

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Análisis Dinámico de un Sistema Solar Pasivo de Muro
Trombe Para Condiciones Climáticas de México

presentado por

Ing. Edgar Vázquez Beltrán

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

Director de tesis

Dra. Yvonne Chávez Chena

Codirector de tesis

Dr. Irving Osiris Hernández López

Cuernavaca, Morelos, México. Septiembre de 2019.



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Mecánica

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Cuernavaca, Mor., 14 agosto/2019

OFICIO No. DIM/215/2019
Asunto: Aceptación de documento de tesis

C. DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del estudiante Ing. Edgar Vázquez Beltrán, con número de control M17CE083, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "Análisis dinámico de un sistema solar pasivo de muro trombe para condiciones climáticas de México" hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

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

REVISOR 1

DR. JESÚS PERFECTO XAMÁN VILLASEÑOR
Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica
4672156

REVISOR 2

DR. JESÚS ARCE LANDA
Doctor en Ingeniería
6170951

REVISOR 3

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

C.p. Guadalupe Garrido Rivera Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Edgar Vázquez Beltrán Estudiante
Expediente

ABO/mrsr

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos.
Tel. (01) 777 3 62 77 70, ext. 1421, e-mail: dim@cenidet.edu.mx

www.tecnm.mx | www.cenidet.edu.mx





"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Cuernavaca, Mor.,

22/AGOSTO/2019

No. de Oficio:

SAC/255/2019

Asunto:

Autorización de
impresión de tesis

EDGAR VÁZQUEZ BELTRÁN
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "Análisis dinámico de un sistema solar pasivo de muro trombe para condiciones climáticas de México", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

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

ATENTAMENTE

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

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA



SEP TecNM
CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA



DEDICATORIA

A súper mamá, por ser una mujer empoderada e incansable, por cumplir las metas que se proponga a pesar de las dificultades que puedan salir en el camino. Siempre manteniendo una actitud a la altura de las circunstancias. Por educarnos con amor y paciencia, nunca con violencia.

A súper papá, por siempre darse un tiempo para sus hijos, ya sea que estuviera ocupado, desvelado o cansado eso, nunca lo detiene para convivir con su familia. Por todo, el tiempo que pasaste ayudándome con mis actividades escolares durante mi formación académica y que hasta la fecha sigues haciéndolo.

Por lo tanto, decidí dedicarles este trabajo a ustedes a manera de agradecimiento por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye el presente. Me formaron con reglas y algunas libertades, pero al final de cuentas, me motivaron y ayudaron constantemente para alcanzar mis metas y anhelos.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Lic. José Atanasio Vázquez Mora y la Sra. Constanca Beltrán Sánchez por todo su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy.

A mis hermanas: Tania Aidé y Estefanía por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo, que me brindaron incondicionalmente.

Al consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACYT) y al tecnológico nacional de México (TecNM) por brindarme el apoyo económico otorgado durante mis estudios de maestría.

Al centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico (CENIDET) por permitirme realizar mis estudios de maestría.

Faltarían páginas para denotar el enorme agradecimiento que siento hacia la Ma. María Antonieta Barrera Rodríguez, así como, a su familia. Por su hospitalidad, amabilidad y por los momentos compartimos durante mi estancia en la hermosa ciudad de Cuernavaca, Mor. asíéndome sentir como parte de su familia.

Al director de Tesis, la Dra. Yvonne Chávez Chena por sus acertados comentarios y recomendaciones durante el desarrollo de este trabajo de investigación. Además, por su disposición, amabilidad, apoyo durante toda mi estancia en CENIDET.

Al Co-director de Tesis, el Dr. Irving Osiris Hernández López le agradezco incondicionalmente por su enorme compromiso y apoyo incondicional para la realización del presente trabajo de investigación.

Dr. Jesús Perfecto Xáman Villaseñor por acertados comentarios y recomendaciones durante la elaboración del presente trabajo de investigación.

Al comité revisor: Dr. Efraín Sima Moo, Dr. Jesús Arce Landa y Dr. Jesús Perfecto Xáman Villaseñor. Por sus comentarios y acertadas sugerencias durante la realización de éste trabajo de investigación.

Al Dr. Jesús Arce le agradezco de antemano por su apoyo durante la construcción y verificación del código desarrollado del presente trabajo de investigación.

En estas líneas le agradezco de todo corazón Thania Lima por estar a mi lado, codo a codo durante esta etapa de mi vida, que con su apoyo y compañía hicieron que la realización de un posgrado se volviera una aventura que recordare por siempre.

Al M.C. Carlos Torres por su amistad y por todo el apoyo que me brindó durante mi estadía en CENIDET. Igualmente, Al M.C. Arnold Jonathan por su amistad, comentarios y apoyo durante la elaboración del presente trabajo de investigación.

A todos mis maestros durante mi formación, en especial al: M.C. Vladimir Zagoya Juárez por ser un excelente educador y despertar en mí, la curiosidad por la investigación y tenerme la confianza al dirigirme al CENIDET para realizar un posgrado en M.C. en ING. Mecánica.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABLAS	VI
NOMENCLATURA.....	VIII
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Ubicación del problema.....	2
1.2 Revisión bibliográfica.....	8
1.3 Conclusión de la revisión bibliográfica	22
1.4 Objetivo general	23
1.5 Objetivos específicos	23
1.6 Alcance	23
1.7 Estructura de la tesis	23
2 MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO	25
2.1 Definición de modelo físicos y matemático	26
2.2 Consideraciones del modelo físico	26
2.3 Modelo físico del muro Trombe.....	26
2.4 Modelo matemático del muro Trombe	29
2.4.1 Implementación de los balances termodinámicos globales	30
2.4.2 Determinación del calor útil q_C en un volumen de control	36
2.4.3 Coeficientes de transferencia de calor, pérdidas convectivas y radiativas	40
2.5 Procedimiento de solución.....	45

3 VERIFICACIÓN DEL CÓDIGO NUMÉRICO	49
3.1 Balances globales de energía (BG).....	50
3.2.1 Conducción unidimensional en estado permanente sujeto a condiciones de fronteras de Robín (No-Lineal) y Dirichlet.	50
3.2.2 Conducción unidimensional en estado transitorio.....	53
3.2.3 Comportamiento térmico de un canal vertical (convección natural).....	60
3.2.4. Estudio del efecto del número de secciones	68
3.2.5 Estudio del efecto del paso de tiempo.	70
4 RESULTADOS	77
4.1 Parámetro de estudio	78
4.2 Estudio del efecto de la inercia térmica.....	78
4.3 Estudio paramétrico del material en el muro.....	82
4.4 Evaluación térmica del sistema muro Trombe.	93
4.4.1 Tulancingo, Hidalgo 2014	93
4.4.2 Ciudad de México, alcaldía de Tacubaya 2014.....	103
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	111
5.1 Conclusiones.....	112
5.2 Recomendaciones para trabajos futuros.	114
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
ANEXO A: Datos climáticos y funciones ajustadas.	118
ANEXO B: Productos Obtenidos.....	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Diseño de muro Trombe de Morse (1881).	5
Figura 1.2. Modos de operación del sistema de muro Trombe de Morse.	5
Figura 2.1. Conjunto de 32 Viviendas Sociales en Portugalete (Bizkala).	28
Figura 2.2. Modelo físico del muro Trombe.	29
Figura 2.3. Diagrama térmico resistivo del sistema muro Trombe.	31
Figura 2.4. Balance de calor del flujo de aire en un volumen de control.	36
Figura 2.5. Diagrama de flujo del código desarrollado en estado transitorio.	47
Figura 3.1. Modelo físico de una losa de concreto con condiciones de frontera de Robín (No-Lineal) y Dirichlet.	51
Figura 3.2. Estudio de simetría del ejercicio 3.2.1.	53
Figura 3.3. Modelo físico de una losa convencional homogéneo.	53
Figura 3.4. Diagrama auxiliar para implementación de BG en cada nodo.	55
Figura 3.5. Comparación de la evaluación del perfil de temperatura para el concreto.	56
Figura 3.6. Comparación de la evaluación del perfil de temperatura para el plomo.	57
Figura 3.7. Comparación de la evaluación del perfil de temperatura para el aluminio.	59
Figura 3.8. Modelo físico de la chimenea solar Edo. permanente.	60
Figura 3.9. Diagrama térmico resistivo de una chimenea solar Edo. permanente.	61
Figura 3.10. Diagrama de flujo implementado para un canal vertical Ong, 2003.	63
Figura 3.11. Variación de la temperatura en función de la altura de la chimenea Ong, 2003.	65
Figura 3.12. Eficiencia y flujo másico en función de la altura de la chimenea Ong, 2003.	65
Figura 3.13. Distribución de las temperaturas en función de la radiación solar incidente Ong, 2003.	67
Figura 3.14. Eficiencia y flujo másico en función de la radiación solar incidente Ong, 2003.	67

Figura 3.15. Comportamiento de la radiación solar del día más frío de Tulancingo, Hidalgo.	72
Figura 3.16. Comportamiento de la temperatura ambiente del día más frío de Tulancingo, Hidalgo.	72
Figura 3.17. Temperatura promedio del vidrio para distintos pasos de tiempo Δt .	73
Figura 3.18. Temperatura promedio del fluido para distintos pasos de tiempo Δt .	74
Figura 3.19. Temperatura promedio del absorbedor para distintos pasos de tiempo Δt .	74
Figura 3.20. Flujos de calor hacia la habitación a través del muro masivo para distintos pasos de tiempo Δt .	75
Figura 4.1. Temperatura del absorbedor durante el día más frío de Tulancingo, Hidalgo.	79
Figura 4.2. Flujo de calor total promedio hacia la habitación del día más frío de Tulancingo, Hidalgo.	80
Figura 4.3. Efecto del material en el muro sobre la temperatura promedio de la superficie absorbadora.	83
Figura 4.4. Efecto del material en el muro sobre la temperatura promedio del vidrio.	85
Figura 4.5. Efecto del material en el muro sobre la temperatura promedio del fluido en el canal.	86
Figura 4.6. Efecto del material en el muro masivo sobre la temperatura promedio en la superficie interior.	87
Figura 4.7. Flujos de calor suministrados por el sistema: muro de concreto.	89
Figura 4.8. Flujos de calor suministrados: muro de ladrillo.	90
Figura 4.9. Flujos de calor suministrados: muro de adobe.	91
Figura 4.10. Efecto del material en el muro masivo sobre el flujo de calor total suministrado a la habitación.	92
Figura 4.11. Comportamiento de la temperatura en el muro masivo: día más frío de Tulancingo.	94
Figura 4.12. Comportamiento del flujo de calor promedio hacia la habitación: día más frío de Tulancingo.	96

