un 45% la energía total consumida. Los autores concluyeron que la WWR debe ser estudiada considerando el consumo energético y el confort visual, también sugirieron que para un mayor ahorro de energía las ventanas deben estar cerradas durante horas de calor y abiertas durante la noche ya que aumenta la ventilación natural.

Sahu *et al.* (2021) realizaron un estudio teórico para determinar la WWR óptima sobre el consumo energético de un edificio ubicado en una zona de clima templado. Los resultados mostraron que las WWR óptimas para cada orientación son: 20% para el Norte, 18% para el Sur, 12% para el Este y 12% para el Oeste. Los autores concluyeron que el uso de una WWR óptima puede disminuir el consumo energético hasta en un 19.96%.

De acuerdo con la revisión bibliográfica a la fecha, se han realizado estudios teóricos analizando la influencia de la WWR, tipo de acristalamiento, materiales aislantes y dispositivos de sombreado sobre el consumo energético y visual dentro de las edificaciones. Estos estudios están enfocados principalmente en edificios de oficinas en diferentes partes del mundo y por lo tanto diferentes climas y radiación solar incidente.

Para las condiciones climáticas de la República Mexicana se encuentran estudios como el de Barrios *et al.* (2010) quienes realizaron la modelación numérica de la transferencia de calor en estado transitorio a través de un muro y techo de una edificación no climatizada, proporcionando así, una guía para la selección de materiales y configuraciones de la envolvente que ayudan a lograr condiciones de confort en el interior de una edificación. Pérez *et al.* (2011) presentaron un estudio numérico de la resistencia térmica en estado permanente en dos tipos de concreto hueco (con y sin aislante térmico) obteniendo así la configuración del bloque de concreto con mayor resistencia térmica. Rosas *et al.* (2015) presentaron una comparativa de cuatro fachadas con diferentes tipos de bloques huecos para muros y tres para losetas, obteniendo el costo energético de cada uno de los sistemas.

Algunos trabajos desarrollados en CENIDET han evaluado la transferencia de calor en componentes de edificaciones, tal como el estudio de Rodríguez (2018), quién presentó un estudio numérico para evaluar el desempeño térmico de un techo plano con material de cambio de fase, mientras que González (2017) presentó el estudio numérico de la transferencia de calor en un sistema de ventana de doble acristalamiento. Castillo (2010) presentó una metodología para la evaluación del desempeño térmico de componentes de edificaciones con masa térmica reducida. Sin embargo, estos trabajos evalúan los componentes de la edificación por separado y no el conjunto muro-ventana

#### 1.1.1. Conclusión de la revisión bibliográfica

Se han realizado estudios teóricos y experimentales para determinar la mejora en la eficiencia energética en edificaciones, considerando la WWR, diferentes tipos de materiales de construcción y dispositivos de sombreado. Estos estudios se enfocaron principalmente a edificios de oficinas con climas variados y con diferentes valores de radiación solar, presentando ahorros de energía de acuerdo al clima establecido. No obstante, estos estudios se han realizado fuera de la República Mexicana por lo que no se tiene WWR óptima para los climas específicos del país, así como para su tipo de vivienda.

## 1.2. Planteamiento del problema

En México el crecimiento de la población ha ido aumentando exponencialmente. Según las estadísticas, en el 2018 se tuvo una población de 125 millones de personas en territorio nacional (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2020). En el mismo año, se publicó el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero en donde se presenta que durante el año 2018 se emitieron 532830.9 Gg de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), de los cuales 18088.9 Gg corresponden a lo emitido por el uso de energía en el sector residencial y 11453.6 Gg corresponde a lo emitido por el uso de energía destinada al acondicionamiento del aire (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2019).

La República Mexicana cuenta con climas cálidos y templados en la mayor parte del territorio, y con estaciones predominantemente soleadas todo el año. En lugares cálidos como



en valles, zonas costeras y suroeste del país, el uso de aire acondicionado en edificios es indispensable en algunas zonas, lo que implica una gran emisión de dióxido de carbono, y que continuará creciendo a la par que lo hará la población. Para prevenir el crecimiento de emisiones de gases de efecto invernadero, ha surgido el uso de algunas energías alternativas como: eólica, solar, y geotérmica. Sin embargo, no todas las regiones del país cumplen con características adecuadas para el aprovechamiento de la energía eólica y geotérmica. No obstante, la energía solar es explotable en todo el territorio nacional.

En México, el problema de la autoconstrucción conlleva una problemática de consumo excesivo de energía eléctrica para generar un ambiente confortable en el interior de estas viviendas. Es así, que el objetivo de esta investigación es realizar un estudio térmico de la fachada típica mexicana considerando diferentes WWR y variando su orientación en Norte, Sur, Este y Oeste, bajo las condiciones climáticas representativas de la ciudad de Mérida, Yucatán. Con el propósito de analizar la ganancia de calor hacia el interior de un edificio y determinar la orientación con menor ganancia térmica.

### 1.3. Objetivo general

Modelar numéricamente el comportamiento térmico dinámico de un muro con ventada (fachada) bajo condiciones climáticas de Mérida, Yucatán ubicada en la República Mexicana.

#### 1.3.1. Objetivos específicos

- Aprender la metodología de balances de energía.
- Aprender a modelar el fenómeno de conducción de calor con condiciones de frontera convectivas y radiativas en un medio opaco (tabique).
- Desarrollar un código numérico para simular la transferencia de calor por conducción multidimensional y transitorio para una ventana (hoja de vidrio).
- Acoplar los códigos computacionales de los muros opacos con la ventana.
- Seleccionar una región de clima cálido de la República Mexicana.
- Realizar el estudio paramétrico de una pared con ventana en un clima cálido de México.

#### 1.4. Alcance

Desarrollar un código computacional para el modelado de una fachada (muro de tabique con ventana) en estado transitorio mediante balances de energía. Realizar el estudio paramétrico considerando las condiciones climatológicas de la ciudad de Mérida, Yucatán, México. Evaluar diferentes WWR y cuatro orientaciones y su efecto sobre las ganancias térmicas al interior.

#### 1.5. Limitaciones

Esta investigación se limitó a evaluar la transferencia de calor mediante balances de energía. El clima considerado solo caracteriza una ciudad de la República Mexicana y se utilizaron los datos climáticos de los días más relevantes de cada mes, es decir el día más cálido y más frío, de un año representativo. Los materiales de construcción considerados se limitaron al uso de tabique rojo recocido y al vidrio claro de 6 mm.

## Capítulo 2: Modelo físico y matemático de una pared con una ventana

En este capítulo se presenta el marco teórico para el desarrollo de la investigación. Se describen los mecanismos de transferencia de calor y se presenta la analogía de estos con la teoría de circuitos. Posteriormente, se explica la metodología de balances de energía (Sección 2.1). Se presenta la metodología para la descomposición de la radiación global incidente en cuatro orientaciones, Norte, Sur, Este y Oeste, sobre una pared vertical (Sección 2.2). Los datos climáticos utilizados son proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), presentados en la Sección 2.3. Finalmente, se establece el modelo físico (Sección 2.4) y matemático (Sección 2.5) del sistema a analizar.

### 2.1. Fundamentos teóricos

El calor es la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperaturas. La disciplina que se encarga de estudiar este fenómeno es la transferencia de calor. La transferencia de calor, a diferencia de la termodinámica, se enfoca en evaluar las interacciones energéticas en el tiempo (Incropera y DeWitt, 1996).

La transferencia de calor está presente en los sistemas de ingeniería y en aspectos de la vida cotidiana. Algunos procesos donde este fenómeno desempeña un papel vital son: la producción de energía, aire acondicionado, reactores, aeronaves, incluso en el mismo cuerpo humano (Patankar, 1981). La transferencia de calor juega un papel importante en el diseño de hogares eficientes respecto al uso de la energía, los cuales minimizan las pérdidas de calor en invierno, y las ganancias de calor en verano. Esto es posible gracias al análisis de los materiales y espesores óptimos para paredes y techos de la construcción.

### 2.1.1. Principios generales de transferencia de calor

La transferencia de calor se produce cuando existe una diferencia de temperaturas entre los medios involucrados. Existen tres mecanismos de la transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

La conducción es la transferencia de energía en el que tiene lugar el intercambio de calor desde una región con temperatura alta a la región con temperatura baja en un medio sólido (Özisik, 1985). La rapidez de la conducción de calor a través de un medio depende de su configuración geométrica, su espesor y el material del que este hecho, así como la diferencia de temperaturas a través de él. Este fenómeno se representa por la ley de Fourier, Ec. 2.1:

$$Q_{cond} = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el fluido adyacente como resultado de una diferencia entre las temperaturas. La convección puede ser forzada si el fluido se mueve a causa de agentes externos, o natural si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por la diferencia de densidades debidas a la variación de la temperatura del fluido, (Oosthuizen y Naylor, 1999). El flujo de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura, y se expresa por la ley de enfriamiento de Newton, Ec. 2.2:

$$Q_{conv} = -hA(T_s + T_{amb}) \quad (2.2)$$

La radiación es la energía emitida por cualquier cuerpo en forma de ondas electromagnéticas al estar a una temperatura por encima del cero absoluto. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere de la presencia de un medio para desplazarse. El flujo de calor por radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura se expresa por la ley de Stefan-Boltzmann Ec. 2.3:

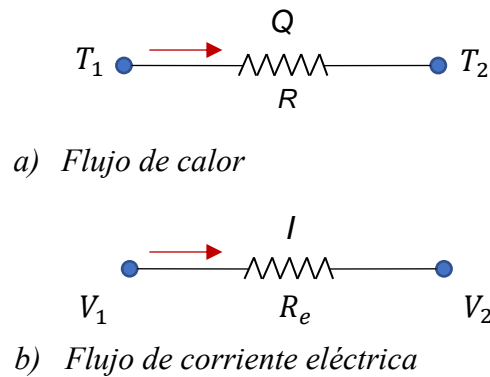
$$Q_{emitida} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (2.3)$$

Sin embargo, si la superficie intercambia radiación con la bóveda celeste, se tiene la Ec. 2.4:

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{cielo}^4) \quad (2.4)$$

### 2.1.2. Circuitos térmicos

La diferencia de temperaturas es la fuerza impulsora para la transferencia de calor, así como la diferencia de potencial es la fuerza impulsora para el flujo de corriente eléctrica. De esta analogía nace el concepto de circuito térmico, en el cual el flujo de calor a través de una capa o medio corresponde a la corriente eléctrica, la resistencia térmica a la resistencia eléctrica y la diferencia de temperaturas a la caída de tensión en el medio (Cengel y Ghajar, 2011). La Figura 3 muestra la analogía entre un circuito térmico (Figura 3.a) y un circuito eléctrico (Figura 3.b).

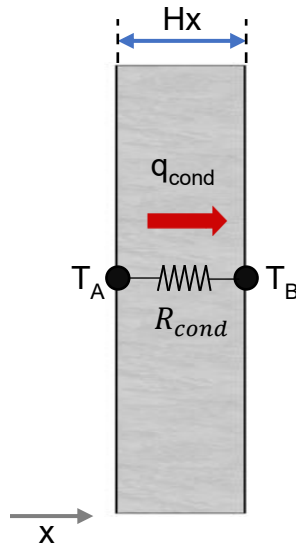


**Figura 3. Analogía entre circuito térmico y circuito eléctrico.**

La ley de Ohm establece que la diferencia de potencial ( $V$ ) que se aplica en los extremos de un material conductor es directamente proporcional a la intensidad de la corriente ( $I$ ) que circula por el conductor. Usando la analogía del circuito térmico se obtiene la Ec. 2.5 para el flujo de calor:

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{R} \quad (2.5)$$

Donde  $R$  representa la resistencia térmica del materia o fluido, y depende del mecanismo de transferencia de calor que se esté analizando. La Figura 4 muestra el flux de calor por conducción a través de una pared plana (Ec. 2.6) y la resistencia térmica por conducción, Ec. 2.7.

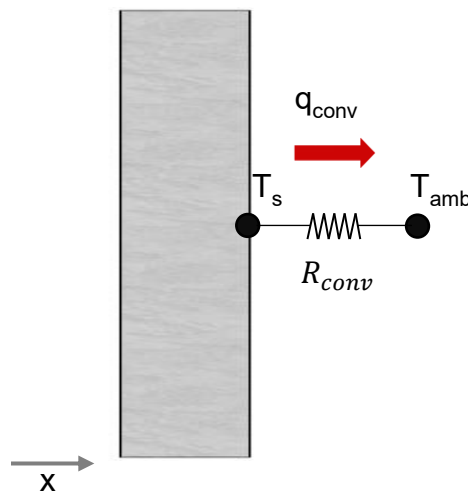


**Figura 4. Flux de calor en una pared plana.**

$$q_{cond} = \frac{T_A - T_B}{R_{cond}} \quad (2.6)$$

$$R_{cond} = \frac{Hx}{\lambda} \quad (2.7)$$

Si se considera la transferencia de calor por convección desde una superficie sólida a una temperatura ( $T_s$ ) hacia un fluido cuya temperatura en un punto lejano a la superficie es ( $T_{amb}$ ), con un coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ ) (Figura 5) se tiene el flux de calor por convección (Ec. 2.8) y la resistencia térmica por convección, Ec. 2.9.



**Figura 5. Flux de calor convectivo de una superficie hacia su alrededor.**

$$q_{conv} = \frac{T_s - T_{amb}}{R_{conv}} \quad (2.8)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{h} \quad (2.9)$$

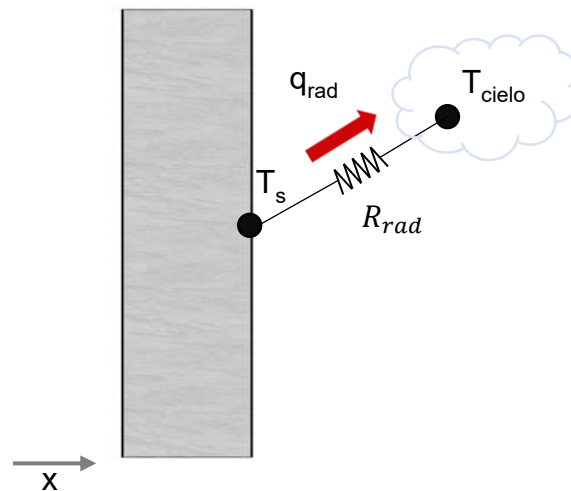
La Figura 6 muestra la razón de la transferencia de calor por radiación entre una superficie de emisividad ( $\varepsilon$ ) y temperatura ( $T_s$ ), y las superficies circundantes a temperatura promedio ( $T_{cielo}$ ), se expresa el flux de calor con la Ec. 2.10:

$$q_{rad} = \frac{T_s - T_{cielo}}{R_{rad}} \quad (2.10)$$

Donde la resistencia térmica por radiación está dada por la Ec. 2.11, y el coeficiente de transferencia de calor por radiación se expresa en la Ec. 2.12:

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad}} \quad (2.11)$$

$$h_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^2 + T_{cielo}^2) (T_s + T_{cielo}) \quad (2.12)$$



**Figura 6. Flux de calor radiativo de una superficie hacia su alrededor.**

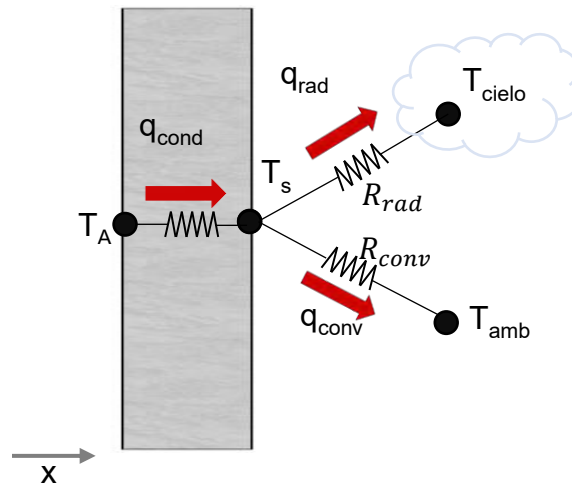
### 2.1.3. Balances de energía

La primera ley de la termodinámica, también conocida como principio de conservación de energía, establece que la energía no se puede crear ni destruir, solo se transforma. El balance de energía para cualquier sistema que pasa por un proceso se expresa como el cambio neto

en la energía del sistema es igual a la diferencia de la energía que entra y la que sale, Ec. 2.13 (Cengel y Ghajar, 2011).

$$E_{entra} - E_{sale} = \Delta E_{sistema} \quad (2.13)$$

Por ejemplo, si se considera el muro exterior de una casa y se realiza el balance de energía, considerando condiciones estables, sobre un nodo en su superficie exterior (Figura 7) se obtiene que del lado izquierdo al nodo (muro) existe transferencia de calor por conducción, mientras que, del lado derecho al nodo (ambiente exterior) existe transferencia de calor por convección y por radiación. Realizando el balance de energía se tiene la Ec. 2.14.



**Figura 7. Interacción energética entre la superficie exterior de una casa y sus alrededores.**

$$q_{cond} = q_{conv} + q_{rad} \quad (2.14)$$

## 2.2. Radiación solar

Los datos climáticos considerados fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Las bases de datos muestran el registro de la radiación global incidente sobre una superficie horizontal a intervalos de 10 minutos. Para realizar el estudio de la transferencia de calor sobre una fachada fue necesario conocer la radiación global incidente sobre una superficie vertical y considerando cuatro orientaciones: Norte, Sur, Este y Oeste.



Para calcular la radiación global incidente sobre una superficie orientada se utilizó la metodología presentada por Kalogirou (2014).

### 2.2.1. Ángulo de incidencia

Para las aplicaciones de energía solar es necesario conocer la trayectoria aparente del Sol en el cielo, así como su posición en un determinado instante. Para determinar el ángulo de incidencia ( $\theta$ ), ángulo con el que los rayos solares inciden sobre una superficie, se determinó la declinación solar ( $\delta$ ), el ángulo azimutal de superficie ( $\gamma$ ) y el ángulo horario ( $\omega$ ).

La declinación solar ( $\delta$ ) es la distancia angular de los rayos del sol al Norte o Sur del ecuador, considerándose positiva hacia el Norte y negativa hacia el Sur. La declinación se calculó mediante la Ec. 2.15.

$$\delta = 23.45 \text{sen} \left[ \frac{360(284+n)}{365} \right] \quad (2.15)$$

Donde  $n$  representa el número del día del año, la Tabla 1 muestra como calcular el valor  $n$ .

**Tabla 1. Número del día del año.**

Mes	Número del día del año (n)
Enero	DD
Febrero	31+DD
Marzo	59+DD
Abril	90+DD
Mayo	120+DD
Junio	151+DD
Julio	181+DD
Agosto	212+DD
Septiembre	243+DD
Octubre	273+DD
Noviembre	304+DD
Diciembre	334+DD

DD corresponde al día del mes.  
Ejemplo: para el 8 de octubre,  $n=273+8=281$ .

El ángulo azimutal de superficie ( $\gamma$ ) es el ángulo de orientación de la normal del plano y la superficie del Sur. Es decir, para el Sur  $\gamma=0^\circ$ , para el Oeste  $\gamma=90^\circ$ , para el Norte  $\gamma=180^\circ$  y para el Este  $\gamma=-90^\circ$ .

El ángulo horario ( $\omega$ ) de un punto sobre la superficie terrestre se define como el ángulo a través del cual la Tierra gira para llevar el meridiano del punto directamente debajo del Sol, Ec. 2.16.

$$\omega = 15 \left( \frac{ATS}{60} - 12 \right) \quad (2.16)$$

La hora solar aparente (ATS, por sus siglas en inglés) es el tiempo en el que el movimiento angular aparente del sol atraviesa el meridiano del observador, es decir, el medio día solar. Este parámetro no suele coincidir con el tiempo local, por lo que se aplican dos correcciones: la ecuación del tiempo (E) y la corrección de longitud (CL). Debido a factores asociados con la órbita de la Tierra alrededor del Sol, la velocidad orbital de la Tierra varía a lo largo del año. Esta variación afecta la hora solar aparente con respecto al tiempo medio que mantiene un reloj, esta variación se conoce como ecuación de tiempo (E). El valor de E se obtiene mediante la Ec. 2.17 (en minutos) y está dada en función del día del año, Ec. 2.18.

$$E = 229.2 \left( \begin{matrix} 0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B \\ -0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B \end{matrix} \right) \quad (2.17)$$

$$B = \frac{360(n-81)}{364} \quad (2.18)$$

Dado que el Sol tarda 4 minutos en recorrer  $1^\circ$  de longitud se hace la corrección de longitud a la hora estándar del reloj local utilizando la Ec. 2.19.

$$CL = 4(Ls - Ll) \quad (2.19)$$

Donde Ls es la longitud estándar y Ll es la longitud local. Para Mérida la longitud estándar se consideró de  $90^\circ$  y la longitud local de  $89.6216^\circ$ . La hora solar aparente se calculó mediante la Ec. 2.20.

$$ATS = CL + E + Lst \quad (2.20)$$

Donde Lst es la hora local. Una vez que se obtuvo la declinación solar, el ángulo azimutal de superficie y el ángulo horario, se determinó el ángulo de incidencia ( $\theta$ ) utilizando la Ec. 2.21.

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{\sin\delta\sin\phi\cos\beta - \sin\delta\cos\phi\sin\beta\cos\gamma + \cos\delta\cos\phi\cos\beta\cos\omega}{\cos\delta\sin\phi\sin\beta\cos\gamma\cos\omega + \cos\delta\sin\beta\sin\gamma\sin\omega} \right) \quad (2.21)$$

En la Ec. 2.21,  $\phi$  representa la latitud que para Mérida se definió de 20.967778° y  $\beta$  es el ángulo de inclinación de la superficie, para el análisis de la fachada se consideró de 90°.

### 2.2.2. Radiación solar incidente sobre una superficie inclinada

Para la descomposición de la radiación global en sus componentes directa y difusa se utilizó la relación presentada por Erbs *et al.* (1982) la cual calcula la radiación extraterrestre, Ec. 2.22.

$$G_o = G_{SC} \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right] (\cos\phi\cos\delta\cos\omega + \sin\phi\sin\delta) \quad (2.22)$$

Donde  $G_{SC}$  corresponde a la constante solar igual a 1366.1 W/m<sup>2</sup> (ASTM-E-490-00aa, 2014). Posteriormente, se calculó el índice de claridad ( $k_T$ ) mediante la Ec.2.23, donde  $G_{solar}$  es la radiación global obtenida por la medición de la estación meteorológica. Una vez que se obtuvo el índice de claridad se evaluó la radiación difusa ( $G_d$ ) utilizando la Ec. 2.24.

$$k_T = \frac{G_{solar}}{G_o} \quad (2.23)$$

$$G_d = G_{solar} \begin{cases} 1.01 - 0.09k_T & k_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604k_T + 4.388k_T^2 - 16.638k_T^3 + 12.336 & 0.22 < k_T \leq 0.80 \\ 0.165 & k_T > 0.8 \end{cases} \quad (2.24)$$

Finalmente, se obtuvo la radiación directa  $G_b$  mediante la Ec. 2.25, la radiación directa incidente sobre el plano orientado en el ángulo azimutal de superficie con la Ec. 2.26 y la radiación global incidente global sobre cada orientación con la Ec. 2.27.

$$G_b = G_{solar} - G_d \quad (2.25)$$

$$G_{b,\gamma} = G_b \cos\theta \quad (2.26)$$

$$G_{solar,\gamma} = G_{b,\gamma} + G_d \quad (2.27)$$

### 2.3. Datos climáticos de Mérida

El estudio se realizó considerando los datos climáticos de Mérida, Yucatán, México. La ciudad se localiza a una latitud norte de  $20.967778^\circ$ ,  $89.621667^\circ$  de longitud y con una altitud de 8 metros sobre el nivel medio del mar. El clima de Mérida se clasifica como  $Aw_0$  donde la temperatura media anual es de  $26^\circ\text{C}$  (INEGI, 2005).

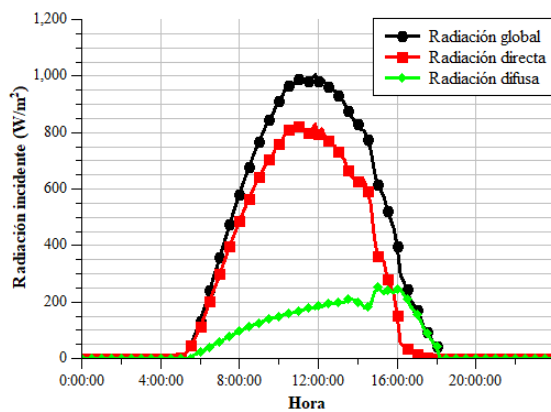
De acuerdo con la clasificación climática de Köppen el clima  $Aw$  es designado como “clima de sabana”, sin embargo, las modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen este corresponde a un clima caliente subhúmedo con lluvias en verano (García, 1981). Los datos climáticos proporcionados corresponden al año 2018, contando con la radiación global sobre el plano horizontal, la velocidad del viento y la temperatura en intervalos de 10 min. Este estudio consideró los días más representativos de cada mes, es decir, el día más cálido y más frío de cada mes. La Tabla 2 muestra la temperatura promedio del día más cálido y más frío de cada mes.

**Tabla 2. Día más cálido y más frío de cada mes (Mérida, Yucatán).**

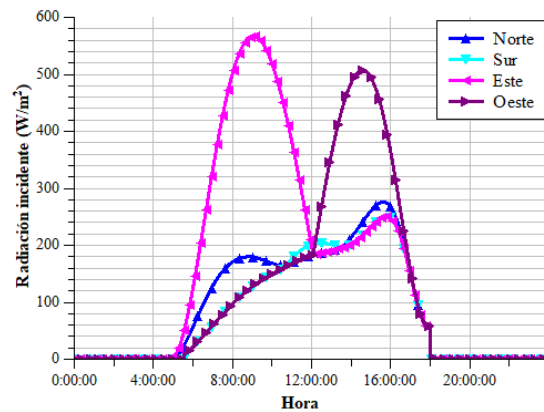
Mes	Día más cálido	Temperatura promedio ( $^\circ\text{C}$ )	Día más frío	Temperatura promedio ( $^\circ\text{C}$ )
Enero	22	26.3	5	19
Febrero	26	27.9	1	23.3
Marzo	19	30	24	25.6
Abril	7	30	16	23.8
Mayo	30	29.7	13	28.4
Junio	4	29.9	13	27.1
Julio	25	32.1	10	28.8
Agosto	10	30.5	7	29.2
Septiembre	1	29.6	22	27.8
Octubre	10	29.3	23	27.1
Noviembre	12	28.2	17	22.4
Diciembre	2	27.9	22	19.7

Los datos climáticos proporcionados están en intervalos de 10 minutos por lo que se utilizaron polinomios para ajustar la temperatura y radiación en intervalos de tiempo de cinco segundos. Asimismo, se obtuvo la radiación global incidente para cada orientación, Norte, Sur, Este y Oeste, sobre un plano vertical para el día más cálido y más frío de cada mes. En

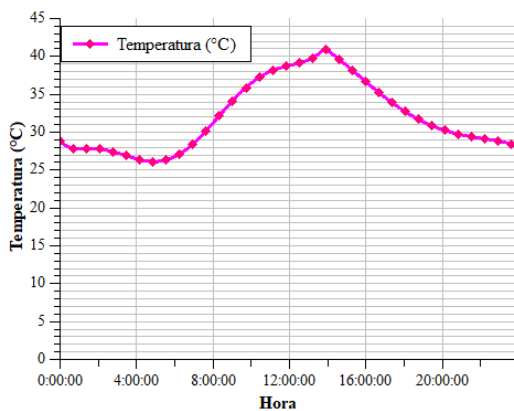
la Tabla 2 se observa que el día más cálido del año fue el 25 de julio, mientras que el día frío fue el 5 de enero. La Figura 8 muestra la gráfica de la radiación global, directa y difusa del 25 de julio, donde se aprecia que la mayor parte de la radiación se encuentra de forma directa. La Figura 10 muestra la gráfica de temperatura a lo largo del día, la Figura 11 muestra las velocidades del viento y la Figura 9 muestra la radiación incidente en cada orientación para el día más cálido del año. Se observa que las orientaciones Este y Oeste son aquellas en las que la radiación es mayor para este día (25/Julio/2018). Las Figuras 12, 13, 14 y 15 representan los datos climáticos para el día más frío del año (05/Enero/2018).



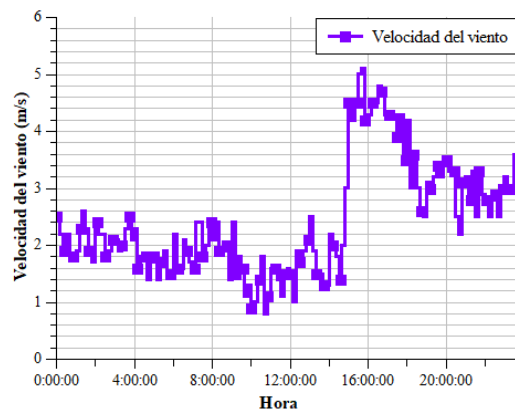
**Figura 8. Radiación global, directa y difusa del día más cálido (25/07/2018).**



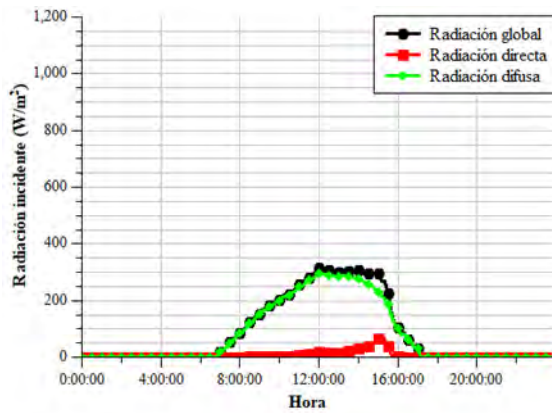
**Figura 9. Radiación incidente para cada orientación del día más cálido (25/07/2018).**



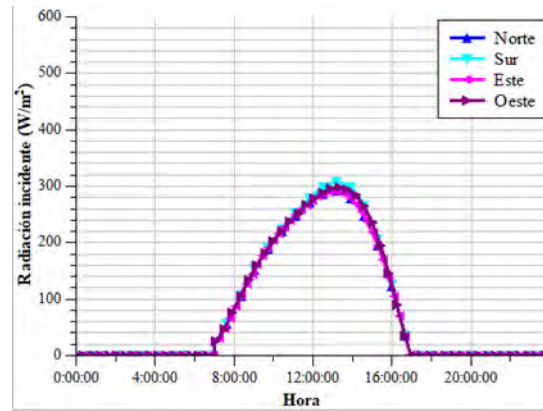
**Figura 10. Temperatura del día más cálido (25/07/2018).**



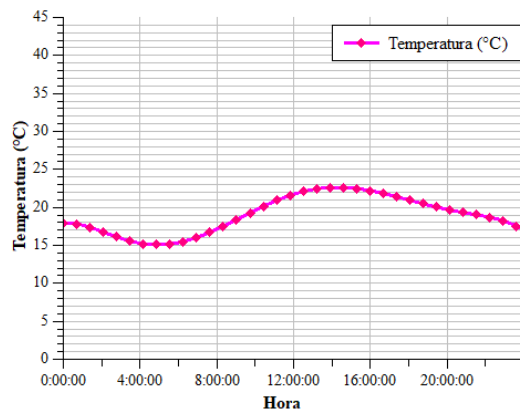
**Figura 11. Velocidad del viento del día más cálido (25/07/2018).**



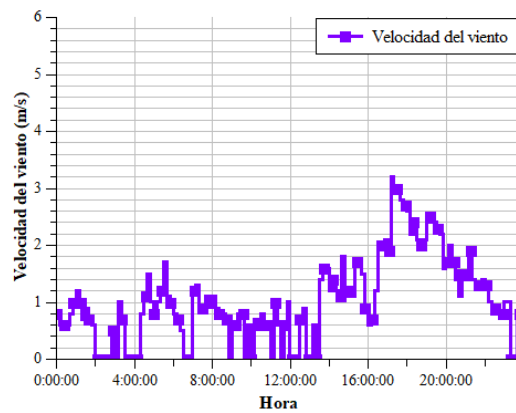
**Figura 12. Radiación global, directa y difusa del día más frío (05/01/2018).**



**Figura 13. Radiación incidente para cada orientación del día más frío (05/01/2018).**



**Figura 14. Temperatura del día más frío (05/01/2018).**

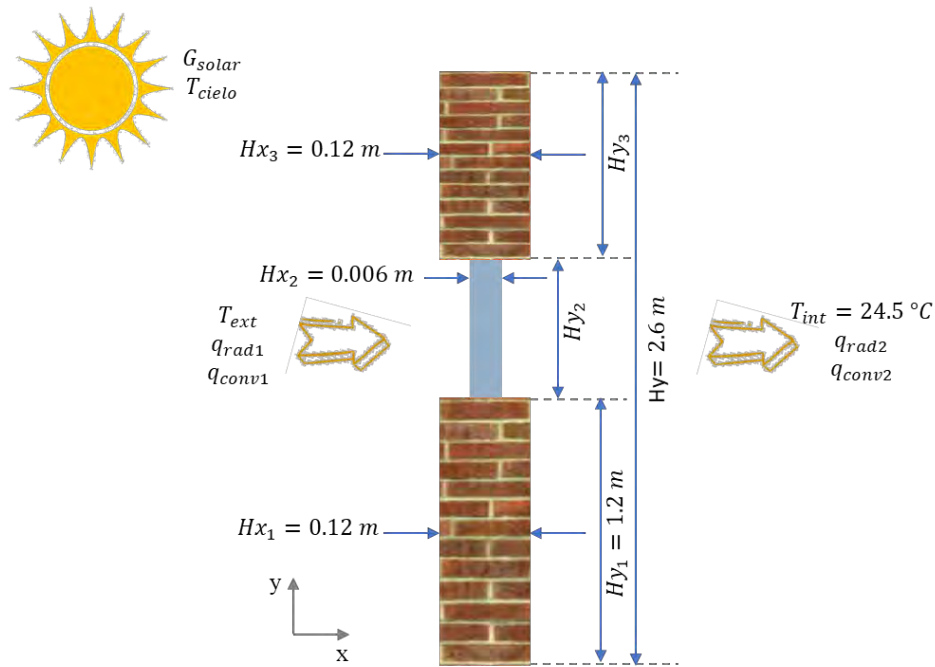


**Figura 15. Velocidad del viento del día más frío (05/01/2018).**

## 2.4. Modelo físico

Se planteó el modelo físico de un muro exterior (fachada) de la vivienda típica de México, que consta de tres elementos: un muro inferior, una ventana y un muro superior. La fachada está sometida a condiciones climáticas en el exterior ( $G_{solar}$ ,  $T_{cielo}$ ,  $T_{ext}$ ,  $q_{rad1}$  y  $q_{conv1}$ ) y de confort en el interior ( $T_{int}$ ,  $q_{rad2}$  y  $q_{conv2}$ ), como se muestra en la Figura 16. La temperatura al interior  $T_{int}$  se definió como una temperatura de confort de 24.5 °C según lo presenta ASHRAE 55 (2004).

Se realizó el estudio paramétrico variando la WWR de una fachada de 2.6 m de alto. Con el fin de realizar el estudio paramétrico, las dimensiones  $Hy_2$  y  $Hy_3$  de los elementos que componen la fachada son variables, mientras que  $Hy_1$  se consideró de 1.2 m. Los espesores  $Hx_1$  y  $Hx_3$  se consideraron iguales a 0.12 m y el espesor  $Hx_2$  se consideró de 0.006 m.



**Figura 16. Modelo físico de una fachada.**

Los materiales utilizados en el estudio son: tabique rojo cocido para los muros, y vidrio claro de 6 mm para la ventana. En la Tabla 3 se muestran los materiales a considerar, así como sus propiedades térmicas, físicas y ópticas.

**Tabla 3. Propiedades físicas, térmicas y ópticas de los materiales considerados.**

Materiales	Densidad ( $\rho$ ) (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad térmica ( $\lambda$ ) (W/mK)	Calor específico ( $cp$ ) (J/kgK)	Absortancia ( $\alpha$ ) (-)	Emitancia ( $\varepsilon$ ) (-)
Tabique rojo cocido	2000 <sup>a</sup>	0.872 <sup>a</sup>	840 <sup>b</sup>	0.6 <sup>b</sup>	0.9 <sup>b</sup>
Vidrio claro 6mm	2500 <sup>c</sup>	1 <sup>c</sup>	750 <sup>c</sup>	0.07 <sup>c</sup>	0.85 <sup>c</sup>

<sup>a</sup>(NOM-020-ENER-2011, 2011), <sup>b</sup>(DesignBuilder, 2021), <sup>c</sup>(Aguilar *et al.*, 2015)

## 2.5. Modelo matemático

Para determinar la transferencia de calor que existe en una fachada, se realizó el balance de energía entre la fachada y su entorno. En la superficie exterior de la fachada se consideró transferencia de calor por radiación y convección, así como una radiación solar incidente ( $G_{solar,\gamma}$ ). Se consideró que existe transferencia de calor por radiación y convección de la superficie interior del muro hacia el interior del edificio. Mientras que, en los elementos sólidos se presenta un flujo de calor conductivo. Con la metodología de balances de energía se estableció el modelo matemático que define los mecanismos de transferencia de calor, conducción, convección y radiación, a los que se encuentra expuesta la fachada. Para establecer el modelo matemático se tomó en cuenta las siguientes consideraciones:

- El modelo considera múltiples nodos a lo largo del eje  $y$ .
- No se considera transferencia de calor entre los nodos en el eje  $y$ .
- Los materiales son homogéneos y con propiedades termo-físicas y ópticas constantes.
- Los procesos de transferencia de calor se analizan en régimen transitorio.

Se estableció el modelo matemático utilizando balances de energía, al no considerarse transferencia de calor entre nodos en el eje  $y$ , el balance de energía se aplicó para cada elemento de la fachada por separado. Al considerar un sistema en régimen transitorio el balance de energía se expresa como se muestra en la Ec. 2.28, donde el flujo de calor que entra menos el flujo de calor que sale es igual a el flujo de calor que se almacena en el sistema.

$$q_{entra} - q_{sale} = \rho c_p \Delta x \frac{dT}{dt} \quad (2.28)$$

Para evaluar el modelo en estado transitorio se empleó una aproximación de Euler de primer orden atrasada (Ec. 2.29), donde  $T_p$  es la temperatura del punto de análisis y los superíndices  $t$  y  $t-1$  indican el tiempo actual y un tiempo anterior, respectivamente.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_p^t - T_p^{t-1}}{\Delta x} \quad (2.29)$$

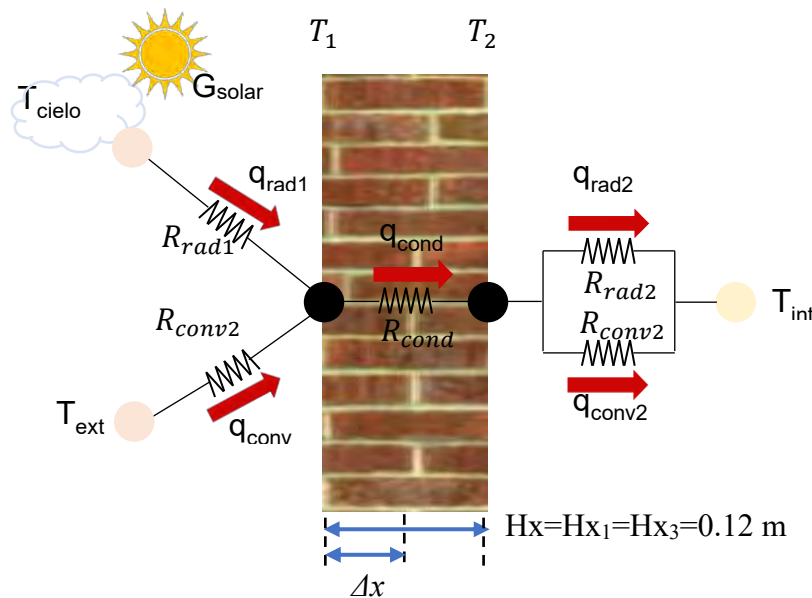


Por lo que el balance de energía en estado transitorio se expresa mediante la Ec. 2.30:

$$q_{entra} - q_{sale} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} (T_p^t - T_p^{t-1}) \quad (2.30)$$

### 2.5.1. Modelo matemático para los muros

Se realizó el balance de energía en estado transitorio sobre los muros. La superficie exterior del muro está sometida a radiación y convección y una radiación solar incidente ( $G_{solar,\gamma}$ ). En la superficie interior se consideró que existe transferencia de calor por radiación y convección. Las temperaturas  $T_1$  y  $T_2$  representan la temperatura superficial del muro al exterior e interior, respectivamente. Asimismo, se consideraron nodos con contacto en las fronteras, en la frontera al exterior se colocó el nodo 1 y en la frontera al interior el nodo 2 (Figura 17).