Figura 4.13. Comportamiento anual de la temperatura de la superficie interior del muro masivo: días más fríos de Tulancingo.	97
Figura 4.14. Comportamiento de la temperatura del muro: día más cálido de Tulancingo.	98
Figura 4.15. Comportamiento del flujo de calor promedio hacia la habitación: día más cálido de Tulancingo.	100
Figura 4.16. Comportamiento anual de la temperatura de la superficie interior: del muro masivo: días más cálidos de Tulancingo.	101
Figura 4.17. Comportamiento de la temperatura del muro masivo: día más frío de la Ciudad de México.	103
Figura 4.18. Comportamiento del flujo de calor promedio hacia la habitación: día más frío de la Ciudad de México.	105
Figura 4.19. Comportamiento térmico de la temperatura interior promedio anual: día más frío de la Ciudad de México.	106
Figura 4.20. Comportamiento térmico del muro masivo: día más cálido de la Ciudad de México.	107
Figura 4.21. Comportamiento térmico del flujo de calor promedio hacia la habitación: día más cálido para la Ciudad de México.	108
Figura 4.22. Comportamiento anual de la temperatura de la superficie interior del muro masivo: días más cálidos de la Ciudad de México.	109

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Comparación de la solución analítica vs el método de BG del ejercicio 3.2.1.	52
Tabla 3.2. Propiedades de los materiales considerados en el ejercicio 3.2.2.	54
Tabla 3.3. Valores de temperatura de la losa de concreto para diferentes instantes del tiempo.	57
Tabla 3.4. Valores de temperatura de la losa de plomo para diferentes instantes del tiempo.	58
Tabla 3.5. Valores de temperatura de la losa de aluminio para diferentes instantes del tiempo.	59
Tabla 3.6. Parámetros que utilizó Ong, 2003 para las Figuras 3.11 y 3.12.	64
Tabla 3.7. Parámetros que utilizó Ong, 2003 para las Figuras 3.13 y 3.14.	64
Tabla 3.8. Comparación de los resultados para la Figura 3.13 entre Ong, 2003 y el presente estudio.	68
Tabla 3.9. Estudio de secciones en dirección y del sistema de muro Trombe.	70
Tabla 3.10. Estudio del efecto del Δt para sistema de muro Trombe.	76
Tabla 4.1. Calor total suministrado por el sistema TW para el día más frío de Tulancingo, Hidalgo.	81
Tabla 4.2. Propiedades termofísicas y radiativas.	82
Tabla 4.3. Efecto del material del muro.	93
Tabla 4.4. Evaluación anual del calor total suministrado a la habitación: Tulancingo.	102
Tabla 4.5. Evaluación anual del calor total suministrado a la habitación: Ciudad de México.	110
Tabla A.1. Datos climáticos del día más frío de la Ciudad Tulancingo, Hidalgo 2014.	118
Tabla A.2. Datos climáticos del día más cálido de la Ciudad Tulancingo, Hidalgo 2014.	119
Tabla A.3. Funciones para la radiación solar y temperatura ambiente del día más frío de Tulancingo Hidalgo.	120

Tabla A.4. Funciones para la radiación solar y temperatura ambiente del día más cálido de Tulancingo Hidalgo.	120
Tabla A.5. Datos climáticos del día más frío de delegación Tacubaya, Ciudad de México 2014.	121
Tabla A.6. Datos climáticos del día más cálido de delegación Tacubaya, Ciudad de México 2014.	122
Tabla A.7. Funciones para la radiación solar y temperatura ambiente del día más frío para delegación Tacubaya, Ciudad de México.	123
Tabla A.8. Funciones para la radiación solar y temperatura ambiente del día más cálido para delegación Tacubaya, Ciudad de México.	125

NOMENCLATURA

A	Área transversal [m]
H_y	Altura de la habitación [m]
H_w	Longitud del muro Trombe [m]
H_v	Longitud de ventilas [m]
L_g	Espesor de la pared semitransparente [m]
L_c	Separación entre placas que forman el canal [m]
L_w	Espesor del muro masivo [m]
T	Temperatura [K]
T_{sky}	Temperatura de cielo [K]
T_{amb}	Temperatura ambiente [K]
T_{room}	Temperatura de la habitación [K]
G_s	Radiación solar [W/m ²]
V_{wind}	Velocidad del viento [m/s]
q^{rad}	Flujo de calor por radiación [W/m ²]
q^{conv}	Flujo de calor por convección [W/m ²]
q^{cond}	Flujo de calor por conducción [W/m ²]
q_c	Flujo de calor transportado por el fluido hacia la habitación [W/m ²]
h^{rad}	Coefficiente radiativo [W/m ² K]
h^{conv}	Coefficiente convectivo [W/m ² K]
h_{wind}	Coefficiente convectivo debido al viento [W/m ² K]
\dot{m}	Flujo másico [kg/m ³]
C_p	Calor específico [J/kgK]
g	Constante de gravedad [9.81 m/s ²]
Gr	Número de Grashof
Pr	Número de Prandtl
Nu	Número de Nusselt

Superíndice

ave Valor promedio

Subíndice

g Pared semitransparente

f Fluido (aire)

abs Superficie absorbedora

w Muro

ws Superficie interior del muro

Símbolos griegos

λ Conductividad térmica [W/mK]

ρ Densidad [kg/m³]

α Difusividad térmica [m²/s]

σ Constante de Stefan-Boltzmann [W/m²K⁴]

α^* Absortividad

ρ^* Reflectividad

τ^* Transmisividad

RESUMEN

En este trabajo se presenta la evaluación dinámica del desempeño térmico de un sistema de muro Trombe (TW) bajo las condiciones climáticas de dos ciudades de clima generalmente frío: Tulancingo, Hidalgo y Tacubaya, Ciudad de México. Se consideró la evaluación de la componente de TW en una habitación con una temperatura de confort térmico de 24 °C además de tomar en cuenta la interacción con el ambiente exterior a través del vidrio colector. Para realizar la predicción numérica del sistema TW, se implementó un modelo matemático basado en el método de los balances globales de energía. De este modelo se obtuvo un sistema de ecuaciones algebraicas el cual se resolvió mediante el desarrollo de un código numérico en FORTRAN. En una primera etapa del estudio, se analizó el efecto del número de secciones, del paso de tiempo, de la inercia térmica debida al día anterior del día de estudio considerado y del material del muro. De este estudio se encontró que un número de secciones de 15 y un paso de tiempo de 60 s permiten obtener resultados independientes de estos parámetros. Además, se observó que el hecho de considerar la inercia térmica del día anterior al día de modelado presenta diferencias de hasta 36 % para calor total suministrado durante el día más frío en Tulancingo. Por otro lado, para determinar el material óptimo para el calentamiento pasivo, se consideraron adobe, ladrillo y concreto, encontrándose que sólo este último fue capaz de almacenar la suficiente energía como para mantener el calentamiento durante la noche. En la segunda etapa del trabajo, se realizó la evaluación dinámica del sistema. Se observó que para la ciudad de Tulancingo, el sistema TW aportó un calor total a la habitación de 1.78 y de 0.89 kWh/m², durante el día más frío y más cálido, respectivamente. Por otro lado, para la Ciudad de México se suministró 1.58 kWh/m² para el día más frío y 0.78 kWh/m² para el día más cálido. Finalmente, al realizar una evaluación anual, se encontró que el sistema proporciona un suministro de 26.87 y de 27.19 kWh/m² para Tulancingo y para la Ciudad de México, respectivamente. Con base en los resultados de la evaluación dinámica, es posible afirmar que el sistema TW con material de concreto es una buena alternativa de calentamiento pasivo para ser implementado en ciudades de clima templado subhúmedo de México.

ABSTRACT

This work presents the dynamic evaluation of the thermal performance of a Trombe wall system (TW) under the climatic conditions of two cities with generally cold weather: Tulancingo, Hidalgo and the Tacubaya city hall in Mexico City. The evaluation of the TW component in a room with a thermal comfort temperature of 24 °C was besides taking into account the interaction with the external environment through the collector glass. To make the numerical prediction of the TW system, a mathematical model was built based on the global energy balance method. From this model was obtained a system of algebraic equations which was solved by the development of a numerical code in FORTRAN. In a first stage of the study, the effect of the number of sections was analyzed, the time step, the thermal inertia due to the previous day of the considered study day and the material of the wall was analyzed. From this study it was found that a number of sections of 15 and a time step of 60 s allow obtaining independent results of these parameters. In addition, it was observed that the fact of considering the thermal inertia of the day before the modeling day presents differences of up to 36% from total heat supplied during the coldest day in Tulancingo. On the other hand, to determine the optimal material for passive heating, was considered adobe, brick and concrete, finding that only the latter was able to store enough energy to maintain heating during the night. In the second stage of the work, the dynamic evaluation of the system was carried out. It was observed that for the city of Tulancingo, the TW system contributed a total heat to the room of 1.78 and 0.89 kWh / m², during the coldest day and the hottest day, respectively. On the other hand, Mexico City supplied 1.58 kWh / m² for the coldest day and 0.78 kWh / m² for the warmest day. Finally, when carrying out an annual evaluation, it was found that the system provides a supply of 26.87 and 27.19 kWh / m² for Tulancingo and for Mexico City, respectively. Based on the results of the dynamic evaluation, it is possible to affirm that the TW system with concrete material is a good alternative for passive heating to be implemented in cities with a temperate sub-humid climate in Mexico.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En el presente Capítulo se expone la importancia de este tema de investigación, la revisión bibliográfica realizada, el objetivo del presente trabajo, así como su alcance. Por consiguiente, se aborda la ubicación del problema de forma general. De este modo, se manifiesta la necesidad que existe por atender este problema. Asimismo, se describe el sistema pasivo de muro Trombe. Posteriormente, se presenta una revisión bibliográfica presentada de manera cronológica con finalidad de transmitir apropiadamente el alcance del sistema pasivo muro Trombe. Finalmente, se presentan el objetivo y el alcance del presente trabajo de investigación.

1.1 Ubicación del problema

Desde el principio de los tiempos, el ser humano se ha enfrentado a adversidades para satisfacer sus necesidades básicas como el alimento, refugio, vestimenta, entre otras. Inicialmente, estas necesidades eran conseguidas a través de la caza de animales para su consumo, el uso de cuevas como refugio contra el clima, depredadores, y el uso del fuego para cocinar sus alimentos y dar una sensación de calidez en climas fríos o durante las noches. Conforme pasó el tiempo, y gracias al desarrollo científico y tecnológico, el ser humano dejó de vivir en cuevas y de satisfacer sus necesidades primarias de manera primitiva, comenzando a hacerlo en una forma tal que es posible satisfacer la demanda de las mismas: a producción industrial. Sin embargo, en la actualidad, la sociedad presenta un crecimiento desmedido, lo que ha llevado a un problema mayor, que es la sobrepoblación a nivel mundial.

Tan solo en el año 2015, se registró un número de habitantes de 7,300 millones y las proyecciones sugieren que para el 2050 llegara a 11 mil millones de habitantes. Mientras tanto en México el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) reportó en 2015, una población de 120 millones de habitantes.

Este incremento exponencial de la población, tiende de manera natural a demandar más servicios y necesidades, lo que conduce al problema de alto consumo y de producción insostenible donde, el planeta Tierra ya no es capaz de sustentar el ritmo de consumo de los seres humanos y paralelo a este crecimiento poblacional y a las necesidades que demandan día con día. El consejo Mundial de la Energía estima que, la demanda de energía primaria se duplicará para el año 2050 (World Energy Issues Monitor, 2013). Debido a estas implicaciones las cuestiones medioambientales son un factor determinante en el punto de partida para el desarrollo de nuevas tecnologías que buscan mitigar estas cuestiones que son una preocupación creciente y global.

El sector de las edificaciones representa una tercera parte del consumo energético a nivel mundial (IPPC, 2005). Mientras en México, la SENER, 2016 reportó un consumo nacional de 9.14 PJ de los cuales sólo el 7.1 % fueron obtenidos a través de los recursos renovables.

Justamente el sector residencial, comercial y público representa el 18.1% del cual solo el 1 % pertenece al aprovechamiento de la energía solar. Adicionalmente, considerando que la mayor parte de nuestra vida la pasamos dentro de ambientes interiores (edificaciones) desempeñando actividades como dormir, comer, trabajar, estudiar o ejercitarse entre otras, no es extraño que resulte necesario establecer condiciones de confort en ellas. De esta manera es posible garantizar un mejor desempeño de nuestras actividades y con ello, una mejor calidad de vida.

Para ello, actualmente, el ser humano ha venido implementando sistemas mecánicos de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) que permiten regular las condiciones medio ambientales al interior de las edificaciones y por consecuencia, proporciona una sensación de confort al interior de estas, pero a costa de un mayor consumo energético.

Esto nos obliga a plantearnos una filosofía de satisfacer nuestras necesidades de una manera sustentable. Uno de los factores más importantes al interior de las edificaciones es el confort térmico. Éste se define como la condición de la mente que expresa satisfacción con el entorno térmico (ASHRAE,55-2004). Es decir, cuando las condiciones de temperatura, humedad y velocidad del aire son favorables a la actividad que desarrollan. La satisfacción de una condición de confort térmico en edificaciones puede darse en un clima frío para dar ambiente cálido como, en un clima cálido dar un ambiente fresco.

Por lo tanto, resulta imperativo la implementación de nuevas tecnologías que permitan mantener un confort térmico, disminuir el consumo energético y así, minimizar el impacto ambiental en otras palabras, *“satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para la satisfacción de las propias”* (ONU, 1987).

Como alternativas, existe el uso de energías renovables tales como eólica, solar, geotérmica e hidráulica. En específico, la energía solar es una fuente de energía renovable que se obtiene del sol y con la que se pueden generar calor y electricidad, es tan abundante que se considera como una fuente inagotable de energía.

La energía solar, además de ser una fuente de energía renovable, es una energía limpia y supone una alternativa a otros tipos de energía no renovables como la energía fósil o la energía nuclear.

Particularmente, la energía solar para uso en edificaciones puede clasificarse por su modo de aprovechamiento como: energía solar fotovoltaica, energía solar térmica y energía solar pasiva. Concretamente, la energía solar pasiva no necesita ningún dispositivo para captar la energía solar, el aprovechamiento se logra aplicando distintos elementos auxiliares pasivos.

Aquí, se introduce el concepto de arquitectura bioclimática el cual es una rama del diseño arquitectónico e ingenieril que opta por el ahorro en gasto energético mediante el diseño de edificaciones que permitan aprovechar al máximo los recursos disponibles (sol, viento, lluvia) reduciendo así, en lo posible, el consumo energético de la edificación y así minimizando el impacto ambiental.

Estos sistemas auxiliares pasivos, son aquellos que involucran la incorporación de ciertas componentes en la envolvente de las edificaciones (techos, paredes, ventanas), tales que permitan aprovechar o rechazar la energía solar para ayudar a conseguir condiciones de confort. Ejemplos estos sistemas podemos encontrar: techos ventilados, ventanas dobles, techos frescos, chimenea solar, muro Trombe, entre otros.

En particular, el muro Trombe (TW) por sus siglas en inglés, es un sistema de ganancia indirecta, utilizado para el calentamiento y bajo ciertas condiciones, para ventilación en viviendas. Este sistema fue diseñado y patentado por Edward Morse a finales del siglo XIX (1881). Su diseño le permite coleccionar y almacenar calor proveniente de la radiación solar durante el día y rechazar dicha energía al interior de la edificación durante la noche. Ver, Figura 1.1.

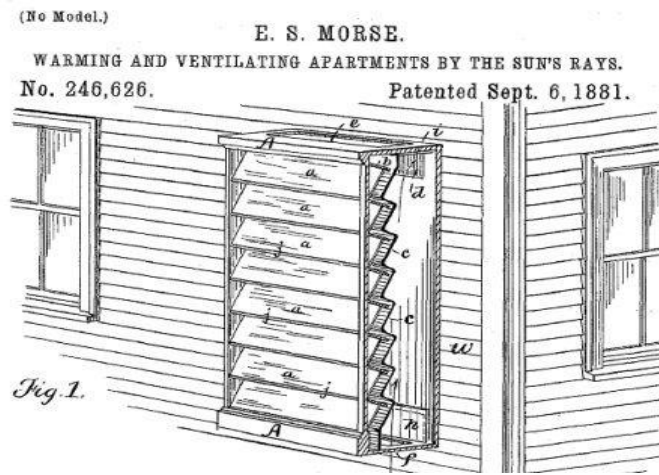


Figura 1.1. Diseño de muro Trombe de Morse (1881).

El sistema de muro Trombe tiene tres modos de operación como lo muestra la Figura 1.2 que pueden ser ejecutados por el sistema pasivo TW: (a) calentamiento, (b) calentamiento con ventilación y finalmente, (c) enfriamiento.

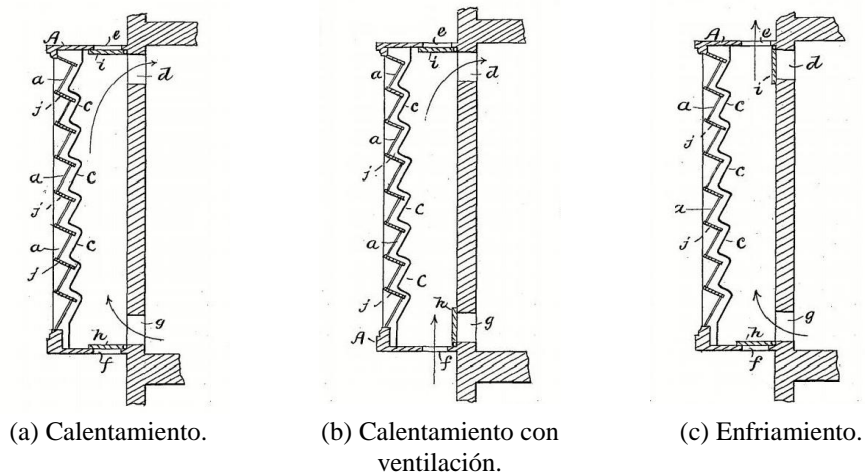


Figura 1.2. Modos de operación del sistema de muro Trombe de Morse.

A pesar de su versatilidad, este sistema no tuvo el auge que se esperaba y permaneció en el olvido aproximadamente por casi un siglo hasta que lo popularizó a principios de los años sesenta el ingeniero Félix Trombe y el Arquitecto Jacques Michel. El interés del muro Trombe surgió en la década de los setentas, con la ayuda de investigadores del Laboratorio Nacional de Los Álamos en Nuevo México. El muro Trombe es particularmente adecuado para climas soleados que tienen altas oscilaciones de temperatura diurna (día-noche). Este sistema se constituye principalmente por:

- **Colector:** El colector solar está compuesto por un vidrio semitransparente o translucido y tiene la función de recolectar la mayor cantidad de energía proveniente del sol y transmitirla para elevar la temperatura de un fluido con vista a su aprovechamiento.
- **Absorbedor:** El absorbedor es una superficie sólida normalmente de color oscuro, que es expuesta a la energía que fue transmitida por el colector, convirtiendo la irradiación solar a energía térmica, el cual es transmitida al elemento siguiente de manera inmediata para ser almacenado.
- **Almacén:** El componente de almacenamiento está constituido por un material o materiales que posean una gran capacidad de almacenamiento de energía térmica para posteriormente utilizar dicha energía. El absorbedor y el almacén por lo general son lo mismo.
- **Distribuidores:** El componente distribuidor entrega la energía recibida y/o almacenada hacia la habitación. La distribución puede ser por medios naturales, como la irradiación de calor del muro o el movimiento de aire por convección natural, o también puede ser mejorada mediante bombas pequeñas o ventiladores que transportan el calor del absorbedor hacia la habitación.

Las ventajas del muro Trombe se presentan a continuación (Cuevas, 2008):

- ✓ El deslumbramiento y la degradación de los materiales por los rayos ultravioleta no son problema, comparado con los sistemas de ganancia directa.
- ✓ El tiempo que transcurre entre la absorción de energía solar de la superficie exterior en la pared y la entrega la energía térmica hacia la habitación, es suficiente para entregar cuando más sea necesario, es decir, en la noche.
- ✓ La masa de almacenamiento térmico necesaria para lograr un nivel deseado de desempeño térmico se puede proporcionar en un área relativamente pequeña, concentrada en la habitación.
- ✓ La temperatura promedio de la irradiación del muro Trombe puede mejorar la comodidad de la habitación adyacente.

Por consiguiente, el presente estudio se enfoca es estudiar el comportamiento del sistema TW en estado dinámico durante todo un día típico de operación para condiciones climáticas de la República Mexicana.

1.2 Revisión bibliográfica

Se inició una revisión de la bibliografía sobre los estudios relacionados con el análisis del desempeño térmico en el muro Trombe, así como la implementación para su uso en habitaciones o edificaciones. Estos estudios son relativamente recientes. A continuación, se presenta los resúmenes de los artículos estudiados hasta la fecha en orden cronológico.

Balcomb et al. (1977), realizaron el análisis teórico de edificios pasivos para calefacción solar. Para identificar el potencial de estos sistemas pasivos, los autores desarrollaron un modelo de simulación dinámica mediante el método de balances globales termodinámicos en una dimensión para determinar el desempeño térmico de un sistema de muro Trombe para un año de operación. Se consideraron tres espesores de muro: 0.5, 1 y 2 ft (15.24, 30.48 y 60.96 cm), para intervalos de modelación de una hora y se utilizaron datos meteorológicos de Los Álamos, Nuevo México (de septiembre 1972 a agosto 1973). Se simularon cinco casos: 0) la habitación y el muro están a la misma temperatura, 1) el muro está acoplado térmicamente solo a la habitación, 2) el muro está directamente frente del vidrio, 3) el muro se coloca contra la pared posterior fuera de los rayos del sol, 4) el muro sólo pierde calor en la habitación. De los resultados, los autores encontraron que, el espesor de 15 cm es muy sensible a los cambios de radiación solar, por lo tanto, el caso 2), con un vidrio doble y el muro de 2 ft (60.96 cm) de espesor, se obtuvo el mejor desempeño. Los autores identificaron importantes consideraciones en el diseño de sistemas pasivos. Se mejora el rendimiento del almacenamiento si se encuentra expuesto directamente al sol en lugar de ser calentado indirectamente, para un conjunto de propiedades del material, habrá un espesor que dé un rendimiento máximo anual de energía solar. Los autores concluyeron que, para una misma área de vidriado, el rendimiento es comparable al de un sistema de colector convencional de aire o líquido refrigerado, esto se puede alcanzar con un sistema de calentamiento solar pasivo de diseño optimizado.