**Figura 17. Modelo físico (muros).**

Se realizó el balance de energía en estado transitorio al nodo 1. Este presenta un flujo radiativo y convectivo que entra y un flujo conductivo que sale, como se expresa en la Ec. 2.31.

$$\frac{T_{ext}-T_1}{\frac{1}{h_{conv1}}} + \frac{T_{cielo}-T_1}{\frac{1}{h_{rad1}}} + \alpha^* G_{solar,\gamma} - \frac{T_1-T_2}{\frac{Hx}{\lambda}} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} (T_1 - T_1^{t-1}) \quad (2.31)$$

Donde  $\Delta x$  es igual a  $Hx/2$ ,  $\Delta t$  son los pasos de tiempo y  $T_1^{t-1}$  es la temperatura de la superficie exterior en un tiempo anterior. Haciendo un cambio de variables:

$$a_1 = R_{conv1} = \frac{1}{h_{conv1}}; a_2 = R_{rad1} = \frac{1}{h_{rad1}}; a_3 = R_{cond1} = \frac{Hx}{\lambda}; a_{p0} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} \quad (2.32)$$

Se reescribió la Ec. 2.31 utilizando el cambio de variables y se obtiene la Ec. 2.33, después se factorizaron las temperaturas de las superficies ( $T_1$  y  $T_2$ ) y se obtuvo la Ec. 2.34.

$$\frac{T_{ext}-T_1}{a_1} + \frac{T_{cielo}-T_1}{a_2} + \alpha^* G_{solar,\gamma} - \frac{T_1-T_2}{a_3} = a_{p0}(T_1 - T_1^{t-1}) \quad (2.33)$$

$$(a_1 a_2 + a_1 a_3 + a_2 a_3 + a_1 a_2 a_3 a_{p0}) T_1 - (a_1 a_2) T_2 = (a_1 a_3) T_{cielo} + (a_2 a_3) T_{ext} + (a_1 a_2 a_3) \alpha^* G_{solar,\gamma} + (a_1 a_2 a_3 a_{p0}) T_1^{t-1} \quad (2.34)$$

Se realizó el mismo procedimiento para el nodo 2. Para este nodo se consideró que entra un flujo conductivo y sale un flujo radiativo y convectivo, y se obtuvo el balance de energía en estado transitorio expresado en la Ec. 2.35

$$\frac{T_1-T_2}{\frac{Hx}{\lambda}} - \frac{T_2-T_{int}}{\frac{1}{h_{conv2}}} - \frac{T_2-T_{int}}{\frac{1}{h_{rad2}}} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} (T_2 - T_2^{t-1}) \quad (2.35)$$

Donde  $T_2^{t-1}$  es la temperatura de la superficie interior en un tiempo anterior al tiempo de análisis. Se realizó un cambio de variables como se muestra en la Ec. 2.36 y se sustituyó en la Ec. 2.35, obteniendo la Ec. 2.37.

$$b_1 = R_{cond2} = \frac{Hx}{\lambda}; b_2 = R_{conv2} = \frac{1}{h_{conv2}}; b_3 = R_{rad2} = \frac{1}{h_{rad2}}; a_{p0} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} \quad (2.36)$$

$$\frac{T_1-T_2}{b_1} - \frac{T_2-T_{int}}{b_2} - \frac{T_2-T_{int}}{b_3} = a_{p0}(T_2 - T_2^{t-1}) \quad (2.37)$$

Se factorizaron las temperaturas de las superficies ( $T_1$  y  $T_2$ ) y se obtuvo la Ec. 2.38.

$$-(b_2 b_3) T_1 + (b_1 b_2 + b_1 b_3 + b_2 b_3 + b_1 b_2 b_3 a_{p0}) T_2 = (b_1 b_3 + b_1 b_2) T_{int} + (b_1 b_2 b_3 a_{p0}) T_2^{t-1} \quad (2.38)$$

Las Ecs. 2.34 y 2.38 conforman el sistema de ecuaciones para la solución del problema de transferencia de calor en los muros. Con este sistema de ecuaciones se obtuvo la matriz 2.39.

$$\begin{bmatrix} (a_1a_2 + a_1a_3 + a_2a_3 + a_1a_2a_3a_{p0}) & -(a_1a_2) \\ -(b_2b_3) & (b_1b_2 + b_1b_3 + b_2b_3 + b_1b_2b_3a_{p0}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (a_1a_3)T_{cielo} + (a_2a_3)T_{ext} + (a_1a_2a_3)\alpha^*G_{solar} + (a_1a_2a_3a_{p0})T_1^{t-1} \\ (b_1b_3 + b_1b_2)T_{int} + (b_1b_2b_3a_{p0})T_2^{t-1} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

#### 2.5.1.1. Coeficientes de transferencia de calor en los muros

Antes de resolver la matriz 2.39, se calcularon los coeficientes convectivos y radiativos tanto al interior como al exterior del muro. Para determinar el coeficiente convectivo a utilizar para los muros al exterior ( $h_{conv1}$ ), se compararon los coeficientes propuestos en la literatura (vid. Anexo A). Se estableció el uso de la relación propuesta por Hagishima y Tanimoto (2003) para el cálculo del coeficiente convectivo exterior del muro, expresada en la Ec. 2.40. El coeficiente convectivo interior se estableció como lo presenta ASHRAE (2009), expresado en la Ec. 2.41.

$$h_{conv1} = 10.21V_{loc} + 4.47 \quad (2.40)$$

$$h_{conv2} = 8.3 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (2.41)$$

Donde  $V_{loc}$  es la velocidad de viento local. El coeficiente radiativo exterior se obtuvo mediante la Ec. 2.42, donde la temperatura de la bóveda celeste ( $T_{cielo}$ ) se obtuvo mediante la relación propuesta por Swinbank (1963), Ec. 2.43. El coeficiente radiativo interior se calculó mediante la Ec. 2.44.

$$h_{rad1} = \sigma\varepsilon(T_{cielo}^2 + T_1^2)(T_{cielo} + T_1) \quad (2.42)$$

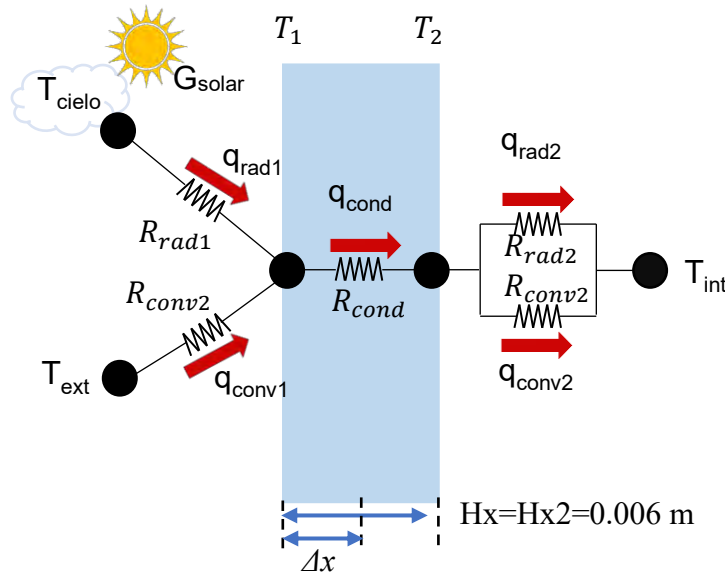
$$T_{cielo} = 0.552T_{ext}^{1.5} \quad (2.43)$$

$$h_{rad2} = \sigma\varepsilon(T_{int}^2 + T_2^2)(T_{int} + T_2) \quad (2.44)$$

#### 2.5.2. Modelo matemático para la ventana

El modelo matemático para la venta se obtuvo de forma similar al modelo para los muros, la Figura 18 muestra el modelo físico de la ventana. Se realizó el balance energía en estado

transitorio considerando flujo convectivo y una radiación incidente al exterior, y un flujo convectivo y radiativo al interior. Mientras que, se consideró un flujo conductivo a través de la ventana.



**Figura 18. Modelo físico (ventana).**

Se realizó el balance de energía en estado transitorio en el nodo sobre la superficie exterior de la ventana, obteniendo la Ec. 2.45.

$$\frac{T_{ext}-T_1}{\frac{1}{h_{conv1}}} + \frac{T_{cielo}-T_1}{\frac{1}{h_{rad1}}} + \alpha^* G_{solar,\gamma} - \frac{T_1-T_2}{\frac{Hx}{\lambda}} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} (T_1 - T_1^{t-1}) \quad (2.45)$$

Se consideró un cambio de variables como se expresa en la Ec. 2.46:

$$a_1 = R_{conv1} = \frac{1}{h_{conv1}}; a_2 = R_{rad1} = \frac{1}{h_{rad1}}; a_3 = R_{cond1} = \frac{Hx}{\lambda}; a_{p0} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} \quad (2.46)$$

Se realizó el cambio de variables de la Ec. 2.46 y se factorizaron las temperaturas de las superficies ( $T_1$  y  $T_2$ ) obteniendo la Ec. 2.47.

$$(a_1 a_2 + a_1 a_3 + a_2 a_3 + a_1 a_2 a_3 a_{p0}) T_1 - (a_1 a_2) T_2 = (a_1 a_3) T_{cielo} + (a_2 a_3) T_{ext} + (a_1 a_2 a_3) \alpha^* G_{solar,\gamma} + (a_1 a_2 a_3 a_{p0}) T_1^{t-1} \quad (2.47)$$

Se realizó el mismo procedimiento para el nodo en la superficie interior de la ventana. Se efectuó el balance de energía en estado transitorio, expresado en la Ec. 2.48.

$$\frac{T_1 - T_2}{\frac{Hx}{\lambda}} - \frac{T_2 - T_{int}}{\frac{1}{h_{conv2}}} - \frac{T_2 - T_{int}}{\frac{1}{h_{rad2}}} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} (T_2 - T_2^{t-1}) \quad (2.48)$$

Se realizó un cambio de variables como se muestra en la Ec. 2.49.

$$b_1 = R_{cond2} = \frac{Hx}{\lambda}; \quad b_2 = R_{conv2} = \frac{1}{h_{conv2}}; \quad b_3 = R_{rad2} = \frac{1}{h_{rad2}}; \quad a_{p0} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} \quad (2.49)$$

Se realizó el cambio de variables en la ecuación 2.48 y se factorizaron las temperaturas de las superficies ( $T_1$  y  $T_2$ ) obteniendo la Ec. 2.50.

$$-(b_2 b_3) T_1 + (b_1 b_2 + b_1 b_3 + b_2 b_3 + b_1 b_2 b_3 a_{p0}) T_2 = (b_1 b_3 + b_1 b_2) T_{int} + (b_1 b_2 b_3 a_{p0}) T_2^{t-1} \quad (2.50)$$

Las Ecs. 2.47 y 2.50 conforman el sistema de ecuaciones para la solución del problema de transferencia de calor en la ventana, obteniendo la matriz 2.51.

$$\begin{bmatrix} (a_1 a_2 + a_1 a_3 + a_2 a_3 + a_1 a_2 a_3 a_{p0}) & -(a_1 a_2) \\ -(b_2 b_3) & (b_1 b_2 + b_1 b_3 + b_2 b_3 + b_1 b_2 b_3 a_{p0}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (a_1 a_3) T_{cielo} + (a_2 a_3) T_{ext} + (a_1 a_2 a_3) \alpha^* G_{solar} + (a_1 a_2 a_3 a_{p0}) T_1^{t-1} \\ (b_1 b_3 + b_1 b_2) T_{int} + (b_1 b_2 b_3 a_{p0}) T_2^{t-1} \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

#### 2.5.2.1. Coeficientes de transferencia de calor en la ventana

Se calcularon los coeficientes convectivos y radiativos al interior y exterior de la ventana. Para determinar el coeficiente convectivo exterior en la ventana ( $h_{conv1}$ ), se compararon los coeficientes propuestos en la literatura (*vid.* Anexo B). La relación propuesta por Sharples y Charlesworth (1998) se usó para el cálculo del coeficiente convectivo exterior en la ventana y se expresa en la Ec. 2.52. Mientras, el coeficiente convectivo al interior se definió como lo presenta ASHRAE (2009), expresado en la Ec. 2.53.

$$h_{conv1} = 9.5 V_{loc}^{0.48} \quad (2.52)$$

$$h_{conv2} = 8.3 W/m^2 K \quad (2.53)$$

Los coeficientes radiativos al exterior e interior se obtuvieron mediante las Ecs. 2.54 y 2.55, respectivamente.

$$h_{rad1} = \sigma\varepsilon(T_{cielo}^2 + T_1^2)(T_{cielo} + T_1) \quad (2.54)$$

$$h_{rad2} = \sigma\varepsilon(T_{int}^2 + T_2^2)(T_{int} + T_2) \quad (2.55)$$

### 2.5.3. Diagrama de flujo computacional

La solución del modelo matemático del sistema muro-ventana se realizó mediante un código de cómputo desarrollado en lenguaje ANSI C99. Para la solución del sistema de ecuaciones se emplea el solver de Jacobi. Este método consiste en proponer un campo adivinado  $[T_i]^{n=0}$  para la solución de la matriz de coeficientes  $[A_{i,j}][T_i] = [B_i]$ , después ésta se calcula por aproximaciones sucesivas  $(T_i)^n$ , resolviendo el sistema con respecto a su diagonal, para  $n=1,2,3\dots$  (Número de iteraciones) (Xamán y Gijón-Rivera, 2016). Las Figuras 19 y 20 muestran el diagrama de flujo del código de cómputo.

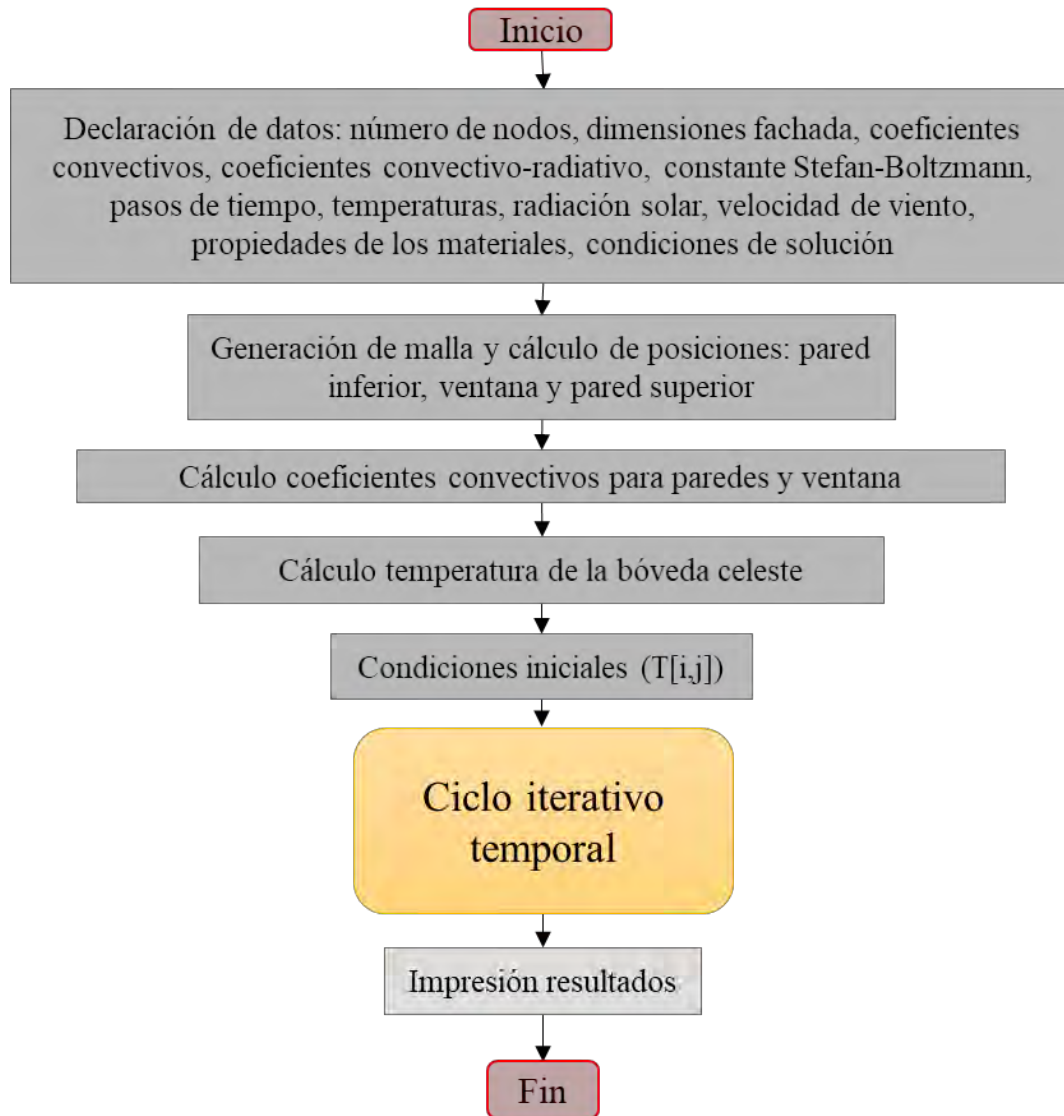


Figura 19. Diagrama de flujo del código de cómputo.

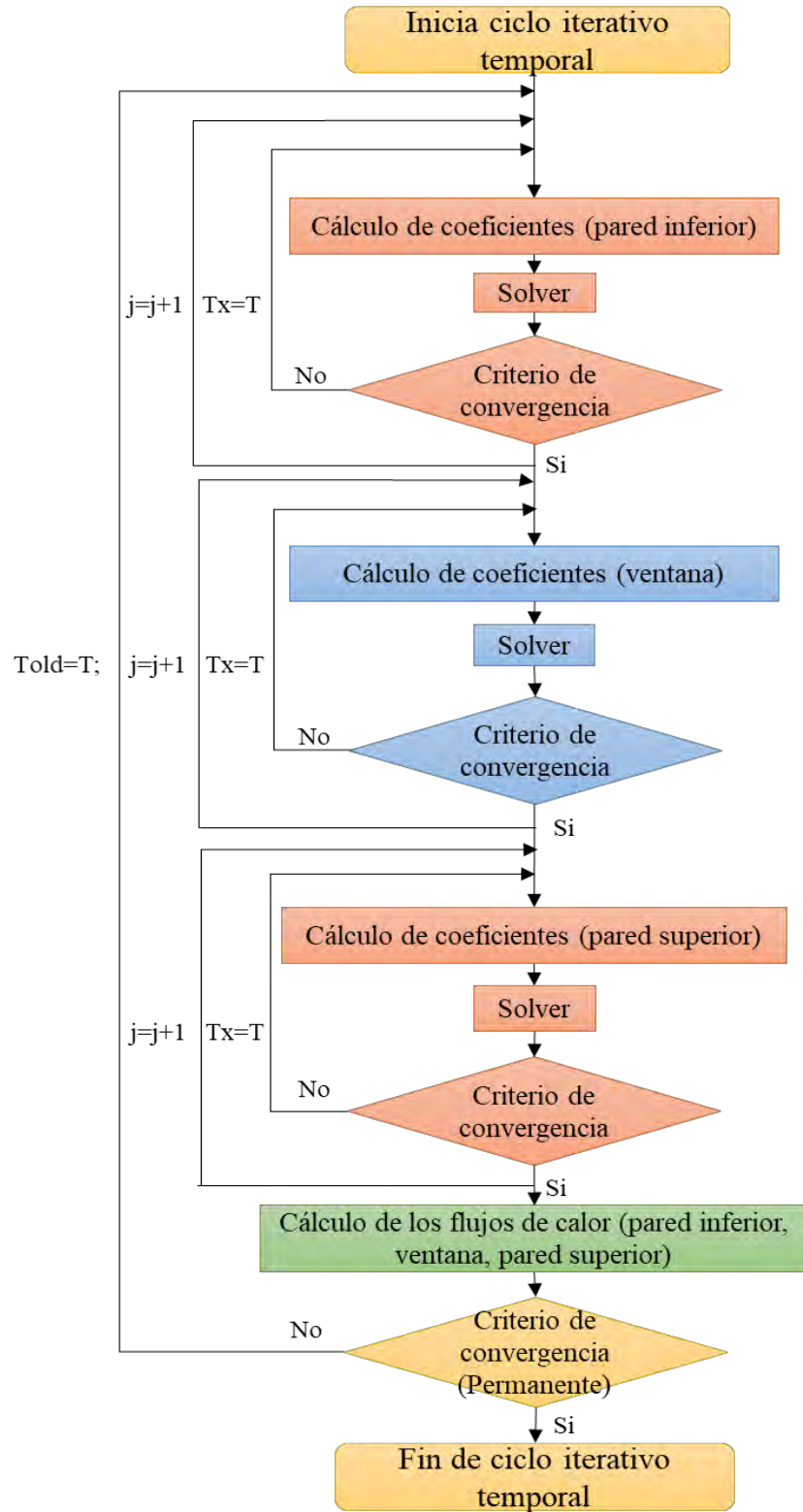


Figura 20. Diagrama de flujo del código de cómputo (ciclo iterativo).

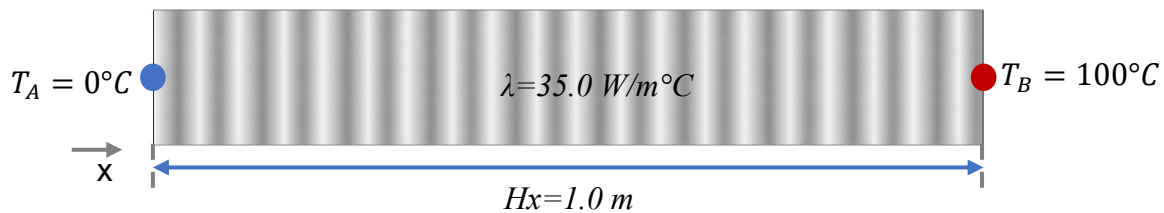


## Capítulo 3. Metodología de solución numérica y verificación

En este capítulo, se presenta la metodología de solución a problemas de transferencia de calor mediante balances de energía. Con el fin de familiarizarse con el método, se realizaron cuatro ejercicios diferentes. En el primer ejercicio se evaluó la transferencia de calor sobre una barra con fronteras de primera clase, el segundo ejercicio consideró la misma barra, pero con una frontera de primera clase y otra de tercera clase y el tercer ejercicio considera la misma barra con ambas fronteras de tercera clase, todos ellos en estado permanente. Finalmente, se presenta un ejercicio de transferencia de calor en estado transitorio con fronteras de primera clase.

### 3.1. Ejercicio de verificación uno: fronteras de primera clase

Se analizó la transferencia de calor por conducción en estado permanente sobre una barra de plomo a través de un modelo matemático planteado mediante balances de energía. El sistema consiste en una barra de plomo homogénea ( $\lambda = 35.0 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ) y tiene una longitud  $Hx = 1.0 \text{ m}$ . La barra está sujeta a condiciones de frontera de primera clase, donde  $T_A = 0^\circ\text{C}$  y  $T_B = 100^\circ\text{C}$ , como se muestra en la Figura 21. Se desea conocer la temperatura  $T(x)$  cuando  $x$  tiene valores de 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 y 0.9 m de la barra.



**Figura 21. Modelo físico ejercicio de verificación uno.**

Modelo matemático:

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad \text{para } 0 \leq x \leq Hx \quad (3.1)$$

Condiciones de frontera:

$$T = T_A = 0^\circ\text{C} \text{ en } x = 0 \quad (3.2)$$

$$T = T_B = 100^\circ\text{C} \text{ en } x = Hx \quad (3.3)$$

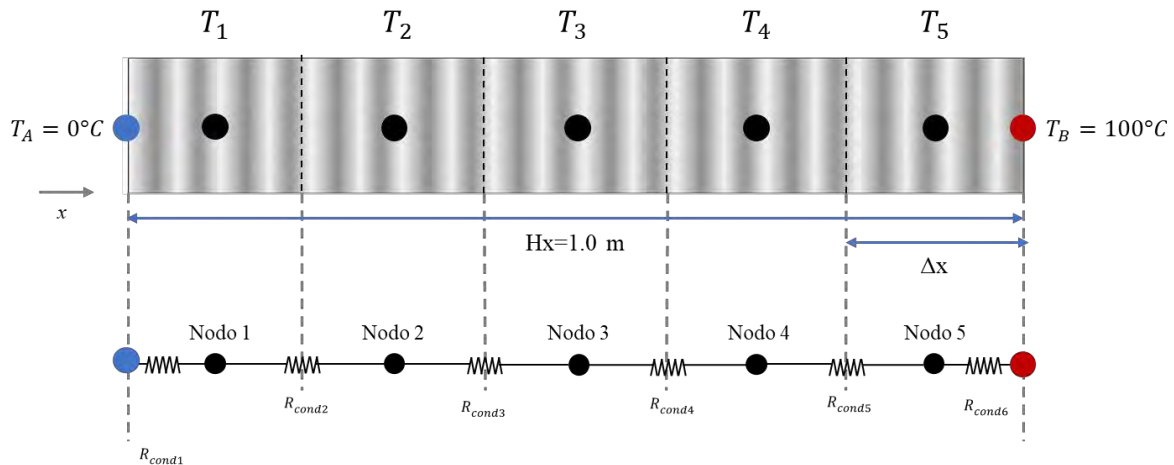
### 3.1.1. Solución analítica

Se resolvió la Ec. 3.1 considerando las condiciones de frontera presentadas en las Ecs. 3.2 y 3.3 y se obtuvo la solución analítica particular para un problema de condición con fronteras de primera clase expresada en la Ec. 3.4.

$$T(x) = \left(\frac{T_B - T_A}{Hx}\right)x + T_A \quad (3.4)$$

### 3.1.2. Balance de energía

Se resolvió el ejercicio mediante balances de energía. Para ello se dividió el elemento en cinco secciones (volúmenes de control) de espesor  $\Delta x$ , como se muestra en la Figura 22, y se realizó el balance de energía para cada nodo.



**Figura 22. Modelo físico ejercicio de verificación uno (balance de energía).**

Al ser un sistema en estado permanente, el balance de energía se estableció como el flujo de calor que entra igual al flujo de calor que sale, como se expresa en la Ec. 3.5.

$$q_{entra} = q_{sale} \quad (3.5)$$

Balance de energía en el nodo 1:

$$\frac{T_A - T_1}{\frac{\Delta x}{2\lambda}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\Delta x}{\lambda}} \quad (3.6)$$

Donde:  $a_1 = R_{cond1} = \frac{\Delta x}{2\lambda}$  ;  $a_2 = R_{cond2} = \frac{\Delta x}{\lambda}$  (3.7)

Reacomodando términos se obtiene la Ec. 3.8.

$$(a_1 + a_2)T_1 - a_1T_2 = a_2T_A \quad (3.8)$$

Balance de energía en el nodo 2:

$$\frac{T_1 - T_2}{\frac{\Delta x}{\lambda}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{\Delta x}{\lambda}} \quad (3.9)$$

Donde:  $b_1 = R_{cond2} = \frac{\Delta x}{\lambda}$  ;  $b_2 = R_{cond3} = \frac{\Delta x}{\lambda}$  (3.10)

$$-b_2T_1 + (b_1 + b_2)T_2 - b_1T_3 = 0 \quad (3.11)$$

Balance de energía en el nodo 3:

$$\frac{T_2 - T_3}{\frac{\Delta x}{\lambda}} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{\Delta x}{\lambda}} \quad (3.12)$$

Donde:  $c_1 = R_{cond3} = \frac{\Delta x}{\lambda}$  ;  $c_2 = R_{cond4} = \frac{\Delta x}{\lambda}$  (3.13)

$$-c_2T_2 + (c_1 + c_2)T_3 - c_1T_4 = 0 \quad (3.14)$$

Balance de energía en el nodo 4:

$$\frac{T_3 - T_4}{\frac{\Delta x}{\lambda}} = \frac{T_4 - T_5}{\frac{\Delta x}{\lambda}} \quad (3.15)$$

Donde:  $d_1 = R_{cond4} = \frac{\Delta x}{\lambda}$  ;  $d_2 = R_{cond5} = \frac{\Delta x}{\lambda}$  (3.16)

$$-d_2T_3 + (d_1 + d_2)T_4 - d_1T_5 = 0 \quad (3.17)$$

Balance de energía en el nodo 5:

$$\frac{T_4 - T_5}{\frac{\Delta x}{\lambda}} = \frac{T_5 - T_B}{\frac{\Delta x}{2\lambda}} \quad (3.18)$$

Donde:  $e_1 = R_{cond5} = \frac{\Delta x}{\lambda}$ ;  $e_2 = R_{cond6} = \frac{\Delta x}{2\lambda}$  (3.19)

$$-e_2 T_4 + (e_1 + e_2) T_5 = e_1 T_B \quad (3.20)$$

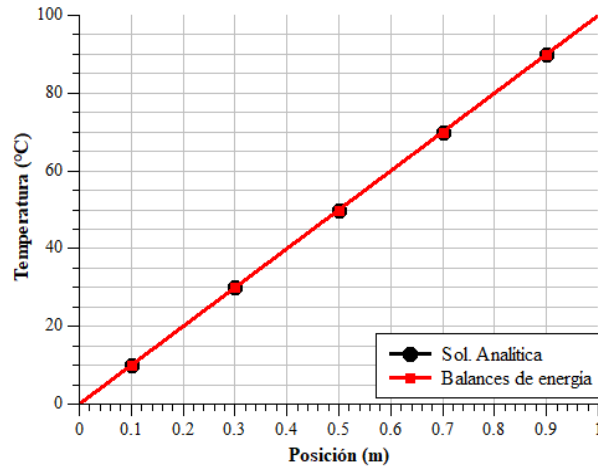
Una vez que se realizó el balance de energía en cada nodo se obtiene un sistema de ecuaciones. Este sistema de ecuaciones se presenta en la matriz 3.21 y es resuelto mediante el método iterativo de Jacobi.

$$\begin{bmatrix} (a_1 + a_2) & -a_1 & 0 & 0 & 0 \\ -b_2 & (b_1 + b_2) & -b_1 & 0 & 0 \\ 0 & -c_2 & (c_1 + c_2) & -c_1 & 0 \\ 0 & 0 & -d_2 & (d_1 + d_2) & -d_1 \\ 0 & 0 & 0 & -e_2 & (e_1 + e_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 T_A \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ e_1 T_B \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

En la Tabla 4, se presentan los resultados de la solución del problema mediante ambas metodologías. La Figura 23 muestra los perfiles de temperatura de la barra de plomo obtenidos mediante la solución analítica y balances de energía.

**Tabla 4. Resultados del ejercicio de verificación uno.**

Posición en x (m)	Temperatura (°C)		Diferencia porcentual (%)
	Sol. Analítica	Balance de energía	
0.0	0.00	0.00	0.00
0.1	10.00	10.00	0.00
0.3	30.00	30.00	0.00
0.5	50.00	50.00	0.00
0.7	70.00	70.00	0.00
0.9	90.00	90.00	0.00
1.0	100.00	100.00	0.00

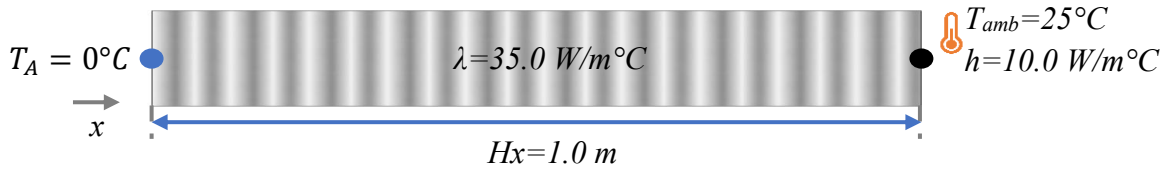


**Figura 23. Perfil de temperatura (ejercicio de verificación uno).**

Como se observa en la Figura 23 y en la Tabla 4, los resultados obtenidos son los mismos en ambas metodologías. Por lo que se concluyó que la metodología basada en balances de energía permite evaluar satisfactoriamente la transferencia de calor por conducción en estado permanente en modelos unidimensionales con fronteras de primera clase.

### 3.2. Ejercicio de verificación dos: una frontera de primera clase y una de tercera clase

Se consideró el modelo físico de la Figura 24 y se analizó la transferencia de calor por conducción en estado permanente a través de un modelo matemático planteado mediante balances de energía. El sistema consiste en una barra de plomo homogénea ( $\lambda=35.0 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ) de longitud  $Hx = 1.0 \text{ m}$ . La barra está sujeta a una condición de frontera de primera clase en un extremo ( $T_A=0^\circ\text{C}$ ) y una condición de frontera de tercera clase en el otro extremo ( $T_{amb}=25^\circ\text{C}$ ,  $h=10.0 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ). Se desea conocer la temperatura  $T(x)$  cuando  $x$  tiene valores de 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 y 1.0 m de la barra.



**Figura 24. Modelo físico ejercicio de verificación dos.**

Modelo matemático:

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad \text{para } 0 \leq x \leq Hx \quad (3.22)$$

Condiciones de frontera:

$$T(x = 0) = T_A \quad \text{en } x = 0 \quad (3.23)$$

$$-\lambda \frac{dT}{dx} = h (T - T_{amb}) \quad \text{en } x = Hx \quad (3.24)$$

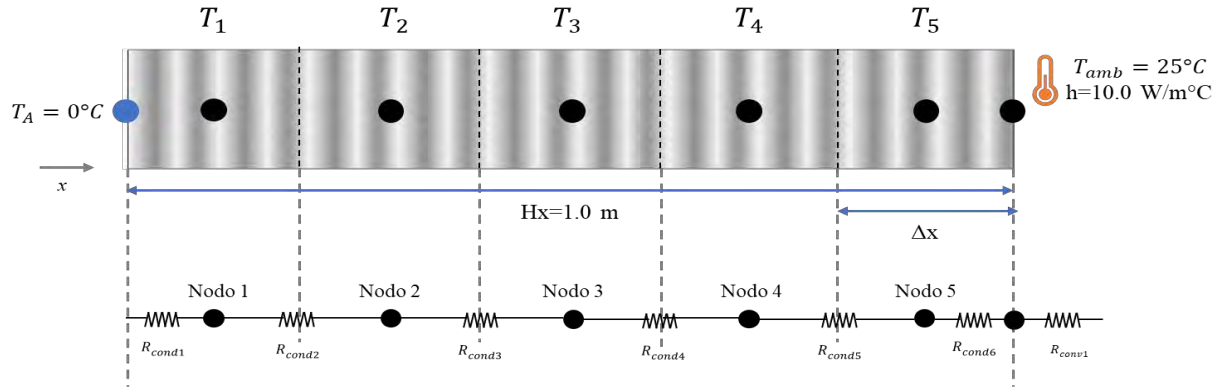
### 3.2.1. Solución analítica

Se resolvió el modelo matemático (Ec. 3.22) considerando las condiciones de frontera presentadas en las Ecs. 3.23 y 3.24 y se obtuvo la solución analítica particular para este problema, expresada en la Ec. 3.25.

$$T(x) = \frac{1}{\lambda} \left[ \frac{T_{amb} - T_A}{\frac{Hx}{\lambda} + \frac{1}{h}} \right] x + T_A \quad (3.25)$$

### 3.2.2. Balance de energía

Se dividió la barra de plomo cinco secciones, como en el ejercicio de verificación uno, pero se consideró una frontera de tercera clase, como se muestra en la Figura 25.



**Figura 25. Modelo físico ejercicio de verificación dos (balance de energía).**

Balance de energía en el nodo 1:

$$\frac{T_A - T_1}{\frac{\Delta x}{2\lambda}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\Delta x}{\lambda}} \quad (3.26)$$

Donde:  $a_1 = R_{cond1} = \frac{\Delta x}{2\lambda}$ ;  $a_2 = R_{cond2} = \frac{\Delta x}{\lambda}$  (3.27)

$$(a_1 + a_2)T_1 - a_1T_2 = a_2T_A \quad (3.28)$$

Balance de energía en el nodo 2:

$$\frac{T_1 - T_2}{\frac{\Delta x}{\lambda}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{\Delta x}{\lambda}} \quad (3.29)$$

Donde:  $b_1 = R_{cond2} = \frac{\Delta x}{\lambda}$ ;  $b_2 = R_{cond3} = \frac{\Delta x}{\lambda}$  (3.30)

$$-b_2T_1 + (b_1 + b_2)T_2 - b_1T_3 = 0 \quad (3.31)$$

Balance de energía en el nodo 3:

$$\frac{T_2 - T_3}{\frac{\Delta x}{\lambda}} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{\Delta x}{\lambda}} \quad (3.32)$$

Donde:  $c_1 = R_{cond3} = \frac{\Delta x}{\lambda}$ ;  $c_2 = R_{cond4} = \frac{\Delta x}{\lambda}$  (3.33)

$$-c_2T_2 + (c_1 + c_2)T_3 - c_1T_4 = 0 \quad (3.34)$$

Balance de energía en el nodo 4:

$$\frac{T_3 - T_4}{\frac{\Delta x}{\lambda}} = \frac{T_4 - T_5}{\frac{\Delta x}{\lambda}} \quad (3.35)$$

Donde:  $d_1 = R_{cond4} = \frac{\Delta x}{\lambda}$  ;  $d_2 = R_{cond5} = \frac{\Delta x}{\lambda}$  (3.36)

$$-d_2 T_3 + (d_1 + d_2) T_4 - d_1 T_5 = 0 \quad (3.37)$$

Balance de energía en el nodo 5:

$$\frac{T_4 - T_5}{\frac{\Delta x}{\lambda}} = \frac{T_5 - T_6}{\frac{\Delta x}{2\lambda}} \quad (3.38)$$

Donde:  $e_1 = R_{cond5} = \frac{\Delta x}{\lambda}$  ;  $e_2 = R_{cond6} = \frac{\Delta x}{2\lambda}$  (3.39)

$$-e_2 T_4 + (e_1 + e_2) T_5 - e_1 T_6 = 0 \quad (3.40)$$

Balance de energía en el nodo 6:

$$\frac{T_5 - T_6}{\frac{\Delta x}{2\lambda}} = \frac{T_6 - T_{amb}}{\frac{1}{h}} \quad (3.41)$$

Donde:  $f_1 = R_{cond6} = \frac{\Delta x}{2\lambda}$  ;  $f_2 = R_{conv1} = \frac{1}{h}$  (3.42)

$$-f_2 T_5 + (f_1 + f_2) T_6 = f_1 T_{amb} \quad (3.43)$$

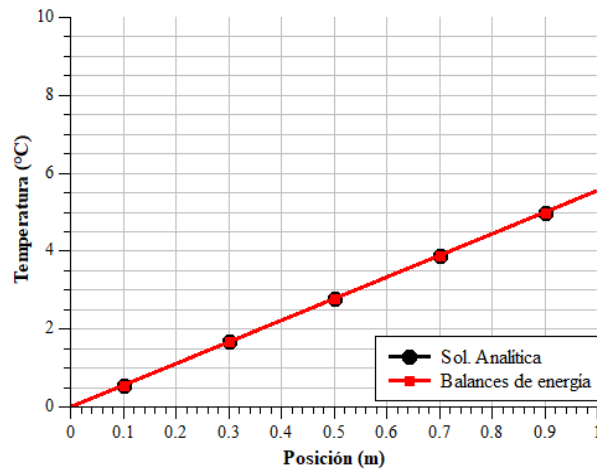
Mediante los balances de energía se obtuvo un sistema de seis ecuaciones, el cual se muestra de forma la matriz 3.44. Se resolvió el sistema de ecuaciones con la metodología de Jacobi. Los resultados obtenidos mediante la solución analítica como balances de energía se muestran en la Tabla 5. La Figura 26 muestra los perfiles de temperatura de la barra de plomo con una frontera de primera clase y una de tercera clase, obtenidos mediante ambas metodologías.



$$\begin{bmatrix} (a_1 + a_2) & -a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -b_2 & (b_1 + b_2) & -b_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_2 & (c_1 + c_2) & -c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -d_2 & (d_1 + d_2) & -d_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -e_2 & (e_1 + e_2) & -e_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -f_2 & (f_1 + f_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 T_A \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ f_1 T_{amb} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

**Tabla 5. Resultados del ejercicio de verificación dos.**

Posición en x (m)	Temperatura (°C)		Diferencia porcentual (%)
	Sol. Analítica	Balace de energía	
0.0	0.00	0.00	0.00
0.1	0.56	0.56	0.00
0.3	1.67	1.67	0.00
0.5	2.78	2.78	0.00
0.7	3.89	3.89	0.00
0.9	5.00	5.00	0.00
1.0	5.56	5.56	0.00

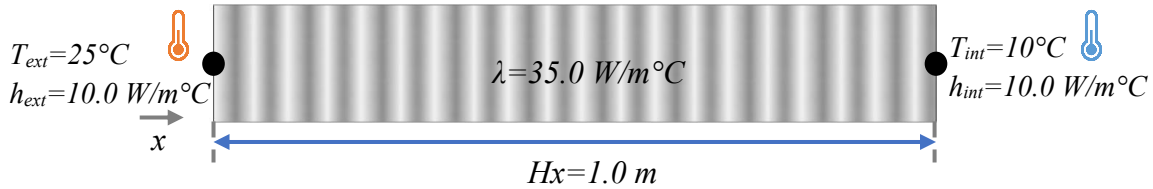


**Figura 26. Perfil de temperatura (ejercicio de verificación dos).**

Se observó que las temperaturas obtenidas mediante la solución analítica y los balances de energía son las mismas. Por lo tanto, el uso de la metodología de balances de energía es adecuado para la solución de problemas con una frontera de primera clase y una de tercera.