Ohanessia y Charters (1978) evaluaron el desempeño térmico de un modelo de muro Trombe usado en “Odeillo, Francia” por Felix Trombe y Jaques Michel. Este sistema fue aplicado para un modelo de casa convencional de Melbourne, Australia. Consideraron una losa de

hormigón como el muro absorbedor, mismo que fue pintado de color negro para aumentar la absorción de energía solar. Los datos de radiación solar se obtuvieron experimentalmente para Melbourne (Australia) considerando un período de diseño específico de 28 días (desde el 18 de julio de 1974 hasta el 14 de agosto de 1974). Se establecieron correlaciones empíricas para evaluar la contribución del calor convectivo. Los autores establecieron diferentes casos de estudio, en los cuales variaron el espesor del muro almacenador, la pared de vidrio simple, vidrio doble con y sin calefacción auxiliar. De los resultados, los autores concluyeron que el espesor del muro almacenador de 25 cm es el óptimo con el uso de calefacción auxiliar y la ventaja térmica del vidrio doble es mínima y por lo tanto no se recomienda para zonas de clima moderado. Ellos compararon estos resultados con un modelo convencional de pared de vidrio. Finalmente, los autores comentaron que es posible obtener ahorros de energía de aproximadamente 40%.

Akbarzabeh et al. (1982) estudiaron de manera experimental las características de la termocirculación del muro Trombe, los autores variaron el espesor del canal, para diferentes tamaños y configuraciones de ventilas, de esta manera determinaron el patrón de flujo a lo largo del canal, ya que no se cuenta con un estudio experimental que lo compruebe. Con base en los resultados, los autores encontraron que el rendimiento de la termocirculación es ligeramente mejor para un espesor óptimo de 25 cm. del canal mientras, que la diferencia insignificante en el rendimiento de la termocirculación cuando se usan alturas de ventilación de 17 cm y 9.5 cm. sugiere que las pérdidas de ventilación no son significativas cuando se comparan con el conducto y otras pérdidas de flujo. Los autores, encontraron que el flujo, presenta un régimen turbulento a lo largo de toda la altura del canal. El grado de turbulencia se origina por la diferencia de áreas entre las ventilas frente al área del canal. De las observaciones visuales del campo de flujo y de los resultados, los autores sugirieron que los procesos de transferencia de calor en el canal, se pueden modelar como un problema de convección natural turbulenta entre dos placas planas isotérmicas verticales independientes.

Nwachukwu y Okonkwo (2008) realizaron un análisis del efecto de la absorptividad del recubrimiento de la superficie exterior del muro Trombe al fin de mejorar la disipación de calor a la habitación durante los periodos nocturnos. Los autores consideraron que solo existe

el intercambio de calor a la habitación a través del muro y por las ventilas, la superficie exterior del muro esta revestida con una película de absorptividad solar y de emisividad baja, propiedades del aire constantes. El sistema se puede modelar como dos superficies verticales isotermas y dos superficies superior e inferior perfectamente aisladas. Desde un punto analítico, la tasa neta de suministro de calor a la habitación mejoró al aumentar los valores de absorptividad (α^*) a 0.45, el calor entregado a la habitación mejoró un 34% en promedio en comparación con el calor entregado con una α^* de 0.15. Asimismo, para un valor de α^* de 0.75, observaron un aumento de aproximadamente 44%, lo que indica que valores de recubrimiento de absorción más altos pueden mejorar significativamente la absorción y transferencia de calor a través de un muro Trombe. Con base en los resultados los autores concluyeron que, una manera de mantener la eficiencia en el muro Trombe es a través del uso de aislamientos durante los periodos nocturnos, esto asegurara que la temperatura de la superficie interior no se reduzca considerablemente, lo que impulsara el valor de temperatura durante la mañana del día siguiente y que a capacidad de absorción y almacenamiento del muro Trombe se puede mejorar mediante la aplicación de un recubrimiento con un alto valor de absorptividad.

Cuevas (2008) realizó un estudio numérico del análisis de la transferencia de calor conjugada en un sistema solar pasivo de muro Trombe. El sistema consistió en una habitación cuadrada con una pared semitransparente, con un sólido embebido en el fluido (muro masivo) formando un canal con aperturas en la parte superior e inferior hacia la habitación. El autor consideró, flujo en régimen laminar, la transferencia de calor por conducción, convección, un flujo de calor radiativo incidente sobre el muro, pérdidas convectivas y radiativas al exterior de la pared semitransparente. La solución de las ecuaciones gobernantes fue a través del método de volumen finito para ello se consideró: flujo incompresible, aproximación de Boussinesq, fluido newtoniano, difusión viscosa despreciable y fluido no-participante. El autor observó que, considerando el tipo de material de construcción del muro Trombe, se observó que el concreto es más efectivo, analizando los espesores de muro se encontró que, el calor transferido a la habitación es inversamente proporcional al espesor de muro, mediante el análisis del patrón de flujo, observó que la transferencia de calor y la velocidad dependen directamente del número de Ra, que a medida que se incrementa el Ra se presentan gradientes

horizontales nulos en el centro de la cavidad y que los niveles de velocidad en el canal se incrementan. Espesor de 1/30 es el de mejor desempeño para todos los anchos de canal estudiados, basado en la eficiencia de la transferencia de calor y temperatura promedio al interior de la habitación. El autor concluyó que, el sistema de muro Trombe con material de concreto y con un espesor de 1/30 de la longitud de la habitación con un canal de 1/15 de la longitud de la habitación es óptimo para aprovechar la energía solar.

Jaber y Ajib (2011) realizaron un estudio sobre el impacto térmico, ambiental y económico del sistema de muro Trombe para edificios residenciales típicas de Jordania en la región del Mediterráneo durante todo un año. Además, el tamaño óptimo de este sistema se determinará utilizando el criterio del costo del ciclo de vida (LCC). El estudio se realizó con la plataforma comercial TRNSYS para analizar el desempeño del muro Trombe acoplado al prototipo residencial típico de la región. Los autores determinaron desde un punto de vista térmico y económico que la relación óptima entre pared sur y muro Trombe tiene que ser de 37%. Con base en los resultados los autores concluyeron que, esta relación óptima ha reducido el LCC en un 2.4 %. Además, alrededor de 445 kg de CO₂ se reducirán anualmente teniendo ahorros de 1,169 euros durante el ciclo de vida del edificio.

Hami et al. (2012) realizaron un estudio numérico en estado transitorio bidimensional para determinar el desempeño térmico de un muro solar. El estudio se realizó con datos meteorológicos de la ciudad de Bechar, Argelia. El modelo consistió en una habitación rectangular con una longitud y altura de 5m y 3m respectivamente, una pared semitransparente formando un canal con un sólido embebido (muro masivo) con ventilas superior e inferior que dan a la habitación. Los autores consideraron: transferencia de calor por conducción y convección natural, flujo en régimen laminar, propiedades termofísicas del aire constantes y aproximación de Bousinesq para las fuerzas de flotación. Para el acople de las ecuaciones gobernantes utilizaron el algoritmo SIMPLE y el esquema de interpolación Power-Law. Con base en los resultados los autores encontraron que, la temperatura de la habitación aumenta por efecto de la termocirculación posteriormente, la inercia térmica del muro desempeña el papel de almacenamiento para calentar la habitación después de las horas de sol. En pleno invierno, las temperaturas en la habitación se encuentran entre 18 °C a 24°C.

La razón de caudal másico obtenido para un periodo de 10 h de funcionamiento fue aproximadamente de 0.086 (kg/s-m) mientras que, el flujo de aire fue de 50 (l/s-m). Los autores concluyeron que, el tipo de material con que esté construido el muro es un factor determinante en el desempeño térmico. El uso rejillas de ventilación pueden proporcionar un importante mecanismo de control tanto para calentar como para enfriar el edificio. El uso de respiraderos a través del acristalamiento mientras se cierran los respiraderos superiores a través del muro reduce la ganancia de calor a la habitación. La eficiencia del sistema puede alcanzar hasta el 48%.

Francesco Fiorito (2012) evaluó el desempeño térmico de un muro trombe implementado materiales de cambio de fase (PCM) variando la posición del PCM en el muro en 2D. Para las ciudades Hobart y Melbourne con climas fríos y templados respectivamente. El sistema consistió en una habitación de 5 m x 5 m, con paredes orientadas al norte y al sur. La pared sur es una pared liviana asilada con una ventana de doble acristalamiento con una relación entre el área del piso entre la ventana de 8. La pared orientada al norte está directamente expuesta a la radiación solar donde se ha implementado un muro Trombe para fines de calentamiento. La pared consta de una pared de acristalamiento de 6 mm seguido por un canal de aire de 100 mm formado por la pared de vidrio y el muro almacenador de 220 mm. El canal de aire conecta con el exterior y el interior a través de ventilas operables. Utiliza una persiana externa para sombrar la fachada transparente durante el verano con el fin de evitar el sobrecalentamiento en el canal de aire. El muro almacenador está constituido por paneles de yeso superficial, con un núcleo compuesto por una capa de madera mineralizada. El autor consideró, 25 particiones de prueba diferentes integrando cuatro tipos de PCM producidos por Rubitherm ® y basados en n-parafina y ceras con un espesor combinado total de entre 30 y 90 mm. El autor simuló los efectos de diferentes intervalos de fusión (18-23 ° C para RT 21, 25-28 ° C para RT 27, 27-31 ° C para RT 31 y 38-43 ° C para RT 42). Para la solución del modelo matemático fue a través del software EnergyPlus. Con base en los resultados el autor concluyó que, el PCM más beneficioso es el RT 27 tanto en Hobart como en Melbourne para climas templados-fríos y templados, la integración de PCM en la superficie exterior de la partición intermedia de una pared Trombe produce una reducción óptima de la fluctuación de las temperaturas internas, que se mantienen constantes en valores confortables. En este

caso, la adopción de un material de cambio de fase con área de punto de fusión que incluye el valor promedio de las temperaturas superficiales externas muestra los mayores beneficios.