### 3.3. Ejercicio de verificación tres: fronteras de tercera clase

Se consideró la barra de plomo homogénea ( $\lambda=35.0 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ) con longitud  $Hx=1.0 \text{ m}$ . En esta ocasión, la barra está sometida a condiciones de frontera de tercera clase, el extremo izquierdo está expuesto a una temperatura  $T_{ext}=25^\circ\text{C}$  y el extremo derecho a una temperatura  $T_{int}=10^\circ\text{C}$ , como se muestra en la Figura 27.



**Figura 27. Modelo físico del ejercicio de verificación tres.**

Modelo matemático

$$\frac{d}{dx}\left(\lambda \frac{dT}{dx}\right) = 0 \quad \text{para } 0 \leq x \leq Hx \quad (3.45)$$

Condiciones de frontera

$$h_{ext}(-T_{ext} + T) = \lambda \frac{dT}{dx} \quad \text{en } x = 0 \quad (3.46)$$

$$\lambda \frac{dT}{dx} = h_{int}(T_{int} - T) \quad \text{en } x = Hx \quad (3.47)$$

#### 3.3.1. Solución analítica

La solución analítica para un problema con condiciones de frontera de tercera clase se obtiene mediante la Ec. 3.48.

$$T(x) = \frac{h_{int}h_{ext}(T_{ext}-T_{int})}{\left[h_{int}+h_{ext}\left(1+\frac{h_{int}Hx}{\lambda}\right)\right]} x + \left[-\frac{h_{ext}}{h_{int}}T_{ext} + c_1\right] \frac{1}{h_{ext}} \quad (3.48)$$

#### 3.3.2. Balance de energía

Se realizó el balance de energía considerando siete nodos, dos en las fronteras y 5 nodos internos, como se muestra en la Figura 28.

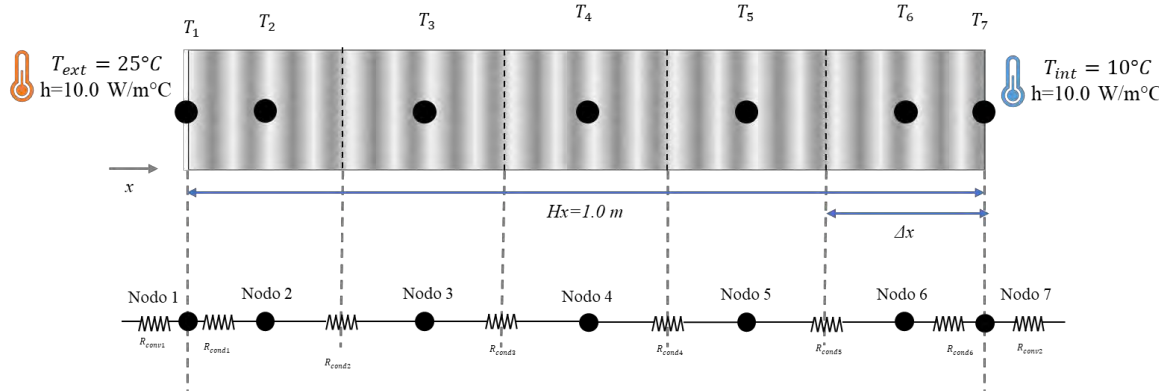


Figura 28. Modelo físico ejercicio de verificación tres (balance de energía)

Balance de energía en el nodo 1:

$$\frac{T_{ext} - T_1}{\frac{1}{h_{ext}}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\Delta x}{2\lambda}} \quad (3.49)$$

Donde:  $a_1 = R_{conv1} = \frac{1}{h_{ext}}; a_2 = R_{cond1} = \frac{\Delta x}{2\lambda}$  (3.50)

$$(a_1 + a_2)T_1 - a_1T_2 = a_2T_{ext} \quad (3.51)$$

Balance de energía en el nodo 2:

$$\frac{T_1 - T_2}{\frac{\Delta x}{2\lambda}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{\Delta x}{\lambda}} \quad (3.52)$$

Donde:  $b_1 = R_{cond1} = \frac{\Delta x}{2\lambda}; b_2 = R_{cond2} = \frac{\Delta x}{\lambda}$  (3.53)

$$-b_2T_1 + (b_1 + b_2)T_2 - b_1T_3 = 0 \quad (3.54)$$

Balance de energía en el nodo 3:

$$\frac{T_2 - T_3}{\frac{\Delta x}{\lambda}} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{\Delta x}{\lambda}} \quad (3.55)$$

Donde:  $c_1 = R_{cond2} = \frac{\Delta x}{\lambda}; c_2 = R_{cond3} = \frac{\Delta x}{\lambda}$  (3.56)

$$-c_2T_2 + (c_1 + c_2)T_3 - b_1T_4 = 0 \quad (3.57)$$

Balance de energía en el nodo 4:

$$\frac{T_3 - T_4}{\frac{\Delta x}{\lambda}} = \frac{T_4 - T_5}{\frac{\Delta x}{\lambda}} \quad (3.58)$$

Donde:  $d_1 = R_{cond3} = \frac{\Delta x}{\lambda}$  ;  $d_2 = R_{cond4} = \frac{\Delta x}{\lambda}$  (3.59)

$$-d_2 T_3 + (d_1 + d_2) T_4 - d_1 T_5 = 0 \quad (3.60)$$

Balance de energía en el nodo 5:

$$\frac{T_4 - T_5}{\frac{\Delta x}{\lambda}} = \frac{T_5 - T_6}{\frac{\Delta x}{\lambda}} \quad (3.61)$$

Donde:  $e_1 = R_{cond4} = \frac{\Delta x}{\lambda}$  ;  $e_2 = R_{cond5} = \frac{\Delta x}{\lambda}$  (3.62)

$$-e_2 T_4 + (e_1 + e_2) T_5 - e_1 T_6 = 0 \quad (3.63)$$

Balance de energía en el nodo 6:

$$\frac{T_5 - T_6}{\frac{\Delta x}{\lambda}} = \frac{T_6 - T_7}{\frac{\Delta x}{2\lambda}} \quad (3.64)$$

Donde:  $f_1 = R_{cond5} = \frac{\Delta x}{\lambda}$  ;  $f_2 = R_{cond6} = \frac{\Delta x}{2\lambda}$  (3.65)

$$-f_2 T_5 + (f_1 + f_2) T_6 - f_1 T_7 = 0 \quad (3.66)$$

Balance de energía en el nodo 7:

$$\frac{T_6 - T_7}{\frac{\Delta x}{2\lambda}} = \frac{T_7 - T_{int}}{\frac{1}{h_{int}}} \quad (3.67)$$

Donde:  $g_1 = R_{cond6} = \frac{\Delta x}{2\lambda}$  ;  $g_2 = R_{conv2} = \frac{1}{h_{int}}$  (3.68)

$$-g_2 T_6 + (g_1 + g_2) T_7 = g_1 T_{int} \quad (3.69)$$

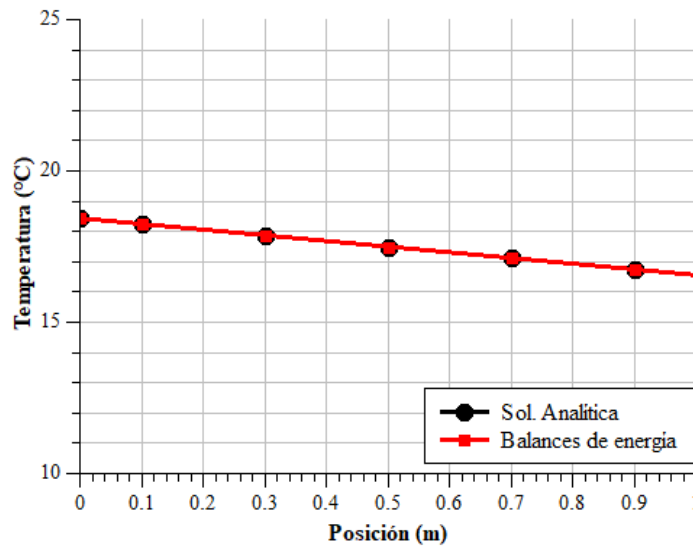
Con el sistema de ecuaciones se forma la matriz 3.70 y se resuelve utilizando el método de Jacobi.

$$\begin{bmatrix} (a_1 + a_2) & -a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -b_2 & (b_1 + b_2) & -b_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_2 & (c_1 + c_2) & -c_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -d_2 & (d_1 + d_2) & -d_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -e_2 & (e_1 + e_2) & -e_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -f_2 & (f_1 + f_2) & -f_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g_2 & (g_1 + g_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 T_A \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ g_1 T_{amb} \end{bmatrix} \quad (3.70)$$

La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos tanto analíticamente como con balances de energía. La Figura 29 muestra los perfiles de temperatura obtenido con ambos métodos.

**Tabla 6. Resultados del ejercicio de verificación tres.**

Posición en x (m)	Temperatura (°C)		Diferencia porcentual (%)
	Sol. Analítica	Balace de energía	
0.0	18.43	18.43	0.00
0.1	18.25	18.25	0.00
0.3	17.87	17.87	0.00
0.5	17.50	17.50	0.00
0.7	17.12	17.12	0.00
0.9	16.75	16.75	0.00
1.0	16.56	16.56	0.00

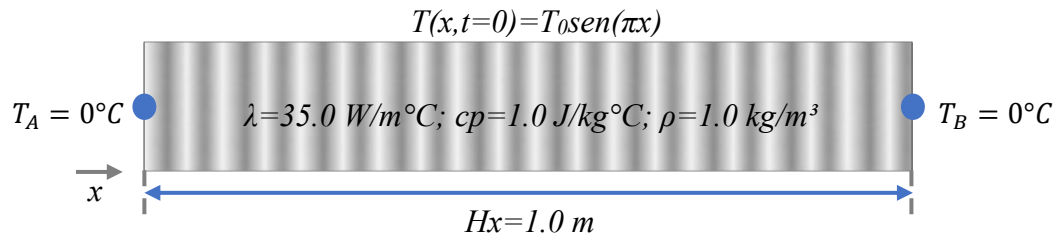


**Figura 29. Perfil de temperaturas (ejercicio de verificación tres).**

Se observó que las temperaturas obtenidas mediante la solución analítica y por balances de energía son similares. Por lo tanto, el uso de la metodología de balances de energía es adecuado para la solución de problemas con fronteras de tercera clase.

### 3.4. Ejercicio de verificación cuatro: fronteras de primera clase en estado transitorio

Para verificar la metodología de solución de los modelos de balances de energía en estado transitorio, se consideró el modelo físico de la Figura 30, sobre el cual se analizó la transferencia de calor por conducción. El sistema consiste en una barra de material homogéneo ( $\lambda=2.0 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ;  $c_p=1.0 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ ;  $\rho=1.0 \text{ kg/m}^3$ ), de longitud  $Hx=1 \text{ m}$ . La barra está sujeta a condiciones de frontera de primera clase,  $T_A=0^\circ\text{C}$  y  $T_B=0^\circ\text{C}$ , y una temperatura inicial  $T(x,t=0)=T_0\text{sen}(\pi x)$  con  $T_0=20^\circ\text{C}$ . Se consideraron diferentes incrementos de tiempo  $\Delta t=0.0001, 0.001, 0.01$  y  $0.1$  segundos, con un tiempo total de modelado de  $0.1$  segundos (Xamán y Gijón-Rivera, 2016).



**Figura 30. Modelo físico del ejercicio de verificación cuatro.**

Modelo matemático:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad \text{para} \quad \begin{cases} 0 \leq x \leq Hx \\ t > 0 \end{cases} \quad (3.71)$$

Condiciones de frontera:

$$T = T_A = 0^\circ\text{C} \quad \text{en} \quad x = 0 \quad \text{para} \quad t > 0 \quad (3.72)$$

$$T = T_b = 0^\circ\text{C} \quad \text{en} \quad x = Hx \quad \text{para} \quad t > 0 \quad (3.73)$$

### 3.4.1. Solución analítica

La solución analítica para la verificación del modelo de balances de energía en estado transitorio se expresa mediante la Ec. 3.74 (Özisik, 1985).

$$T(x, t) = T_0 e^{-\left(\frac{\lambda}{\rho c_p}\right)\left(\frac{\pi}{Hx}\right)t} \text{sen} \left[ \left(\frac{\pi}{Hx}\right) x \right] \quad (3.74)$$

### 3.4.2. Balance de energía

Se dividió el elemento en cinco volúmenes de control de espesor  $\Delta x$ , como se muestra en el ejercicio de verificación uno (Figura 22), y se realizó el balance de energía para cada uno de los nodos. Al ser un sistema dependiente del tiempo, el balance de energía se estableció como el flujo de calor que entra menos el flujo de calor que sale es igual al flujo de calor almacenado, como se expresa en la Ec. 3.75

$$q_{entra} - q_{sale} = \rho c_p \Delta x \frac{dT}{dt} \quad (3.75)$$

Al evaluar el modelo en estado transitorio se empleó una aproximación de Euler de primer orden atrasada (Ec. 3.76), donde  $T_p$  es la temperatura del punto de análisis y los superíndices  $t$  y  $t-1$  indican el tiempo actual y un tiempo anterior, respectivamente.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_p^t - T_p^{t-1}}{\Delta t} \quad (3.76)$$

Por lo que el balance de energía en estado transitorio se expresa como la Ec. 3.7.

$$q_{entra} - q_{sale} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} (T_p^t - T_p^{t-1}) \quad (3.77)$$

Balance de energía en el nodo 1:

$$\frac{T_A - T_1}{\frac{\Delta x}{2\lambda}} - \frac{T_1 - T_2}{\frac{\Delta x}{\lambda}} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} (T_1 - T_1^{t-1}) \quad (3.78)$$

Donde:  $a_1 = R_{cond1} = \frac{\Delta x}{2\lambda}$ ;  $a_2 = R_{cond2} = \frac{\Delta x}{\lambda}$ ;  $a_{p0} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t}$  (3.79)

$$(a_1 + a_2 + a_1 a_2 a_{p0}) T_1 - a_1 T_2 = a_2 T_A + a_1 a_2 a_{p0} T_1^{t-1} \quad (3.80)$$

Balance de energía en el nodo 2:

$$\frac{T_1 - T_2}{\frac{\Delta x}{\lambda}} - \frac{T_2 - T_3}{\frac{\Delta x}{\lambda}} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} (T_2 - T_2^{t-1}) \quad (3.81)$$

Donde:  $b_1 = R_{cond2} = \frac{\Delta x}{\lambda}$ ;  $b_2 = R_{cond3} = \frac{\Delta x}{\lambda}$ ;  $a_{\rho 0} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t}$  (3.82)

$$-b_2 T_1 + (b_1 + b_2 + b_1 b_2 a_{\rho 0}) T_2 - b_1 T_3 = b_1 b_2 a_{\rho 0} T_2^{t-1} \quad (3.83)$$

Balance de energía en el nodo 3:

$$\frac{T_2 - T_3}{\frac{\Delta x}{\lambda}} - \frac{T_3 - T_4}{\frac{\Delta x}{\lambda}} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} (T_3 - T_3^{t-1}) \quad (3.84)$$

Donde:  $c_1 = R_{cond3} = \frac{\Delta x}{\lambda}$ ;  $c_2 = R_{cond4} = \frac{\Delta x}{\lambda}$ ;  $a_{\rho 0} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t}$  (3.85)

$$-c_3 T_2 + (c_1 + c_2 + c_1 c_2 a_{\rho 0}) T_3 - c_1 T_4 = c_1 c_2 a_{\rho 0} T_3^{t-1} \quad (3.86)$$

Balance de energía en el nodo 4:

$$\frac{T_3 - T_4}{\frac{\Delta x}{\lambda}} - \frac{T_4 - T_5}{\frac{\Delta x}{\lambda}} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} (T_4 - T_4^{t-1}) \quad (3.87)$$

Donde:  $d_1 = R_{cond4} = \frac{\Delta x}{\lambda}$ ;  $d_2 = R_{cond5} = \frac{\Delta x}{\lambda}$ ;  $a_{\rho 0} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t}$  (3.88)

$$-d_2 T_3 + (d_1 + d_2 + d_1 d_2 a_{\rho 0}) T_4 - d_1 T_5 = d_1 d_2 a_{\rho 0} T_4^{t-1} \quad (3.89)$$

Balance de energía en el nodo 5:

$$\frac{T_4 - T_5}{\frac{\Delta x}{\lambda}} - \frac{T_5 - T_B}{\frac{\Delta x}{2\lambda}} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} (T_5 - T_5^{t-1}) \quad (3.90)$$

Donde:  $e_1 = R_{cond5} = \frac{\Delta x}{\lambda}$ ;  $e_2 = R_{cond6} = \frac{\Delta x}{2\lambda}$ ;  $a_{\rho 0} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t}$  (3.91)

$$-e_2 T_4 + (e_1 + e_2 + e_1 e_2 a_{\rho 0}) T_5 = e_1 T_B + e_1 e_2 a_{\rho 0} T_5^{t-1} \quad (3.92)$$



El sistema de ecuaciones forma la matriz 3.93 y esta se resolvió mediante el método iterativo Jacobi. Se modeló el ejercicio por un tiempo de 0.1 segundos y se obtuvieron los resultados para  $\Delta t=0.0001, 0.001, 0.01$  y  $0.1$  segundos, como se observa en la Tabla 7.

$$\begin{bmatrix} (a_1 + a_2 + a_1 a_2 a_{\rho 0}) & -a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -b_2 & (b_1 + b_2 + b_1 b_2 a_{\rho 0}) & -b_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_2 & (c_1 + c_2 + c_1 c_2 a_{\rho 0}) & -c_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -d_2 & (d_1 + d_2 + d_1 d_2 a_{\rho 0}) & -d_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -e_2 & (e_1 + e_2 + e_1 e_2 a_{\rho 0}) & -e_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 T_A + a_1 a_2 a_{\rho 0} T_1^{t-1} \\ b_1 b_2 a_{\rho 0} T_2^{t-1} \\ c_1 c_2 a_{\rho 0} T_3^{t-1} \\ d_1 d_2 a_{\rho 0} T_4^{t-1} \\ e_1 T_B + e_1 e_2 a_{\rho 0} T_5^{t-1} \end{bmatrix} \tag{3.93}$$

**Tabla 7. Resultados del ejercicio de verificación cuatro.**

Temperatura	Nodos							Diferencia porcentual (%)
	1	2	3	4	5	6	7	
T(°C) Solución analítica	0.00	0.86	2.25	2.78	2.25	0.86	0.00	-
T(°C) $\Delta t=0.0001s$	0.00	0.91	2.40	2.96	2.40	0.91	0.00	6.62
T(°C) $\Delta t=0.001s$	0.00	0.93	2.43	3.01	2.43	0.93	0.00	7.63
T(°C) $\Delta t=0.01s$	0.00	1.07	2.81	3.48	2.81	1.07	0.00	22.58
T(°C) $\Delta t=0.1s$	0.00	2.12	5.56	6.87	5.56	2.12	0.00	117.75

La Tabla 7 presenta los resultados de la solución del problema mediante ambas metodologías. Se observó que a medida que  $\Delta t$  se reduce, la diferencia porcentual entre la solución analítica y la solución mediante balances de energía también se reduce. La diferencia porcentual menor que se obtuvo es de 6.62% cuando  $\Delta t=0.0001s$ .

La Figura 31 muestra los perfiles de temperaturas para los diferentes pasos de tiempo considerados. Se observó que cuando se disminuye el paso de tiempo el perfil de temperaturas obtenido mediante el balance de energía se acerca más a la solución analítica.

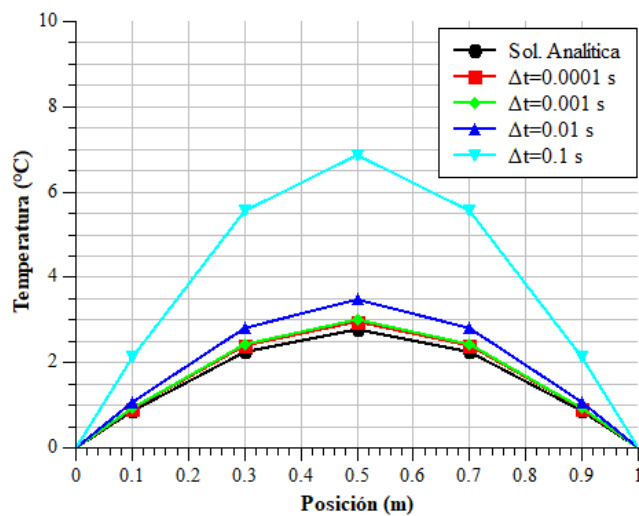


Figura 31. Perfil de temperatura (ejercicio de verificación cuatro).

## Capítulo 4: Resultados

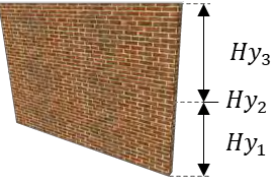
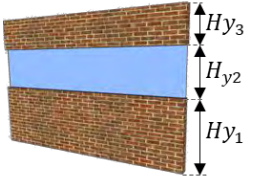
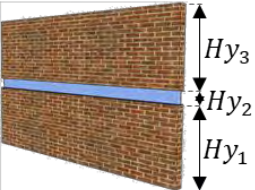
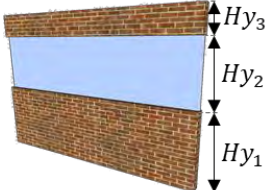
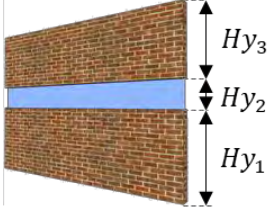
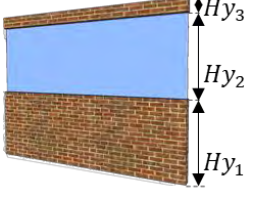
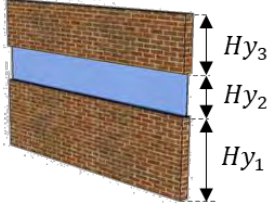
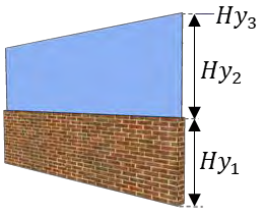
En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de la investigación. Se definió el estudio paramétrico, en el cual se varió la WWR y la orientación de la fachada con el objetivo de conocer su efecto sobre la ganancia o pérdida de calor (Sección 4.1). Se realizó la independencia de malla temporal para obtener el paso de tiempo con el cual se modeló la transferencia de calor en la fachada (Sección 4.2). Se muestra la influencia de la WWR y la orientación de la fachada sobre las temperaturas (Sección 4.3), los flujos de calor (Sección 4.4) y las ganancias térmicas (Sección 4.5). Finalmente, se presenta el estudio económico para conocer la WWR óptima para cada orientación con la que se presenta un menor costo para la climatización del edificio (Sección 4.6).

### 4.1. Estudio paramétrico

Con el objetivo de identificar la WWR que minimice el consumo eléctrico para climatización, se realizó un estudio paramétrico de la transferencia de calor variando la WWR y la orientación de la fachada. Se consideró que la fachada es el muro exterior de un edificio, el cual se encuentra expuesto a condiciones climáticas en el exterior y a un ambiente de confort en el interior.

Los espesores de la fachada se mantienen constantes, siendo  $Hx_1=Hx_3=0.12$  m y  $Hx_2=0.006$  m. La altura del muro inferior  $Hy_1$  también se mantiene constante a 1.2 m, los parámetros a variar son la altura de la ventana  $Hy_2$  y del muro superior  $Hy_3$ . Se consideraron ocho WWR, o “casos” con porcentajes de: 0%, 7.7%, 15.4%, 23.1%, 3.8%, 38.5%, 46.2% y 53.8%, como se muestra en la Tabla 8. El estudio paramétrico se realizó variando las ocho WWR de una fachada de dimensiones 3.5 m de ancho por 2.6 m de alto. Los casos fueron evaluados para las orientaciones Norte, Sur, Este y Oeste. Se modeló para el día más frío y más cálido de cada mes de un año típico de Mérida, Yucatán. En total se realizaron 768 modelaciones mediante el código de cómputo desarrollado.

**Tabla 8. Razones de aspecto muro-ventana (WWR) evaluadas.**

Caso	WWR (%)	Hy <sub>2</sub> (m)	Hy <sub>3</sub> (m)	Modelo físico	Caso	WWR (%)	Hy <sub>2</sub> (m)	Hy <sub>3</sub> (m)	Modelo físico
Caso 1	0.0	0.0	1.4		Caso 5	30.8	0.8	0.6	
Caso 2	7.7	0.2	1.2		Caso 6	38.5	1.0	0.4	
Caso 3	15.4	0.4	1.0		Caso 7	46.2	1.2	0.2	
Caso 4	23.1	0.6	0.8		Caso 8	53.8	1.4	0.0	

## 4.2. Independencia temporal

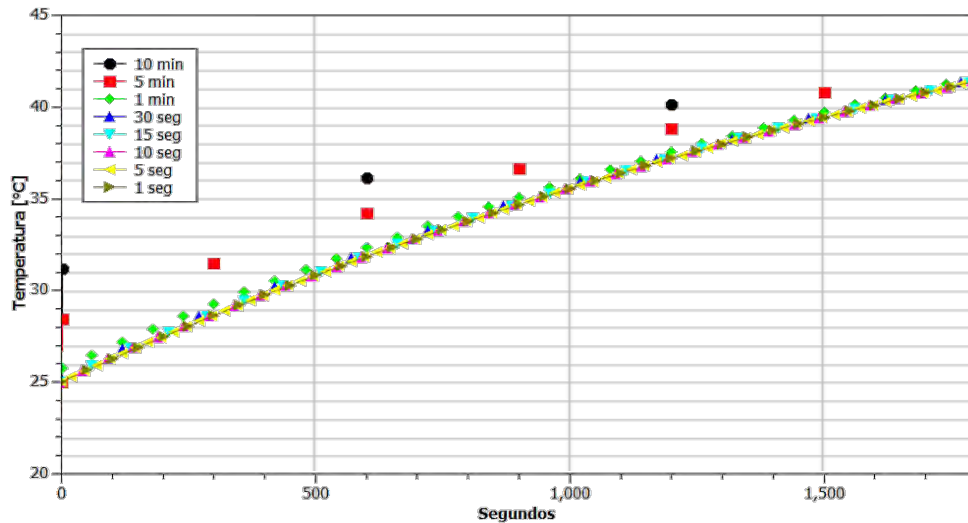
Como se observó en el ejercicio de verificación cuatro (Capítulo 3, Sección 3.4), la independencia temporal es de gran importancia para obtener resultados con variaciones mínimas. Por ello, se realizó la independencia temporal modelando la transferencia de calor en una fachada típica de México. Se consideraron  $\Delta t = 600, 300, 60, 30, 15, 10, 5$  y 1 segundos y se modeló el problema de transferencia de calor por un tiempo total de 30 minutos. Se consideraron la radiación y la temperatura más alta presentadas durante un año típico de Mérida, Yucatán. La velocidad del viento se consideró como una velocidad promedio a lo largo del año. La Tabla 9 muestra los datos considerados para la independencia temporal.

**Tabla 9. Datos considerados para la independencia temporal.**

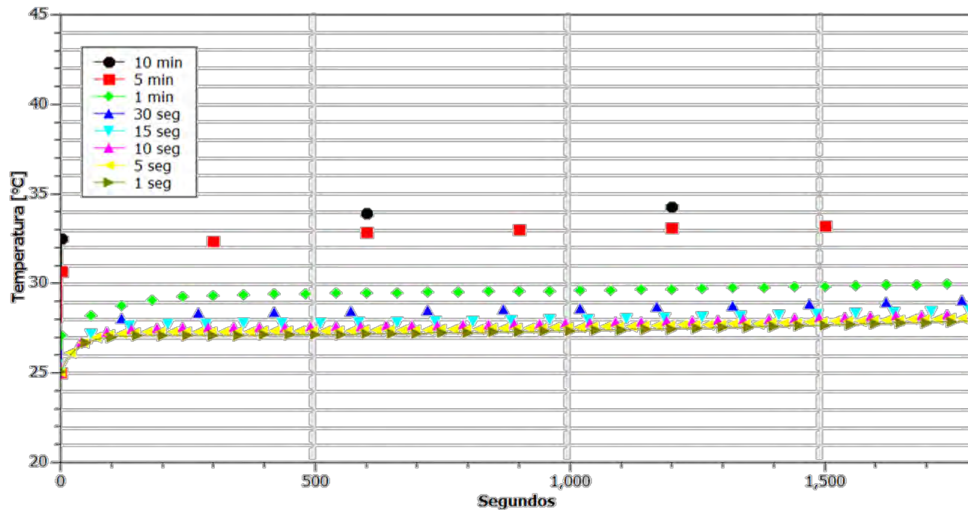
Datos del mallado			
$N_x$	2	-	Número de nodos del sistema en x
$N_{y1}$	20	-	Número de nodos del sistema en el muro inferior
$N_{y2}$	10	-	Número de nodos del sistema en la ventana
$N_{y3}$	20	-	Número de nodos del sistema el muro superior
Propiedades del sistema			
$H_z$	1	m	Ancho de la fachada
$H_{x1}$	0.12	m	Espesor del muro inferior
$H_{x2}$	0.006	m	Espesor de la ventana
$H_{x3}$	0.12	m	Espesor del muro superior
$H_{y1}$	1.2	m	Altura del muro inferior
$H_{y2}$	0.8	m	Altura de la ventana
$H_{y3}$	0.6	m	Altura del muro superior
$T_{ext}$	41.3	°C	Temperatura exterior
$T_{int}$	24.5	°C	Temperatura interior
$G_{solar,\gamma}$	1293	W/m <sup>2</sup>	Radiación solar incidente
$V_{loc}$	2.285	m/s	Velocidad del viento local
$h_{conv2}$	8.3	W/m <sup>2</sup> K	Coefficiente convectivo al interior
Condiciones de solución			
$Itermax$	10000	-	Número de iteraciones máximo
$eps_1$	$1 \times 10^{-10}$	-	Criterio de convergencia de la variable
$eps_2$	$1 \times 10^{-5}$	-	Criterio de convergencia de estado permanente
$time$	1800	s	Tiempo de modelación

Se observó que para  $\Delta t$  menores de 30 segundos se alcanza una convergencia en las temperaturas de los muros, como lo muestra la Figura 32. Sin embargo, al evaluar la

independencia temporal para la ventana se observaron pequeñas variaciones de la temperatura entre los pasos menores de 30 segundos, como se muestra en la Figura 33.



**Figura 32. Independencia temporal (muros).**



**Figura 33. Independencia temporal (ventana).**

La Tabla 10 muestra las diferencias porcentuales entre las temperaturas obtenidas con los diferentes tiempos a los 10 minutos de la modelación de la independencia temporal de la ventana. Se observó que la diferencia porcentual menor se obtuvo con  $\Delta t=5$  segundos, por lo que se estableció este paso de tiempo para realizar el estudio paramétrico.

**Tabla 10. Resultados de la independencia temporal.**

Paso de tiempo [s]	Temperatura [°C]	Diferencia porcentual [%]
1	27.16	
5	27.36	0.73
10	27.60	1.60
15	27.83	2.41
30	28.45	4.54
60	29.46	7.81
300	32.83	17.27
600	33.93	19.95

### 4.3. Análisis de temperaturas

Se realizó el análisis de las temperaturas sobre la superficie exterior e interior de la fachada con el objetivo de conocer la influencia que tiene la WWR y la orientación sobre estas. La Tabla 11 muestra las temperaturas máximas y mínimas sobre la superficie exterior e interior de la fachada para los ocho casos en la orientación Norte del día más cálido del año. Las temperaturas máximas y mínimas sobre las superficies se calcularon como el promedio de la temperatura máxima presentada tanto en el muro como en la ventana, como se muestra en las Ecs. 4.1 y 4.2.

$$T_{m\acute{a}x} = \frac{T_{m\acute{a}x.muro} + T_{m\acute{a}x.ventana}}{2} \quad (4.1)$$

$$T_{m\acute{i}n} = \frac{T_{m\acute{i}n.muro} + T_{m\acute{i}n.ventana}}{2} \quad (4.2)$$

Para el “Caso 1” las temperaturas máximas y mínimas se consideraron como las temperaturas del muro. En la Tabla 11 se observa que la temperatura del “Caso 1” presenta temperaturas máximas mayores a los otros casos, esto se debe a que el muro es completamente de tabique y este material tiene una masa térmica mayor que el de la ventana por lo que absorbe mayor energía térmica. Los “Casos 2 a 8” presentaron una temperatura máxima al exterior menor que el “Caso 1”, debido a que en estos casos se consideró también la temperatura máxima de la ventana. Sin embargo, los casos donde se consideró la ventana no muestran diferencias entre las temperaturas a causa de que no se consideró transferencia

de calor entre nodos en el eje  $y$ , y que tanto la radiación como la velocidad incidente sobre la fachada no varían a lo largo del eje  $y$ .

**Tabla 11. Temperaturas superficiales de la fachada para el día más cálido del año (25/Julio/2018) con orientación Norte.**

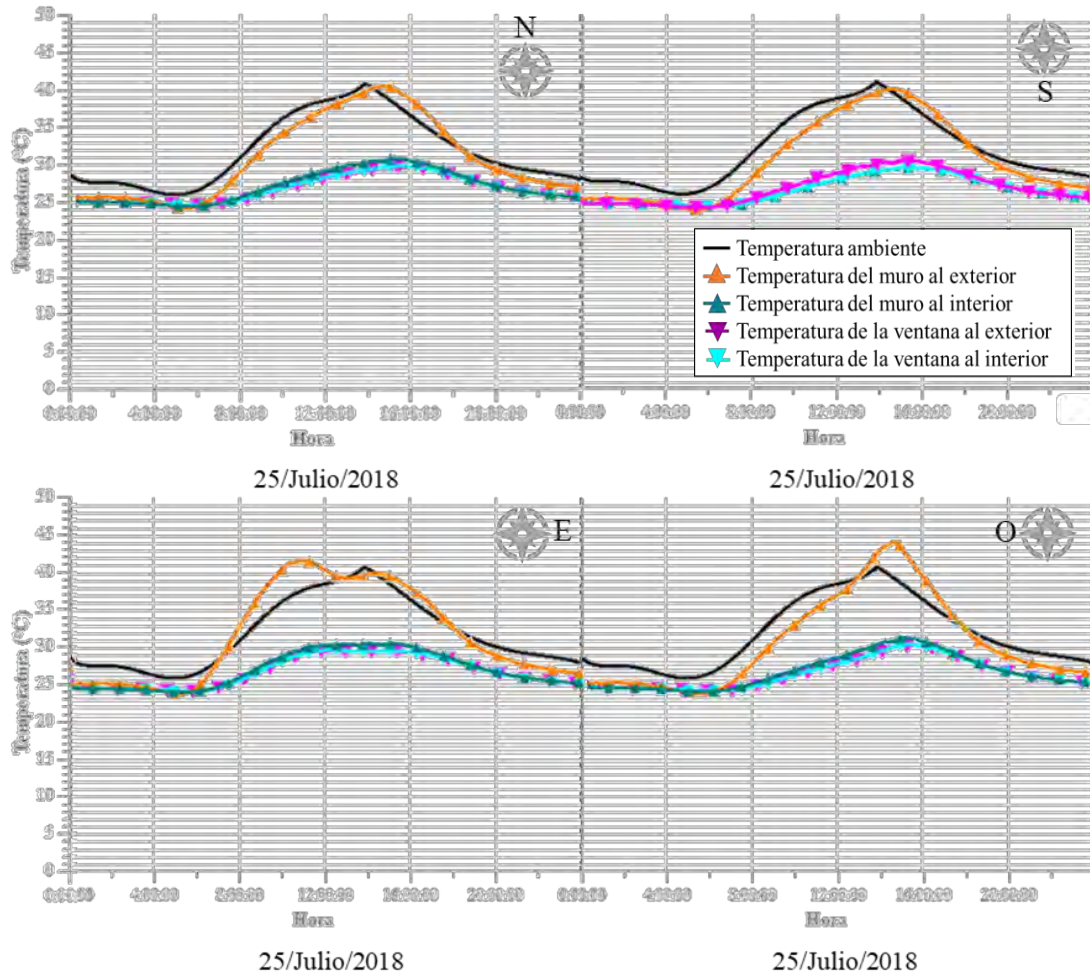
Caso	T promedio superficial exterior (°C)		T promedio superficial interior (°C)	
	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima
1	40.20	24.05	29.59	24.49
2	35.44	24.19	29.63	24.48
3	35.44	24.19	29.63	24.48
4	35.44	24.19	29.63	24.48
5	35.44	24.19	29.63	24.48
6	35.44	24.19	29.63	24.48
7	35.44	24.19	29.63	24.48
8	35.44	24.19	29.63	24.48

Se observó un comportamiento similar en las temperaturas obtenidas para el día más frío del año (Tabla 12) por lo que este análisis no muestra la influencia de la WWR sobre las temperaturas promedio en la superficie de la fachada. No obstante, la orientación de la fachada si mostró influencia sobre las temperaturas de esta, como se observa en la Figura 34, donde la fachada con orientación Sur mostró temperaturas menores a la del resto de las orientaciones. Sin embargo, el muro al interior presentó una temperatura menor, esto se debe a las propiedades térmicas y ópticas del material. El tabique rojo recocido al tener una absorptancia mayor que el vidrio, presenta temperaturas mayores al exterior, y al tener una conductividad térmica relativamente baja disipa el calor a una razón menor que el vidrio por lo que su temperatura al interior es menor.

**Tabla 12. Temperaturas superficiales de la fachada para el día más frío del año (05/Enero/2018) con orientación Norte.**

Caso	T promedio superficial exterior (°C)		T promedio superficial interior (°C)	
	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima
1	25.87	13.69	24.99	21.55
2	25.37	17.18	24.98	21.51
3	25.37	17.18	24.98	21.51
4	25.37	17.18	24.98	21.51
5	25.37	17.18	24.98	21.51
6	25.37	17.18	24.98	21.51
7	25.37	17.18	24.98	21.51
8	25.37	17.18	24.98	21.51





**Figura 34. Perfiles de temperatura del “Caso 5” en las cuatro orientaciones del día más cálido de año (25/julio/2018).**

El Anexo B muestra las temperaturas obtenidas para las ocho WWR evaluadas, en las cuatro orientaciones y para el día más cálido y más frío de los 12 meses del año típico evaluado. El análisis de las temperaturas en la fachada permitió identificar la influencia que tiene la orientación sobre las temperaturas. Sin embargo, este análisis no permitió determinar la influencia de la WWR sobre las temperaturas. Para conocer la influencia de la WWR sobre las ganancias o pérdidas de calor se realizó el análisis de los flujos de calor.

#### 4.4. Análisis de flujos de calor

Mediante el código de cómputo se obtuvieron las temperaturas sobre la superficie exterior e interior de la fachada a lo largo del día para el día más cálido y el día más frío de cada mes. Se realizó el análisis de los flujos de calor de la fachada al interior del edificio para conocer la influencia de la WWR y la orientación sobre estos. Utilizando la ley de enfriamiento de Newton (Ec. 2.2, Capítulo 2) se determinaron los flujos convectivos al interior. Con la ley de Stefan-Boltzmann (Ec. 2.3, Capítulo 2) se calcularon los flujos radiativos al interior del edificio. Para obtener el flujo total de calor a través de cada elemento de la fachada ( $Q_{total,elemento}$ ), se sumaron los flujos convectivos y radiativos hacia el interior del edificio de cada elemento, como se expresa en la Ec. 4.3.

$$Q_{total,elemento} = Q_{conv} + Q_{rad} \quad (4.3)$$

El flujo de calor total a través de la fachada ( $Q_{total}$ ) se obtuvo sumando el flujo de calor desde el muro inferior hacia el interior ( $Q_{muroinferior}$ ), el flujo de calor desde la ventana hacia el interior ( $Q_{ventana}$ ) y el flujo de calor desde muro superior hacia el interior ( $Q_{murosuperior}$ ), como se muestra en la Ec. 4.4.

$$Q_{total} = Q_{muroinferior} + Q_{ventana} + Q_{murosuperior} \quad (4.4)$$

Los flujos de calor máximos y mínimos obtenidos para las diferentes WWR evaluadas y para cada orientación son presentados en el Anexo B. Para analizar la influencia de la WWR y la orientación sobre los flujos de calor se consideraron los resultados obtenidos del día más cálido y más frío del año. Para mantener un ambiente de confort en el interior el flujo de calor hacia el interior debe ser mínimo.

La Tabla 13 muestra los flujos máximos y mínimos de cada caso y orientación del día más cálido del año. Donde el signo positivo expresa que hay un intercambio de calor desde la fachada hacia el interior y el signo negativo expresa un intercambio de calor desde el interior hacia la fachada. Al ser el día más cálido del año predomina el intercambio de calor desde la fachada hacia el interior. Se observó que a medida que la WWR aumenta, el flujo de calor máximo al interior disminuye, esto se debe a que el vidrio permite disipar flujo de

calor a una razón mayor que el tabique. La orientación Sur fue la que menor flujo de calor hacia el interior presentó, con un flujo de calor máximo de 180.85 W, como se muestra en las celdas sombreadas de la Tabla 13. Particularmente, para este día del año la radiación global incidente sobre la orientación Sur es menor que para el resto de las demás orientaciones. Mientras que la orientación Oeste fue la que mayor flujo de calor hacia el interior mostró con un flujo máximo de 216.49 W. Para este día, la orientación óptima para mantener un ambiente de confort en el interior es la orientación Sur y una WWR= 53.8% (“Caso 8”).

**Tabla 13. Flujos de calor máximos y mínimos al interior para el día más cálido del año (25/Julio/2018) en las cuatro orientaciones.**

Caso	Norte		Sur		Este		Oeste	
	Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)
1	183.07	-0.18	181.54	-1.13	195.85	0.75	218.02	-1.13
2	182.97	-0.22	181.44	-1.16	195.58	0.70	217.80	-1.16
3	182.87	-0.25	181.34	-1.20	195.33	0.64	217.58	-1.20
4	182.77	-0.30	181.24	-1.23	195.09	0.59	217.36	-1.23
5	182.67	-0.34	181.14	-1.26	194.87	0.54	217.14	-1.26
6	182.57	-0.39	181.04	-1.30	194.66	0.49	216.92	-1.30
7	182.47	-0.44	180.94	-1.33	194.44	0.43	216.71	-1.33
8	182.37	-0.49	180.85	-1.37	194.22	0.38	216.49	-1.37

La Tabla 14 muestra los flujos de calor hacia el interior para cada caso y orientación del día más frío del año. En este día predominó el flujo de calor desde el interior hacia la fachada. Para mantener un ambiente de confort en el interior el flujo de calor desde el interior hacia la fachada debe ser reducido.

A diferencia de los resultados obtenidos del día más cálido, en el día más frío a medida que se incrementa la WWR el flujo de calor desde el interior hacia la fachada también aumenta. Para ese día la orientación óptima es la orientación Este y con una WWR igual al “Caso 1”, como se observa en las celdas sombreadas de la Tabla 14.

**Tabla 14. Flujos de calor máximos y mínimos al interior para el día más frío del año (05/Enero/2018) en las cuatro orientaciones.**

Caso	Norte		Sur		Este		Oeste	
	Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)
1	62.28	-364.90	62.28	-364.87	62.28	-364.85	62.28	-364.90
2	61.97	-364.98	61.97	-364.95	61.97	-364.93	61.97	-364.98
3	61.67	-365.08	61.67	-365.05	61.67	-365.03	61.67	-365.08
4	61.36	-365.17	61.36	-365.14	61.36	-365.12	61.36	-365.17
5	61.05	-365.27	61.05	-365.24	61.05	-365.22	61.05	-365.27
6	60.74	-365.36	60.74	-365.34	60.74	-365.31	60.74	-365.36
7	60.43	-365.46	60.43	-365.43	60.43	-365.41	60.43	-365.46
8	60.12	-365.56	60.12	-365.53	60.12	-365.51	60.12	-365.56

De las Tabla 13 se infiere que, para mantener un ambiente de confort en el interior cuando las temperaturas al exterior son altas, el maximizar la WWR minimizará el flujo de calor al interior. El vidrio al tener una menor masa térmica permite disipar la energía excedente durante las horas sin radiación, de tal forma que se reduce la ganancia de calor durante el día, en contraste con los muros de tabique. La Tabla 14 muestra el caso opuesto, donde el flujo de calor del interior hacia la fachada es mayor, por lo que mantener una WWR mínima reducirá este flujo.

Este análisis demostró que la WWR y la orientación influyen sobre los flujos de calor hacia el interior de la fachada. Sin embargo, este análisis muestra los flujos de calor máximos en un determinado instante del día. Para conocer su efecto a lo largo del día se realizó el análisis de las ganancias térmicas.

#### 4.5. Análisis de ganancias térmicas

Una vez que se calcularon los flujos de calor totales al interior, se determinó la ganancia de calor para el día más cálido y más frío de cada mes de un año típico, para las cuatro orientaciones y los ocho casos. Para determinar la ganancia o pérdida de calor al interior se utilizó la integración numérica por medio de la regla del trapecio sobre los valores de flujo de calor en todo el día de modelación, Ec. 4.5.

$$\int_{t_0}^{t_1} Q_{tot}(t)dt = t_1 - t_0 \left( \frac{Q_{total,(t_1)} + Q_{total,(t_0)}}{2} \right) \quad (4.5)$$

Donde  $t_1$  es el tiempo actual y  $t_0$  es un tiempo anterior. El Anexo B muestra las ganancias y pérdidas de calor para cada caso y orientación. La Tabla 15 muestra las ganancias térmicas para cada caso y orientación del día más cálido del año. Al igual que en el análisis de los flujos de calor, a medida que se incrementa la WWR la ganancia térmica al interior disminuye, como se observa en la fila subrayada de la Tabla 15. Mientras que, para el día más frío del año (Tabla 16), a medida que se incrementa la WWR la pérdida de calor también incrementa, como se observa en la fila subrayada de la Tabla 16.

**Tabla 15. Ganancia térmica al interior para el día más cálido del año (25/Julio/2018) en las cuatro orientaciones.**

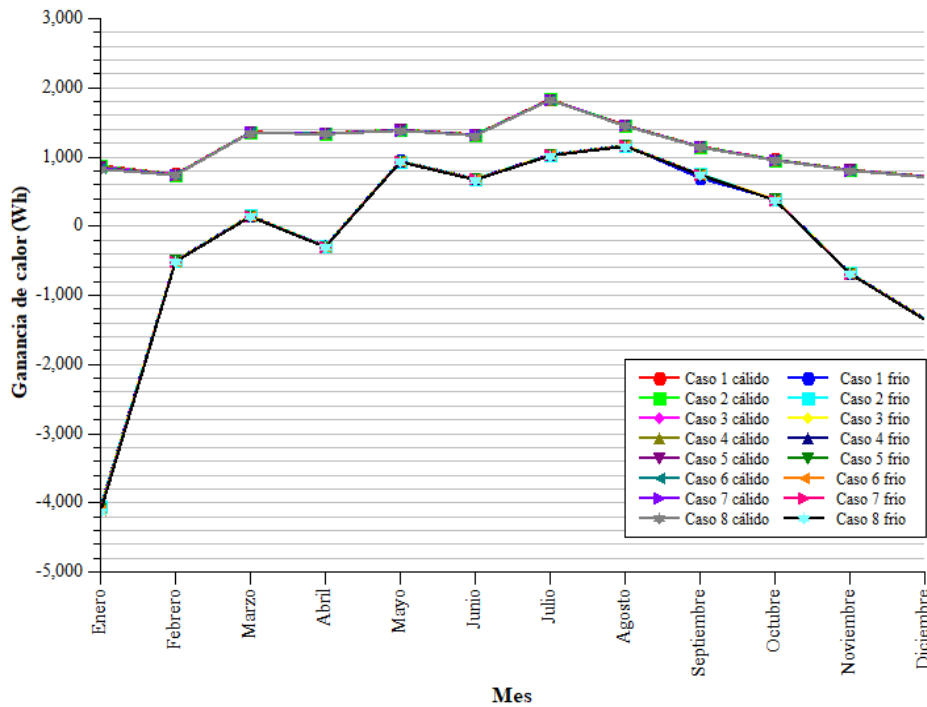
Caso	Ganancia térmica total (Wh)			
	Norte	Sur	Este	Oeste
1	1834.5	1778	2197.2	1908.9
2	1832.6	1776.3	2194.2	1906.9
3	1830.7	1774.5	2191.2	1904.7
4	1828.8	1772.8	2188.2	1902.6
5	1826.9	1771	2185.2	1900.4
6	1825	1769.3	2182.2	1898.3
7	1823.1	1767.5	2179.2	1896.2
8	1821.1	1765.8	2176.2	1894

**Tabla 16. Ganancia térmica al interior para el día más frío del año (05/Enero/2018) en las cuatro orientaciones.**

Caso	Ganancia térmica total (Wh)			
	Norte	Sur	Este	Oeste
1	-4052.3	-3990.3	-4042.2	-4021.1
2	-4062.5	-4001.6	-4053.4	-4032.4
3	-4073.7	-4013	-4064.6	-4043.7
4	-4084.9	-4024.4	-4075.8	-4054.9
5	-4096.1	-4035.7	-4087	-4066.2
6	-4107.2	-4047.1	-4098.2	-4077.5
7	-4118.5	-4058.5	-4109.5	-4088.8
8	-4129.6	-4069.8	-4120.7	-4100

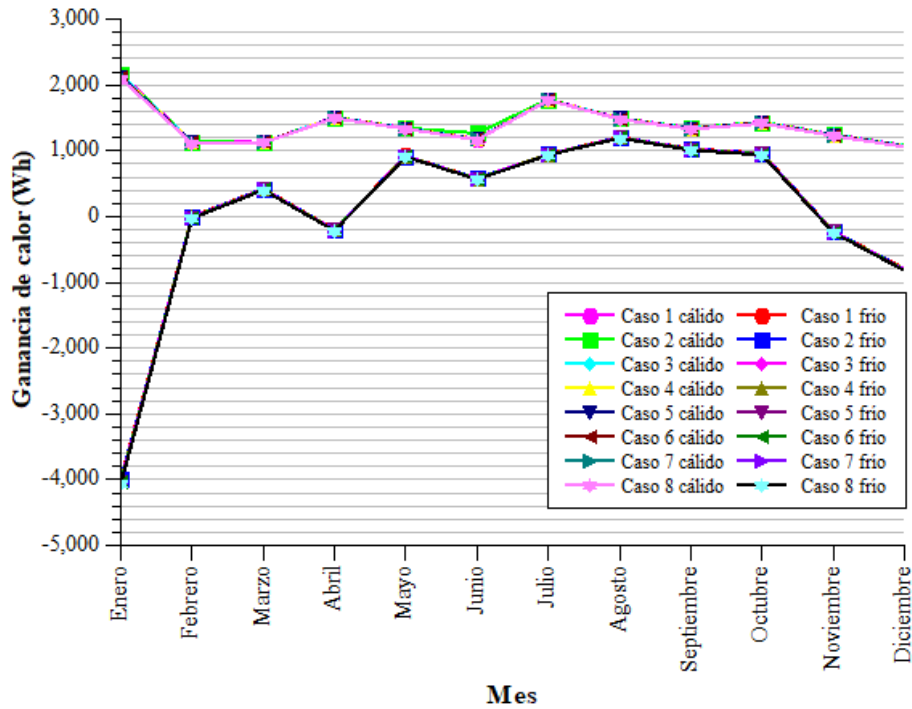
Para conocer el efecto de la WWR y la orientación a lo largo del año se graficaron las ganancias de calor al interior para el día más cálido y el día más frío de cada mes. La Figura 35 muestra las ganancias de calor cuando la fachada se encuentra orientada hacia el Norte. Se observó que para los días más cálidos la mayor ganancia térmica se presentó el 25

de julio, dicho día es el día más cálido del año. Mientras que, para los días cálidos la menor ganancia se presentó el 02 de diciembre. Asimismo, para los días más fríos del año el día con mayores pérdidas de energía coincide con el día más frío del año (05 de enero), y el día con mayor ganancia fue el 07 de agosto.



**Figura 35. Ganancia de calor en la orientación Norte**

La Figura 36 muestra de forma cualitativa las ganancias de calor cuando la fachada se encuentra orientada al Sur. En esta gráfica se aprecia que, para los días más cálidos del año, el día con mayor ganancia térmica fue el 22 de enero, y el día con menor ganancia el 02 de diciembre. Para los días más fríos del año la mayor pérdida térmica se presentó el 05 de enero y el día con mayor ganancia el 07 de agosto.



**Figura 36. Ganancia de calor en la orientación Sur.**

La Figura 37 muestra la ganancia de calor cuando la fachada se orienta hacia el Este. Al igual que en la orientación Norte, para los días más cálidos del año la mayor ganancia térmica se presentó el 25 de julio, y la menor ganancia el 02 de diciembre. Para los días más fríos del año el día con mayores pérdidas de energía fue el 05 de enero, y el día con mayor ganancia el 07 de agosto.

La Figura 38 muestra la ganancia de calor cuando la fachada está orientada hacia el Oeste. Se observó que para las orientaciones Norte, Este y Oeste las mayores ganancias y pérdidas de calor se presentaron en el día 25 de julio y 05 de enero, respectivamente. Para la fachada orientada hacia el Sur la mayor ganancia de calor se tuvo el día 22 de enero, mientras que, la mayor pérdida de calor se tuvo el 05 de enero.

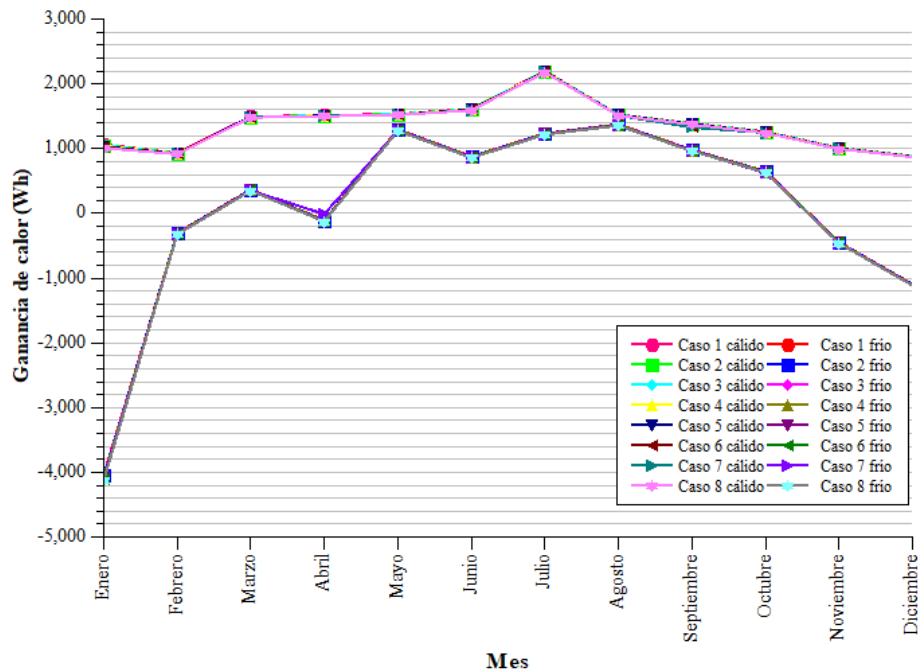


Figura 37. Ganancia de calor en la orientación Este.

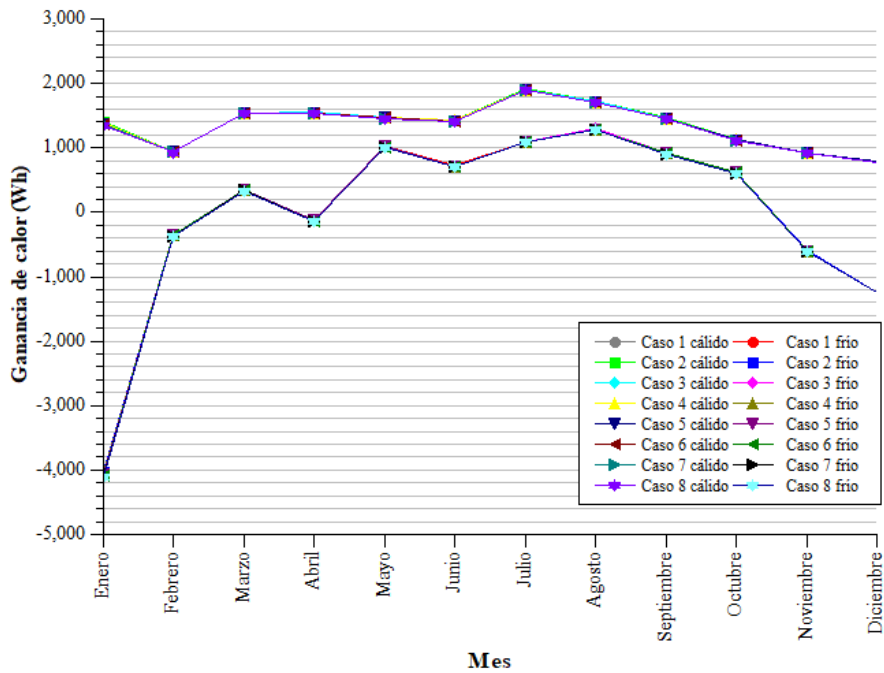


Figura 38. Ganancia de calor en la orientación Oeste.

Estas gráficas mostraron el comportamiento del flujo a lo largo del día y como son afectados por la radiación incidente. Sin embargo, para determinar el caso con menor consumo eléctrico para climatización se realizó un análisis económico.



#### 4.6. Análisis económico

Se realizó un análisis económico para determinar WWR con la cual el costo de energía eléctrica para climatización es menor. Para realizar este análisis se consideró la ganancia o pérdida térmica a través de la fachada y el costo de la energía eléctrica necesaria para climatizar y mantener un ambiente de confort.

Se consideraron las tarifas de consumo eléctrico proporcionadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) del año 2021. De acuerdo con la CFE la ciudad de Mérida, Yucatán, se clasifica como tarifa tipo C1. Esta tarifa se aplica a los servicios que destinan la energía eléctrica para uso exclusivamente doméstico y para localidades cuya temperatura promedio en verano sea mayor de 30°C (Comisión Federal de Electricidad, 2021). La temporada de verano para la ciudad de Mérida inicia el mes de abril y se extiende los seis meses consecutivos del año, por lo que la tarifa sufre de un ajuste en esta temporada. Se considera una tarifa fuera de la temporada de verano, es decir, para los meses de enero, febrero, marzo, octubre, noviembre y diciembre, y otra tarifa en la temporada de verano (abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre).

La tarifa fuera de la temporada de verano se divide en tres tipos de consumo: consumo básico, consumo intermedio y consumo excedente. El consumo básico se considera hasta los primeros 75 kWh, el consumo intermedio considera de 75 kWh hasta un máximo de 175 kWh, y el consumo excedente se considera cuando el consumo sobrepasa los 175kWh. La tarifa en la temporada de verano se divide en cuatro tipos de consumo: consumo básico, consumo intermedio bajo, consumo intermedio alto y consumo excedente. El consumo básico comprende hasta los primero 150 kWh, el consumo intermedio bajo comprende hasta 300kWh, el consumo intermedio alto comprende de los 300 a los 450 kWh y el consumo excedente considera los kWh adicionales. La Tabla 17 muestra las cuotas del kWh para cada mes del año según el tipo de consumo y temporada.

**Tabla 17. Costo del kWh para Mérida, Yucatán.**

Mes	Consumo básico (MX \$)	Consumo intermedio (MX \$)	Consumo excedente (MX \$)
Enero	0.855	1.034	3.026
Febrero	0.857	1.037	3.034
Marzo	0.859	1.04	3.042
Abril	0.765	0.89* 1.146**	3.05
Mayo	0.767	0.892* 1.149**	3.058
Junio	0.769	0.894* 1.152**	3.066
Julio	0.771	0.896* 1.155**	3.074
Agosto	0.773	0.898* 1.158**	3.082
Septiembre	0.775	0.9* 1.161**	3.09
Octubre	0.873	1.061	3.098
Noviembre	0.875	1.064	3.106
Diciembre	0.877	1.067	3.115

\* Consumo intermedio bajo. \*\* Consumo intermedio alto.

El análisis económico consideró las ganancias o pérdidas térmicas de cada mes del año. Para obtener costo del consumo eléctrico anual se consideró el uso de un sistema de climatización activo con una eficiencia del 100% por lo que la demanda de energía eléctrica del sistema es igual a la ganancia térmica a través de la fachada. Al solo contar con la ganancia térmica del día más cálido ( $Ganancia_{cálido}$ ) y más frío ( $Ganancia_{frío}$ ) de cada mes, para obtener la ganancia térmica mensual ( $Ganancia_{mes}$ ) se consideró que medio mes presentó el clima del día más cálido y la otra mitad del mes el clima del día más frío, como se expresa en la Ec. 4.6.

$$Ganancia_{mes} = \frac{|(Ganancia_{cálido})(N/2) + |(Ganancia_{frío})(N/2)|}{1000} \quad (4.6)$$

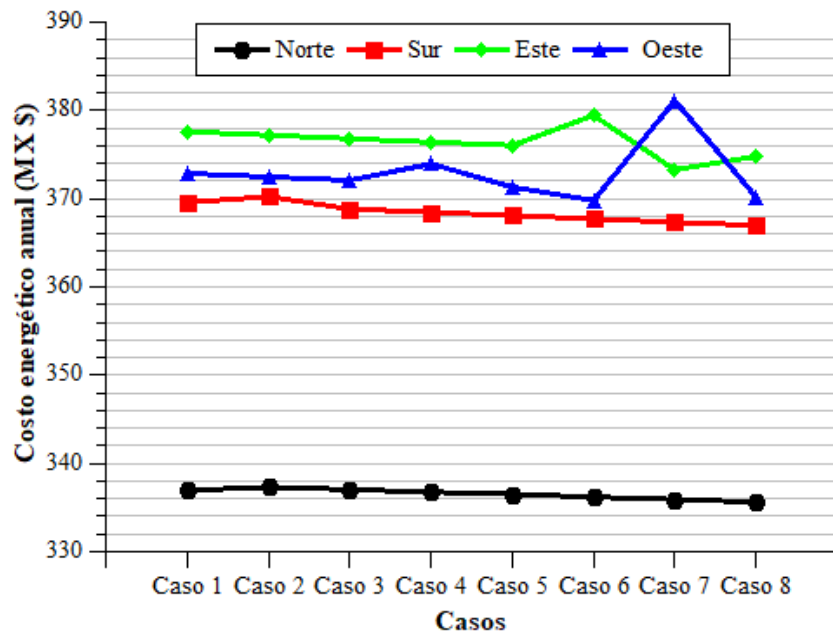
Donde  $N$  es el número de días del mes. Una vez que se obtuvo la ganancia térmica mensual esta se multiplica por la tarifa según el consumo obteniendo así el costo eléctrico

mensual ( $Costo_{mes}$ ) (Ec. 4.7), y a su vez, se suma el consumo eléctrico de cada mes para obtener el consumo eléctrico anual ( $Costo_{anual}$ ), como se muestra en la Ec. 4.8.

$$Costo_{mes} = (Ganancia_{mes})(Tarifa) \quad (4.7)$$

$$Costo_{anual} = \sum_{i=Enero}^{i=Diciembre} Ganancia_{mes}(i) \quad (4.8)$$

Este procedimiento se realizó para los ocho casos de la WWR y para las cuatro orientaciones. La Figura 39 muestra el costo energético anual para cada caso y orientación.



**Figura 39. Costo energético anual de climatización.**

De acuerdo a los resultados obtenidos del análisis económico las WWR tienen un impacto en el consumo energético para climatización. Se observó que para las orientaciones Norte y Sur el caso con mayor consumo eléctrico fue el “Caso 2” que muestra un costo anual para climatización de \$336.94 y \$370.22, respectivamente. Mientras que, el caso con menor consumo energético fue el “Caso 8” con un costo anual para climatización de \$335.63 para el Norte y \$366.96 para el Sur. Para la orientación Este el caso con mayor consumo eléctrico fue el “Caso 6” con un costo anual \$379.43, el caso con menor consumo energético fue el “Caso 7” con un costo anual para climatización de \$373.27. Finalmente, para la orientación

Oeste el caso con mayor consumo eléctrico se presentó en el “Caso 7” que muestra un costo anual \$381.11, el caso con menor consumo energético es el “Caso 6” con un costo anual de \$369.78.

## Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas de este trabajo y algunas recomendaciones para trabajos futuros. En la Sección 5.1. se describe el problema de transferencia de calor sobre una fachada y las consideraciones tomadas para llegar a los resultados obtenidos. También, se muestran las conclusiones de dicho trabajo. En la Sección 5.2. se presentan algunas recomendaciones para futuros trabajos de transferencia de calor en fachadas.

### 5.1. Conclusiones

Se modeló numéricamente el comportamiento térmico multidimensional en estado transitorio de una fachada bajo las condiciones climáticas de Mérida, Yucatán, México. Se consideró una fachada compuesta por un muro inferior, una ventana y un muro superior, de 3.5 m de ancho y 2.6 m de alto. Los muros se consideraron de ladrillo rojo recocido con un espesor de 0.12m y la ventana de vidrio claro de 0.006 m de espesor. Se realizó un estudio paramétrico variando la WWR en ocho casos diferentes y su orientación en Norte, Sur, Este y Oeste. En el “Caso 1” se consideró una WWR de 0%, en el “Caso 2” de 7.7%, en el “Caso 3” de 15.4%, en el “Caso 4” de 23.1%, en el “Caso 5” de 30.8%, en el “Caso 6” de 38.5%, en el “Caso 7” de 46.2% y en el “Caso 8” de 53.8%.

Los datos climáticos considerados fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) correspondientes al día más cálido y más frío de cada mes de un año típico. Se planteó el modelo matemático mediante balances de energía y se desarrolló un código computacional en lenguaje ANSI C99 para la solución de la transferencia de calor en una fachada. A partir de los resultados del estudio paramétrico se llegaron a las siguientes conclusiones:

- De acuerdo a los ejercicios de verificación realizados, se observó que la metodología de balances de energía mostró ser una alternativa acertada para la

evaluación de la transferencia de calor en estado transitorio en los componentes de edificaciones. El uso del modelo en estado transitorio permitió evaluar el efecto de la masa térmica en las fachadas típicas.

- Los coeficientes convectivos influyen directamente en los resultados de la transferencia de calor. Por lo que, se debe realizar una correcta selección de estos de acuerdo a los factores considerados en el planteamiento del problema.
- De acuerdo con los resultados obtenidos, la orientación influye directamente sobre la ganancia de calor al interior del edificio. Esto se debe a que las diferencias entre la radiación incidente de cada orientación son significativas.
- El efecto de la masa térmica de los materiales repercute en la selección de la WWR óptima. En días cálidos el tener una WWR mayor favorecerá el mantener un ambiente de confort en el interior. Para días fríos el tener una WWR menor ayudará a mantener un ambiente de confort en el interior.
- Del análisis de costos se concluyó que, las WWR que logran reducir el costo energético para climatización para cada orientación son: 53.8% (“Caso 8”) para el Norte, 53.8% (“Caso 8”) para el Sur, 46.2% (“Caso 7”) para el Este, 38.5% (“Caso 6”) para el Oeste.

En general, se concluye que la orientación de la fachada afecta la ganancia de calor a través de esta, y una adecuada selección de la WWR disminuye las ganancias de calor al interior.

## 5.2. Recomendaciones para trabajos futuros

Con el propósito de realizar un estudio más completo variando la WWR en trabajos futuros, se sugieren las siguientes recomendaciones:

- Evaluar el efecto de la capa límite de la velocidad del viento a lo largo del eje y.

- Considerar ganancias de calor debido a ocupantes y demás aparatos eléctricos.
- Modelar la fachada utilizando diferentes tipos de materiales de construcción, con diferentes propiedades térmicas y ópticas: materiales aislantes, materiales de cambio de fase y modelar la fachada considerando múltiples capas de materiales.
- Evaluar más zonas climáticas del país.
- Realizar un análisis económico considerando la carga eléctrica del edificio.

## Referencias bibliográficas

- Aguilar J., Xamán J., Álvarez G., Hernández-Pérez I. y López-Mata C. (2015). Thermal performance of a double pane window using glazing available on the Mexican market. *Renewable Energy*, 81, 785-794.
- Ahmed K. y Kurnitski J. (2021). New Equation for Optimal Insulation Dependency on the Climate for Office Buildings. *Energies*, 14(2), 321.
- Al-Ashwal N. y Hassan A. (2017). Impact of Window's Height on Energy Efficiency in Air-Conditioned Office Buildings. *Advanced Science Letters*, 23, 11540-11544.
- Aldawoud A. (2017). Assessing the energy performance of modern glass facade systems. *MATEC Web of Conferences*, 120.
- Alghoul S., Rijabo H. y Mashena M. (2017). Energy consumption in buildings: A correlation for the influence of window to wall ratio and window orientation in Tripoli, Libya. *Journal Of Building Engineering*, 11, 82-86.
- Alhagla K., Mansour A. y Elbassuoni R. (2019). Optimizing windows for enhancing daylighting performance and energy saving. *Alexandria Engineering Journal*, 58(1), 283- 290.
- Alwetaishi M. (2019). Impact of glazing to wall ratio in various climatic regions: A case study. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 31(1), 6-18.
- Alwetaishi M. y Taki A. (2019). Investigation into energy performance of a school building in a hot climate: Optimum of window-to-wall ratio. *Indoor and Built Environment*, 29(1), 24-39.
- Amaral A., Rodrigues E., Gaspar A. y Gomes Á. (2016). A thermal performance parametric study of window type, orientation, size and shadowing effect. *Sustainable Cities and Society*, 26, 456–465.



- Asfour O. (2020). A comparison between the daylighting and energy performance of courtyard and atrium buildings considering the hot climate of Saudi Arabia. *Journal of Building Engineering*, 30.
- ASHRAE. (1975). Procedure for Determining Heating and Cooling Loads for Computerising Energy Calculations. Algorithms for Building Heat Transfer Subroutines, ASHRAE.
- ASHRAE 55. (2004). ANSI/ASHRAE Standard 55-2004: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE. (2009). ASHRAE handbook of fundamentals. Chapter 15: fenestration Atlanta. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- ASTM-E-490-00a. (2014). Standar Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectrak Irradiance.
- Barrios G., Elías P. y Rojas J. (2010). Selección De Los Materiales De Muros Y Techos Para Mejorar El Confort Térmico En Edificaciones No Climatizadas.
- Bas H. (2020). Hybrid-model simulations to equilibrate the energy demand and daylight autonomy as a function of window-to-wall ratio and orientation for a perimeter office in Izmir. MEGARON / Yıldız Technical University, Faculty of Architecture EJournal, 15(4), 537–5.
- Bhandari N. y Sundaram A. (2019). Optimization of Windows for Daylighting and Energy Consumption for South Facade in Office Building in Hot and Dry Climate of India. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 307-320.
- Bokel R. (2007). The effect of window position and window size on the energy demand for heating, cooling and electric lighting. IBPSA 2007 - International Building Performance Simulation Association, 117–121.
- Castillo R. (2010). Evaluación Térmica de Componentes de Envolventes de Edificaciones con Reducida Masa Térmica Expuestos a Diferentes Condiciones Ambientales y a

Diferentes Ángulos de Incidencia Solar. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Cengel Y. y Ghajar A. (2011). Transferencia de calor y de masa. McGraw Hill.

Cesari S., Valdiserri P., Coccagna M. y Mazzacane S. (2018). Energy savings in hospital patient rooms: the role of windows size and glazing properties. *Energy Procedia*, 148, 1151- 1158.

CIBS (Chartered Institute of Building Services). (1979). Guide Book A, Section A3, CIBS.

Chávez-Galán J., Almanza R. y Rodríguez N. (2014). Convective heat transfer coefficients: experimental estimation and its impact on thermal building design for walls made of different Mexican building materials. *Concreto Y Cemento. Investigación Y Desarrollo*, 5(2), 26-38.

Chi F., Wang Y., Wang R., Li G. y Peng C. (2020). An investigation of optimal window to wall ratio based on changes in building orientations for traditional dwellings. *Solar Energy*, 195, 64–81.

Comisión Federal de Electricidad. (2021).

Gastines M. y Pattini A. (2020). Window energy efficiency in Argentina - Determining factors and energy savings strategies. *Journal of Cleaner Production*, 247.

DesignBuilder. (2021). DesignBuilder [Windows].

Dincer I. (2000). Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 4(2), 157-175.

Diasty R. (1988). Transient three-dimensional thermal analysis of external wall panels. *Building And Environment*, 23(4), 291-301.

Elghamry R. y Hassan H. (2019). Impact of window parameters on the building envelope on the thermal comfort, energy consumption and cost and environment. *International Journal of Ventilation*, 19(4), 233- 259.

- Ergs D., Klein S. y Duffie J. (1982). Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, 28(4), 293-302.
- Feng G., Chi D., Xu X., Dou B., Sun Y. y Fu Y. (2017). Study on the Influence of Window-wall Ratio on the Energy Consumption of Nearly Zero Energy Buildings. *Procedia Engineering*, 205, 730–737.
- García E. (1981). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República mexicana).
- González E. (2017). Evaluación Térmica de Vidrios de Control Solar Disponibles en el Mercado Mexicano para Ventanas de Vidrio Doble. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- Hagishima A. y Tanimoto J. (2003). Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces. *Building and Environment*, 38, 873-881.
- Hassouneh K., Alshboul A. y Al-Salaymeh A. (2010). Influence of windows on the energy balance of apartment buildings in Amman. *Energy Conversion and Management*, 51(8), 1583–1591.
- Incropera F. y DeWitt D. (1996). *Fundamentals of heats and mass transfer*. Wiley.
- INEGI. (2005) Marco Geoestadístico Municipal, versión 3.1.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2019). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). ESTADÍSTICAS A PROPÓSITO DEL DÍA MUNDIAL DE LA POBLACIÓN (11 DE JULIO) DATOS NACIONALES.
- International Energy Agency. (2007). *World Energy Outlook 2007*. Paris: International Energy Agency (IEA).
- Jayamaha S., Wijesundera N. y Chou S. (1996). Measurement of the heat transfer coefficient for walls. *Building and Environment* 31, 399-407.

- Jiru T., Taob Y. y Haghghat F. (2011). Airflow and heat transfer in double skin facades. *Energy and Buildings*, 43(10), 2760–2766.
- Kalogirou S. (2014). *Solar Energy Engineering Processes and Systems*. Elsevier.
- Kalogirou S. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Prog. Energy Combust. Sci.* 30 (3), 231–295.
- Key World Energy Statistics. (2020). *Key World Energy Statistics*. International Energy Agency.
- Koranteng C., Simons B. y Essel C. (2017). An empirical analysis of the thermal performance of curtain wall office buildings in Ghana: the window-to-wall ratio effect. 6th International Conference on Infrastructure Development in Africa
- Kull T., Mairing T. y Tkaczyk A. (2015). Energy balance calculation of window glazings in the northern latitudes using long-term measured climatic data. *Energy Conversion and Management*, 89, 896–906.
- Kusuda T. (1976). *The Computer Program for Heating and Cooling Loads in Buildings*, in: NBS Building Science Series, 69, National Bureau of Standards.
- LBL (Lawrence Berkeley Laboratory). (1994). DOE2.1E-053 Source Code.
- Loveday D. y Taki A. (1996). Convective heat transfer coefficients at a plane surface on a full-scale building facade, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 39, 1729-1742.
- Mandilaras I., Atsonios I., Zannis G. y Founti M. (2014). Thermal performance of a building envelope incorporating ETICS with vacuum insulation panels and EPS. *Energy and Buildings*, 85, 654-665.
- Marino C., Nucara A. y Pietrafesa M. (2017). Does window-to-wall ratio have a significant effect on the energy consumption of buildings? A parametric analysis in Italian climate conditions. *Journal of Building Engineering*, 13, 169–183.
- McAdams W. (1954). *Heat Transmission*, McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo, Japan.

- Morrillón D. (1993). *Sistemas Pasivos de Climatización*. Universidad de Guadalajara.
- Nicol K. (1977). The energy balance of an exterior window surface, Inuvik, N.W.T. *Building and Environment*, 12.
- Norma Oficial Mexicana. (2011). NOM-020-ENER-2011, EFICIENCIA ENERGETICA EN EDIFICACIONES. - ENVOLVENTE DE EDIFICIOS PARA USO HABITACIONAL.
- Oosthuizen P. y Naylor D. (1999). *An introduction to heat transfer analysis*. New York: McGraw-Hill Companies.
- Organización de las Naciones Unidas. (2019). *Creciendo a un ritmo menor, se espera que la población mundial alcanzará 9.700 millones en 2050 y un máximo de casi 11.000 millones alrededor de 2100: Informe de la ONU*. Nueva York.
- Özisik N. (1985). *Heat transfer basic approach*. McGraw-Hill, USA.
- Patankar S. (1981). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw-Hill Book Company.
- Pathirana S., Rodrigo A. y Halwatura R. (2019). Effect of building shape, orientation, window to wall ratios and zones on energy efficiency and thermal comfort of naturally ventilated houses in tropical climate. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 10(1), 107-120.
- Pérez J., Cabanillas R., Hinojosa J. y Borbón A. (2011). Estudio Numérico de la Resistencia Térmica en Muros de Bloques de Concreto Hueco con Aislamiento Térmico. *Información Tecnológica*, 22(3), 27–38.
- Pilechiha P., Mahdavejad M., Pour Rahimian F., Carnemolla P. y Seyedzadeh S. (2020). Multi-objective optimization framework for designing office windows: quality of view, daylight and energy efficiency. *Applied Energy*, 261.
- Potrc T., Premrov M. y Žegarac V. (2019). Influence of the orientation on the optimal glazing size for passive houses in different European climates (for non-cardinal directions). *Solar Energy*, 189, 15–25.