Rabani et al. (2013) realizaron un estudio numérico en dos dimensiones en falso transitorio de un muro Trombe para calefacción para predecir la tasa de almacenamiento de energía y así mismo su desempeño en condiciones climáticas sin radiación solar. Los autores consideraron, condiciones climáticas del periodo más frío (21 de enero-19 de febrero) en la Ciudad de Yazd, Iran. El sistema consistió, en una habitación cuadrada de $4 \times 4 \text{ m}^2$ con una pared semitransparente con un sólido embebido en el fluido (muro) de 3.4 m de altura y 0.2 m de espesor formando un canal de 0.3 m de anchura con ventilas en parte superior e inferior hacia la habitación con espesor de 0.3 m. El estudio se realizó en régimen de flujo laminar, se impuso un flujo de calor constante para representar la radiación solar durante diferentes horas en el período más frío, la fuerza de flotación ha sido modelada por la aproximación de Boussinesq. La solución de las ecuaciones gobernantes fue resueltas a través del método de volumen finito. Se evaluaron distintos materiales de muro: ladrillo, concreto, sal hidratada y cera de parafina (PCM). Con base en los resultados, los autores encontraron que en las primeras horas la transferencia de calor por conducción es dominante hasta que alcanza la temperatura máxima a las 12:30 h. cuando la pared almacena energía y la distribución de la temperatura indica que, la transferencia de calor por convección se vuelve dominante. Los autores concluyeron que, usando la cera de parafina (PCM) mantiene una mayor temperatura en la habitación en comparación con los otros materiales durante 9 horas aproximadamente.

Krüger et al. (2013) analizaron el potencial experimentalmente un sistema de muro Trombe en una ubicación subtropical para fines de enfriamiento y calefacción. Las pruebas se llevaron a cabo en los períodos fríos de 2011 y durante el verano de 2012 con datos meteorológicos de Curitiba, Brasil. Los autores construyeron, dos células una de control y de otra de prueba ambas de 5.25 m^3 , esta última la pared orientada al norte de la celda de prueba del muro Trombe fue pintada de negro, las paredes restantes de ambas celdas y el techo se dejaron sin pintar. Adosado a la pared orientada al norte del sistema Trombe hay un marco de ventana de aluminio de $1.50 \times 2.00 \text{ m}$. Utilizaron doble acristalamiento, el vidrio exterior tiene 4 mm y el vidrio interno de 5 mm de espesor respectivamente. El espacio entre las capas

de vidrio es de 0.008 m de espesor. Se hicieron dos aberturas grandes en el muro de almacenamiento a dos alturas diferentes. La salida de aire inferior está a 0.20 m y la ventilación superior a 1.85 m de altura. Cada abertura tiene un área de $0.90 \times 0.20 \text{ m}^2$. Se proporcionaron salidas de aire horizontales en la parte inferior y en la parte superior del marco con la misma área de apertura de $1.40 \times 0.15 \text{ m}^2$, que se podía abrir / inclinar / cerrar mediante una bisagra. Los datos se registraron en intervalos de 5 min y se tomaron muestras como datos de temperatura cada hora. Los autores consideraron, tres modos de operación para los siguientes periodos de fríos del año 2011: 24-29/ mayo, 31-1 mayo-junio, 19-24/sep. Mientras que para las condiciones de verano se probaron cuatro modos de operación. Los autores encontraron que, para invierno el modo de operación 2: calefacción con ventilación presenta las condiciones más favorables en términos de mantener el interior más cálido durante el día y reducir la oscilación de la temperatura diurna en el interior. Mientras que, para verano el modo 3: completamente ventilación. Hay un efecto de chimenea en el canal cuando el aire externo se eleva y sale de la chimenea a través del respiradero superior; se intenta una extracción de aire interior abriendo la rejilla de ventilación superior en la pared de almacenamiento presenta una temperatura máxima interior que es ligeramente inferior a la del exterior, mientras que esto no ocurre en los otros modos. Los autores concluyeron que, particularmente para las ubicaciones subtropicales analizadas, el sistema se comportó razonablemente bien debido a la alta elevación solar en verano, lo que no requiere la necesidad de dispositivos de sombreado o voladizos. La comparación con celda de control produjo un alto potencial de enfriamiento y calentamiento del espacio interior, lo que es consistente con las estimaciones de la literatura de alrededor del 30% anual en la reducción del consumo de energía.

Liu et al. (2013) realizaron un estudio numérico-experimental de las características de gestión de ventilación y almacenamiento de calor de un muro Trombe. Los autores utilizaron el proyecto de demostración de calefacción de energía solar del asentamiento en condado de GangCha, provincia de QingHai, China. El tamaño de la casa es: ancho 3.3 m x profundidad 3.9 m x altura 2.9 m. Las paredes este, oeste y norte están construidas con paredes de ladrillo de 2.4 m de espesor. La pared sur es de pared trombe, la estructura es de vidrio simple de 4 mm, capa de aire de 0.10 cm, hierro corrugado rojo de 10 mm, pared de ladrillo de 0.24 m y

cistosepimento de poliestireno de 5 cm. La absorptividad y la emisividad del material de la superficie externa de la pared de ladrillo son 0.9 y 0.3 respectivamente. Tiene dos orificios de ventilación en la parte superior y tres en la parte inferior de 2 mm x 2 mm. Los parámetros de prueba incluyeron la intensidad de radiación solar de la radiación directa y dispersa de la elevación horizontal y sur, la temperatura del aire interior y exterior, la temperatura del aire en el canal y la velocidad de la ventilación. Los autores encontraron que, debido a la alta latitud y al pequeño ángulo de elevación solar, la radiación solar en la pared sur proporciona una condición de radiación solar de 445 W/m² favorable para el uso de un muro Trombe. Los datos mostraron que, el momento óptimo para abrir la ventilación del muro Trombe es de 2 a 3 h después del amanecer con cierre 1 h antes del atardecer, además la capacidad de almacenamiento de calor del muro Trombe alcanza su valor máximo a las 4 pm con 10.6 MJ/m², su valor mínimo a las 7–8 am del día siguiente con 0.2 MJ/m². Con base a los resultados los autores concluyeron que, es razonable abrir el respiradero a las 10:30 o 2-3 h después del amanecer y cerrar el respiradero a las 18:00 o 1 h antes del atardecer.

Addassi et al. (2014) realizaron un estudio energético teórico-experimental de un sistema de muro Trombe con condiciones meteorológicas de tunecino (2012), para edificios típicos de Tunéz. La celda de pruebas para validar consiste en una habitación individual con las dimensiones de 1.86 m x 1.52 m x 1.25 m. Hecha de madera con 0.02 m de espesor y aislada por un panel de poliestireno de 0.04 m de espesor para evitar pérdidas de calor. La fachada sur contiene el muro Trombe. El muro de almacenamiento de 0.10 m de espesor está hecho de ladrillo de concreto sólido. La superficie de la pared que absorbe el calor está pintada de negro mate. Se coloca un panel aislante a los lados de la pared de almacenamiento para reducir la pérdida de calor latera. Para la transferencia de calor por convección, se ubicaron dos respiraderos en las posiciones superior e inferior de la pared, cada una de las cuales mide 0.25 m / 0.15 m. El espacio de aire entre la pared y el acristalamiento es de 0.12 m. La fachada norte de la celda de prueba contiene una puerta con las dimensiones de 0.50 m / 0.20 m. Los autores compararon los resultados obtenidos por mediciones experimentales y los obtenidos por simulación con TRNSYS. Obtuvieron que la comparación de los resultados es aceptable. Con base en los resultados los autores encontraron que, basados en las necesidades de calefacción de un edificio típico de la región es de 1500 kWh un muro Trombe de 4 m²

pueden ahorrar hasta el 50% de la energía auxiliar de calefacción anual de un edificio clásico tunecino simple y el 77% se puede ahorrar con una pared de trombe de 8 m².

Al-Saadi y Zhai (2015) Realizaron la simulación del almacenamiento de calor latente en un muro con material de cambio de fase (PCM), integrando una función de diseño espacial de un sistema de ecuaciones al módulo Type-56 en el software TRNSYS. El modelo consistió en el método de entalpía para modelar el PCM. El modelo matemático se desarrolló en lenguaje FORTRAN, se resolvió utilizando el esquema de corrección iterativa. Para el análisis, se seleccionaron cuatro ciudades: Phoenix, Atlanta, Seattle, Golden que representan las zonas climáticas de EE.UU. Los autores consideraron, h convectivos para el exterior entre 18 y 23 W/m² K mientras que, para el h convectivo interior constante de 4.43 W/m²K. Se modeló una casa con dos zonas térmicas: zona principal acondicionada y zona ático no acondicionada. Las zonas están separadas por un techo aislado considerando, la masa térmica de los muebles, muros estructurales internos. Los autores variaron la ubicación del PCM, orientaciones del muro, propiedades térmicas del PCM: calor de fusión latente, temperatura de fusión y rango de temperatura de fusión. Con base a los resultados los autores concluyeron que, la mejor ubicación para el uso de PCM es sobre la superficie interior del muro. Los resultados muestran que, los ahorros máximos en la carga de enfriamiento máxima oscilan entre el 6.8 y el 13.3 %, mientras que los ahorros en la carga máxima de calentamiento oscilan entre el 7 y el 10.5 %. Definir las propiedades óptimas del PCM, ha demostrado ser una tarea desafiante ya que no se pueden establecer pautas universales para las propiedades térmicas óptimas del PCM. Esto se refiere: al calor latente de los PCM, las características de funcionamiento del edificio (puntos de ajuste de calefacción y refrigeración y perfiles de carga internos), el clima y el objetivo de diseño previsto.

Hernández-López et al. (2016) realizaron un estudio numérico para predecir el almacenamiento y las pérdidas de energía térmica en un sistema de muro Trombe acoplado a una habitación (R-TW) considerando la influencia del ambiente exterior. El sistema consistió de una pared de almacenamiento (Trombe) de hormigón con ventilas, una pared semitransparente, y una habitación con longitud y altura de 3 m. Los autores consideraron: las ciudades de Huitzilac, Morelos y Toluca, Estado de México con datos meteorológicos del

año 2014. El fluido en la cavidad se consideró como aire seco, en régimen turbulento, disipación viscosa despreciable, propiedades termofísicas constantes, a excepción de la densidad en el término de flotación, transferencia de calor por conducción, convección y radiación térmica superficial para el modelo de intercambio radiativo todas las superficies se consideran emisores opacos, difusos y grises. La solución de las ecuaciones gobernantes fue a través método de volumen finito. Los autores observaron que, para ambas ciudades, durante el día más frío, la energía máxima almacenada es de aproximadamente 109 MJ y durante el día más cálido es de aproximadamente 70 MJ. Con base a los resultados los autores concluyeron que, las pérdidas de energía térmica a través de la pared semitransparente; para Huitzilac, representa alrededor del 56 a 62 % y para la ciudad de Toluca son de 57.3 a 64.6%. Sin embargo, el sistema almacena suficiente energía para mantener el aire dentro de la habitación con una temperatura superior a 35 ° C.