- Rodriguez A. (2018). Evaluación Térmica de Materiales de Cambio de Fase en Techos para Edificaciones (Ing). Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- Rosas M., Espuna J. y Garcia V. (2015). Costo energético de muros y techos utilizados en la zona sur de Tamaulipas Energetic expenses of walls and roofs used in the zone of Tamaulipas. *Revista Electrónica Nova Scientia*, 7(15), 15.
- Sadafi N., Jamshidi N. y Zahedian M. (2021). Energy Efficient Design Optimization of a Building Envelope in a Temperate and Humid Climate. *Iranian (Iranica) Journal Of Energy And Environment*, 12(3), 255-263.
- Sahu D., Kini P., Kishore P., Upadhyay A. y Kamath K. (2021). Impact of window wall ratio in office building envelopes on operational energy consumption in the temperate climatic zone of India. In *Impact of window wall ratio in office building envelopes on operational energy consumption in the temperate climatic zone of India*. San Francisco, CA; IEECP'21.
- Shaeri J., Habibi A., Yaghoubi M. y Chokhachian A. (2019). The Optimum Window to Wall Ratio in Office Buildings for Hot–Humid, Hot–Dry, and Cold Climates in Iran. *Environments*, 6(4).
- Sharples S. y Charlesworth P. (1998). Full-scale measurements of wind-induced convective heat transfer from a roof-mounted flat plate solar collector. *Solar Energy*, 62 (2), 69-77.
- Sturrock N. (1971). Localised Boundary Layer Heat Transfer from External Building Surfaces. PhD thesis. University of Liverpool.
- Susorova I., Angulo M., Bahrami P. y Brent S. (2013). A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance. *Building and Environment*, 67, 1–13.
- Swinbank W. (1963). Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89(381), 339-348.
- Szokolay S. (1976). *Solar energy and building*. London: Architectural Press.

- Tao C., Li N. y Wang Y. (2019). The effect of different types of windows for residential building based on intermittent heating supply. *E3S Web of Conferences*, 136, 3020.
- Troup L., Phillips R., Eckelman M. y Fannon D. (2019). Effect of window-to-wall ratio on measured energy consumption in US office buildings. *Energy and Buildings*, 203.
- Voellinger T., Bassi A. y Heitel M. (2014). Facilitating the incorporation of VIP into precast concrete sandwich panels. *Energy and Buildings*, 85, 666- 671.
- Walton G. (1981). *Passive Solar Extension of the Building Loads Analysis and System Thermodynamics (BLAST) Program*, United States Army Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, IL.
- Wang L., Wong H. y Li S. (2007). Facade design optimization for naturally ventilated residential buildings in Singapore. *Energy and Buildings*, 39(8), 954– 961.
- Watmuff J., Charters, W. y Proctor D. (1977). Solar and Wind Induced External Coefficients for Solar Collectors. *Revue Internationale d’Heliotechnique*, 2, 56.
- Xamán J. y Gijón-Rivera M. (2016). *Dinámica de fluidos computacionales para ingenieros*, Paladio.
- Xue P., Li Q., Xie J., Zhao M. y Liu J. (2019). Optimization of window-to-wall ratio with sunshades in China low latitude region considering daylighting and energy saving requirements. *Applied Energy*, 233-234, 62-70.
- Yang Q., Liu M., Shu C., Mmereki D., Uzzal M. y Zhan X. (2015). Impact Analysis of Window-Wall Ratio on Heating and Cooling Energy Consumption of Residential Buildings in Hot Summer and Cold Winter Zone in China. *Journal of Engineering*, 2015, 1-17.
- Yazdani M., Klems J. (1994). Measurement of the exterior convective film coefficient for windows in low-rise buildings, *ASHRAE Transactions* 100 (Part 1) 1087.

Yeom S., Kim H., Hong T. y Lee M. (2020). Determining the optimal window size of office buildings considering the workers' task performance and the building's energy consumption. *Building and Environment*, 177.

Zhai Y., Wang Y., Huang Y. y Meng X. (2019). A multi-objective optimization methodology for window design considering energy consumption, thermal environment and visual performance. *Renewable Energy*, 134, 1190–1199.



## Anexos

### Anexo A: Coeficientes convectivos

El coeficiente convectivo ( $h_{conv}$ ) cuantifica la influencia de las propiedades del fluido y superficie cuando se presenta una transferencia de calor por convección. El coeficiente convectivo depende de múltiples parámetros como: la conductividad, la viscosidad, el calor específico, la densidad, las dimensiones de la superficie, la velocidad de fluido y el efecto de flotabilidad, rugosidad, etc. (Oosthuizen y Naylor, 1999). Este puede ser obtenido de forma experimental o con simulación. Para determinar el coeficiente convectivo a utilizar para los muros al exterior, se compararon los coeficientes propuestos en la literatura, como se muestra en la Tabla 19.

En la Tabla 19, se observan las diferencias entre los modelos presentados en la literatura y los factores considerados para determinar el coeficiente convectivo. Al comparar los factores considerados y las variables utilizadas para el cálculo del coeficiente convectivo se resaltan tres referencias: ASHRAE task group (1975), CIBS (1979) y Hagishima y Tanimoto (2003). Se seleccionaron las relaciones de las literaturas mencionadas debido a que se cuenta con la velocidad del viento local y la orientación. Para determinar la relación a utilizar se evaluaron los modelos empleando datos como la velocidad de viento del día más frío y más cálido de Mérida, Yucatán, de un año típico. Como se muestra en las Figuras 40 y 41.

Las Figuras 40 y 41 muestran los coeficientes convectivos para el día más cálido y más frío, respectivamente. Se observó que los valores obtenidos mediante las relaciones de ASHRAE task group (1975) y Hagishima y Tanimoto (2003) con muy similares. Sin embargo, la relación propuesta por Hagishima y Tanimoto (2003) es más actual, además, las condiciones sobre las que se obtuvo la relación reportada son similares al estudio de interés de este trabajo. Se evaluó el día más cálido (Figuras 43 y 45) y el día más frío (Figuras 42 y 44) de un año representativo de Mérida, Yucatán, y se obtuvo la temperatura de los muros sobre la superficie exterior usando la relación de Hagishima y Tanimoto (2003) para el cálculo de los coeficientes convectivos.

En las Figuras 42 a 45 no se observaron variaciones significativas en el comportamiento de los perfiles de temperatura al emplear la relación del coeficiente convectivo reportada en la literatura. Por lo tanto, se estableció el uso de la relación de Hagishima y Tanimoto (2003) para el cálculo del coeficiente convectivo sobre el muro. La Tabla 18, muestra las relaciones a evaluar para seleccionar el coeficiente convectivo para la ventana.

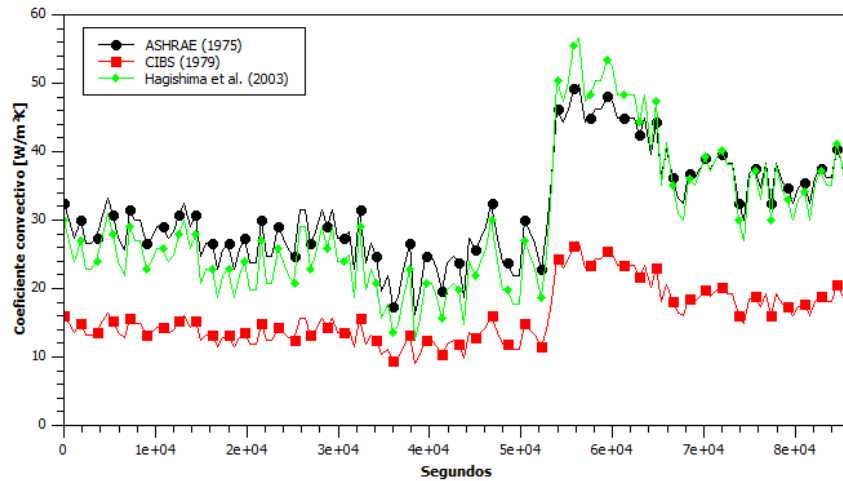


Figura 40. Coeficientes convectivos para muros del día más cálido (25/Julio/2018).

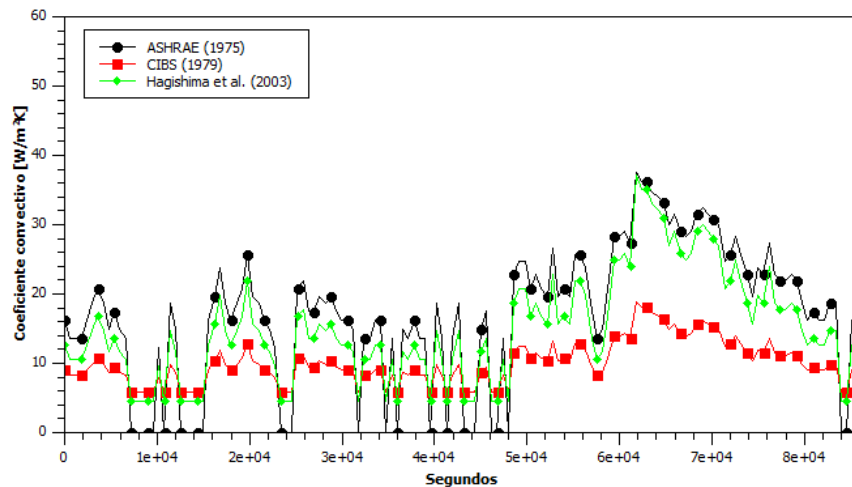
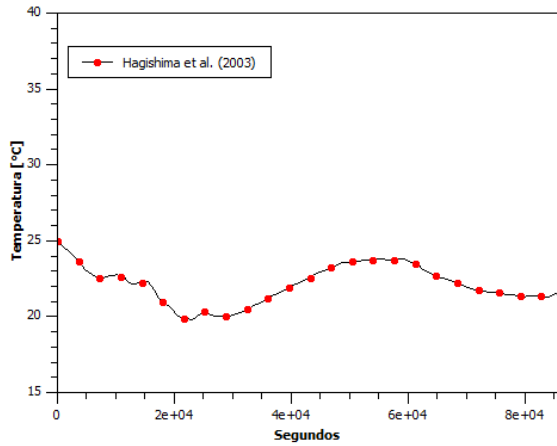
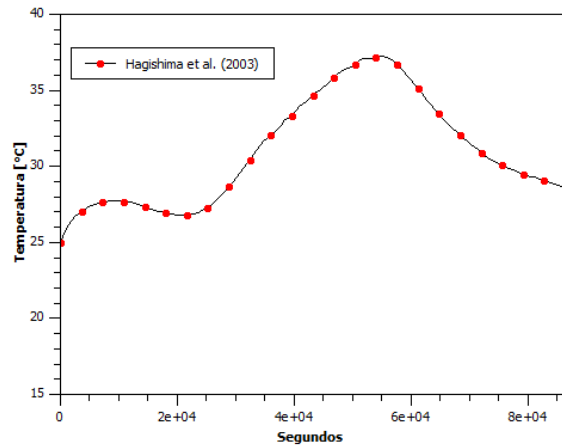


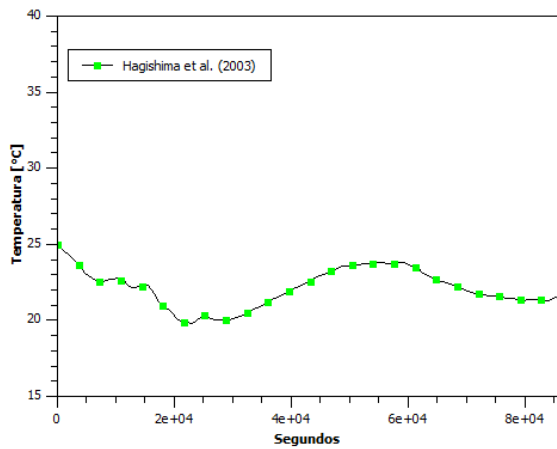
Figura 41. Coeficientes convectivos para muros del día más frío (05/Enero/2018).



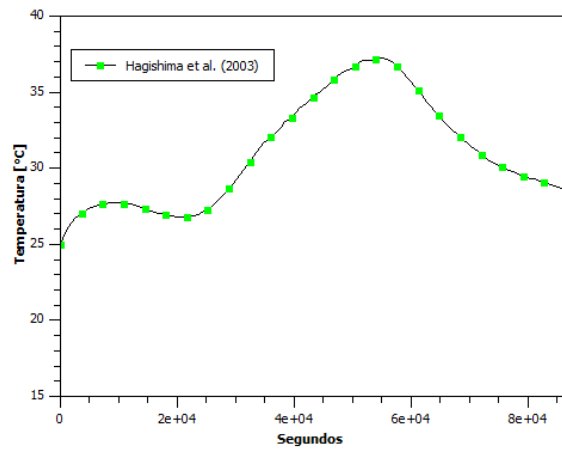
**Figura 42.** Perfil de temperatura de la superficie exterior del muro inferior del día más frío (05/Enero/2018).



**Figura 43.** Perfil de temperatura de la superficie exterior del muro inferior del día más cálido(25/Julio/2018).



**Figura 44.** Perfil de temperatura de la superficie exterior del muro superior del día más frío (05/Enero/2018).

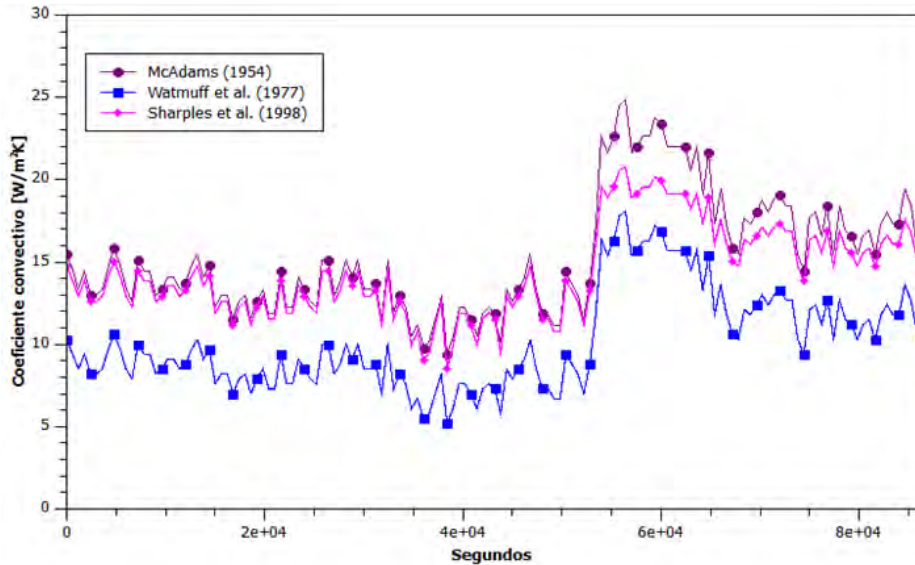


**Figura 45.** Perfil de temperatura de la superficie exterior del muro superior del día más cálido(25/Julio/2018).

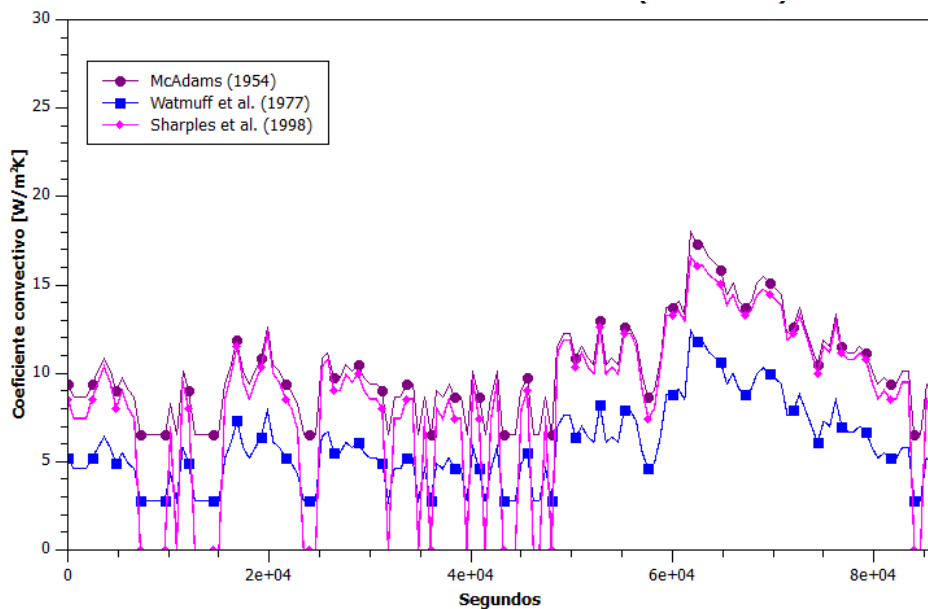
**Tabla 18.** Coeficientes convectivos para la ventana al exterior.

Autor y año	Modelo
McAdams (1954)	$h_{c,ext} = 3.6V_{loc} + 6.5$
Watmuff <i>et al.</i> (1977)	$h_{c,ext} = 3V_{loc} + 2.8$
Sharples y Charlesworth (1998)	$h_{c,ext} = 9.5V_{loc}^{0.48}$

Se evaluaron las tres relaciones para el día más cálido (Figura 46) y más frío (Figura 47) de un año representativo de Mérida, Yucatán. Se observó un comportamiento similar y con intensidad media del coeficiente convectivo para ventanas obtenido mediante la relación propuesta por Sharples y Charlesworth (1998).

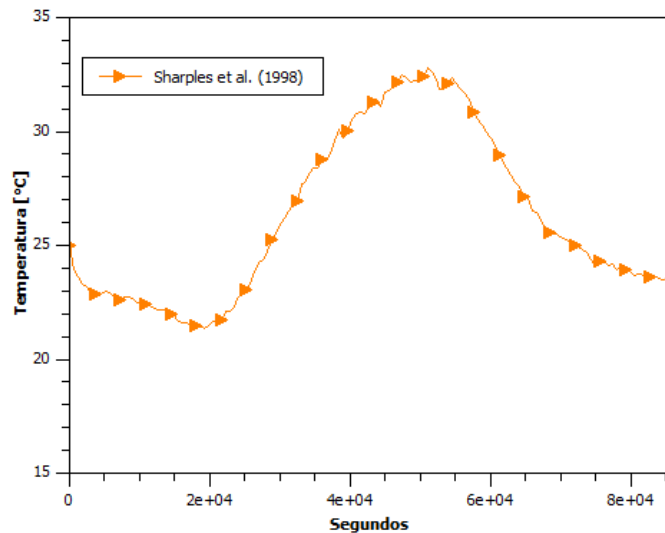


**Figura 46. Coeficientes convectivos para ventanas del día más cálido (25/Julio/2018).**

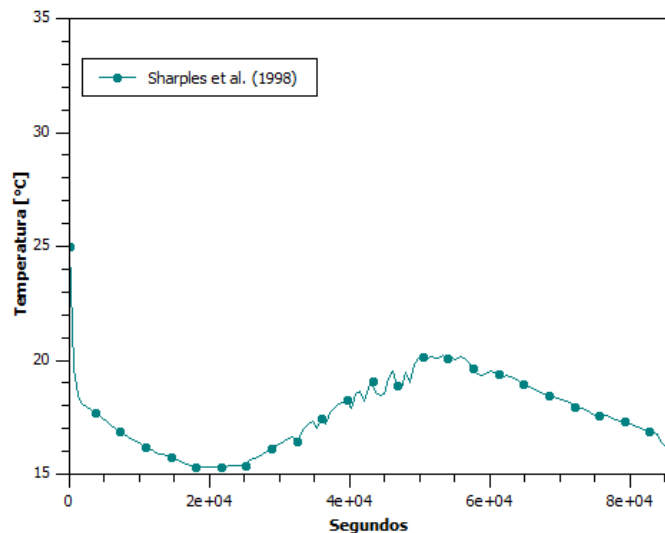


**Figura 47. Coeficientes convectivos para ventanas del día más frío (05/Enero/2018).**

Se usó la relación de Sharples y Charlesworth (1998) y se obtuvo la temperatura de la superficie exterior de la ventana para el día más cálido (Figura 48) y el día más frío (Figura 49). Se aprecia un comportamiento esperado, por lo que se seleccionó la relación de Sharples y Charlesworth para el cálculo del coeficiente convectivo en la ventana. Para el coeficiente convectivo en el interior se estableció como lo presenta ASHRAE (2009) de  $8.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ .



**Figura 48. Perfil de temperatura de la superficie exterior de la ventana del día más cálido (25/Julio/2018).**



**Figura 49. Perfil de temperatura de la superficie exterior de la ventana de día más frío (05/Enero/2018).**

Tabla 19. Coeficientes convectivos para muros al exterior.

Autor y año	Factores considerados									Modelo
	Velocidad del viento	Ángulo de ataque	Orientación de la superficie	Ángulo de inclinación de la superficie	Tipo de terreno	Efecto protector	Textura de la superficie	Diferencia de temperaturas superficie-aire	Tamaño de la superficie	
McAdams (1954)	x	x	x				x			$h_{c,ext} = 5.678 \left[ m + n \left( \frac{V_f}{0.3048} \right)^p \right]$
Sturrock (1971)	x					x				$h_{c,ext} = 6V_R + 5.7$
ASHRAE (1975)	x		x							$h_{c,ext} = 18.6V_{loc}^{0.605}$
Kusuda (1976)	x				x		x			$h_{c,ext} = D + EV_{10} + FV_{10}^2$
Nicol (1977)	x									$h_{c,ext} = 7.55V_R + 4.35$
CIBS (1979)	x					x				$h_{c,ext} = 4.1V_{loc} + 5.8$

Continúa en la siguiente página...

Tabla 19. Continuación.

Autor y año	Factores considerados									Modelo
	Velocidad del viento	Ángulo de ataque	Orientación de la superficie	Ángulo de inclinación de la superficie	Tipo de terreno	Efecto protector	Textura de la superficie	Diferencia de temperaturas superficie-aire	Tamaño de la superficie	
Walton (1981)	x		x	x	x		x	x	x	$h_{c,ext} = h_{c,for} + h_{c,nat}$ $h_{c,for} = 2.537W_fR_f \left(\frac{PV_f}{A}\right)^{0.5}$ $h_{c,nat} = 9.482 \frac{( T_s - T_a )^{\frac{1}{3}}}{7.238 -  \cos\varphi }$ <p style="text-align: center;"><i>para <math>T_s &gt; T_a</math></i></p> $h_{c,nat} = 1.810 \frac{( T_s - T_a )^{\frac{1}{3}}}{1.382 -  \cos\varphi }$ <p style="text-align: center;"><i>para <math>T_s &lt; T_a</math></i></p>
LBL (1994)	x		x		x		x	x		$h_{c,ext} = (1 - R_f)h_{c,nat} + R_f \sqrt{h_{c,nat}^2 + (aV_{10}^b)^2}$ $h_{c,nat} = 9.482 \frac{( T_s - T_a )^{\frac{1}{3}}}{7.238 -  \cos\varphi } \text{ para } T_s > T_a$ $h_{c,nat} = 1.810 \frac{( T_s - T_a )^{\frac{1}{3}}}{1.382 -  \cos\varphi } \text{ para } T_s < T_a$

Continúa en la siguiente página...

Tabla 19. Continuación.

Autor y año	Factores considerados									Modelo
	Velocidad del viento	Ángulo de ataque	Orientación de la superficie	Ángulo de inclinación de la superficie	Tipo de terreno	Efecto protector	Textura de la superficie	Diferencia de temperaturas superficie-aire	Tamaño de la superficie	
Yazdanian <i>et al.</i> (1994)	x		x		x			x		$h_{c,ext} = \sqrt{\left[ C_t(T_s - T_a)^{\frac{1}{3}} \right]^2 + (aV_{10}^b)^2}$
Loveday y Taki (1996)	x		x							$h_{c,ext} = 16.15V_{loc}^{0.397} \text{ a barlovento}$ $h_{c,ext} = 16.25V_{loc}^{0.503} \text{ a sotavento}$
Jayamaha <i>et al.</i> (1996)	x									$h_{c,ext} = 1.444V + 4.955$
Hagishima y Tanimoto (2003).	x			x						$h_{c,ext} = 10.21V_{loc} + 4.47$
Liu <i>et al.</i> (2007)	x		x							$h_{c,ext} = 6.31V_{loc} + 3.32 \text{ a barlovento}$ $h_{c,ext} = 5.03V_{loc} + 3.19 \text{ a sotavento}$

Continúa en la siguiente página...




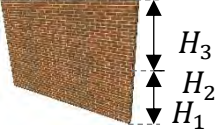














Tabla 19. Continuación.

Autor y año	Factores considerados									Modelo
	Velocidad del viento	Ángulo de ataque	Orientación de la superficie	Ángulo de inclinación de la superficie	Tipo de terreno	Efecto protector	Textura de la superficie	Diferencia de temperaturas superficie-aire	Tamaño de la superficie	
Chávez-Galán <i>et al.</i> (2014)	x		x	x			x	x		$V = 2 \frac{m}{s}; h_{c,ext} = 19.09W/m^2K$ $V = 4 \frac{m}{s}; h_{c,ext} = 29.44W/m^2K$ $V = 6 \frac{m}{s}; h_{c,ext} = 36.89W/m^2K$

Anexo B: Resultados (temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica)

Tabla 20. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 1" en la orientación Norte.

Caso:1	WWR= 0.0%	Alturas (m):	Orientación: Norte		 Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale			
								
		$H_1 = 1.2$ $H_2 = 0.0$ $H_3 = 1.4$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	 22/01/2018	32.4	26.58	19.99	23.29	261.26	-149.34	875.321
	 05/01/2018	25.876	24.99	13.69	21.55	62.28	-364.89	-4052.316
Febrero	 26/02/2018	35.75	28.13	20.55	23.27	130.13	-43.61	750.229
	 01/02/2018	31.83	26.7	15.6	21.53	78.89	-47.72	-496.98
Marzo	 19/03/2018	39.02	29.28	22.08	23.79	171.81	-25.13	1360.478
	 24/03/2018	34.83	27.67	17.29	22.14	113.64	-83.52	152.127
Abril	 07/04/2018	39.38	29.26	22.09	23.8	171.27	-24.77	1342.986
	 16/04/2018	29.37	26.06	16.41	21.88	55.89	-92.54	-287.303
Mayo	 30/05/2018	39.34	29.17	23.12	24.11	167.78	-13.68	1394.787
	 13/05/2018	36.53	28.39	20.7	23.3	139.52	-42.33	942.135
Junio	 04/06/2018	38.43	28.97	21.88	23.8	160.45	-24.8	1325.272
	 13/06/2018	34.48	27.57	21.64	23.62	110.11	-30.92	687.172

Continúa en la siguiente página...

Tabla 20. Continuación.

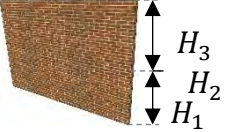















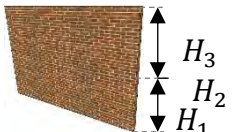















Caso:1	WWR= 0.0%	Alturas (m):	Orientación: Norte					
		$H_1 = 1.2$		 Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_2 = 0.0$						
		$H_3 = 1.4$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	 25/07/2018	40.2	29.59	24.05	24.49	183.068	-0.184	1834.537
	 10/07/2018	35.9	28.26	21.38	23.5	135.122	-35.458	1032.926
Agosto	 10/08/2018	36.33	28.4	23.48	24.25	140.068	-8.651	1459.282
	 07/08/2018	37.38	28.64	23.43	24.22	148.604	-9.876	1169.597
Septiembre	 01/09/2018	36.06	28.34	21.52	23.68	137.763	-28.859	1152.835
	 22/09/2018	35.61	28.06	19.75	23.1	118.005	-45.529	695.229
Octubre	 10/10/2018	35.68	28.22	20.79	23.31	133.45	-42.1	962.686
	 23/10/2018	33.44	27.4	18.31	22.53	104.016	-69.748	389.701
Noviembre	 12/11/2018	34.62	27.84	21.02	23.44	119.736	-37.569	815.465
	 17/11/2018	29.16	25.95	14.2	21.07	52.068	-121.036	-676.524
Diciembre	 02/12/2018	35.66	28.1	20.18	23.12	129.05	-48.64	722.919
	 22/12/2018	28.38	25.63	11.38	20.06	40.51	-156.453	-1339.116

Tabla 21. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 1" en la orientación Sur.

Caso:1	WWR= 0.0%	Alturas (m):	Orientación: Sur					
				   Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	 22/01/2018	38.1	27.94	19.99	23.29	431.68	-149.32	2167.779
	 05/01/2018	26.22	24.99	13.69	21.55	62.284	-364.868	-3990.26
Febrero	 26/02/2018	39.85	29.51	20.55	23.27	180.134	-43.592	1135.382
	 01/02/2018	36.74	28.44	15.6	21.53	141.318	-104.748	-2.317
Marzo	 19/03/2018	37.22	28.67	20.08	23.67	149.848	-14.24	1127.906
	 24/03/2018	37.15	28.62	17.29	22.14	147.898	-83.528	422.93
Abril	 07/04/2018	41.04	29.9	22.09	23.8	194.53	-24.774	1509.265
	 16/04/2018	30.68	26.45	16.41	21.88	69.948	-92.547	-199.981
Mayo	 30/05/2018	38.94	29.03	23.12	24.11	162.703	-13.771	1344.524
	 13/05/2018	36.82	28.44	20.67	23.29	141.402	-42.917	921.004
Junio	 04/06/2018	37.29	28.62	21.77	23.73	147.795	-27.244	1179.043
	 13/06/2018	33.91	27.33	21.64	23.61	101.563	-31.335	579.38

Continúa en la siguiente página...

Tabla 21. Continuación.

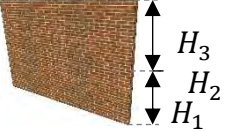















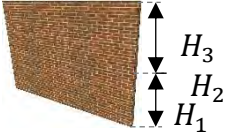

Caso:1	WWR= 0.0%	Alturas (m):	Orientación: Sur					
		$H_1 = 1.2$		 Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_2 = 0.0$						
		$H_3 = 1.4$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	 25/07/2018	40.04	29.55	24.0	24.46	181.541	-1.132	1778.003
	 10/07/2018	35.32	28.07	21.38	23.49	128.021	-35.576	947.965
Agosto	 10/08/2018	36.69	28.57	23.48	24.25	146.123	-8.651	1493.838
	 07/08/2018	38.41	28.93	23.43	24.22	159.182	-9.876	1206.534
Septiembre	 01/09/2018	38.5	29.09	21.52	23.68	165.092	-28.86	1345.484
	 22/09/2018	38.7	29.15	19.76	23.11	167.263	-49.04	1027.384
Octubre	 10/10/2018	41.8	30.1	20.79	23.31	201.485	-42.084	1436.097
	 23/10/2018	39.72	29.31	18.31	22.53	173.066	-69.613	962.639
Noviembre	 12/11/2018	39.96	29.45	21.02	23.44	178.057	-37.444	1246.777
	 17/11/2018	35.13	27.65	14.24	21.1	112.962	-120.001	-224.054
Diciembre	 02/12/2018	39.05	29.2	20.18	23.13	168.819	-48.393	1078.647
	 22/12/2018	34.31	27.44	11.38	20.07	105.418	-156.104	-795.42

Tabla 22. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 1" en la orientación Este.

Caso:1	WWR= 0.0%	Alturas (m):	Orientación: Este					
				  ☀ Día más cálido del mes ❄ Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	☀ 22/01/2018	32.45	26.64	19.99	23.29	267.863	-149.298	1062.175
	❄ 05/01/2018	25.88	24.99	13.69	21.55	62.284	-364.845	-4042.17
Febrero	☀ 26/02/2018	35.79	20.55	28.2161	23.27	133.182	-43.502	929.814
	❄ 01/02/2018	31.91	26.82	15.6	21.53	83.113	-104.748	-304.14
Marzo	☀ 19/03/2018	39.03	29.32	22.08	23.80	173.14	-24.701	1494.755
	❄ 24/03/2018	34.87	27.77	17.29	22.14	117.235	-83.421	368.845
Abril	☀ 07/04/2018	39.41	29.34	22.09	23.80	173.957	-24.766	1515.43
	❄ 16/04/2018	31.0	26.29	16.41	21.85	64.126	-92.545	-109.078
Mayo	☀ 30/05/2018	39.09	29.25	23.12	24.11	170.921	-13.579	1533.091
	❄ 13/05/2018	38.51	28.75	30.70	23.32	152.674	-41.749	1297.198
Junio	☀ 04/06/2018	38.86	28.95	21.99	23.85	159.73	-22.924	1613.338
	❄ 13/06/2018	36.36	28.18	21.64	23.63	132.008	-30.66	877.756

Continúa en la siguiente página...

Tabla 22. Continuación.

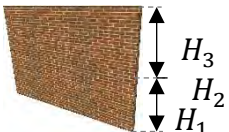















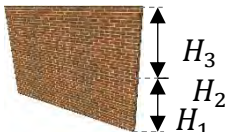














Caso:1	WWR= 0.0%	Alturas (m):	Orientación: Este						
		$H_1 = 1.2$		 Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale					
		$H_2 = 0.0$							
		$H_3 = 1.4$							
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)	
		Exterior	Interior	Exterior	Interior				
Julio	 25/07/2018	42.0	29.94	24.1	24.52	195.85	0.747	2197.216	
	 10/07/2018	36.66	28.3	21.38	23.5	136.268	-35.357	1234.104	
Agosto	 10/08/2018	36.36	28.46	23.48	24.25	142.125	-8.651	1524.03	
	 07/08/2018	38.8	29.04	23.43	24.22	163.098	-9.876	1374.498	
Septiembre	 01/09/2018	37.33	28.49	21.52	23.68	143.409	-28.856	1388.048	
	 22/09/2018	36.75	28.27	19.75	23.11	135.16	-49.302	980.651	
Octubre	 10/10/2018	38.15	28.59	20.79	23.31	146.708	-42.024	1259.817	
	 23/10/2018	34.0	27.5	18.31	22.54	107.411	-69.304	649.305	
Noviembre	 12/11/2018	34.79	27.94	21.02	23.44	123.236	-37.332	1010.751	
	 17/11/2018	30.65	26.12	14.25	21.12	58.032	-119.277	-445.991	
Diciembre	 02/12/2018	35.7	28.16	20.18	23.14	131.437	-48.194	884.09	
	 22/12/2018	28.47	25.75	11.38	20.08	44.801	-155.844	-1096.471	

Tabla 23. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 1" en la orientación Oeste.

Caso:1	WWR= 0.0%	Alturas (m):	Orientación: Oeste					
				  Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	 22/01/2018	36.09	27.41	19.99	23.29	365.176	-149.342	1410.397
	 05/01/2018	26.06	24.99	13.69	21.55	62.284	-365.896	-4021.099
Febrero	 26/02/2018	40.68	29.48	20.55	23.27	179.176	-43.612	948.272
	 01/02/2018	35.75	27.77	15.6	21.53	117.44	-104.748	-347.088
Marzo	 19/03/2018	42.66	30.33	22.08	23.79	210.032	-25.134	1543.692
	 24/03/2018	39.8	29.12	17.29	22.14	166.037	-83.528	355.33
Abril	 07/04/2018	45.12	30.74	22.09	23.8	224.968	-24.774	1550.865
	 16/04/2018	32.6	27.01	16.41	21.88	89.779	-92.547	-117.735
Mayo	 30/05/2018	43.02	29.98	23.12	24.11	197.112	-13.771	1473.527
	 13/05/2018	40.0	29.25	20.67	23.29	170.745	-42.917	1027.257
Junio	 04/06/2018	43.77	30.37	21.77	23.73	211.64	-27.244	1428.676
	 13/06/2018	35.16	27.68	21.64	23.61	113.858	-31.335	721.015

Continúa en la siguiente página...



Tabla 23. Continuación.

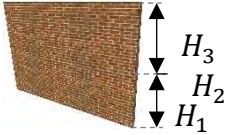















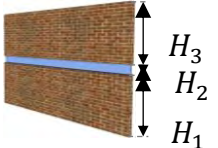












Caso:1	WWR= 0.0%	Alturas (m):	Orientación: Oeste					
		$H_1 = 1.2$		 Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_2 = 0.0$						
		$H_3 = 1.4$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	 25/07/2018	44.31	30.55	24.0	24.46	218.018	-1.132	1908.907
	 10/07/2018	39.19	29.11	21.38	23.49	165.715	-35.576	1100.419
Agosto	 10/08/2018	42.12	29.97	23.48	24.25	196.744	-8.651	1721.178
	 07/08/2018	41.7	29.54	23.43	24.22	181.113	-9.876	1299.052
Septiembre	 01/09/2018	42.55	30.16	21.52	23.68	203.998	-28.86	1466.696
	 22/09/2018	39.31	28.98	19.77	23.13	161.009	-48.589	924.728
Octubre	 10/10/2018	40.63	29.43	20.79	23.31	177.164	-42.1	1131.007
	 23/10/2018	38.85	28.91	18.31	22.53	158.399	-69.748	628.216
Noviembre	 12/11/2018	37.68	28.65	21.02	23.44	149.106	-37.569	929.398
	 17/11/2018	31.45	26.54	14.2	21.07	73.194	-121.036	-593.888
Diciembre	 02/12/2018	37.54	28.57	20.18	23.12	146.228	-48.64	791.1405
	 22/12/2018	31.23	26.35	11.38	20.06	66.165	-156.453	-1235.802

Tabla 24. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 2" en la orientación Norte.

Caso:2	WWR= 7.7%	Alturas (m):	Orientación: Norte					
								
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	 22/01/2018	29.68	26.59	21.37	23.27	260.968	-149.568	867.941
	 05/01/2018	25.37	24.98	17.18	21.51	61.974	-364.979	-4062.505
Febrero	 26/02/2018	32.33	28.14	21.66	23.24	129.966	-43.655	748.333
	 01/02/2018	29.4	26.7	18.15	21.5	78.728	-104.748	-499.312
Marzo	 19/03/2018	34.73	29.32	22.74	23.77	171.734	-25.189	1358.645
	 24/03/2018	31.63	27.68	19.28	22.1	113.521	-83.592	149.802
Abril	 07/04/2018	34.86	29.3	22.75	23.78	171.172	-24.825	1341.305
	 16/04/2018	27.79	26.06	18.78	21.85	55.792	-92.543	-289.479
Mayo	 30/05/2018	34.74	29.2	23.5	24.1	167.665	-13.716	1392.838
	 13/05/2018	32.84	28.41	21.76	23.28	139.41	-42.38	939.975
Junio	 04/06/2018	34.03	28.97	22.67	23.78	160.212	-24.832	1322.945
	 13/06/2018	31.26	27.57	22.44	23.61	109.916	-30.968	684.641

Continúa en la siguiente página...

Tabla 24. Continuación.

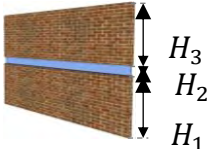















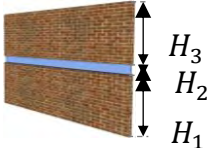















Caso:2	WWR= 7.7%	Alturas (m):	Orientación: Norte					
		$H_1 = 1.2$	 Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale					
		$H_2 = 0.2$						
		$H_3 = 1.2$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	 25/07/2018	35.44	29.63	24.19	24.48	182.968	-0.216	1832.624
	 10/07/2018	32.41	28.29	22.27	23.48	135.003	-35.478	1030.864
Agosto	 10/08/2018	32.75	28.43	23.76	24.24	139.941	-8.69	1457.489
	 07/08/2018	33.51	28.68	23.72	24.21	148.552	-9.905	1167.255
Septiembre	 01/09/2018	32.56	28.36	22.41	23.67	137.653	-28.865	1150.91
	 22/09/2018	32.2	28.08	21.17	23.08	127.733	-49.378	751.016
Octubre	 10/10/2018	32.22	28.23	21.87	23.3	133.305	-42.092	960.884
	 23/10/2018	30.63	27.4	20.12	22.51	103.84	-69.72	387.694
Noviembre	 12/11/2018	31.51	27.85	22.03	23.42	119.6	-37.599	813.609
	 17/11/2018	27.55	25.94	17.28	21.06	51.909	-120.908	-678.236
Diciembre	 02/12/2018	32.19	28.11	21.41	23.1	128.897	-48.664	721.022
	 22/12/2018	26.93	25.61	15.19	20.02	40.332	-156.391	-1341.34

Tabla 25. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 2" en la orientación Sur.

Caso:2	WWR= 7.7%	Alturas (m):	Orientación: Sur					
		$H_1 = 1.2$		 Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_2 = 0.2$						
		$H_3 = 1.2$						
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	 22/01/2018	33.26	27.95	21.37	23.27	431.082	-149.548	2156.799
	 05/01/2018	25.54	24.98	17.18	21.51	61.974	-364.953	-4001.626
Febrero	 26/02/2018	35.07	29.53	21.66	23.24	179.906	-43.635	1132.362
	 01/02/2018	32.71	28.43	18.15	21.5	141.023	-104.747	-6.124
Marzo	 19/03/2018	33.53	28.72	22.73	23.73	149.768	-26.475	1126.734
	 24/03/2018	33.26	28.64	19.28	22.1	147.629	-83.593	419.814
Abril	 07/04/2018	36.01	29.93	22.75	23.78	194.325	-24.825	1507.105
	 16/04/2018	28.65	26.45	18.78	21.85	68.822	-92.543	-202.394
Mayo	 30/05/2018	34.48	29.06	23.5	24.1	162.606	-13.804	1342.72
	 13/05/2018	33.03	28.46	21.74	23.26	141.286	-42.961	918.9
Junio	 04/06/2018	33.32	28.63	22.58	23.72	158.772	-29.265	1265.961
	 13/06/2018	30.84	27.34	22.44	23.6	101.395	-31.371	577.157

Continúa en la siguiente página...

Tabla 25. Continuación.

Caso:2	WWR= 7.7%	Alturas (m):	Orientación: Sur					
		$H_1 = 1.2$	Día más cálido del mes Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale					
		$H_2 = 0.2$						
		$H_3 = 1.2$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	25/07/2018	35.34	29.59	24.15	24.46	181.439	-1.164	1776.254
	10/07/2018	32.02	28.09	22.27	23.48	127.925	-35.593	946.152
Agosto	10/08/2018	33.02	28.6	23.76	24.24	146.009	-8.69	1491.945
	07/08/2018	34.17	28.97	23.72	24.21	159.084	-9.905	1204.082
Septiembre	01/09/2018	34.13	29.11	22.41	23.67	164.907	-28.865	1342.986
	22/09/2018	34.3	29.17	21.18	23.09	167.074	-49.096	1024.445
Octubre	10/10/2018	36.16	30.09	21.87	23.3	201.117	-42.076	1432.866
	23/10/2018	34.7	29.31	20.12	22.51	172.758	-69.588	958.93
Noviembre	12/11/2018	34.98	29.46	22.03	23.42	177.804	-37.476	1243.666
	17/11/2018	31.38	27.63	17.3	21.08	112.673	-119.882	-227.09
Diciembre	02/12/2018	34.46	29.21	21.41	23.11	168.611	-48.421	1075.722
	22/12/2018	30.8	27.41	15.19	20.02	105.093	-156.056	-799.25

Tabla 26. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 2" en la orientación Este.

Caso:2	WWR= 7.7%	Alturas (m):	Orientación: Este					
		$H_1 = 1.2$		Día más cálido del mes Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_2 = 0.2$						
		$H_3 = 1.2$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	22/01/2018	29.74	26.64	21.37	23.27	267.529	-149.525	1054.279
	05/01/2018	25.37	24.98	17.18	21.51	61.974	-364.931	-4053.385
Febrero	26/02/2018	32.4	28.23	21.66	23.51	133.006	-43.547	927.405
	01/02/2018	29.52	26.82	18.15	21.5	82.942	-104.746	-307.037
Marzo	19/03/2018	34.76	29.36	22.74	23.78	173.068	-24.761	1492.543
	24/03/2018	31.71	27.78	19.28	22.1	117.077	-83.488	365.905
Abril	07/04/2018	34.92	29.37	22.75	23.78	173.849	-24.817	1513.278
	16/04/2018	28.7	26.29	18.78	21.85	63.986	-92.541	-111.75
Mayo	30/05/2018	34.72	29.28	23.5	24.1	170.787	-13.616	1530.746
	13/05/2018	34.04	28.78	21.76	23.3	152.573	-41.804	1293.99
Junio	04/06/2018	34.26	28.95	22.75	23.83	159.49	-22.979	1610.157
	13/06/2018	32.54	28.19	22.44	23.61	131.845	-30.705	874.676

Continúa en la siguiente página...

Tabla 26. Continuación.



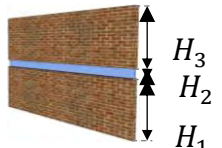













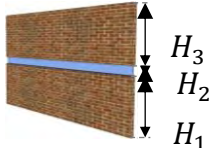















Caso:2	WWR= 7.7%	Alturas (m):	Orientación: Este	 Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_1 = 1.2$ $H_2 = 0.2$ $H_3 = 1.2$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	 25/07/2018	36.48	29.96	24.22	24.51	195.576	0.696	2194.22
	 10/07/2018	32.82	28.32	22.27	23.48	136.15	-35.378	1231.449
Agosto	 10/08/2018	32.8	28.49	23.76	24.24	142.031	-8.69	1522.053
	 07/08/2018	34.4	29.07	23.72	24.21	162.986	-9.905	1371.553
Septiembre	 01/09/2018	33.28	28.52	22.41	23.67	143.289	-28.862	1385.429
	 22/09/2018	32.92	28.29	21.17	23.08	135.075	-49.356	977.847
Octubre	 10/10/2018	33.68	28.6	21.87	23.3	146.554	-42.021	1257.125
	 23/10/2018	30.97	27.5	20.12	22.52	107.243	-69.285	646.535
Noviembre	 12/11/2018	31.68	27.95	22.03	23.42	123.108	-37.366	1008.331
	 17/11/2018	28.4	26.11	17.3	21.1	57.888	-119.162	-448.382
Diciembre	 02/12/2018	32.25	28.18	21.41	23.12	131.286	-48.225	881.729
	 22/12/2018	27.05	25.73	15.2	20.03	44.629	-155.816	-1099.411

Tabla 27. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 2" en la orientación Oeste.

Caso:2	WWR= 7.7%	Alturas (m):	Orientación: Oeste					
		$H_1 = 1.2$		 Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_2 = 0.2$						
		$H_3 = 1.2$						
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	 22/01/2018	31.9	27.41	21.37	23.27	364.542	-149.568	1401.53
	 05/01/2018	25.46	24.98	17.18	21.51	61.974	-364.979	-4032.376
Febrero	 26/02/2018	35.37	29.48	21.66	23.24	178.828	-43.655	945.787
	 01/02/2018	31.82	27.76	18.15	21.5	117.142	-104.748	-349.873
Marzo	 19/03/2018	37.06	30.37	22.74	23.77	209.879	-25.189	1541.33
	 24/03/2018	34.74	29.11	19.28	22.1	165.726	-83.594	352.403
Abril	 07/04/2018	38.35	30.76	22.75	23.78	224.676	-24.825	1548.567
	 16/04/2018	29.82	26.99	18.78	21.85	89.533	-92.543	-120.372
Mayo	 30/05/2018	36.93	29.99	23.5	24.1	196.573	-13.804	1471.353
	 13/05/2018	34.98	29.27	21.74	23.26	170.54	-42.961	1024.913
Junio	 04/06/2018	37.28	30.36	22.58	23.72	211.22	-27.207	1426.023
	 13/06/2018	31.52	27.66	22.44	23.6	113.595	-31.371	718.392

Continúa en la siguiente página...



Tabla 27. Continuación.

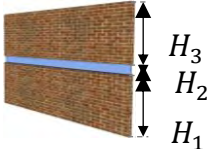















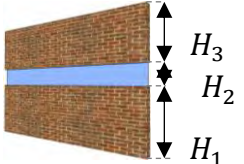

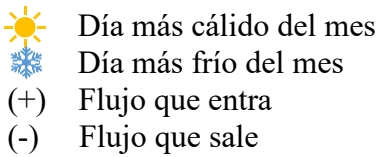
Caso:2	WWR= 7.7%	Alturas (m):	Orientación: Oeste					
		$H_1 = 1.2$	 Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale					
		$H_2 = 0.2$						
		$H_3 = 1.2$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	 25/07/2018	37.93	30.58	24.15	24.46	217.798	-1.164	1906.872
	 10/07/2018	34.45	29.12	22.27	23.48	165.495	-35.593	1098.221
Agosto	 10/08/2018	36.35	29.97	23.76	24.24	196.452	-8.69	1718.62
	 07/08/2018	36.06	29.56	23.72	24.21	180.92	-9.905	1296.344
Septiembre	 01/09/2018	36.62	30.16	22.41	23.67	203.626	-28.865	1463.829
	 22/09/2018	34.46	28.99	21.19	23.1	160.793	-48.646	922.095
Octubre	 10/10/2018	35.25	29.43	21.87	23.3	176.874	-42.092	1128.695
	 23/10/2018	34.04	28.9	20.12	22.51	158.069	-69.72	625.488
Noviembre	 12/11/2018	33.4	28.66	22.03	23.42	148.864	-37.599	927.208
	 17/11/2018	28.97	26.53	17.28	21.06	72.972	-120.908	-595.838
Diciembre	 02/12/2018	33.36	28.58	21.41	23.1	146.031	-48.664	789.046
	 22/12/2018	28.68	26.32	15.19	20.02	65.918	-156.391	-1238.332

Tabla 28. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 3" en la orientación Norte.

Caso:3	WWR= 15.4%	Alturas (m):	Orientación: Norte					
		$H_1 = 1.2$						
		$H_2 = 0.4$						
		$H_3 = 1.0$						
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	22/01/2018	29.68	26.59	21.37	23.27	260.677	-149.796	860.562
	05/01/2018	25.37	24.98	17.18	21.51	61.665	-365.075	-4073.695
Febrero	26/02/2018	32.33	28.14	21.66	23.24	129.802	-43.698	746.437
	01/02/2018	29.4	26.7	18.15	21.5	78.563	-104.747	-501.643
Marzo	19/03/2018	34.73	29.32	22.74	23.77	171.662	-25.245	1356.813
	24/03/2018	31.63	27.68	19.28	22.1	113.399	-83.658	147.478
Abril	07/04/2018	34.86	29.3	22.75	23.78	171.076	-24.876	1339.624
	16/04/2018	27.79	26.06	18.78	21.85	55.694	-92.54	-291.655
Mayo	30/05/2018	34.74	29.2	23.5	24.1	167.555	-13.752	1390.89
	13/05/2018	32.84	28.41	21.76	23.28	139.298	-42.431	937.816
Junio	04/06/2018	34.03	28.97	22.67	23.78	159.973	-24.87	1320.597
	13/06/2018	31.26	27.57	22.44	23.61	109.722	-31.011	682.109

Continúa en la siguiente página...

Tabla 28. Continuación.



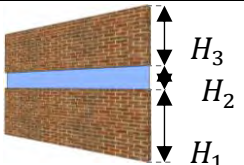













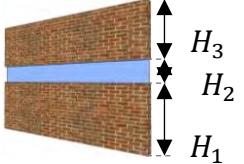















Caso:3	WWR= 15.4%	Alturas (m):	Orientación: Norte					
				 Día más cálido del mes	 Día más frío del mes	(+)	Flujo que entra	(-)
		$H_1 = 1.2$						
		$H_2 = 0.4$						
		$H_3 = 1.0$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	 25/07/2018	35.44	29.63	24.19	24.48	182.868	-0.249	1830.711
	 10/07/2018	32.41	28.29	22.27	23.48	134.885	-35.497	1028.803
Agosto	 10/08/2018	32.75	28.43	23.76	24.24	139.814	-8.729	1455.696
	 07/08/2018	33.51	28.68	23.72	24.21	148.501	-9.934	1164.913
Septiembre	 01/09/2018	32.56	28.36	22.41	23.67	137.544	-28.872	1148.985
	 22/09/2018	32.2	28.08	21.17	23.08	127.627	-49.433	748.867
Octubre	 10/10/2018	32.22	28.23	21.87	23.3	133.153	-42.085	959.082
	 23/10/2018	30.63	27.4	20.12	22.51	103.666	-69.694	385.687
Noviembre	 12/11/2018	31.51	27.85	22.03	23.42	119.464	-37.63	811.753
	 17/11/2018	27.55	25.94	17.28	21.06	51.751	-120.78	-679.947
Diciembre	 02/12/2018	32.19	28.11	21.41	23.1	128.744	-48.688	719.125
	 22/12/2018	26.93	25.61	15.19	20.02	40.155	-156.333	-1343.564

Tabla 29. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 3" en la orientación Sur.

Caso:3	WWR= 15.4%	Alturas (m):	Orientación: Sur	   Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale					
									Mes
				Exterior	Interior	Exterior	Interior		
Enero	 22/01/2018	33.26	27.95	21.37	23.27	430.483	-149.776	2145.819	
	 05/01/2018	25.54	24.98	17.18	21.51	61.665	-365.049	-4012.992	
Febrero	 26/02/2018	35.07	29.53	21.66	23.24	179.688	-43.679	1129.343	
	 01/02/2018	32.71	28.43	18.15	21.5	140.73	-104.746	-9.93	
Marzo	 19/03/2018	33.53	28.72	22.73	23.73	149.689	-26.505	1125.562	
	 24/03/2018	33.26	28.64	19.28	22.1	147.361	-83.659	416.697	
Abril	 07/04/2018	36.01	29.93	22.75	23.78	194.122	-24.877	1504.944	
	 16/04/2018	28.65	26.45	18.78	21.85	69.696	-92.54	-204.808	
Mayo	 30/05/2018	34.48	29.06	23.5	24.1	162.51	-13.838	1340.916	
	 13/05/2018	33.03	28.46	21.74	23.26	141.171	-43.006	916.796	
Junio	 04/06/2018	33.32	28.63	22.58	23.72	147.404	-27.169	1175.265	
	 13/06/2018	30.84	27.34	22.44	23.6	101.228	-31.408	574.935	

Continúa en la siguiente página...

Tabla 29. Continuación.



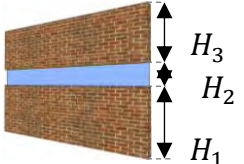













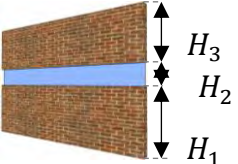

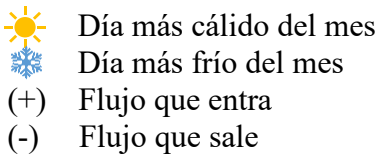












Caso:3	WWR= 15.4%	Alturas (m):	Orientación: Sur					
				 Día más cálido del mes	 Día más frío del mes	(+) Flujo que entra	(-) Flujo que sale	
		$H_1 = 1.2$						
		$H_2 = 0.4$						
		$H_3 = 1.0$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	 25/07/2018	35.34	29.59	24.15	24.46	181.338	-1.197	1774.506
	 10/07/2018	32.02	28.09	22.27	23.48	127.829	-35.611	944.34
Agosto	 10/08/2018	33.02	28.6	23.76	24.24	145.904	-8.729	1490.052
	 07/08/2018	34.17	28.97	23.72	24.21	159.011	-9.934	1201.629
Septiembre	 01/09/2018	34.13	29.11	22.41	23.67	164.721	-28.872	1340.489
	 22/09/2018	34.3	29.17	21.18	23.09	166.886	-49.152	1021.506
Octubre	 10/10/2018	36.16	30.09	21.87	23.3	200.75	-42.07	1429.635
	 23/10/2018	34.7	29.31	20.12	22.51	172.45	-69.564	955.222
Noviembre	 12/11/2018	34.98	29.46	22.03	23.42	177.551	-37.509	1240.555
	 17/11/2018	31.38	27.63	17.3	21.08	112.384	-119.763	-230.12
Diciembre	 02/12/2018	34.46	29.21	21.41	23.11	168.403	-48.45	1072.811
	 22/12/2018	30.8	27.41	15.19	20.02	104.768	-156.014	-803.08

Tabla 30. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 3" en la orientación Este.

Caso:3	WWR= 15.4%	Alturas (m):	Orientación: Este					
		$H_1 = 1.2$						
		$H_2 = 0.4$						
		$H_3 = 1.0$						
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	 22/01/2018	29.74	26.64	21.37	23.27	267.197	-149.753	1046.382
	 05/01/2018	25.37	24.98	17.18	21.51	61.665	-365.027	-4064.6
Febrero	 26/02/2018	32.4	28.23	21.66	23.51	132.832	-43.592	924.997
	 01/02/2018	29.52	26.82	18.15	21.5	82.772	-104.745	-309.934
Marzo	 19/03/2018	34.76	29.36	22.74	23.78	172.998	-24.822	1490.331
	 24/03/2018	31.71	27.78	19.28	22.1	116.937	-83.556	362.966
Abril	 07/04/2018	34.92	29.37	22.75	23.78	173.744	-24.869	1511.125
	 16/04/2018	28.7	26.29	18.78	21.85	63.847	-92.538	-114.421
Mayo	 30/05/2018	34.72	29.28	23.5	24.1	170.653	-13.654	1528.401
	 13/05/2018	34.04	28.78	21.76	23.3	152.472	-41.859	1290.782
Junio	 04/06/2018	34.26	28.95	22.75	23.83	159.25	-23.035	1606.975
	 13/06/2018	32.54	28.19	22.44	23.61	131.683	-30.751	871.596

Continúa en la siguiente página...

Tabla 30. Continuación.



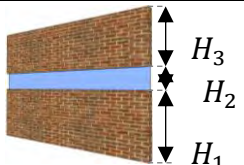













Caso:3	WWR= 15.4%	Alturas (m):	Orientación: Este					
				 Día más cálido del mes	 Día más frío del mes	(+) Flujo que entra	(-) Flujo que sale	
		$H_1 = 1.2$						
		$H_2 = 0.4$						
		$H_3 = 1.0$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	 25/07/2018	36.48	29.96	24.22	24.51	195.33	0.644	2191.224
	 10/07/2018	32.82	28.32	22.27	23.48	136.032	-35.4	1228.795
Agosto	 10/08/2018	32.8	28.49	23.76	24.24	141.937	-8.729	1520.075
	 07/08/2018	34.4	29.07	23.72	24.21	162.896	-9.934	1368.609
Septiembre	 01/09/2018	33.28	28.52	22.41	23.67	143.17	-28.868	1382.81
	 22/09/2018	32.92	28.29	21.17	23.08	134.991	-49.411	975.043
Octubre	 10/10/2018	33.68	28.6	21.87	23.3	146.4	-42.018	1254.433
	 23/10/2018	30.97	27.5	20.12	22.52	107.077	-69.267	643.764
Noviembre	 12/11/2018	31.68	27.95	22.03	23.42	122.981	-37.4	1005.91
	 17/11/2018	28.4	26.11	17.3	21.1	57.744	-119.047	-450.774
Diciembre	 02/12/2018	32.25	28.18	21.41	23.12	131.135	-48.257	879.368
	 22/12/2018	27.05	25.73	15.2	20.03	44.457	-155.789	-1102.352

Tabla 31. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 3" en la orientación Oeste.

Caso:3	WWR= 15.4%	Alturas (m):	Orientación: Oeste					
		$H_1 = 1.2$						
		$H_2 = 0.4$						
		$H_3 = 1.0$						
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	22/01/2018	31.9	27.41	21.37	23.27	363.914	-149.796	1392.664
	05/01/2018	25.46	24.98	17.18	21.51	61.665	-365.075	-4043.653
Febrero	26/02/2018	35.37	29.48	21.66	23.24	178.48	-43.698	943.302
	01/02/2018	31.82	27.76	18.15	21.5	116.845	-104.747	-352.657
Marzo	19/03/2018	37.06	30.37	22.74	23.77	209.727	-25.245	1538.968
	24/03/2018	34.74	29.11	19.28	22.1	165.415	-83.66	349.476
Abril	07/04/2018	38.35	30.76	22.75	23.78	224.385	-24.877	1546.268
	16/04/2018	29.82	26.99	18.78	21.85	89.288	-92.54	-123.009
Mayo	30/05/2018	36.93	29.99	23.5	24.1	196.595	-13.838	1469.178
	13/05/2018	34.98	29.27	21.74	23.26	170.336	-43.006	1022.5
Junio	04/06/2018	37.28	30.36	22.58	23.72	210.802	-27.169	1423.369
	13/06/2018	31.52	27.66	22.44	23.6	113.333	-31.408	715.769

Continúa en la siguiente página...



Tabla 31. Continuación.



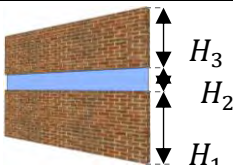













Caso:3	WWR= 15.4%	Alturas (m):	Orientación: Oeste					
				 Día más cálido del mes	 Día más frío del mes	(+) Flujo que entra	(-) Flujo que sale	
		$H_1 = 1.2$						
		$H_2 = 0.4$						
		$H_3 = 1.0$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	 25/07/2018	37.93	30.58	24.15	24.46	217.578	-1.197	1904.731
	 10/07/2018	34.45	29.12	22.27	23.48	165.276	-35.611	1095.962
Agosto	 10/08/2018	36.35	29.97	23.76	24.24	196.161	-8.729	1716.062
	 07/08/2018	36.06	29.56	23.72	24.21	180.728	-9.934	1293.636
Septiembre	 01/09/2018	36.62	30.16	22.41	23.67	203.255	-28.872	1460.962
	 22/09/2018	34.46	28.99	21.19	23.1	160.577	-48.704	919.461
Octubre	 10/10/2018	35.25	29.43	21.87	23.3	176.583	-42.085	1126.384
	 23/10/2018	34.04	28.9	20.12	22.51	157.74	-69.694	622.76
Noviembre	 12/11/2018	33.4	28.66	22.03	23.42	148.636	-37.63	925.019
	 17/11/2018	28.97	26.53	17.28	21.06	75.75	-120.78	-597.788
Diciembre	 02/12/2018	33.36	28.58	21.41	23.1	145.834	-48.688	786.952
	 22/12/2018	28.68	26.32	15.19	20.02	65.672	-156.333	-1240.863

Tabla 32. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 4" en la orientación Norte.

Caso:4	WWR= 23.1%	Alturas (m):	Orientación: Norte					
		$H_1 = 1.2$ $H_2 = 0.6$ $H_3 = 0.8$		Día más cálido del mes Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	22/01/2018	29.68	26.59	21.37	23.27	260.387	-150.024	853.182
	05/01/2018	25.37	24.98	17.18	21.51	61.356	-365.171	-4084.88
Febrero	26/02/2018	32.33	28.14	21.66	23.24	129.639	-43.742	744.541
	01/02/2018	29.4	26.7	18.15	21.5	78.398	-104.747	-503.974
Marzo	19/03/2018	34.73	29.32	22.74	23.77	171.59	-28.303	1354.98
	24/03/2018	31.63	27.68	19.28	22.1	113.277	-83.725	145.154
Abril	07/04/2018	34.86	29.3	22.75	23.78	170.981	-24.929	1337.943
	16/04/2018	27.79	26.06	18.78	21.85	55.596	-92.538	-293.831
Mayo	30/05/2018	34.74	29.2	23.5	24.1	167.445	-13.788	1388.942
	13/05/2018	32.84	28.41	21.76	23.28	139.187	-42.483	935.656
Junio	04/06/2018	34.03	28.97	22.67	23.78	159.735	-24.909	1318.291
	13/06/2018	31.26	27.57	22.44	23.61	109.529	-31.054	679.578

Continúa en la siguiente página...

Tabla 32. Continuación.

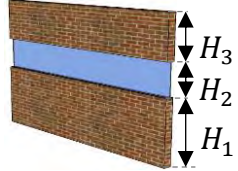

Caso:4	WWR= 23.1%	Alturas (m):	Orientación: Norte					
				  ☀ Día más cálido del mes ❄ Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	☀ 25/07/2018	35.44	29.63	24.19	24.48	182.768	-0.297	1828.798
	❄ 10/07/2018	32.41	28.29	22.27	23.48	134.766	-35.516	1026.742
Agosto	☀ 10/08/2018	32.75	28.43	23.76	24.24	139.687	-8.771	1453.904
	❄ 07/08/2018	33.51	28.68	23.72	24.21	148.451	-9.966	1162.571
Septiembre	☀ 01/09/2018	32.56	28.36	22.41	23.67	137.436	-28.879	1147.06
	❄ 22/09/2018	32.2	28.08	21.17	23.08	127.521	-49.487	746.718
Octubre	☀ 10/10/2018	32.22	28.23	21.87	23.3	133.003	-42.078	957.279
	❄ 23/10/2018	30.63	27.4	20.12	22.51	103.492	-69.66	383.68
Noviembre	☀ 12/11/2018	31.51	27.85	22.03	23.42	119.329	-37.66	809.897
	❄ 17/11/2018	27.55	25.94	17.28	21.06	51.594	-120.653	-681.659
Diciembre	☀ 02/12/2018	32.19	28.11	21.41	23.1	128.592	-14.966	717.228
	❄ 22/12/2018	26.93	25.61	15.19	20.02	39.977	-156.28	-1345.788

Tabla 33. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 4" en la orientación Sur.

Caso:4	WWR= 23.1%	Alturas (m):	Orientación: Sur					
		$H_1 = 1.2$ $H_2 = 0.6$ $H_3 = 0.8$		Día más cálido del mes Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	22/01/2018	33.26	27.95	21.37	23.27	429.886	-150.005	2134.839
	05/01/2018	25.54	24.98	17.18	21.51	61.356	-365.144	-4024.358
Febrero	26/02/2018	35.07	29.53	21.66	23.24	179.496	-43.723	1126.323
	01/02/2018	32.71	28.43	18.15	21.5	140.441	-104.74	-13.737
Marzo	19/03/2018	33.53	28.72	22.73	23.73	149.611	-26.547	1124.391
	24/03/2018	33.26	28.64	19.28	22.1	147.094	-83.726	413.58
Abril	07/04/2018	36.01	29.93	22.75	23.78	193.919	-24.93	1502.784
	16/04/2018	28.65	26.45	18.78	21.85	69.57	-92.538	-207.221
Mayo	30/05/2018	34.48	29.06	23.5	24.1	162.415	-13.873	1339.112
	13/05/2018	33.03	28.46	21.74	23.26	141.062	-43.051	914.692
Junio	04/06/2018	33.32	28.63	22.58	23.72	147.209	-27.133	1173.376
	13/06/2018	30.84	27.34	22.44	23.6	101.061	-31.445	572.712

Continúa en la siguiente página...

Tabla 33. Continuación.



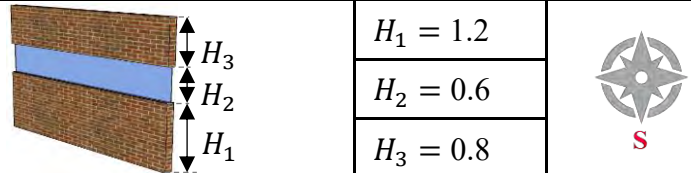













Caso:4	WWR= 23.1%	Alturas (m):	Orientación: Sur					
				 Día más cálido del mes	 Día más frío del mes	(+) Flujo que entra	(-) Flujo que sale	
		$H_1 = 1.2$						
		$H_2 = 0.6$						
		$H_3 = 0.8$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	 25/07/2018	35.34	29.59	24.15	24.46	181.238	-1.23	1772.757
	 10/07/2018	32.02	28.09	22.27	23.48	127.734	-35.629	942.527
Agosto	 10/08/2018	33.02	28.6	23.76	24.24	145.801	-8.771	1488.16
	 07/08/2018	34.17	28.97	23.72	24.21	158.938	-9.966	1199.177
Septiembre	 01/09/2018	34.13	29.11	22.41	23.67	164.536	-28.879	1337.991
	 22/09/2018	34.3	29.17	21.18	23.09	166.698	-49.207	1018.568
Octubre	 10/10/2018	36.16	30.09	21.87	23.3	200.383	-42.065	1426.405
	 23/10/2018	34.7	29.31	20.12	22.51	172.142	-69.541	951.514
Noviembre	 12/11/2018	34.98	29.46	22.03	23.42	177.298	-37.542	1237.444
	 17/11/2018	31.38	27.63	17.3	21.08	112.096	-119.645	-233.163
Diciembre	 02/12/2018	34.46	29.21	21.41	23.11	168.196	-48.48	1069.893
	 22/12/2018	30.8	27.41	15.19	20.02	104.443	-155.988	-806.91

Tabla 34. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 4" en la orientación Este.

Caso:4	WWR= 23.1%	Alturas (m):	Orientación: Este					
		$H_1 = 1.2$ $H_2 = 0.6$ $H_3 = 0.8$		Día más cálido del mes Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	22/01/2018	29.74	26.64	21.37	23.27	266.868	-149.982	1038.486
	05/01/2018	25.37	24.98	17.18	21.51	19.164	-112.26	-4075.814
Febrero	26/02/2018	32.4	28.23	21.66	23.51	132.676	-43.638	922.588
	01/02/2018	29.52	26.82	18.15	21.5	82.603	-104.744	-312.843
Marzo	19/03/2018	34.76	29.36	22.74	23.78	172.928	-24.883	1488.118
	24/03/2018	31.71	27.78	19.28	22.1	116.8	-83.625	360.026
Abril	07/04/2018	34.92	29.37	22.75	23.78	173.64	-24.92	1508.972
	16/04/2018	28.7	26.29	18.78	21.85	63.708	-92.536	-117.092
Mayo	30/05/2018	34.72	29.28	23.5	24.1	170.52	-13.692	1526.056
	13/05/2018	34.04	28.78	21.76	23.3	152.372	-41.914	1287.573
Junio	04/06/2018	34.26	28.95	22.75	23.83	159.011	-23.092	1603.794
	13/06/2018	32.54	28.19	22.44	23.61	131.521	-30.796	868.516

Continúa en la siguiente página...

Tabla 34. Continuación.

Caso:4	WWR= 23.1%	Alturas (m):	Orientación: Este					
						Día más cálido del mes Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale		
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	25/07/2018	36.48	29.96	24.22	24.51	195.092	0.592	2188.228
	10/07/2018	32.82	28.32	22.27	23.48	135.915	-35.422	1226.141
Agosto	10/08/2018	32.8	28.49	23.76	24.24	141.844	-8.771	1518.098
	07/08/2018	34.4	29.07	23.72	24.21	162.808	-9.966	1365.665
Septiembre	01/09/2018	33.28	28.52	22.41	23.67	143.053	-28.876	1380.191
	22/09/2018	32.92	28.29	21.17	23.08	134.907	-49.466	972.239
Octubre	10/10/2018	33.68	28.6	21.87	23.3	146.245	-42.016	1251.741
	23/10/2018	30.97	27.5	20.12	22.52	106.912	-69.25	640.994
Noviembre	12/11/2018	31.68	27.95	22.03	23.42	122.855	-37.435	1003.49
	17/11/2018	28.4	26.11	17.3	21.1	57.599	-118.932	-453.165
Diciembre	02/12/2018	32.25	28.18	21.41	23.12	130.985	-48.289	877.008
	22/12/2018	27.05	25.73	15.2	20.03	44.286	-155.762	-1105.292

Tabla 35. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 4" en la orientación Oeste.

Caso:4	WWR= 23.1%	Alturas (m):	Orientación: Oeste					
		$H_1 = 1.2$		Día más cálido del mes Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_2 = 0.6$						
		$H_3 = 0.8$						
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	22/01/2018	31.9	27.41	21.37	23.27	363.288	-150.024	1383.797
	05/01/2018	25.46	24.98	17.18	21.51	61.356	-365.171	-4054.93
Febrero	26/02/2018	35.37	29.48	21.66	23.24	178.134	-43.742	940.817
	01/02/2018	31.82	27.76	18.15	21.5	116.549	-104.747	-355.441
Marzo	19/03/2018	37.06	30.37	22.74	23.77	209.574	-25.303	1536.606
	24/03/2018	34.74	29.11	19.28	22.1	165.104	-83.726	346.549
Abril	07/04/2018	38.35	30.76	22.75	23.78	224.094	-24.93	1543.969
	16/04/2018	29.82	26.99	18.78	21.85	89.044	-92.538	-125.646
Mayo	30/05/2018	36.93	29.99	23.5	24.1	226.662	-13.873	1467.0
	13/05/2018	34.98	29.27	21.74	23.26	170.132	-43.051	1020.087
Junio	04/06/2018	37.28	30.36	22.58	23.72	210.384	-27.133	1420.716
	13/06/2018	31.52	27.66	22.44	23.6	113.072	-31.445	713.146

Continúa en la siguiente página...



Tabla 35. Continuación.

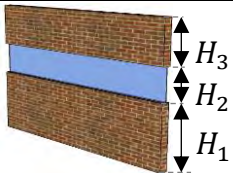















Caso:4	WWR= 23.1%	Alturas (m):	Orientación: Oeste					
				   Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	 25/07/2018	37.93	30.58	24.15	24.46	217.359	-1.23	1902.589
	 10/07/2018	34.45	29.12	22.27	23.48	165.057	-35.629	1093.702
Agosto	 10/08/2018	36.35	29.97	23.76	24.24	195.872	-8.771	1713.504
	 07/08/2018	36.06	29.56	23.72	24.21	180.538	-9.966	1290.927
Septiembre	 01/09/2018	36.62	30.16	22.41	23.67	202.885	-28.879	1458.094
	 22/09/2018	34.46	28.99	21.19	23.1	160.363	-48.761	916.827
Octubre	 10/10/2018	35.25	29.43	21.87	23.3	176.292	-42.078	1124.072
	 23/10/2018	34.04	28.9	20.12	22.51	157.412	-69.669	620.032
Noviembre	 12/11/2018	33.4	28.66	22.03	23.42	148.412	-37.661	922.83
	 17/11/2018	28.97	26.53	17.28	21.06	72.528	-120.653	-599.738
Diciembre	 02/12/2018	33.36	28.58	21.41	23.1	145.637	-48.712	784.858
	 22/12/2018	28.68	26.32	15.19	20.02	65.426	-156.28	-1243.393

Tabla 36. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 5" en la orientación Norte.

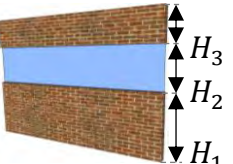















Caso:5	WWR=30.8%	Alturas (m):	Orientación: Norte					
		$H_1 = 1.2$		Día más cálido del mes Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_2 = 0.8$						
		$H_3 = 0.6$						
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	22/01/2018	29.68	26.59	21.37	23.27	260.097	-150.254	845.802
	05/01/2018	25.37	24.98	17.18	21.51	61.047	-365.267	-4096.073
Febrero	26/02/2018	32.33	28.14	21.66	23.24	129.478	-43.786	742.645
	01/02/2018	29.4	26.7	18.15	21.5	78.234	-104.747	-506.305
Marzo	19/03/2018	34.73	29.32	22.74	23.77	171.518	-25.362	1353.147
	24/03/2018	31.63	27.68	19.28	22.1	113.156	-83.792	142.83
Abril	07/04/2018	34.86	29.3	22.75	23.78	170.886	-24.981	1336.262
	16/04/2018	27.79	26.06	18.78	21.85	55.498	-92.537	-296.008
Mayo	30/05/2018	34.74	29.2	23.5	24.1	167.555	-13.752	1390.89
	13/05/2018	32.84	28.41	21.76	23.28	139.075	-42.534	933.497
Junio	04/06/2018	34.03	28.97	22.67	23.78	159.498	-24.947	1315.965
	13/06/2018	31.26	27.57	22.44	23.61	109.337	-31.098	677.046

Continúa en la siguiente página...

Tabla 36. Continuación.

Caso:5	WWR=30.8%	Alturas (m):	Orientación: Norte					
		$H_1 = 1.2$		Día más cálido del mes Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_2 = 0.8$						
		$H_3 = 0.6$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	25/07/2018	35.44	29.63	24.19	24.48	182.668	-0.344	1826.884
	10/07/2018	32.41	28.29	22.27	23.48	134.649	-35.536	1024.68
Agosto	10/08/2018	32.75	28.43	23.76	24.24	139.56	-8.818	1452.111
	07/08/2018	33.51	28.68	23.72	24.21	148.4	-9.999	1160.23
Septiembre	01/09/2018	32.56	28.36	22.41	23.67	137.329	-28.887	1145.1349
	22/09/2018	32.2	28.08	21.17	23.08	127.415	-49.542	744.569
Octubre	10/10/2018	32.22	28.23	21.87	23.3	132.853	-42.075	955.477
	23/10/2018	30.63	27.4	20.12	22.51	103.32	-69.644	381.672
Noviembre	12/11/2018	31.51	27.85	22.03	23.42	119.193	-37.69	808.04
	17/11/2018	27.55	25.94	17.28	21.06	51.437	-120.526	-683.371
Diciembre	02/12/2018	32.19	28.11	21.41	23.1	128.441	-48.737	715.331
	22/12/2018	26.93	25.61	15.19	20.02	39.801	-156.228	-1348.012

Tabla 37. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 5" en la orientación Sur.

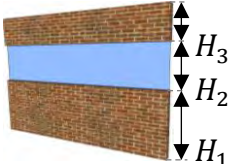















Caso:5	WWR=30.8%	Alturas (m):	Orientación: Sur					
		$H_1 = 1.2$		 Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_2 = 0.8$						
		$H_3 = 0.6$						
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	 22/01/2018	33.26	27.95	21.37	23.27	429.289	-150.235	2123.859
	 05/01/2018	25.54	24.98	17.18	21.51	61.047	-365.24	-4035.724
Febrero	 26/02/2018	35.07	29.53	21.66	23.24	179.305	-43.768	1123.303
	 01/02/2018	32.71	28.43	18.15	21.5	140.155	-104.746	-17.5444
Marzo	 19/03/2018	33.53	28.72	22.73	23.73	149.585	-26.59	1123.219
	 24/03/2018	33.26	28.64	19.28	22.1	146.832	-83.793	410.463
Abril	 07/04/2018	36.01	29.93	22.75	23.78	193.718	-24.982	1500.623
	 16/04/2018	28.65	26.45	18.78	21.85	69.444	-92.537	-209.635
Mayo	 30/05/2018	34.48	29.06	23.5	24.1	162.32	-13.917	1337.308
	 13/05/2018	33.03	28.46	21.74	23.26	140.968	-43.096	912.588
Junio	 04/06/2018	33.32	28.63	22.58	23.72	147.014	-27.097	1171.488
	 13/06/2018	30.84	27.34	22.44	23.6	100.895	-31.483	570.49

Continúa en la siguiente página...

Tabla 37. Continuación.

Caso:5	WWR=30.8%	Alturas (m):	Orientación: Sur					
		$H_1 = 1.2$		Día más cálido del mes Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_2 = 0.8$						
		$H_3 = 0.6$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	25/07/2018	35.34	29.59	24.15	24.46	181.138	-1.264	1771.008
	10/07/2018	32.02	28.09	22.27	23.48	127.638	-35.647	940.715
Agosto	10/08/2018	33.02	28.6	23.76	24.24	145.697	-8.818	1486.267
	07/08/2018	34.17	28.97	23.72	24.21	158.865	-9.999	1196.724
Septiembre	01/09/2018	34.13	29.11	22.41	23.67	164.35	-28.888	1335.493
	22/09/2018	34.3	29.17	21.18	23.09	166.512	-49.263	1015.629
Octubre	10/10/2018	36.16	30.09	21.87	23.3	200.017	-42.064	1423.174
	23/10/2018	34.7	29.31	20.12	22.51	171.834	-69.519	947.805
Noviembre	12/11/2018	34.98	29.46	22.03	23.42	177.046	-37.576	1234.333
	17/11/2018	31.38	27.63	17.3	21.08	111.807	-119.526	-236.199
Diciembre	02/12/2018	34.46	29.21	21.41	23.11	167.988	-48.51	1066.976
	22/12/2018	30.8	27.41	15.19	20.02	104.119	-155.962	-810.74

Tabla 38. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 5" en la orientación Este.

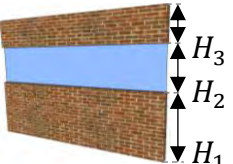















Caso:5	WWR=30.8%	Alturas (m):	Orientación: Este					
		$H_1 = 1.2$		 Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_2 = 0.8$						
		$H_3 = 0.6$						
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	 22/01/2018	29.74	26.64	21.37	23.27	266.553	-150.213	1030.59
	 05/01/2018	25.37	24.98	17.18	21.51	61.047	-365.218	-4087.029
Febrero	 26/02/2018	32.4	28.23	21.66	23.51	132.579	-43.685	920.18
	 01/02/2018	29.52	26.82	18.15	21.5	82.438	-104.744	-315.727
Marzo	 19/03/2018	34.76	29.36	22.74	23.78	172.928	-24.883	1488.118
	 24/03/2018	31.71	27.78	19.28	22.1	116.664	-83.693	357.086
Abril	 07/04/2018	34.92	29.37	22.75	23.78	173.536	-24.972	1506.82
	 16/04/2018	28.7	26.29	18.78	21.85	63.568	-92.536	-119.763
Mayo	 30/05/2018	34.72	29.28	23.5	24.1	170.387	-13.73	1523.711
	 13/05/2018	34.04	28.78	21.76	23.3	152.272	-41.969	1284.365
Junio	 04/06/2018	34.26	28.95	22.75	23.83	158.771	-23.149	1600.613
	 13/06/2018	32.54	28.19	22.44	23.61	131.364	-30.842	865.437

Continúa en la siguiente página...