Yu et al. (2017) realizaron un estudio teórico-experimental del desempeño de un novedoso sistema de aplicación de energía solar cero que combina la tecnología catalítica con el muro Trombe para la purificación del aire en interiores, El sistema consistió en: una pared semitransparente, un canal de aire, y una capa de catalizadores los cuales están recubiertos en la superficie exterior del muro Trombe (TC-Trombe). Los autores consideraron, propiedades constantes, transferencia de calor por conducción, convección y radiación entre la pared semitransparente y la capa de catalizadores (MnOx-CeO₂), el coeficiente de transferencia de calor radiactivo con un valor estándar de 29 W/m²K). Con base a los resultados experimentales de un día completo mostraron que, TC-Trombe tiene un excelente rendimiento de calefacción. Con una radiación solar de 7.89 MJ, la eficiencia diaria de calefacción del aire, el volumen total generado de aire fresco y la cantidad total de degradación de formaldehído fueron 41.3%, 249.2 m³/(m² día) y 208.4 mg / (m² día), respectivamente. El oxígeno reticular del catalizador MnOx-CeO₂ se activa bajo radiación solar y acelera la reacción termocatalítica a temperaturas de 40, 60, 80 y 100 ° C, la conversión de paso único de formaldehído bajo radiación solar fue 1.3, 1.2, 1.2 y 1.1 veces mayor que la de en la oscuridad, respectivamente. Los resultados teóricos mostraron que, la intensidad de la radiación juega un papel importante para el rendimiento térmico del sistema, mientras que el efecto de temperatura ambiente puede ignorarse. El espesor óptimo del canal

es de 0.1 m. Con base en el modelo térmico del sistema establecido, el rendimiento de ahorro de energía de la pared TC-Trombe se evaluó en temporadas de calefacción en Hefei. El ahorro de energía para la calefacción y la degradación del formaldehído son 64.3 kWh/m^2 y 33.1 kWh/m^2 , respectivamente. Los autores concluyeron que, TC-Trombe tiene un excelente rendimiento de purificación de aire interior totalmente impulsado por energía solar al mismo tiempo para la calefacción de aire.

Rabani et al. (2017) realizaron el análisis teórico experimental de la transferencia de calor de un muro Trombe con un diseño de canal saliente en Yazd, Irán para fines de calentamiento en los días más fríos y cálidos del invierno, para determinar el impacto de los mecanismos de la transferencia de calor en la variación de la temperatura en la superficie posterior del muro Trombe y la absorción durante todo el día. El sistema consistió en una habitación con dimensiones de $2 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$. Las paredes de la habitación están formadas por una capa de espuma de 14 cm junto con una cubierta de 5 cm tanto en la superficie interior, exterior de las paredes de la habitación con una mezcla de paja y hormigón, recubiertas de cemento blanco el exterior de las paredes. La nueva pared diseñada se localizó al sur de la habitación con dimensiones de $1 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ hecha de hormigón, este diseño permite recibir la intensidad solar desde tres diferentes direcciones. El espesor del canal de aire formado por la pared de acristalamiento con el muro almacenador es de 0.3 m. con ventilas en la parte superior e inferior con una dimensión de $0.3 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$. Los autores consideraron la transferencia de calor por conducción, convección y radiación. Con base en los resultados los autores observaron que, la variación del número de Rayleigh en el canal indicó una disminución considerable en la temperatura en las primeras horas debido a la falta de radiación solar lo que provoca una baja temperatura en el canal. A medida que pasa el tiempo, el aumento de la radiación solar mejora el número de Rayleigh. La transferencia de calor por radiación es el mecanismo dominante en el muro Trombe. Por otra parte, el mecanismo de transferencia de calor dominante para los periodos no soleados es la transferencia de calor por conducción donde para las primeras horas cayó a valores negativos que detonan un proceso inverso de transferencia de calor de conducción a través de la pared de Trombe debido a la disminución sustancial de la temperatura del absorbedor en comparación con la temperatura de la pared posterior de Trombe.

Xie et al. (2018) realizaron el análisis de rendimiento térmico de tableros PCM durante un año para aplicaciones de construcción a través de simulaciones numéricas. El sistema consistió en una habitación con aire acondicionado en Beijing, China. La pared está compuesta por: una capa de aislamiento, seguida por un espesor de ladrillo y un tablero de PCM. Los espesores son 4 cm, 30 cm y 3 cm respectivamente. La habitación estudiada está en un segundo piso de un edificio con dimensiones de 5 m x 5 m x 3 m. Los autores variaron cinco tableros de PCM para el análisis del rendimiento térmico en diferentes zonas climáticas para ello consideraron cinco ciudades las cuales están ubicadas en cuatro zonas climáticas diferentes. Harbin zona fría severa, Beijing zona fría, Shanghái zona calurosa de verano y de invierno frío, Guangzhou y Haikou están en un verano caluroso y en una zona de invierno cálido. Usando datos meteorológicos de administración Meteorológica China. La diferencia entre los paneles I, II, III y IV radica en su temperatura de cambio de fase mientras que, I y V es la capacidad de calor latente. Los autores consideraron la transferencia de calor por radiación y convección. Los coeficientes de la transferencia de calor convectivo exterior e interior son: $18.6 \text{ [Wm}^{-2} \text{ °C]}$ y $8.7 \text{ [Wm}^{-2} \text{ °C]}$ respectivamente (Zhang et al., 2008). La solución del modelo matemático se realizó a través del método de diferencias finitas (Kuznik et al., 2008). Los autores encontraron, efecto del cambio de fase en el rendimiento térmico durante un año mostró que, en marzo y mayo, la relación de calor de los cinco tableros PCM es muy estrecha, lo que significa que el cambio de fase tiene poco efecto, y el rendimiento térmico de la placa PCM no puede mejorarse considerablemente al cambiar el calor latente y la temperatura de cambio de fase en los dos meses sin embargo, en junio y septiembre, la relación máxima de calor es 0.08 más alta que el mínimo, lo que significa que el cambio de fase tiene un efecto significativo y el rendimiento térmico del tablero de PCM se puede mejorar considerablemente al cambiar el calor latente y la temperatura de cambio de fase. Finalmente, los autores concluyeron que, después de calcular el coeficiente de transferencia de calor de cinco paredes PCM en doce meses, todas las paredes PCM no cumplen con el estándar de diseño para la eficiencia energética de los edificios. Sin embargo, al aumentar el espesor de la capa de aislamiento a 4,5 cm, se puede cumplir el estándar de diseño.

Liu et al. (2018) realizaron un estudio numérico sobre el rendimiento térmico de un muro Trombe ventilado con materiales de cambio de fase (PCMs-VTW) para propósitos de enfriamiento. El modelo consistió en una pared semitransparente, un canal de aire, una placa de PCM en la pared exterior del muro seguido de un aislante de espuma de poliestireno expandido (EPS) acoplado a una pared de concreto, Posteriormente una pared de yeso con activos interiores PCM por donde pasan tuberías de agua para refrigeración. El PCM está encapsulado en contenedores cerrados de acero inoxidable. Donde, el panel PCM exterior es para almacenar energía de enfriamiento natural a través de la ventilación nocturna, y el tablero PCM interior activo es para enfriamiento radiante. Los autores consideraron tres modos de operación disponibles dependiendo de las condiciones climáticas. Para este estudio, se consideraron cuatro diferentes regiones climáticas de China, las ciudades fueron: Yan'an, Lasa, Kunming y Haikou, mismas que corresponden a las zonas de frío, frío extremo, clima templado y de invierno cálido, respectivamente. La solución de las ecuaciones gobernantes del sistema se resolvió con el método de balances globales para una dimensión. Se consideraron 12 nodos, con un paso de tiempo de 5 segundos. De los resultados, los autores obtuvieron que el sistema (PCMs-VTW) es eficaz para mantener la temperatura del aire interior dentro del rango de confort térmico en condiciones de verano severo y que, para mantener la temperatura del aire interior dentro del rango de confort térmico por más tiempo a excepción de Lasa (zona fría extrema) se logra con el aumento en la tasa de flujo de aire de 1 a 7 m/s en comparación con el muro Trombe clásico (C-TW). Los autores concluyeron que el consumo anual de energía de enfriamiento se reduce en un 20.8 % cuando la temperatura establecida en el aire interior es de 24 °C.

Demoun y Grigoriadis (2018) realizaron un estudio teórico de un modelo unidimensional para calcular el rendimiento energético estacional de los captadores solares (SAC) de convección natural para fines de calefacción con datos meteorológicos de Nicosia, Cyprus del año 2011. El modelo consistió en una pared semitransparente, paredes adiabáticas en la parte superior e inferior de la configuración que forma el canal, posteriormente un muro almacenador. Los autores resolvieron las ecuaciones gobernantes a través de la técnica de balances globales. Consideraron, temperatura constante de 20 °C en la habitación, Con base en los resultados, los autores encontraron que, la eficiencia del sistema aumenta de 35.1 % a

35.4 % a medida que el aumenta el tamaño del canal de 6 cm a 14 cm y la eficiencia disminuye de 43.1 % a 31.6 % cuando el espesor del muro aumenta de 5 cm a 40 cm. Los autores concluyeron que, la eficiencia del sistema es más sensible al material de superficie absorbente solar que al grosor de la pared, el espaciado del vidrio de pared o la orientación del sistema. El intervalo de tiempo entre la ganancia directa e indirecta se calculó aproximadamente 2 h por cada 10 cm de espesor de pared. La eficiencia del sistema es significativamente menor en lugares con inviernos más fríos, pero la temporada de calefacción prolongada eleva el rendimiento energético de los sistemas a un nivel comparable con climas más cálidos. La necesidad de poner el sistema fuera de servicio surge en algún momento durante la noche, debido a la inversión de flujo que hace que el SAC entregue aire más frío a la habitación a través del orificio de entrada.

Ahmed et al. (2019) realizaron un estudio teórico sobre el desempeño térmico del sistema pasivo muro Trombe en términos de mejorar el confort térmico, variando las dimensiones del sistema TW, bajo las condiciones climáticas típicas de una semana de invierno para la Ciudad de Alejandría, Egipto. Los autores desarrollaron un modelo dinámico mediante el método de balances globales en 1D en MATLAB, así como, una simulación con el programa comercial DesignBuilder en 2D con un enfoque CFD y validándolo mediante un estudio experimental. Con base a los resultados, los autores determinaron que, las dimensiones óptimas del sistema TW tiene que contar 1.7 m de altura, espesor de 0.3 m con una profundidad de 0.22 m y encontraron que, existe una desviación promedio del 3.93% con la validación experimental del modelo. Finalmente, los autores concluyeron que: A través de las pruebas de simulación analítica, se podría determinar que este diseño podría alcanzar el rango de confort estándar de 293.15 a 298.15 K, basado en el enfoque del modelo adaptativo (ANSI/ASHRAE Standard 55-2010). Y bajo las condiciones de confort estándar se lograron en un 38.19 % durante las condiciones de operaciones seleccionadas y durante toda la temporada de invierno, el muro de Trombe propuesto logró condiciones satisfactorias de confort térmico del 43.88 %, en comparación con el 9.4% reportado (ANSI/ASHRAE Standard 55-2010).

1.3 Conclusión de la revisión bibliográfica

Con base a la revisión bibliográfica realizada, se observa que se han realizado diversos estudios teóricos, experimentales y teóricos-experimentales considerando diversos aspectos del muro Trombe: patrón de flujo, uso de vidrio doble, tipo de material para el muro almacenador, desempeño térmico, implementación de material de cambio de fase (PCM), gestión de ventilas, entre otros. Se encontró que existen estudios teóricos sobre la determinación de la energía almacenada en el sistema solar pasivo de muro Trombe en su configuración de calentamiento. Entre ellos, existe un estudio para condiciones de clima frío en México. Sin embargo, este estudio se limitó a predecir la cantidad de energía almacenada bajo consideraciones de régimen de flujo turbulento con una formulación de estado pseudo transitorio. Esta consideración sólo permitió predecir la cantidad total de energía acumulada en la pared almacenadora al final de un día, pero no el proceso de liberación de la misma durante la noche. La principal causa de esto es que el modelado de la turbulencia con una formulación completamente transitoria conlleva un alto costo computacional. Así, resulta ventajosa la aplicación del método de balances globales GB ya que permite un análisis dinámico del comportamiento del sistema a un consumo de recursos computacionales menor que el enfoque de CFD. De esta manera, es posible determinar la evolución del desempeño térmico de un sistema TW para condiciones climáticas de México.

1.4 Objetivo general

Realizar la evaluación dinámica del desempeño térmico de un sistema de muro Trombe para condiciones climáticas de México.

1.5 Objetivos específicos

- Aprender el método de balances globales de energía.
- Desarrollar un código numérico para simular la transferencia de calor conjugada en estado transitorio para el sistema pasivo de muro Trombe.
- Realizar un estudio paramétrico para diferentes materiales de muro con climas de México.
- Seleccionar condiciones climáticas de la República Mexicana.

1.6 Alcance

Implementar un código numérico para la solución de la transferencia de calor conjugada en un sistema solar pasivo de muro Trombe. El estudio se realizará en estado transitorio usando las condiciones de la República Mexicana con clima generalmente frío. Se considerarán distintos materiales en la pared masiva para evaluar el desempeño térmico del módulo de muro Trombe para propósitos de calentamiento.

1.7 Estructura de la tesis

La tesis consta con un total de cinco Capítulos. El Capítulo II presenta el modelo físico y matemático del sistema muro Trombe, así como las consideraciones y suposiciones que fueron establecidas en el presente trabajo de investigación. En el Capítulo III, se presenta la metodología llevada a cabo para dar solución al modelo matemático del sistema muro Trombe. En el Capítulo IV se presentan los resultados obtenidos del presente trabajo de investigación. Finalmente, el Capítulo V expone las conclusiones y las recomendaciones para futuros trabajos.

CAPÍTULO II

MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO

En este capítulo se describirá el modelo físico y matemático del sistema muro Trombe. En primera instancia se presenta la definición de un modelo físico y matemático, seguido de las consideraciones del presente estudio finalmente, se describe el modelo físico y matemático muro Trombe donde se presenta la utilidad del método de balances globales de energía (BG).

2.1 Definición del modelo físico y matemático

El modelo físico, es una parte fundamental para todo estudio teórico. El modelo físico es la representación conceptual y simplificada de un sistema que se estudia. El modelo físico tiene el propósito de reproducir la realidad en lo posible en función de las consideraciones establecidas para tal estudio. Por otro lado, el modelo matemático es tipo de lenguaje que mediante formulismos matemáticos trata de expresar lo acotado por el modelo físico.

2.2 Consideraciones del modelo físico

Las consideraciones para la realización del modelo del muro Trombe se enlistan a continuación:

1. Fluido Newtoniano
2. Flujo incomprensible
3. Estado Transitorio
4. Disipación viscosa despreciable
5. Fluido radiativamente no participante
6. Se considera un flujo bidimensional (x, y) y los efectos en la dirección (z) se desprecia

2.3 Modelo físico del muro Trombe

A continuación, se describe un sistema de muro Trombe convencional el cual está constituido por una pared semitransparente (colector), un muro masivo (absorbedor y almacenador), un canal formado por la pared semitransparente y el muro masivo con entradas en la parte inferior y superior del muro masivo que, funcionan para establecer un lazo convectivo entre el canal y la habitación.

Se considera la orientación hacia el sur para garantizar que incida la mayor cantidad de radiación solar sobre el absorbedor a lo largo del día. En virtud de las propiedades ópticas del vidrio, una fracción de la energía se refleja hacia el exterior, otra porción se absorbe y el resto se transmite, donde la energía que logra ser transmitida de forma íntegra son: las componentes de onda corta de la radiación solar, la cual presenta un mayor nivel de energía (luz visible entre 0.4 y 0.7 μm), esta energía no interactúa con el fluido en el canal debido a que, se consideró como un fluido no-participante.

Finalmente, esta energía incide sobre el absorbedor donde se transformada en energía térmica, siendo transmitida al muro masivo el cual funciona como un almacenador. Este almacenamiento de energía provoca un aumento en el calor sensible del muro masivo de igual manera, la porción de energía que, fue adsorbida por la pared semitransparente provocó un aumento en su calor sensible, para ambos elementos este aumento se percibe como un incremento en su valor de temperatura, estas superficies emiten radiación en el infrarrojo lejano comprendida aproximadamente de 50 a 1000 μm esta energía queda atrapada en la sección del canal debido a que para el infrarrojo lejano la pared semitransparente se vuelve un medio opaco. Con ello produce un efecto invernadero haciendo que el aire en el canal eleve su temperatura provocando cambios en la densidad del fluido a lo largo de todo el canal detonando así, un efecto chimenea mientras que, en la parte inferior del canal se induce un efecto succión a través de la ventila inferior. De esta manera, el sistema de muro Trombe suministra energía a la habitación de manera pasiva ayudando a mantener una condición de confort térmico.

Para acotar el alcancé del modelo físico del presente estudio se muestra la Figura 2.1, un conjunto de tres edificaciones donde se aplicaron tecnologías bioclimáticas entre ellas, el muro Trombe, se puede observar dos columnas a lo largo de la edificación donde se encuentra instalado este sistema TW. Para facilitar el análisis del sistema se consideró, analizar una sección transversal del sistema muro Trombe, puede observarse a continuación cómo la zona resaltada en color rojo en la Figura 2.1.



Figura 2.1. Conjunto de 32 Viviendas Sociales en Portugalete (Bizkala).

Para ello, se describirán los mecanismos de transferencia de calor considerados en la sección transversal.

En la Figura 2.2, se presenta el modelo Físico del sistema muro Trombe para una sección transversal, en la figura se puede apreciar que, la pared semitransparente considera pérdidas convectivas y radiativas hacia el medio ambiente.

Posteriormente, la sección del canal se considera la transferencia de calor por convección en el canal por parte del fluido e intercambio radiativo superficial entre el absorbedor y la pared semitransparente. Finalmente, el muro masivo considera la transferencia de calor por conducción así como pérdidas convectivas y radiativas hacia la habitación.

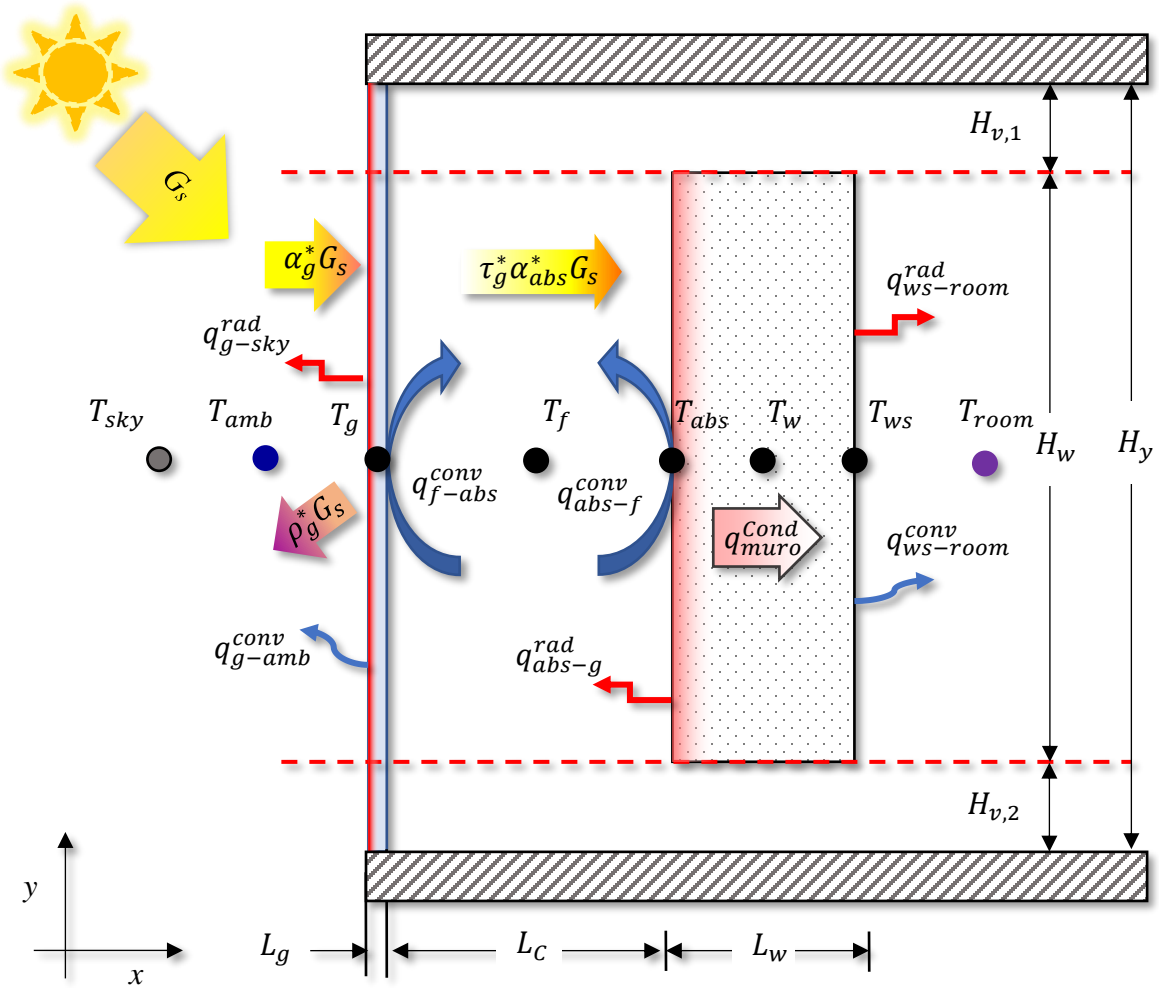


Figura 2.2. Modelo físico del muro Trombe.

2.4 Modelo matemático del muro Trombe

Para llevar a cabo la construcción de un modelo matemático del sistema TW, se implementó el método de balances globales de energía (BG), el cual permite simplificar el análisis dado que se obtiene un modelo matemático más simple que en el enfoque diferencial.