Tabla 38. Continuación.

Caso:5	WWR=30.8%	Alturas (m):	Orientación: Este					
		$H_1 = 1.2$		Día más cálido del mes Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_2 = 0.8$						
		$H_3 = 0.6$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	25/07/2018	36.48	29.96	24.22	24.51	194.873	0.54	2185.232
	10/07/2018	32.82	28.32	22.27	23.48	135.798	-35.444	1223.487
Agosto	10/08/2018	32.8	28.49	23.76	24.24	141.752	-8.818	1516.121
	07/08/2018	34.4	29.07	23.72	24.21	162.72	-9.999	1362.72
Septiembre	01/09/2018	33.28	28.52	22.41	23.67	142.937	-28.884	1377.572
	22/09/2018	32.92	28.29	21.17	23.08	134.823	-45.521	969.435
Octubre	10/10/2018	33.68	28.6	21.87	23.3	146.091	-42.015	1249.049
	23/10/2018	30.97	27.5	20.12	22.52	106.749	-69.234	638.223
Noviembre	12/11/2018	31.68	27.95	22.03	23.42	122.729	-37.74	1001.069
	17/11/2018	28.4	26.11	17.3	21.1	57.455	-118.817	-455.556
Diciembre	02/12/2018	32.25	28.18	21.41	23.12	130.836	-48.321	874.647
	22/12/2018	27.05	25.73	15.2	20.03	44.116	-155.736	-1108.233

Tabla 39. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 5" en la orientación Oeste.

Caso:5	WWR=30.8%	Alturas (m):	Orientación: Oeste						
		$H_1 = 1.2$		 Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale					
		$H_2 = 0.8$							
		$H_3 = 0.6$							
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)	
		Exterior	Interior	Exterior	Interior				
Enero	 22/01/2018	31.9	27.41	21.37	23.27	362.664	-150.254	1374.93	
	 05/01/2018	25.46	24.98	17.18	21.51	61.047	-365.267	-4066.207	
Febrero	 26/02/2018	35.37	29.48	21.66	23.24	177.789	-43.786	938.332	
	 01/02/2018	31.82	27.76	18.15	21.5	116.253	-104.747	-358.225	
Marzo	 19/03/2018	37.06	30.37	22.74	23.77	209.422	-25.362	1534.244	
	 24/03/2018	34.74	29.11	19.28	22.1	164.795	-83.793	343.622	
Abril	 07/04/2018	38.35	30.76	22.75	23.78	223.805	-24.982	1541.67	
	 16/04/2018	29.82	26.99	18.78	21.85	88.8	-92.537	-128.283	
Mayo	 30/05/2018	36.93	29.99	23.5	24.1	196.083	-13.907	1464.829	
	 13/05/2018	34.98	29.27	21.74	23.26	169.928	-43.096	1017.673	
Junio	 04/06/2018	37.28	30.36	22.58	23.72	209.967	-27.097	1418.063	
	 13/06/2018	31.52	27.66	22.44	23.6	112.81	-31.483	710.523	

Continúa en la siguiente página...



Tabla 39. Continuación.

Caso:5	WWR=30.8%	Alturas (m):	Orientación: Oeste					
		$H_1 = 1.2$		Día más cálido del mes Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_2 = 0.8$						
		$H_3 = 0.6$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	25/07/2018	37.93	30.58	24.15	24.46	217.141	-1.264	1900.448
	10/07/2018	34.45	29.12	22.27	23.48	164.839	-35.647	1091.443
Agosto	10/08/2018	36.35	29.97	23.76	24.24	195.583	-8.818	1710.946
	07/08/2018	36.06	29.56	23.72	24.21	180.349	-9.999	1288.219
Septiembre	01/09/2018	36.62	30.16	22.41	23.67	202.516	-28.88	1455.227
	22/09/2018	34.46	28.99	21.19	23.1	160.149	-48.818	914.193
Octubre	10/10/2018	35.25	29.43	21.87	23.3	176.002	-42.075	1121.76
	23/10/2018	34.04	28.9	20.12	22.51	157.084	-69.644	617.304
Noviembre	12/11/2018	33.4	28.66	22.03	23.42	148.188	-37.693	920.641
	17/11/2018	28.97	26.53	17.28	21.06	72.206	-120.526	-601.688
Diciembre	02/12/2018	33.36	28.58	21.41	23.1	145.441	-48.737	782.765
	22/12/2018	28.68	26.32	15.19	20.02	65.18	-156.228	-1245.923

Tabla 40. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 6" en la orientación Norte.

Caso:6	WWR= 38.5%	Alturas (m):	Orientación: Norte					
		$H_1 = 1.2$						
		$H_2 = 1.0$						
		$H_3 = 0.4$						
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	22/01/2018	29.68	26.59	21.37	23.27	259.807	-150.485	838.423
	05/01/2018	25.37	24.98	17.18	21.51	60.737	-365.363	-4107.191
Febrero	26/02/2018	32.33	28.14	21.66	23.24	129.317	-43.831	740.748
	01/02/2018	29.4	26.7	18.15	21.5	78.071	-104.747	-508.635
Marzo	19/03/2018	34.73	29.32	22.74	23.77	171.447	-25.42	1351.314
	24/03/2018	31.63	27.68	19.28	22.1	113.035	-83.859	140.506
Abril	07/04/2018	34.86	29.3	22.75	23.78	170.792	-25.034	1334.581
	16/04/2018	27.79	26.06	18.78	21.85	55.401	-92.545	-298.184
Mayo	30/05/2018	34.74	29.2	23.5	24.1	167.228	-13.86	1385.046
	13/05/2018	32.84	28.41	21.76	23.28	138.965	-42.586	931.337
Junio	04/06/2018	34.03	28.97	22.67	23.78	159.262	-24.985	1313.638
	13/06/2018	31.26	27.57	22.44	23.61	109.144	-31.142	674.514

Continúa en la siguiente página...

Tabla 40. Continuación.

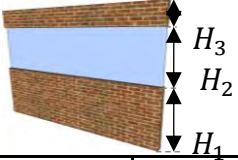















Caso:6	WWR= 38.5%	Alturas (m):	Orientación: Norte					
		$H_1 = 1.2$		 Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_2 = 1.0$						
		$H_3 = 0.4$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	 25/07/2018	35.44	29.63	24.19	24.48	182.569	-0.391	1824.971
	 10/07/2018	32.41	28.29	22.27	23.48	134.5322	-35.556	1022.619
Agosto	 10/08/2018	32.75	28.43	23.76	24.24	139.433	-8.866	1450.318
	 07/08/2018	33.51	28.68	23.72	24.21	148.349	-10.033	1157.888
Septiembre	 01/09/2018	32.56	28.36	22.41	23.67	137.223	-28.896	1143.209
	 22/09/2018	32.2	28.08	21.17	23.08	127.309	-49.597	742.419
Octubre	 10/10/2018	32.22	28.23	21.87	23.3	132.703	-42.074	953.675
	 23/10/2018	30.63	27.4	20.12	22.51	103.149	-69.62	379.665
Noviembre	 12/11/2018	31.51	27.85	22.03	23.42	119.058	-37.725	806.185
	 17/11/2018	27.55	25.94	17.28	21.06	51.28	-120.399	-685.083
Diciembre	 02/12/2018	32.19	28.11	21.41	23.1	128.97	-48.763	713.434
	 22/12/2018	26.93	25.61	15.19	20.02	39.625	-156.176	-1350.236

Tabla 41. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 6" en la orientación Sur.

Caso:6	WWR= 38.5%	Alturas (m):	Orientación: Sur					
		$H_1 = 1.2$						
		$H_2 = 1.0$						
		$H_3 = 0.4$						
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	22/01/2018	33.26	27.95	21.37	23.27	428.693	-150.467	2112.879
	05/01/2018	25.54	24.98	17.18	21.51	60.737	-365.336	-4047.09
Febrero	26/02/2018	35.07	29.53	21.66	23.24	179.113	-43.813	1120.283
	01/02/2018	32.71	28.43	18.15	21.5	139.872	-104.746	-21.351
Marzo	19/03/2018	33.53	28.72	22.73	23.73	149.584	-26.632	1122.047
	24/03/2018	33.26	28.64	19.28	22.1	146.732	-83.86	407.347
Abril	07/04/2018	36.01	29.93	22.75	23.78	193.516	-25.035	1498.463
	16/04/2018	28.65	26.45	18.78	21.85	69.318	-95.545	-212.048
Mayo	30/05/2018	34.48	29.06	23.5	24.1	162.225	-13.942	1335.504
	13/05/2018	33.03	28.46	21.74	23.26	140.873	-43.142	910.484
Junio	04/06/2018	33.32	28.63	22.58	23.72	146.82	-27.061	1169.599
	13/06/2018	30.84	27.34	22.44	23.6	100.729	-31.521	568.267

Continúa en la siguiente página...

Tabla 41. Continuación.



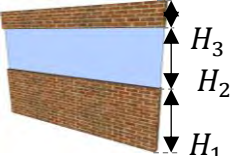













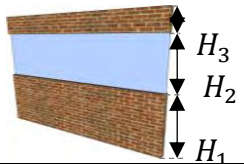















Caso:6	WWR= 38.5%	Alturas (m):	Orientación: Sur					
				 Día más cálido del mes	 Día más frío del mes	(+) Flujo que entra	(-) Flujo que sale	
		$H_1 = 1.2$						
		$H_2 = 1.0$						
		$H_3 = 0.4$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	 25/07/2018	35.34	29.59	24.15	24.46	181.04	-1.298	1769.26
	 10/07/2018	32.02	28.09	22.27	23.48	127.543	-35.665	938.902
Agosto	 10/08/2018	33.02	28.6	23.76	24.24	145.594	-8.866	1484.374
	 07/08/2018	34.17	28.97	23.72	24.21	158.792	-10.033	1194.272
Septiembre	 01/09/2018	34.13	29.11	22.41	23.67	164.165	-28.897	1332.995
	 22/09/2018	34.3	29.17	21.18	23.09	166.326	-49.319	1012.69
Octubre	 10/10/2018	36.16	30.09	21.87	23.3	199.651	-42.063	1419.943
	 23/10/2018	34.7	29.31	20.12	22.51	171.526	-69.498	944.097
Noviembre	 12/11/2018	34.98	29.46	22.03	23.42	176.793	-37.61	1231.222
	 17/11/2018	31.38	27.63	17.3	21.08	111.519	-119.408	-239.235
Diciembre	 02/12/2018	34.46	29.21	21.41	23.11	167.782	-48.54	1064.058
	 22/12/2018	30.8	27.41	15.19	20.02	103.794	-155.936	-814.569

Tabla 42. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 6" en la orientación Este.

Caso:6	WWR= 38.5%	Alturas (m):	Orientación: Este					
		$H_1 = 1.2$		 Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_2 = 1.0$						
		$H_3 = 0.4$						
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	 22/01/2018	29.74	26.64	21.37	23.27	266.253	-150.444	1022.693
	 05/01/2018	25.37	24.98	17.18	21.51	60.737	-365.314	-4098.244
Febrero	 26/02/2018	32.4	28.23	21.66	23.51	183.137	-60.699	917.771
	 01/02/2018	29.52	26.82	18.15	21.5	82.274	-104.745	-318.624
Marzo	 19/03/2018	34.76	29.36	22.74	23.78	172.794	-25.006	1483.693
	 24/03/2018	31.71	27.78	19.28	22.1	116.528	-83.763	354.147
Abril	 07/04/2018	34.92	29.37	22.75	23.78	173.432	-25.025	1504.667
	 16/04/2018	28.7	26.29	18.78	21.85	63.429	-92.545	-122.435
Mayo	 30/05/2018	34.72	29.28	23.5	24.1	170.255	-13.769	1521.366
	 13/05/2018	34.04	28.78	21.76	23.3	152.174	-42.024	1281.157
Junio	 04/06/2018	34.26	28.95	22.75	23.83	158.532	-23.206	1597.431
	 13/06/2018	32.54	28.19	22.44	23.61	131.209	-30.888	862.357

Continúa en la siguiente página...

Tabla 42. Continuación.



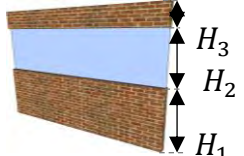













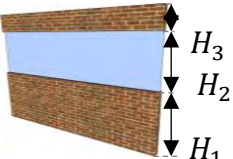















Caso:6	WWR= 38.5%	Alturas (m):	Orientación: Este					
				 Día más cálido del mes	 Día más frío del mes	(+) Flujo que entra	(-) Flujo que sale	
		$H_1 = 1.2$						
		$H_2 = 1.0$						
		$H_3 = 0.4$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	 25/07/2018	36.48	29.96	24.22	24.51	194.655	0.487	2182.236
	 10/07/2018	32.82	28.32	22.27	23.48	135.68	-35.466	1220.833
Agosto	 10/08/2018	32.8	28.49	23.76	24.24	141.661	-8.866	1514.143
	 07/08/2018	34.4	29.07	23.72	24.21	162.632	-10.033	1359.776
Septiembre	 01/09/2018	33.28	28.52	22.41	23.67	142.821	-28.893	1347.953
	 22/09/2018	32.92	28.29	21.17	23.08	134.739	-49.576	966.631
Octubre	 10/10/2018	33.68	28.6	21.87	23.3	145.937	-42.014	1246.357
	 23/10/2018	30.97	27.5	20.12	22.52	106.586	-69.219	635.452
Noviembre	 12/11/2018	31.68	27.95	22.03	23.42	122.603	-37.506	998.649
	 17/11/2018	28.4	26.11	17.3	21.1	57.311	-118.702	-457.948
Diciembre	 02/12/2018	32.25	28.18	21.41	23.12	130.687	-48.354	872.286
	 22/12/2018	27.05	25.73	15.2	20.03	43.946	-155.71	-1111.173

Tabla 43. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 6" en la orientación Oeste.

Caso:6	WWR= 38.5%	Alturas (m):	Orientación: Oeste					
		$H_1 = 1.2$		 Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_2 = 1.0$						
		$H_3 = 0.4$						
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	 22/01/2018	31.9	27.41	21.37	23.27	362.041	-150.485	1366.063
	 05/01/2018	25.46	24.98	17.18	21.51	60.737	-365.363	-4077.484
Febrero	 26/02/2018	35.37	29.48	21.66	23.24	177.446	-43.831	935.847
	 01/02/2018	31.82	27.76	18.15	21.5	115.959	-104.747	-361.009
Marzo	 19/03/2018	37.06	30.37	22.74	23.77	209.27	-25.42	1531.882
	 24/03/2018	34.74	29.11	19.28	22.1	164.485	-83.86	340.695
Abril	 07/04/2018	38.35	30.76	22.75	23.78	223.517	-25.035	1539.371
	 16/04/2018	29.82	26.99	18.78	21.85	88.557	-92.545	-130.92
Mayo	 30/05/2018	36.93	29.99	23.5	24.1	195.828	-13.942	1462.655
	 13/05/2018	34.98	29.27	21.74	23.26	169.725	-43.142	1015.26
Junio	 04/06/2018	37.28	30.36	22.58	23.72	209.55	-27.061	1415.41
	 13/06/2018	31.52	27.66	22.44	23.6	112.549	-31.521	707.9

Continúa en la siguiente página...



Tabla 43. Continuación.















Caso:6	WWR= 38.5%	Alturas (m):	Orientación: Oeste					
				 Día más cálido del mes	 Día más frío del mes	(+) Flujo que entra	(-) Flujo que sale	
		$H_1 = 1.2$						
		$H_2 = 1.0$						
		$H_3 = 0.4$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	 25/07/2018	37.93	30.58	24.15	24.46	216.923	-1.298	1898.307
	 10/07/2018	34.45	29.12	22.27	23.48	164.621	-35.665	-1098.184
Agosto	 10/08/2018	36.35	29.97	23.76	24.24	195.295	-8.866	1708.389
	 07/08/2018	36.06	29.56	23.72	24.21	180.161	-10.033	1285.511
Septiembre	 01/09/2018	36.62	30.16	22.41	23.67	202.148	-28.897	1452.36
	 22/09/2018	34.46	28.99	21.19	23.1	136.238	-41.114	911.56
Octubre	 10/10/2018	35.25	29.43	21.87	23.3	175.712	-42.074	1119.448
	 23/10/2018	34.04	28.9	20.12	22.51	156.756	-69.62	614.575
Noviembre	 12/11/2018	33.4	28.66	22.03	23.42	147.964	-37.725	918.452
	 17/11/2018	28.97	26.53	17.28	21.06	72.084	-120.399	-603.638
Diciembre	 02/12/2018	33.36	28.58	21.41	23.1	145.245	-48.763	780.671
	 22/12/2018	28.68	26.32	15.19	20.02	64.934	-156.176	-1248.453

Tabla 44. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 7" en la orientación Norte.

Caso:7	WWR= 46.2%	Alturas (m):	Orientación: Norte					
		$H_1 = 1.2$	  (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale					
		$H_2 = 1.2$						
		$H_3 = 0.2$						
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	22/01/2018	29.68	26.59	21.37	23.27	259.517	-150.718	831.043
	05/01/2018	25.37	24.98	17.18	21.51	60.428	-365.459	-4118.451
Febrero	26/02/2018	32.33	28.14	21.66	23.24	129.157	-43.877	738.852
	01/02/2018	29.4	26.7	18.15	21.5	77.907	-104.748	-510.966
Marzo	19/03/2018	34.73	29.32	22.74	23.77	171.377	-25.479	1349.482
	24/03/2018	31.63	27.68	19.28	22.1	112.914	-83.927	138.182
Abril	07/04/2018	34.86	29.3	22.75	23.78	170.698	-25.087	1332.9
	16/04/2018	27.79	26.06	18.78	21.85	55.303	-92.555	-300.36
Mayo	30/05/2018	34.74	29.2	23.5	24.1	167.12	-13.897	1383.098
	13/05/2018	32.84	28.41	21.76	23.28	138.855	-42.638	929.178
Junio	04/06/2018	34.03	28.97	22.67	23.78	159.026	-25.024	1311.311
	13/06/2018	31.26	27.57	22.44	23.61	108.952	-31.186	671.983

Continúa en la siguiente página...

Tabla 44. Continuación.



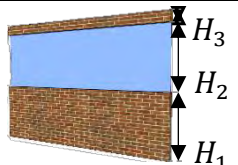













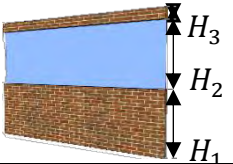















Caso:7	WWR= 46.2%	Alturas (m):	Orientación: Norte					
				 Día más cálido del mes	 Día más frío del mes	(+)	Flujo que entra	(-)
		$H_1 = 1.2$						
		$H_2 = 1.2$						
		$H_3 = 0.2$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	 25/07/2018	35.44	29.63	24.19	24.48	182.469	-0.439	1823.058
	 10/07/2018	32.41	28.29	22.27	23.48	134.415	-35.576	1020.558
Agosto	 10/08/2018	32.75	28.43	23.76	24.24	139.318	-8.913	1448.526
	 07/08/2018	33.51	28.68	23.72	24.21	148.299	-10.066	1155.546
Septiembre	 01/09/2018	32.56	28.36	22.41	23.67	137.119	-28.906	1141.284
	 22/09/2018	32.2	28.08	21.17	23.08	127.204	-49.652	740.27
Octubre	 10/10/2018	32.22	28.23	21.87	23.3	132.554	-42.073	951.873
	 23/10/2018	30.63	27.4	20.12	22.51	102.979	-69.597	377.658
Noviembre	 12/11/2018	31.51	27.85	22.03	23.42	118.922	-37.757	804.329
	 17/11/2018	27.55	25.94	17.28	21.06	51.124	-120.272	-686.794
Diciembre	 02/12/2018	32.19	28.11	21.41	23.1	128.14	-48.79	711.537
	 22/12/2018	26.93	25.61	15.19	20.02	39.449	-156.123	-1352.46

Tabla 45. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 7" en la orientación Sur.

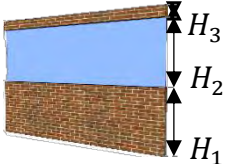














Caso:7	WWR= 46.2%	Alturas (m):	Orientación: Sur					
		$H_1 = 1.2$		 Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_2 = 1.2$						
		$H_3 = 0.2$						
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	 22/01/2018	33.26	27.95	21.37	23.27	428.097	-150.699	2101.899
	 05/01/2018	25.54	24.98	17.18	21.51	60.428	-365.432	-4058.457
Febrero	 26/02/2018	35.07	29.53	21.66	23.24	178.922	-43.859	1117.264
	 01/02/2018	32.71	28.43	18.15	21.5	139.593	-104.747	-25.157
Marzo	 19/03/2018	33.53	28.72	22.73	23.73	149.583	-26.674	1120.875
	 24/03/2018	33.26	28.64	19.28	22.1	146.631	-83.928	404.23
Abril	 07/04/2018	36.01	29.93	22.75	23.78	193.315	-25.088	1496.302
	 16/04/2018	28.65	26.45	18.78	21.85	69.193	-92.555	-214.462
Mayo	 30/05/2018	34.48	29.06	23.5	24.1	162.13	-13.977	1333.7
	 13/05/2018	33.03	28.46	21.74	23.26	140.779	-43.188	908.38
Junio	 04/06/2018	33.32	28.63	22.58	23.72	146.625	-27.026	1167.71
	 13/06/2018	30.84	27.34	22.44	23.6	100.564	-31.559	566.045

Continúa en la siguiente página...

Tabla 45. Continuación.

Caso:7	WWR= 46.2%	Alturas (m):	Orientación: Sur					
		$H_1 = 1.2$	Día más cálido del mes Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale					
		$H_2 = 1.2$						
		$H_3 = 0.2$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	25/07/2018	35.34	29.59	24.15	24.46	180.942	-1.333	1767.511
	10/07/2018	32.02	28.09	22.27	23.48	127.448	-35.683	937.09
Agosto	10/08/2018	33.02	28.6	23.76	24.24	145.491	-8.913	1482.482
	07/08/2018	34.17	28.97	23.72	24.21	158.719	-10.066	1191.819
Septiembre	01/09/2018	34.13	29.11	22.41	23.67	163.98	-28.907	1330.498
	22/09/2018	34.3	29.17	21.18	23.09	166.141	-49.374	1009.751
Octubre	10/10/2018	36.16	30.09	21.87	23.3	199.285	-42.062	1416.712
	23/10/2018	34.7	29.31	20.12	22.51	171.218	-69.478	940.389
Noviembre	12/11/2018	34.98	29.46	22.03	23.42	176.541	-37.645	1228.111
	17/11/2018	31.38	27.63	17.3	21.08	111.231	-119.291	-242.271
Diciembre	02/12/2018	34.46	29.21	21.41	23.11	167.575	-48.571	1061.14
	22/12/2018	30.8	27.41	15.19	20.02	103.469	-155.91	-818.399

Tabla 46. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 7" en la orientación Este.

Caso:7	WWR= 46.2%	Alturas (m):	Orientación: Este					
				  Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	 22/01/2018	29.74	26.64	21.37	23.27	265.953	-150.677	1014.797
	 05/01/2018	25.37	24.98	17.18	21.51	60.428	-365.41	-4109.459
Febrero	 26/02/2018	32.4	28.23	21.66	23.51	132.384	-43.779	915.363
	 01/02/2018	29.52	26.82	18.15	21.5	82.112	-104.745	-321.521
Marzo	 19/03/2018	34.76	29.36	22.74	23.78	172.729	-25.069	1481.481
	 24/03/2018	31.71	27.78	19.28	22.1	116.392	-83.832	351.207
Abril	 07/04/2018	34.92	29.37	22.75	23.78	173.328	-25.078	1502.514
	 16/04/2018	28.7	26.29	18.78	21.85	63.29	-92.555	-12.5106
Mayo	 30/05/2018	34.72	29.28	23.5	24.1	170.122	-13.808	1519.021
	 13/05/2018	34.04	28.78	21.76	23.3	152.076	-42.08	1277.949
Junio	 04/06/2018	34.26	28.95	22.75	23.83	158.292	-23.263	1594.25
	 13/06/2018	32.54	28.19	22.44	23.61	131.054	-30.934	859.277

Continúa en la siguiente página...

Tabla 46. Continuación.



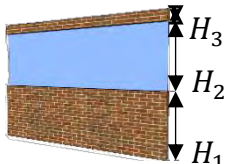













Caso:7	WWR= 46.2%	Alturas (m):	Orientación: Este	 Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_1 = 1.2$ $H_2 = 1.2$ $H_3 = 0.2$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	 25/07/2018	36.48	29.96	24.22	24.51	194.438	0.434	2179.241
	 10/07/2018	32.82	28.32	22.27	23.48	135.563	-35.488	1218.179
Agosto	 10/08/2018	32.8	28.49	23.76	24.24	141.571	-8.913	1512.166
	 07/08/2018	34.4	29.07	23.72	24.21	162.545	-10.066	1356.832
Septiembre	 01/09/2018	33.28	28.52	22.41	23.67	142.706	-28.903	1327.334
	 22/09/2018	32.92	28.29	21.17	23.08	134.655	-49.631	963.827
Octubre	 10/10/2018	33.68	28.6	21.87	23.3	145.782	-42.014	1243.665
	 23/10/2018	30.97	27.5	20.12	22.52	106.424	-69.205	623.682
Noviembre	 12/11/2018	31.68	27.95	22.03	23.42	122.481	-37.541	996.228
	 17/11/2018	28.4	26.11	17.3	21.1	57.167	-118.588	-460.339
Diciembre	 02/12/2018	32.25	28.18	21.41	23.12	130.539	-48.388	869.925
	 22/12/2018	27.05	25.73	15.2	20.03	43.777	-155.685	-1114.113

Tabla 47. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 7" en la orientación Oeste.

Caso:7	WWR= 46.2%	Alturas (m):	Orientación: Oeste					
		$H_1 = 1.2$		Día más cálido del mes Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_2 = 1.2$						
		$H_3 = 0.2$						
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	22/01/2018	31.9	27.41	21.37	23.27	361.42	-150.718	1357.197
	05/01/2018	25.46	24.98	17.18	21.51	60.428	-365.459	-4088.76
Febrero	26/02/2018	35.37	29.48	21.66	23.24	177.103	-43.877	933.363
	01/02/2018	31.82	27.76	18.15	21.5	115.666	-104.748	-363.793
Marzo	19/03/2018	37.06	30.37	22.74	23.77	209.118	-25.479	1529.52
	24/03/2018	34.74	29.11	19.28	22.1	164.176	-83.928	337.768
Abril	07/04/2018	38.35	30.76	22.75	23.78	223.229	-25.088	1537.072
	16/04/2018	29.82	26.99	18.78	21.85	88.315	-92.555	-133.558
Mayo	30/05/2018	36.93	29.99	23.5	24.1	195.575	-13.977	1460.48
	13/05/2018	34.98	29.27	21.74	23.26	169.522	-43.188	1012.847
Junio	04/06/2018	37.28	30.36	22.58	23.72	209.134	-27.026	1412.756
	13/06/2018	31.52	27.66	22.44	23.6	112.287	-31.559	705.277

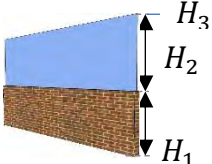















Continúa en la siguiente página...



Tabla 47. Continuación.

Caso:7	WWR= 46.2%	Alturas (m):	Orientación: Oeste					
		$H_1 = 1.2$		Día más cálido del mes Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
		$H_2 = 1.2$						
		$H_3 = 0.2$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	25/07/2018	37.93	30.58	24.15	24.46	216.705	-1.333	1896.165
	10/07/2018	34.45	29.12	22.27	23.48	164.406	-35.683	1086.925
Agosto	10/08/2018	36.35	29.97	23.76	24.24	195.006	-8.913	1705.831
	07/08/2018	36.06	29.56	23.72	24.21	179.975	-10.066	1282.803
Septiembre	01/09/2018	36.62	30.16	22.41	23.67	201.78	-28.907	1449.493
	22/09/2018	34.46	28.99	21.19	23.1	159.723	-48.932	908.926
Octubre	10/10/2018	35.25	29.43	21.87	23.3	175.422	-42.073	1117.136
	23/10/2018	34.04	28.9	20.12	22.51	156.429	-69.597	611.847
Noviembre	12/11/2018	33.4	28.66	22.03	23.42	147.739	-37.757	916.262
	17/11/2018	28.97	26.53	17.28	21.06	71.863	-120.272	-605.588
Diciembre	02/12/2018	33.36	28.58	21.41	23.1	266.443	-48.79	778.577
	22/12/2018	28.68	26.32	15.19	20.02	64.689	-156.123	-1250.983

Tabla 48. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 8" en la orientación Norte.

Caso:8	WWR= 53.8%	Alturas (m):	Orientación: Norte					
		$H_1 = 1.2$ $H_2 = 1.4$ $H_3 = 0.0$		 Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	 22/01/2018	29.68	26.59	21.37	23.27	259.227	-150.951	823.663
	 05/01/2018	25.37	24.98	17.18	21.51	60.119	-365.556	-4129.64
Febrero	 26/02/2018	32.33	28.14	21.66	23.24	128.997	-43.923	736.956
	 01/02/2018	29.4	26.7	18.15	21.5	77.744	-104.749	-513.297
Marzo	 19/03/2018	34.73	29.32	22.74	23.77	171.309	-25.538	1347.649
	 24/03/2018	31.63	27.68	19.28	22.1	112.793	-83.995	135.857
Abril	 07/04/2018	34.86	29.3	22.75	23.78	170.605	-25.141	1331.219
	 16/04/2018	27.79	26.06	18.78	21.85	55.207	-92.564	-302.536
Mayo	 30/05/2018	34.74	29.2	23.5	24.1	167.013	-13.934	1381.149
	 13/05/2018	32.84	28.41	21.76	23.28	138.746	-42.69	927.019
Junio	 04/06/2018	34.03	28.97	22.67	23.78	158.791	-25.062	1308.985
	 13/06/2018	31.26	27.57	22.44	23.61	108.76	-31.23	669.451

Continúa en la siguiente página...

Tabla 48. Continuación.

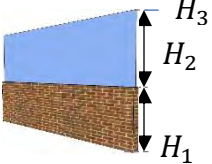

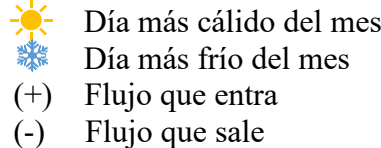
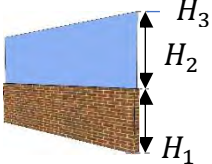

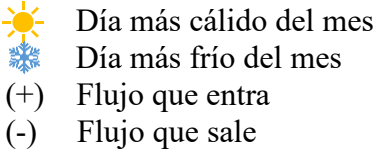












Caso:8	WWR= 53.8%	Alturas (m):	Orientación: Norte					
		$H_1 = 1.2$						
		$H_2 = 1.4$						
		$H_3 = 0.0$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	25/07/2018	35.44	29.63	24.19	24.48	182.369	-0.486	1821.145
	10/07/2018	32.41	28.29	22.27	23.48	134.298	-35.596	1018.496
Agosto	10/08/2018	32.75	28.43	23.76	24.24	139.23	-8.961	1446.733
	07/08/2018	33.51	28.68	23.72	24.21	148.248	-10.099	1153.204
Septiembre	01/09/2018	32.56	28.36	22.41	23.67	137.015	-28.917	1139.359
	22/09/2018	32.2	28.08	21.17	23.08	127.098	-49.707	738.121
Octubre	10/10/2018	32.22	28.23	21.87	23.3	132.405	-42.073	950.071
	23/10/2018	30.63	27.4	20.12	22.51	102.81	-69.576	375.651
Noviembre	12/11/2018	31.51	27.85	22.03	23.42	118.787	-37.789	802.473
	17/11/2018	27.55	25.94	17.28	21.06	50.968	-120.146	-688.506
Diciembre	02/12/2018	32.19	28.11	21.41	23.1	127.991	-48.816	709.64
	22/12/2018	26.93	25.61	15.19	20.02	39.282	-156.077	-1354.685

Tabla 49. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 8" en la orientación Sur.

Caso:8	WWR= 53.8%	Alturas (m):	Orientación: Sur					
		$H_1 = 1.2$						
		$H_2 = 1.4$						
		$H_3 = 0.0$						
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	 22/01/2018	33.26	27.95	21.37	23.27	427.502	-150.932	2090.919
	 05/01/2018	25.54	24.98	17.18	21.51	60.119	-365.529	-4069.823
Febrero	 26/02/2018	35.07	29.53	21.66	23.24	178.73	-43.906	1114.244
	 01/02/2018	32.71	28.43	18.15	21.5	139.318	-104.748	-28.964
Marzo	 19/03/2018	33.53	28.72	22.73	23.73	149.582	-26.717	1119.704
	 24/03/2018	33.26	28.64	19.28	22.1	146.531	-83.996	401.113
Abril	 07/04/2018	36.01	29.93	22.75	23.78	193.114	-25.142	1494.142
	 16/04/2018	28.65	26.45	18.78	21.85	69.067	-92.564	-216.876
Mayo	 30/05/2018	34.48	29.06	23.5	24.1	162.035	-14.013	1331.896
	 13/05/2018	33.03	28.46	21.74	23.26	140.685	-43.234	906.276
Junio	 04/06/2018	33.32	28.63	22.58	23.72	146.431	-26.992	1165.821
	 13/06/2018	30.84	27.34	22.44	23.6	100.399	-31.598	563.822

Continúa en la siguiente página...

Tabla 49. Continuación.



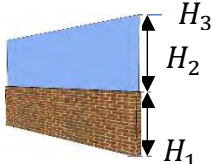













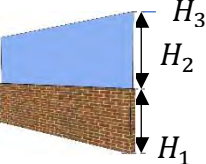















Caso:8	WWR= 53.8%	Alturas (m):	Orientación: Sur					
				 Día más cálido del mes	 Día más frío del mes	(+) Flujo que entra	(-) Flujo que sale	
		$H_1 = 1.2$						
		$H_2 = 1.4$						
		$H_3 = 0.0$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	 25/07/2018	35.34	29.59	24.15	24.46	180.845	-1.368	1765.762
	 10/07/2018	32.02	28.09	22.27	23.48	127.353	-35.702	935.277
Agosto	 10/08/2018	33.02	28.6	23.76	24.24	145.388	-8.961	1480.589
	 07/08/2018	34.17	28.97	23.72	24.21	158.647	-10.099	1189.367
Septiembre	 01/09/2018	34.13	29.11	22.41	23.67	163.795	-28.918	1328.0
	 22/09/2018	34.3	29.17	21.18	23.09	165.957	-49.43	1006.813
Octubre	 10/10/2018	36.16	30.09	21.87	23.3	198.919	-42.061	1413.481
	 23/10/2018	34.7	29.31	20.12	22.51	170.91	-69.458	936.68
Noviembre	 12/11/2018	34.98	29.46	22.03	23.42	176.289	-37.68	1225.001
	 17/11/2018	31.38	27.63	17.3	21.08	110.942	-119.173	-245.307
Diciembre	 02/12/2018	34.46	29.21	21.41	23.11	167.368	-48.602	1058.222
	 22/12/2018	30.8	27.41	15.19	20.02	103.144	-155.884	-822.229

Tabla 50. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 8" en la orientación Este.

Caso:8	WWR= 53.8%	Alturas (m):	Orientación: Este					
		$H_1 = 1.2$ $H_2 = 1.4$ $H_3 = 0.0$		 Día más cálido del mes  Día más frío del mes (+) Flujo que entra (-) Flujo que sale				
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	 22/01/2018	29.74	26.64	21.37	23.27	265.654	-150.911	1006.901
	 05/01/2018	25.37	24.98	17.18	21.51	60.119	-365.508	-4120.674
Febrero	 26/02/2018	32.4	28.23	21.66	23.51	132.287	-43.827	912.954
	 01/02/2018	29.52	26.82	18.15	21.5	81.953	-104.746	-324.418
Marzo	 19/03/2018	34.76	29.36	22.74	23.78	172.664	-25.131	1479.268
	 24/03/2018	31.71	27.78	19.28	22.1	116.257	-83.902	348.267
Abril	 07/04/2018	34.92	29.37	22.75	23.78	173.224	-25.131	1500.362
	 16/04/2018	28.7	26.29	18.78	21.85	63.151	-92.564	-127.777
Mayo	 30/05/2018	34.72	29.28	23.5	24.1	169.989	-13.848	1516.676
	 13/05/2018	34.04	28.78	21.76	23.3	151.979	-42.135	1274.741
Junio	 04/06/2018	34.26	28.95	22.75	23.83	158.052	-23.321	1591.069
	 13/06/2018	32.54	28.19	22.44	23.61	130.9	-30.98	856.197

Continúa en la siguiente página...

Tabla 50. Continuación.

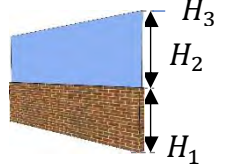

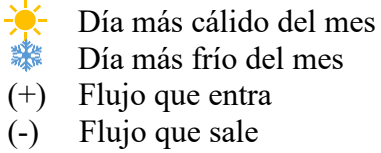
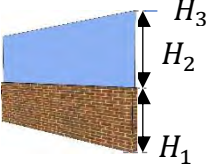

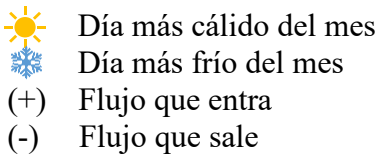












Caso:8	WWR= 53.8%	Alturas (m):	Orientación: Este					
		$H_1 = 1.2$						
		$H_2 = 1.4$						
		$H_3 = 0.0$						
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	25/07/2018	36.48	29.96	24.22	24.51	194.222	0.381	2176.245
	10/07/2018	32.82	28.32	22.27	23.48	135.446	-35.51	1215.525
Agosto	10/08/2018	32.8	28.49	23.76	24.24	141.481	-8.961	1510.189
	07/08/2018	34.4	29.07	23.72	24.21	162.457	-10.099	1353.887
Septiembre	01/09/2018	33.28	28.52	22.41	23.67	142.591	-28.914	1369.715
	22/09/2018	32.92	28.29	21.17	23.08	134.57	-49.686	961.024
Octubre	10/10/2018	33.68	28.6	21.87	23.3	145.628	-42.015	1240.974
	23/10/2018	30.97	27.5	20.12	22.52	106.263	-69.192	629.911
Noviembre	12/11/2018	31.68	27.95	22.03	23.42	122.376	-37.577	993.808
	17/11/2018	28.4	26.11	17.3	21.1	57.023	-118.474	-462.731
Diciembre	02/12/2018	32.25	28.18	21.41	23.12	130.392	-48.422	867.565
	22/12/2018	27.05	25.73	15.2	20.03	43.608	-155.659	-1117.054

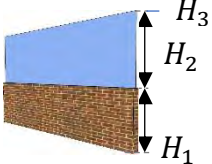

Tabla 51. Temperaturas, flujos de calor y ganancia térmica del "Caso 8" en la orientación Oeste.

Caso:8	WWR= 53.8%	Alturas (m):	Orientación: Oeste					
		$H_1 = 1.2$						
		$H_2 = 1.4$						
		$H_3 = 0.0$						
Mes	Día	T superficial máxima(°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Enero	 22/01/2018	31.9	27.41	21.37	23.27	360.8	-150.951	1348.33
	 05/01/2018	25.46	24.98	17.18	21.51	60.119	-365.556	-4100.037
Febrero	 26/02/2018	35.37	29.48	21.66	23.24	176.762	-43.923	930.878
	 01/02/2018	31.82	27.76	18.15	21.5	115.373	-104.749	-366.577
Marzo	 19/03/2018	37.06	30.37	22.74	23.77	208.966	-25.538	1527.157
	 24/03/2018	34.74	29.11	19.28	22.1	168.868	-83.996	334.841
Abril	 07/04/2018	38.35	30.76	22.75	23.78	222.943	-25.142	1534.773
	 16/04/2018	29.82	26.99	18.78	21.85	88.073	-92.564	-136.195
Mayo	 30/05/2018	36.93	29.99	23.5	24.1	195.323	-14.013	1458.305
	 13/05/2018	34.98	29.27	21.74	23.26	169.32	-43.234	1010.434
Junio	 04/06/2018	37.28	30.36	22.58	23.72	208.719	-26.992	1410.103
	 13/06/2018	31.52	27.66	22.44	23.6	112.026	-31.598	702.654

Continúa en la siguiente página...



Tabla 51. Continuación.

Caso:8	WWR= 53.8%	Alturas (m):	Orientación: Oeste					
		$H_1 = 1.2$		☀️ Día más cálido del mes				
		$H_2 = 1.4$		❄️ Día más frío del mes				
		$H_3 = 0.0$		(+) Flujo que entra				
				(-) Flujo que sale				
Mes	Día	T superficial máxima (°C)		T superficial mínima (°C)		Q total máximo (W)	Q total mínimo (W)	Ganancia total (Wh)
		Exterior	Interior	Exterior	Interior			
Julio	☀️ 25/07/2018	37.93	30.58	24.15	24.46	216.488	-1.368	1894.024
	❄️ 10/07/2018	34.45	29.12	22.27	23.48	164.185	-35.702	1084.666
Agosto	☀️ 10/08/2018	36.35	29.97	23.76	24.24	194.717	-8.961	1703.273
	❄️ 07/08/2018	36.06	29.56	23.72	24.21	179.791	-10.099	1280.095
Septiembre	☀️ 01/09/2018	36.62	30.16	22.41	23.67	201.414	-28.918	1446.626
	❄️ 22/09/2018	34.46	28.99	21.19	23.1	159.511	-48.99	906.292
Octubre	☀️ 10/10/2018	35.25	29.43	21.87	23.3	175.133	-42.073	1114.825
	❄️ 23/10/2018	34.04	28.9	20.12	22.51	156.103	-69.576	609.119
Noviembre	☀️ 12/11/2018	33.4	28.66	22.03	23.42	147.515	-37.789	914.073
	❄️ 17/11/2018	28.97	26.53	17.28	21.06	71.641	-120.146	-607.537
Diciembre	☀️ 02/12/2018	33.36	28.58	21.41	23.1	144.856	-48.816	776.483
	❄️ 22/12/2018	28.68	26.32	15.19	20.02	64.444	-156.077	-1253.514

## Anexo C: Análisis económico

Tabla 52. Costo eléctrico mensual y anual para climatización para la orientación Norte (Caso 1-4).

Orientación: Norte	Caso: 1		Caso: 2		Caso: 3		Caso: 4	
Mes	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)
Enero	76.378	78.975	76.422	79.020	76.481	79.081	76.540	79.142
Febrero	17.461	14.964	17.467	14.969	17.473	14.974	17.479	14.980
Marzo	23.445	20.140	23.381	20.084	23.317	20.029	23.252	19.974
Abril	24.454	18.708	24.462	18.713	24.469	18.719	24.477	18.725
Mayo	36.222	27.782	36.159	27.734	36.095	27.685	36.031	27.636
Junio	30.187	23.214	30.114	23.158	30.041	23.101	29.968	23.045
Julio	44.446	34.268	44.384	34.220	44.322	34.173	44.261	34.125
Agosto	40.748	31.498	40.684	31.448	40.619	31.399	40.555	31.349
Septiembre	27.721	21.484	28.529	22.110	28.468	22.063	28.407	22.015
Octubre	20.962	18.300	20.903	18.248	20.844	18.197	20.785	18.145
Noviembre	22.380	19.582	22.378	19.580	22.376	19.579	22.373	19.577
Diciembre	31.962	28.030	31.967	28.035	31.972	28.039	31.977	28.044
Costo anual (MX\$)		336.9		337.3		337.0		336.7

**Tabla 53. Costo eléctrico mensual y anual para climatización para la orientación Norte (Caso 5-8).**

Orientación: Norte	Caso: 5		Caso: 6		Caso: 7		Caso: 8	
Mes	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)
Enero	76.599	79.203	76.657	79.263	76.717	79.326	76.776	79.387
Febrero	17.485	14.985	17.491	14.990	17.497	14.995	17.504	15.001
Marzo	23.188	19.918	23.123	19.863	23.059	19.808	22.994	19.752
Abril	24.484	18.730	24.491	18.736	24.499	18.742	24.506	18.747
Mayo	36.028	27.633	35.904	27.538	35.840	27.489	35.777	27.441
Junio	29.895	22.989	29.822	22.933	29.749	22.877	29.677	22.821
Julio	44.199	34.078	44.138	34.030	44.076	33.983	44.014	33.935
Agosto	40.491	31.300	40.427	31.250	40.363	31.201	40.299	31.151
Septiembre	28.346	21.968	28.284	21.920	28.223	21.873	28.162	21.826
Octubre	20.726	18.094	20.667	18.042	20.608	17.991	20.549	17.939
Noviembre	22.371	19.575	22.369	19.573	22.367	19.571	22.365	19.569
Diciembre	31.982	28.048	31.987	28.052	31.992	28.057	31.997	28.061
Costo anual (MX\$)	336.5		336.1		335.9		335.6	

Tabla 54. Costo eléctrico mensual y anual para climatización para la orientación Sur (Caso 1-4).

Orientación: Sur	Caso: 1		Caso: 2		Caso: 3		Caso: 4	
Mes	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)
Enero	95.450	98.695	95.456	98.701	95.462	98.707	95.468	98.713
Febrero	15.928	13.650	15.939	13.660	15.950	13.669	15.961	13.678
Marzo	24.038	20.649	23.971	20.592	23.905	20.534	23.839	20.477
Abril	25.639	19.614	25.642	19.617	25.646	19.619	25.650	19.622
Mayo	35.116	26.934	35.055	26.887	34.995	26.841	34.934	26.794
Junio	26.376	20.283	27.647	21.260	26.253	20.189	26.191	20.141
Julio	42.253	32.577	42.197	32.534	42.142	32.492	42.087	32.449
Agosto	41.856	32.355	41.788	32.302	41.721	32.250	41.654	32.198
Septiembre	35.593	27.585	35.511	27.521	35.430	27.458	35.348	27.395
Octubre	37.180	32.458	37.073	32.365	36.965	32.271	36.858	32.177
Noviembre	22.062	19.305	22.061	19.304	22.060	19.303	22.059	19.302
Diciembre	29.048	25.475	29.062	25.487	29.076	25.500	29.090	25.512
Costo anual (MX\$)	369.5		370.2		368.8		368.4	

**Tabla 55. Costo eléctrico mensual y anual para climatización para la orientación Sur (Caso 5-8).**

Orientación: Sur	Caso: 5		Caso: 6		Caso: 7		Caso: 8	
Mes	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)
Enero	95.474	98.720	95.480	98.726	95.486	98.732	95.492	98.738
Febrero	15.972	13.688	15.983	13.697	15.994	13.707	16.005	13.716
Marzo	23.772	20.420	23.706	20.363	23.639	20.306	23.573	20.249
Abril	25.654	19.625	25.658	19.628	25.661	19.631	25.665	19.634
Mayo	34.873	26.748	34.813	26.701	34.752	26.655	34.692	26.609
Junio	26.130	20.094	26.068	20.046	26.006	19.999	25.945	19.951
Julio	42.032	32.406	41.977	32.364	41.921	32.321	41.866	32.279
Agosto	41.586	32.146	41.519	32.094	41.452	32.042	41.384	31.990
Septiembre	35.267	27.332	35.185	27.269	35.104	27.205	35.022	27.142
Octubre	36.750	32.083	36.643	31.989	36.535	31.895	36.427	31.801
Noviembre	22.058	19.301	22.057	19.300	22.056	19.299	22.055	19.298
Diciembre	29.105	25.525	29.119	25.537	29.133	25.550	29.147	25.562
Costo anual (MX\$)	368.0		367.7		367.3		366.9	

**Tabla 56. Costo eléctrico mensual y anual para climatización para la orientación Este (Caso 1-4).**

Orientación: Este	Caso: 1		Caso: 2		Caso: 3		Caso: 4	
Mes	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)
Enero	79.117	81.807	79.169	81.861	79.220	81.914	79.272	81.967
Febrero	17.275	14.805	17.282	14.811	17.289	14.817	17.296	14.823
Marzo	28.886	24.813	28.806	24.744	28.726	24.676	28.646	24.607
Abril	24.368	18.641	24.375	18.647	24.383	18.653	24.391	18.659
Mayo	43.869	33.648	43.783	33.582	43.697	33.516	43.611	33.450
Junio	37.366	28.735	37.272	28.663	37.179	28.590	37.085	28.518
Julio	53.185	41.006	53.098	40.938	53.010	40.871	52.923	40.803
Agosto	44.927	34.729	44.851	34.670	44.775	34.611	44.698	34.552
Septiembre	35.530	27.536	35.449	27.473	35.368	27.410	35.286	27.347
Octubre	29.591	25.833	29.507	25.759	29.422	25.685	29.337	25.612
Noviembre	21.851	19.120	21.851	19.119	21.850	19.119	21.850	19.119
Diciembre	30.699	26.923	30.708	26.931	30.717	26.939	30.726	26.946
Costo anual (MX\$)	377.5		377.1		376.8		376.4	

**Tabla 57. Costo eléctrico mensual y anual para climatización para la orientación Este (Caso 5-8).**

Orientación: Este	Caso: 5		Caso: 6		Caso: 7		Caso: 8	
Mes	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)
Enero	79.323	82.020	79.375	82.073	79.426	82.126	79.477	82.180
Febrero	17.303	14.828	22.148	18.981	17.316	14.840	17.323	14.846
Marzo	28.601	24.568	28.487	24.470	28.407	24.401	28.327	24.333
Abril	24.399	18.665	24.407	18.671	22.725	17.385	24.422	18.683
Mayo	43.525	33.384	43.439	33.318	43.353	33.252	43.267	33.186
Junio	36.991	28.446	36.897	28.374	36.803	28.301	36.709	28.229
Julio	52.835	40.736	52.748	40.668	52.660	40.601	52.572	40.533
Agosto	44.622	34.493	44.546	34.434	44.469	34.375	44.393	34.316
Septiembre	35.205	27.284	34.719	26.907	34.367	26.635	34.961	27.095
Octubre	29.253	25.538	29.168	25.464	28.944	25.268	28.999	25.316
Noviembre	21.849	19.118	21.849	19.118	21.849	19.117	21.848	19.117
Diciembre	30.735	26.954	30.744	26.962	30.753	26.970	30.762	26.978
Costo anual (MX\$)	376.0		379.4		373.2		374.8	

**Tabla 58. Costo eléctrico mensual y anual para climatización para la orientación Oeste (Caso 1-4).**

Orientación: Oeste	Caso: 1		Caso: 2		Caso: 3		Caso: 4	
Mes	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)
Enero	84.188	87.051	84.226	87.089	84.263	87.128	84.300	87.166
Febrero	18.135	15.542	18.139	15.545	18.143	15.549	18.148	15.553
Marzo	29.435	25.285	29.353	25.214	29.271	25.144	29.189	25.073
Abril	25.029	19.147	25.034	19.151	25.039	19.155	25.044	19.159
Mayo	38.762	29.731	38.692	29.677	38.621	29.622	41.469	31.807
Junio	32.245	24.797	32.166	24.736	32.087	24.675	32.008	24.614
Julio	46.645	35.963	46.579	35.912	46.511	35.860	46.443	35.807
Agosto	46.814	36.187	46.732	36.124	46.650	36.061	46.569	35.998
Septiembre	35.871	27.800	35.789	27.736	35.706	27.672	35.624	27.608
Octubre	27.268	23.805	27.190	23.737	27.112	23.669	27.034	23.600
Noviembre	22.849	19.993	22.846	19.990	22.842	19.987	22.839	19.984
Diciembre	31.418	27.553	31.424	27.559	31.431	27.565	31.438	27.571
Costo anual (MX\$)	372.8		372.4		372.0		373.9	



**Tabla 59. Costo eléctrico mensual y anual para climatización para la orientación Oeste (Caso 5-8).**

Orientación: Oeste	Caso: 5		Caso: 6		Caso: 7		Caso: 8	
Mes	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo (MX \$)
Enero	84.338	87.205	84.375	87.244	84.412	87.282	84.450	87.321
Febrero	18.152	15.556	18.156	15.560	18.160	15.563	18.164	15.567
Marzo	29.107	25.003	29.025	24.932	28.943	24.862	28.861	24.792
Abril	25.049	19.163	25.054	19.167	25.059	19.170	25.065	19.174
Mayo	38.479	29.513	38.408	29.459	38.337	29.404	38.265	29.350
Junio	31.929	24.553	31.850	24.492	31.770	24.432	31.691	24.371
Julio	46.374	35.755	46.446	35.810	46.238	35.649	46.170	35.597
Agosto	46.487	35.934	46.405	35.871	46.324	35.808	46.242	35.745
Septiembre	35.541	27.545	33.841	26.227	35.376	27.417	35.294	27.353
Octubre	26.955	23.532	26.877	23.464	26.799	23.396	26.721	23.328
Noviembre	22.835	19.981	22.831	19.977	22.828	19.974	22.824	19.971
Diciembre	31.445	27.577	31.451	27.583	43.509	38.157	31.465	27.595
Costo anual (MX\$)	371.3		369.7		381.1		370.1	

Apéndice



EDUCACIÓN SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

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

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

A

GABRIELA PEDRAZA JIMÉNEZ, JESÚS P. XAMÁN VILLASEÑOR, CARLOS E. TORRES AGUILAR

POR LA PRESENTACIÓN DEL ARTICULO: "EVALUACIÓN TÉRMICA DE UNA FACHADA TÍPICA EN CLIMA CÁLIDO" EN EL MARCO DE LA 7ª JORNADA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA APLICADA, CELEBRADO DEL 17 AL 19 DE NOVIEMBRE DE 2021, EN EL TECN/CENIDET.

CUERNAVACA, MORELOS., 18 DE NOVIEMBRE DE 2021

DRA. YESICA IMELDA SAAVEDRA BENÍTEZ DIRECTORA



JCYTA1321 http://constancias.cenidet.tecnm.mx



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. (01) 777 3 62 77 70, ext. 4201, e-mail: dir\_cenidet@tecnm.mx www.tecnm.mx | www.cenidet.tecnm.mx



## Evaluación térmica de una fachada típica en clima cálido

G. Pedraza\*, J. Xamán\*,  
C. E. Torres-Aguilar\*.

\*Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Cuernavaca, Mor., CP, 62490, México  
(e-mails: m20ce007@cenidet.tecnm.mx, jesus.xv@cenidet.tecnm.mx, carlos.torres17ma@cenidet.edu.mx)

**Resumen:** Se evaluó la transferencia de calor en una pared con ventana (fachada) bajo las condiciones climáticas de Mérida, Yucatán. Se modeló la fachada en las orientaciones Norte, Sur, Este y Oeste, considerando el día más cálido (25/Julio/2018) de un año típico. Para realizar el estudio, se planteó el modelo matemático mediante balances de energía y se desarrolló un código computacional en lenguaje ANSI C99. Se encontró que la fachada orientada al Sur presentó una ganancia de calor menor (1771 Wh) que las otras orientaciones, lo cual se traduce en una reducción de las cargas térmicas por remover a través de sistemas activos o pasivos para lograr un ambiente de confort. La fachada orientada al Este fue la que mayor ganancia térmica presentó, de 2185.2 Wh, lo cual implica un mayor consumo energético para climatización. Se concluyó que la orientación de la fachada tiene diferentes efectos en la ganancia de calor al interior del edificio, por lo que un adecuado diseño y construcción contribuye a disminuir el consumo energético del edificio.

**Abstract:** The heat transfer in a wall with a window (façade) was evaluated under the climatic conditions of Mérida, Yucatán. The facade was modeled in the North, South, East and West orientations, considering the warmest day (July 25, 2018) of a typical year. To carry out the study, the mathematical model was proposed using energy balances and a computational code was developed in ANSI C99 language. The results showed that the south-facing façade presented the lowest thermal gain, 1771,008 Wh, which translates into a reduction in thermal loads to be removed through active or passive systems to achieve a comfortable environment. The east-facing façade was the one with the highest thermal gain, 2,185,232 Wh, which implies greater energy consumption for air conditioning. It was concluded that the orientation of the façade has different effects on the heat gain inside the building, so proper design and construction can contribute to reducing the building's energy consumption.

**Palabras clave:** Balance de energía, fachada, orientación, análisis térmico

**Keywords:** Energy balance, façade, orientation, thermal analysis.

### 1. INTRODUCCIÓN

La República Mexicana se compone principalmente de climas cálidos y templados. Las edificaciones localizadas en zonas de clima cálido dependen del uso de sistemas activos, como el aire acondicionado, para mantener las condiciones de confort deseadas. Sin embargo, esto implica una gran emisión de gases de efecto invernadero que continúa incrementando con el paso de los años junto al crecimiento demográfico.

En México, en 2018, se reportó una demanda energética total de 9236.86 PJ de los cuales 1000.54 PJ corresponden a la demanda de energía del sector eléctrico (Secretaría de Energía, 2019). En el mismo año, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en colaboración con la Secretaría de Medio

Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) publicaron el inventario nacional de emisión de gases y compuestos de efecto

Para prevenir el crecimiento de emisiones de gases de efecto invernadero se ha estudiado el uso de los sistemas de climatización pasivos, que transforman el potencial energético existente en fuentes naturales de energía para el acondicionamiento de edificios. Los sistemas de climatización pasivos usan los elementos propios de las edificaciones (orientación, tamaño de las ventanas, dispositivos de sombreado, materiales aislantes, masa térmica, entre otros), para disminuir el uso de energías convencionales para climatización.

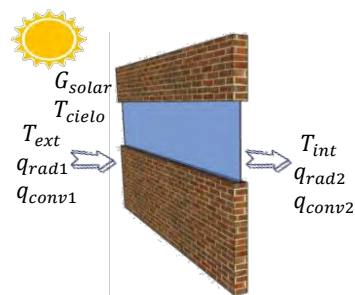
Zhai *et al.* (2018) realizaron un estudio teórico para determinar la razón de aspecto óptima muro-ventana (WWR, por sus siglas en inglés) de una habitación ubicada en China considerando cuatro orientaciones. Los autores determinaron que la WWR óptima para cada orientación fue: 30% para el Norte, 60% para el Sur, 50% para el Este y 40% para el Oeste. Potrc-Obrecht *et al.* (2019) desarrollaron un estudio teórico para determinar las WWR óptimas para una residencia considerando un clima Cfb (según la clasificación Koppen) y orientaciones Sur, Sur-Este y Sur-Oeste. Los autores obtuvieron que las WWR óptimas son de 38-42 % para el Sur, 0-20% para el Sur-Este y de 0-24% para el Sur-Oeste. Bas *et al.* (2020) evaluaron la razón de aspecto óptimo muro-venta para un edificio de oficinas ubicado en Turquía y obtuvieron una WWR óptima de 30% para el Sur, 60% para el Norte, 40% para el Este y 30% para el Oeste. Estos estudios han demostrado el efecto de la orientación sobre las ganancias térmicas en un edificio. Sin embargo, fueron realizados para condiciones climáticas diferentes a las de la República Mexicana.

El principal objetivo de este estudio es modelar numéricamente la transferencia de calor de una pared con ventana (fachada) bajo condiciones climáticas de Mérida, Yucatán y variando su orientación en Norte, Sur, Este y Oeste. Este problema se abordó mediante la metodología de balances de energía considerando un régimen transitorio y el desarrollo de un código computacional en lenguaje ANSI C99 para su solución. Con los resultados de este estudio se analizó el efecto de la orientación de la fachada sobre las ganancias o pérdidas de energía hacia el interior de un edificio.

## 1. METODOLOGÍA

El método de este estudio teórico se basa en la modelación numérica de la transferencia de calor existente en una fachada expuesta a condiciones climáticas reales. Primero se presenta el modelo físico a evaluar definiendo sus características físicas, térmicas y ópticas. Seguido se expone el modelo matemático utilizando la metodología de balances de energía. Finalmente, se presenta la solución numérica para la transferencia de calor.

### 2.1 Modelo físico



El modelo de físico está formado por tres elementos, un muro

Fig. 1. Modelo físico de una fachada compuesta por muro y ventana.

inferior, una ventana y un muro superior. La Tabla 1 muestra las dimensiones de cada elemento del modelo. La fachada está sometida a condiciones climáticas en el exterior y a una temperatura de confort en el interior, como se muestra en la Fig. 1.

Donde  $G_{solar}$  es la radiación solar incidente,  $T_{cielo}$  es la temperatura de la bóveda celeste,  $T_{int}$  la temperatura interior,  $T_{ext}$  la temperatura al exterior,  $q_{rad1}$  y  $q_{conv1}$  son el flujo radiativo y convectivo en el exterior, respectivamente. Mientras que,  $q_{rad2}$  y  $q_{conv2}$  son el flujo radiativo y convectivo en el interior.

Tabla 1. Dimensiones del modelo físico

Elemento	Altura (m)	Largo (m)	Espesor (m)
Muro superior	0.6	3.5	0.12
Ventana	0.8	3.5	0.006
Muro inferior	1.2	3.5	0.12

Como se observa en la Fig. 1, tanto el muro inferior como el superior se componen de ladrillo rojo recocido y la venta se considera de vidrio claro. Las propiedades de los materiales que componen la fachada se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades físicas, térmicas y ópticas de los materiales.

Material	Densidad ( $\rho$ ) (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad térmica ( $\lambda$ ) (W/mK)	Calor específico ( $c_p$ ) (J/kgK)	Absorbancia ( $\alpha$ ) (-)	Emisividad ( $\epsilon$ ) (-)
Tabique rojo recocido	2000 <sup>a</sup>	0.872 <sup>a</sup>	840 <sup>b</sup>	0.6 <sup>b</sup>	0.9 <sup>b</sup>
Vidrio claro 6mm	2500 <sup>c</sup>	1.0 <sup>c</sup>	750 <sup>c</sup>	0.07 <sup>c</sup>	0.85 <sup>c</sup>

<sup>a</sup>(NOM-020-ENER-2011, 2011), <sup>b</sup>(DesignBuilder, 2021), <sup>c</sup>(Aguilar *et al.*, 2015)

Se analizó la transferencia de calor en estado transitorio a través de un modelo matemático planteado mediante balances de energía. Al evaluar el modelo en estado transitorio se empleó una aproximación de Euler de primer orden atrasada (1), donde  $T_p$  es la temperatura del punto de análisis y los superíndices  $t$  y  $t-1$  indican el tiempo actual o un tiempo anterior, respectivamente.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_p^t - T_p^{t-1}}{\Delta t} \quad (1)$$

Por lo que el balance de energía es:

$$q_{entra} - q_{sale} = \frac{\rho C_p \Delta x}{\Delta t} (T_p^t - T_p^{t-1}) \quad (2)$$

Siendo  $q_{entra}$  y  $q_{sale}$  el flujo que entra y sale del elemento, respectivamente, y  $\Delta x$  el espesor del elemento que se analiza. Se realizó el balance de energía sobre la superficie de la fachada expuesta a las condiciones climáticas (3) y sobre la superficie de la fachada con condiciones de confort (4), donde  $H_x$  es el espesor del componente de la fachada,  $T_1$  y  $T_2$  la temperatura de la superficie de la fachada al exterior y la temperatura de la superficie de la fachada al interior, respectivamente.

$$\frac{T_{ext} - T_1}{\frac{1}{h_{conv1}}} + \frac{T_{cielo} - T_1}{\frac{1}{h_{rad1}}} + \alpha G_{solar} - \frac{T_1 - T_2}{\frac{H_x}{\lambda}} = \frac{\rho C_p \Delta x}{\Delta t} (T_1 - T_1^{t-1}) \quad (3)$$

$$\frac{T_1 - T_2}{\frac{H_x}{\lambda}} - \frac{T_2 - T_{int}}{\frac{1}{h_{conv1}}} - \frac{T_2 - T_{int}}{\frac{1}{h_{rad2}}} = \frac{\rho C_p \Delta x}{\Delta t} (T_2 - T_2^{t-1}) \quad (4)$$

El coeficiente convectivo ( $h_{conv1}$ ) se determinó tanto para el muro como para la ventana, los subíndices  $m$  y  $v$  indican el coeficiente para el muro y ventana, respectivamente. Se utilizó la relación de Hagishima et al. (2003) para determinar el coeficiente convectivo sobre el muro al exterior (5), y para determinar el coeficiente convectivo de la ventana al exterior se utilizó la relación propuesta por Sharples et al. (1998) (6). Para el cálculo de los coeficientes se consideró la velocidad del viento local ( $V$ ). El coeficiente convectivo en el interior se estableció como se presenta en ASHRAE (2009) de  $8.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

$$h_{conv1,m} = 10.21V + 4.47 \quad (5)$$

$$h_{conv1,v} = 9.5V^{0.48} \quad (6)$$

La temperatura al interior ( $T_{int}$ ) se estableció como una temperatura de confort de  $297.565 \text{ K}$ , como se presenta en ASHRAE (2009). La temperatura de la bóveda celeste ( $T_{cielo}$ ) fue calculada mediante la relación de Swinbank (1963), véase (7).

$$T_{cielo} = 0.0552T_{ext}^{1.5} \quad (7)$$

## 2.2 Datos climáticos

El estudio se realizó para la ciudad de Mérida, Yucatán, cuyo clima es cálido. Mérida se localiza en las coordenadas  $20^\circ 58' 04'' \text{ N}$  y  $89^\circ 37' 18'' \text{ O}$ , con una altitud de 8 metros sobre el nivel medio del mar y de clasificación de clima tipo  $Aw_0$  (temperatura media anual de  $26^\circ\text{C}$ ) (García, 1981). Los datos climáticos considerados para el estudio son proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) correspondientes al año 2018. Para evaluar la fachada en diferentes orientaciones se emplearon los datos del día más cálido (25/Julio/2018), en el que la temperatura máxima fue de  $41^\circ\text{C}$  y la temperatura mínima de  $26.1^\circ\text{C}$ .

## 2.3 Solución numérica

La solución del modelo matemático del sistema se realizó mediante un código de cómputo desarrollado en lenguaje ANSI C99. Para la solución del sistema de ecuaciones se empleó el método de Jacobi. La Fig. 2 muestra el diagrama de flujo del código de cómputo para la solución al problema de transferencia de calor de una fachada.

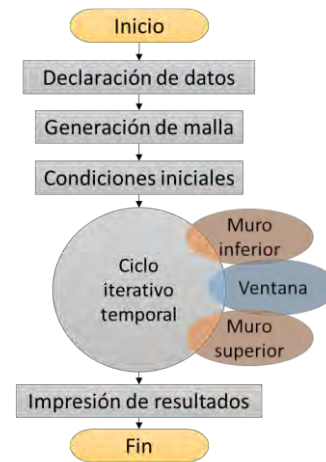


Fig. 1. Diagrama de flujo del código de cómputo.

Se realizó la verificación de la solución numérica al resolver un problema de transferencia de calor en un sistema que consiste en una barra de material homogéneo ( $\lambda=2.0 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ;  $c_p=1.0 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ ;  $\rho=1.0 \text{ kg/m}^3$ ) con longitud  $H_x=1.0 \text{ m}$ . La barra está

$$T(x,t) = T_{i0} e^{-\left(\frac{\lambda}{\rho c_p}\right)\left(\frac{\Pi}{H_x}\right)t} \operatorname{sen}\left[\left(\frac{\Pi}{H_x}\right)x\right] \quad (8)$$

Se obtuvieron los resultados de la solución del problema mediante ambas metodologías (Fig. 3). Se observa que a medida que los pasos de tiempo se reducen, la diferencia porcentual entre la solución analítica y la solución mediante balances de energía también se reduce. La diferencia porcentual menor que se obtuvo fue de 6.6% cuando  $\Delta t=0.0001$ s. Los resultados entre las dos metodologías son satisfactorios.

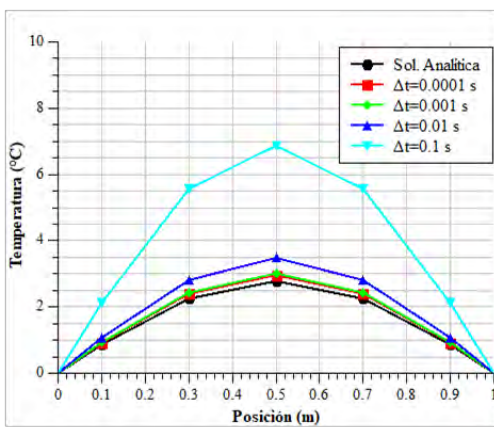


Figura 1. Perfil de temperaturas del ejercicio de verificación.

1. RESULTADOS

Las Figs. 4 a 7 muestran los flujos de calor en la fachada en las diferentes orientaciones, así como la radiación incidente en cada orientación. El flujo de calor total sobre la fachada se obtuvo mediante la suma de los flujos de calor sobre cada elemento (9), esto debido a que no se consideró de calor entre los nodos en el eje y.

$$Q_{total} = Q_{muroinferior} + Q_{ventana} + Q_{murosuperior} \quad (9)$$

Se observó que la orientación con mayor radiación solar incidente es la orientación Este con una radiación máxima alcanzada de 567.2 W/m<sup>2</sup>, seguida por la orientación Oeste con 507 W/m<sup>2</sup>, mientras que las orientaciones Norte y Sur son las que presentan la menor radiación incidente alcanzada con 276 W/m<sup>2</sup> y 250.6 W/m<sup>2</sup>, respectivamente. Para determinar la ganancia térmica de la fachada en cada orientación, se realizó la integración numérica por medio de la regla del trapecio sobre los valores de flujo de calor en todo el día de modelación (10).

$$\int_{t_1}^{t_2} Q_{total}(t) dt = (t_2 - t_1) \left( \frac{Q_{total(t_2)} + Q_{total(t_1)}}{2} \right) \quad (10)$$

La Fig. 8 muestra la ganancia térmica al interior de la fachada, así como, a través del muro y de la ventana, con el fin de determinar cuál orientación presenta menor ganancia térmica y, por lo tanto, menor consumo energético para climatización.

Se observó que la orientación Norte fue una de las que menores ganancias de calor presentó, con una ganancia térmica total de 1826.9 Wh durante el día. La orientación Sur presentó un flujo de calor máximo de 181.1 W y una ganancia total de 1771 Wh a lo largo del día, lo que la convierte en la orientación con menor consumo energético para climatización para el día 25 de julio. Las orientaciones Este y Oeste fueron las que mayor ganancia térmica presentaron. La orientación Oeste presentó un flujo máximo de 217.14W y una ganancia térmica total de 1900.448 Wh. La fachada orientada hacia Este presentó un flujo de calor máximo de 194.8 W y una ganancia térmica de 2185.2 Wh, por lo tanto, la fachada con un consumo energético mayor para climatización.

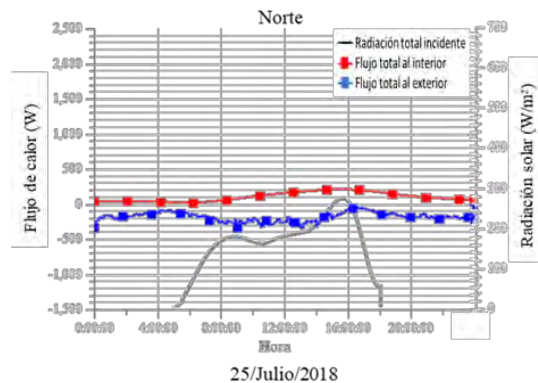


Figura 2. Flujo de calor en la fachada orientada al Norte.

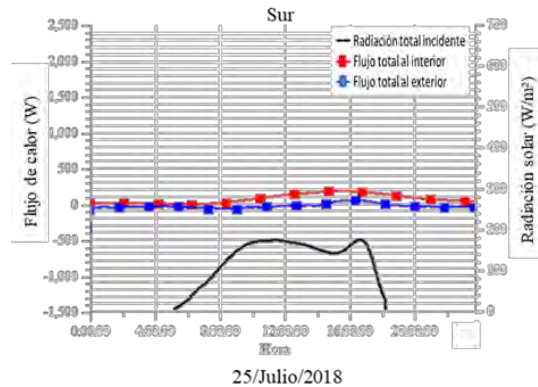


Figura 3. Flujo de calor en la fachada orientada al Sur.

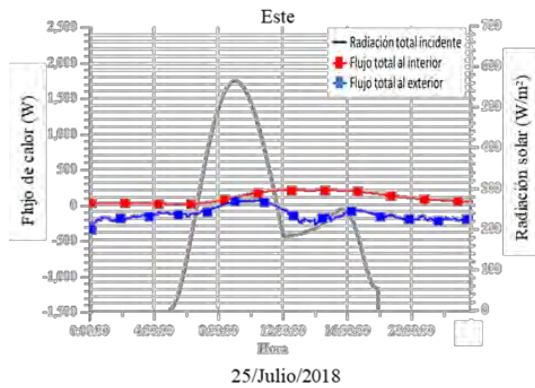


Figura 1. Flujo de calor en la fachada orientada al Este.

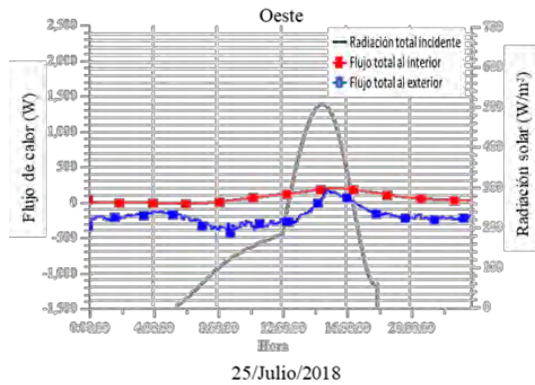


Figura 2. Flujo de calor en la fachada orientada al Oeste.

Los resultados mostraron que el diseño de una edificación debe considerar las relaciones de áreas para cada una de sus envolventes. Reducir el área de las envolventes sobre las que se presente una mayor ganancia de calor, permite reducir el flujo de calor total ganado al interior de la edificación. Sin embargo, se debe de tomar en cuenta otros parámetros, como la relación de aspecto muro-ventana, así como, la búsqueda de materiales que funcionen como aislantes térmicos o que disipen una mayor cantidad de energía en horarios sin radiación solar.

El efecto de la inercia térmica repercute en la cantidad de energía recibida al interior de la edificación, como se muestra en la Fig. 8 en contraste con las Figs. 4-7. El vidrio al tener una menor masa térmica, permite disipar la energía excedente, durante las horas sin radiación, de tal forma que se reduce la ganancia de calor durante el día, en contraste con los muros de tabique. También, debe considerarse que en este estudio los muros representan una mayor área de la fachada. Por lo tanto, es necesario realizar un estudio más detallado sobre el efecto de la razón de aspecto muro-venta sobre las ganancias térmicas de la fachada.

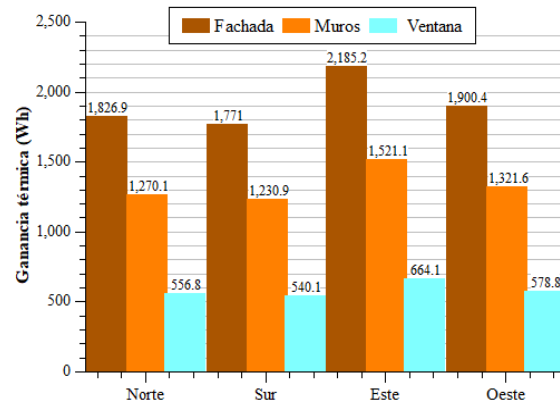


Figura 3. Ganancia térmica por elemento.

## 1. CONCLUSIONES

Se estudió la transferencia de calor en una fachada compuesta por muro y ventana variando su orientación y su efecto sobre la ganancia térmica bajo condiciones climáticas de la ciudad de Mérida, Yucatán, México. La fachada tiene un largo de 3.5 m y consta de tres elementos, un muro inferior de 1.2 m de alto y 0.12 m de espesor, una ventana de 0.8 m de alto (espesor de 0.006 m) y un muro superior de 0.6 m de alto y 0.12 m de espesor. Mediante la modelación numérica en estado transitorio se modeló la transferencia de calor a través de la fachada para el día más cálido de un año representativo (25/Julio/2018) de la ciudad de Mérida, Yucatán. De acuerdo con los resultados del estudio se concluyó que:

- La metodología de balances de energía mostró ser una alternativa acertada para la evaluación de transferencia de calor en estado transitorio en componentes de edificaciones. El uso del modelo en estado transitorio permite evaluar la masa térmica de una forma más cercana a la realidad.
- La orientación de la fachada tiene efectos sobre la ganancia de calor al interior de la habitación.
- La fachada orientada al Sur es la que menor ganancia térmica presenta, con un flujo de calor máximo de 181.1 W y una ganancia térmica total de 1771 Wh. Esto resulta en un menor consumo de energía eléctrica para lograr un ambiente de confort en el interior.
- La fachada orientada al Este presenta mayor ganancia térmica total de 2185.2 Wh. Sin embargo, no presenta el mayor flujo de calor hacia el interior (194.8 W), por lo que, es la orientación donde se presentan ganancias térmicas significativas por un periodo más largo de tiempo.

También, se observa que la ganancia de calor al interior es mayor en los muros que en la ventana. No obstante, es necesario realizar un estudio más detallado del efecto de la razón de aspecto muro-ventana sobre la ganancia de energía.

### 1. NOMENCLATURA

cp	Calor específico (J/kgK)
G <sub>solar</sub>	Radiación solar incidente (W)
h	Coficiente (W/m <sup>2</sup> K)
Hx	Espesor del elemento (m)
q	Flux (W/m <sup>2</sup> )
Q	Flujo de calor del muro (W)
t	Tiempo (s)
T	Temperatura (K, °C)
V	Velocidad del viento local (m/s)
Griegas	
ρ	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
α	Absortancia (-)
Δt	Paso de tiempo (s)
Δx	Espesor del volumen de control (m)
ε	Emitancia (-)
λ	Conductividad térmica (W/mK)
Subíndices	
A	Punto A
B	Punto B
cielo	Cielo
conv	Convectivo
entra	Entrada
ext	Exterior
int	Interior
muro inferior	Muro inferior
muro superior	Muro superior
p	Punto de análisis
rad	Radiativo
sale	Salida
t <sub>0</sub>	Tiempo cero
t <sub>1</sub>	Tiempo 1
t <sub>2</sub>	Tiempo 2
total	Total
ventana	Ventana
Superíndices	
t	Tiempo actual
t-1	Tiempo anterior

### 2. REFERENCIAS

- Aguilar, J., Xaman, J., Álvarez, G., Hernández-Pérez, I., & López-Mata, C. (2015). Thermal performance of a double pane window using glazing available on the Mexican market. *Renewable Energy*, 81, 785-794.
- ASHRAE. (2009). *ASHRAE handbook of fundamentals*. Chapter 15: fenestration Atlanta (USA). American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Baş, H. (2020). *Hybrid-model simulations to equilibrate the energy demand and daylight autonomy as a function of window-to-wall ratio and orientation for a perimeter office in Izmir*. MEGARON / Yıldız Technical University, Faculty of Architecture E-Journal, 15(4), 537-552.
- DesignBuilder. (2021). DesignBuilder [Windows].
- García, E. (1981). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la Republica mexicana)*.
- Norma Oficial Mexicana. (2011). *NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones. - envolvente de edificios para uso habitacional*.
- Özisik N.M. (1985). *Heat transfer basic approach*. McGraw-Hil, USA.
- Potrč Obrecht, T., Premrov, M., & Žegarac Leskovar, V. (2019). *Influence of the orientation on the optimal glazing size for passive houses in different European climates (for non-cardinal directions)*. *Solar Energy*, 189, 15-25.
- Secretaría de Energía. (2019). *Balance Nacional de Energía 2018*. Ciudad de México: Secretaría de Energía.
- Sharples, S. and Charlesworth, P.S. (1998). Full-scale measurements of wind-induced convective heat transfer from a roof-mounted flat plate solar collector. *Solar Energy*, 62(2), 69-77.
- Swinbank, W., 1963. Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89(381), pp.339-348.
- Xamán J., Gijón-Rivera M. (2016). *Dinámica de fluidos computacionales para ingenieros*, Paladio.
- Zhai, Y., Wang, Y., Huang, Y., & Meng, X. (2019). A multi-objective optimization methodology for window design considering energy consumption, thermal environment and visual performance. *Renewable Energy*, 134, 1190-1199.





**TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO**

---

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