2.4.1 Implementación de los balances termodinámicos globales

La contribución del término transitorio permite determinar la variación de la temperatura a través del tiempo para ello, se considera, que el término transitorio sea de propiedades constantes siendo válido para un pequeño volumen de control.

$$\rho C_p V \frac{\partial(T)}{\partial t} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} \quad (2.1)$$

Donde V es el volumen de control del nodo donde se realiza el balance de energía. El volumen de control, puede escribirse como: $V = A\delta x$, siendo A y δx el área transversal y el espesor del volumen de control, respectivamente. Sustituyendo en V en la Ec. 2.1, se obtiene:

$$\rho C_p A \delta x \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} \quad (2.2)$$

Para obtener un sistema de ecuaciones algebraicas se discretizó el término transitorio, aplicando el método del esquema completamente implícito, por tener la peculiaridad de ser condicionalmente estable.

$$\frac{\rho C_p A \delta x}{\Delta t} [T^{t+\Delta t} - T^t] = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} \quad (2.3)$$

De esta forma se obtuvo, la discretización del término temporal del modelo matemático ver Ec. (2.1), para la realización de los balances de energía en estado transitorio para cada uno de los puntos nodales del sistema muro Trombe.

A partir de la Figura 2.2, se obtuvo un diagrama térmico resistivo del muro Trombe, esto permite simplificar los mecanismos de transferencia que considera el sistema. La Figura 2.3 muestra la disposición de los puntos nodales en el sistema.

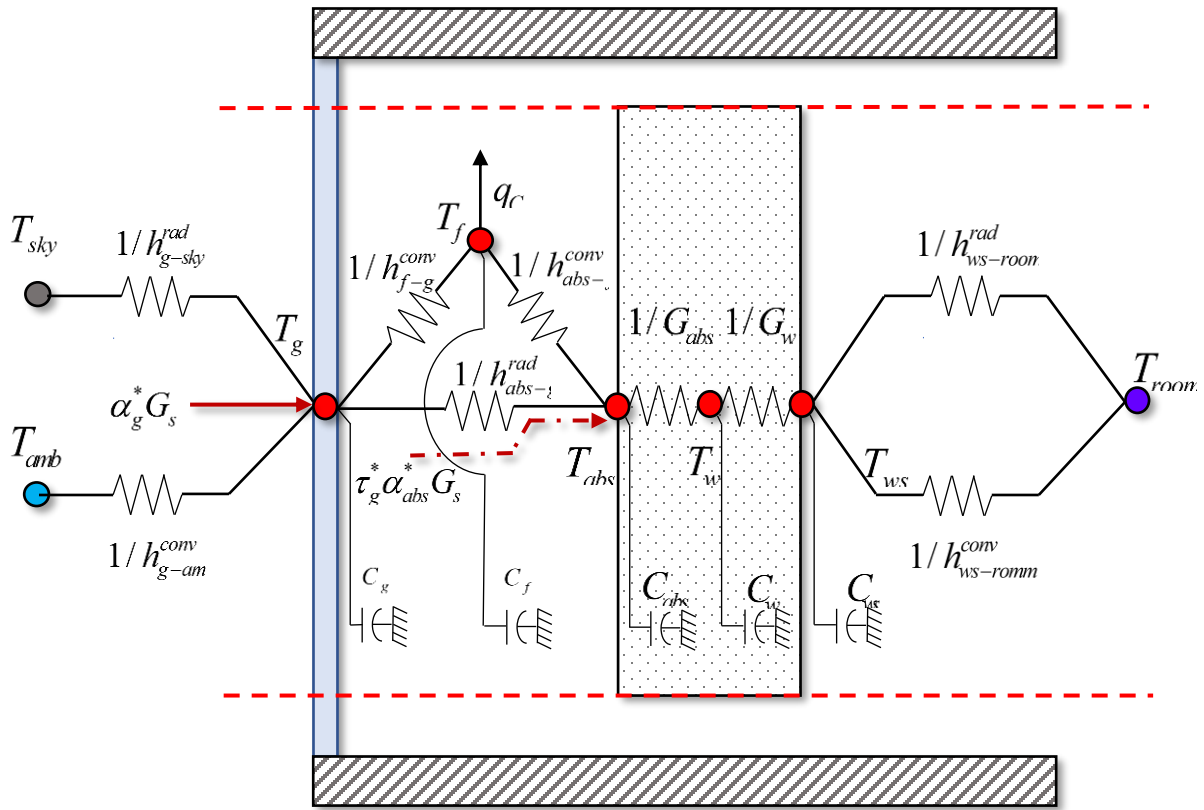


Figura 2.3. Diagrama térmico resistivo del sistema muro Trombe.

donde:

$$C_{g,f,abs,w,ws} = \rho C_p V \frac{\partial(T)}{\partial t}; G_{abs} = L_3 / \lambda_{abs}; G_w = L_4 / \lambda_w$$

A continuación, se presentan los balances de energía en estado transitorio, para ello, se utilizó la Ec. (2.3) y la sustituiremos en cada uno de los elementos del sistema.

Pared semitransparente:

El modelo de la pared semitransparente se determina a partir de un balance global de energía sustentada por la primera ley de la termodinámica. El balance global empleando un esquema implícito para la derivada temporal se obtiene como:

$$\frac{\rho_g C_{P,g} A_g \delta x_g}{\Delta t} [T_g^{t+\Delta t} - T_g^t] = \dot{E}_{in,g} - \dot{E}_{out,g} \quad (2.4)$$

$$\frac{\rho_g C_{P,g} A_g \delta x_g}{\Delta t} [T_g^{t+\Delta t} - T_g^t] = q_g^{abs} A_g + q_{f-g}^{conv} A_g + q_{abs-g}^{rad} A_g - (q_{g-amb}^{conv} A_g + q_{g-sky}^{rad} A_g) \quad (2.5)$$

Desarrollando y factorizando:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_g C_{P,g} \delta x_g}{\Delta t} [T_g^{t+\Delta t} - T_g^t] = & \alpha_g^* G_s + h_{f-g}^{conv} (T_f - T_g) + h_{abs-g}^{rad} (T_{abs} - T_g) - h_{g-amb}^{conv} \\ & (T_g - T_{amb}) - h_{g-sky}^{rad} (T_g - T_{sky}) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Esta ecuación contempla la radiación solar que incide sobre la pared semitransparente, el intercambio convectivo con el fluido del canal, intercambio radiativo superficial entre el absorbedor y la pared semitransparente así como las pérdidas convectivas y radiativas al medio ambiente.

Canal:

El modelo del fluido se determina a partir de un balance global de energía basándose en el diagrama térmico resistivo del muro Trombe. El balance global queda como:

$$\frac{\rho_f C_{P,f} A_f \delta x_f}{\Delta t} [T_f^{t+\Delta t} - T_f^t] = \dot{E}_{in,f} - \dot{E}_{out,f} \quad (2.7)$$

$$\frac{\rho_f C_{P,f} A_f \delta x_f}{\Delta t} [T_f^{t+\Delta t} - T_f^t] = q_{abs-f}^{conv} A_f - (q_{f-g}^{conv} A_f + q_C A_f) \quad (2.8)$$

Desarrollando y factorizando:

$$\frac{\rho_f C_{P,f} \delta x_f}{\Delta t} [T_f^{t+\Delta t} - T_f^t] = h_{abs-f}^{conv} (T_{abs} - T_f) - MT_f - h_{f-g}^{conv} (T_f - T_g) + MT_{f,in,j} \quad (2.9)$$

Esta ecuación contempla el intercambio convectivo entre las superficies que conforman el canal con el fluido y el calor útil que es transferido al flujo de fluido en estado transitorio.

Muro masivo:

El modelo del muro se determina a partir de un balance global de energía basándose en el diagrama térmico resistivo del muro Trombe. El balance global del muro masivo se expresa de la siguiente manera:

Superficie del muro masivo adyacente al fluido en el canal:

$$\frac{\rho_{abs} C_{P,abs} A_{abs} \delta x_{abs}}{\Delta t} [T_{abs}^{t+\Delta t} - T_{abs}^t] = \dot{E}_{in,abs} - \dot{E}_{out,abs} \quad (2.10)$$

$$\frac{\rho_{abs} C_{P,abs} A_{abs} \delta x_{abs}}{\Delta t} [T_{abs}^{t+\Delta t} - T_{abs}^t] = q_{abs}^{abso} A_{abs} - (q_{abs-f}^{conv} A_{abs} + q_{abs-g}^{rad} A_p + q_{abs-w}^{cond} A_{abs}) \quad (2.11)$$

Desarrollando:

$$\frac{\rho_{abs} C_{P,abs} \delta x_{abs}}{\Delta t} [T_{abs}^{t+\Delta t} - T_{abs}^t] = \alpha_{abs}^* \tau_g^* G_s - h_{abs-f}^{conv} (T_{abs} - T_f) - h_{abs-g}^{rad} (T_{abs} - T_g) - G_{abs} (T_{abs} - T_w) \quad (2.12)$$

Esta ecuación contempla la radiación solar que logró ser transmitida a través de pared semitransparente de forma íntegra hacia el muro masivo, está es transformada en energía

térmica por el absorbedor, el intercambio radiativo entre las superficies que, conforman el canal y la transferencia de calor por conducción en estado transitorio.

Conducción a través del muro:

$$\frac{\rho_w C_{P,w} A_w \delta x_w}{\Delta t} [T_w^{t+\Delta t} - T_w^t] = \dot{E}_{in,w} - \dot{E}_{out,w} \quad (2.13)$$

$$\frac{\rho_w C_{P,w} A_w \delta x_w}{\Delta t} [T_w^{t+\Delta t} - T_w^t] = q_{abs-w}^{cond} A_w - q_{w-ws}^{cond} A_w \quad (2.14)$$

$$\frac{\rho_w C_{P,w} \delta x_w}{\Delta t} [T_w^{t+\Delta t} - T_w^t] = G_{abs} (T_{abs} - T_w) - G_w (T_w - T_{ws}) \quad (2.15)$$

La Ec. (2.15) representa la transferencia de calor por conducción a través del muro masivo en estado transitorio.

Superficie del muro masivo adyacente a la habitación:

$$\frac{\rho_{ws} C_{P,ws} A_{ws} \delta x_{ws}}{\Delta t} [T_{ws}^{t+\Delta t} - T_{ws}^t] = \dot{E}_{in,ws} - \dot{E}_{out,ws} \quad (2.16)$$

$$\frac{\rho_{ws} C_{P,ws} A_{ws} \delta x_{ws}}{\Delta t} [T_{ws}^{t+\Delta t} - T_{ws}^t] = q_{w-ws}^{cond} A_{ws} - q_{ws-room}^{conv} A_{ws} + q_{ws-room}^{rad} A_{ws} \quad (2.17)$$

Desarrollando:

$$\frac{\rho_{ws} C_{P,ws} \delta x_{ws}}{\Delta t} [T_{ws}^{t+\Delta t} - T_{ws}^t] = G_w (T_w - T_{ws}) - h_{ws-room}^{conv} (T_{ws} - T_{room}) + h_{ws-room}^{rad} (T_{ws} - T_{room}) \quad (2.18)$$

Esta ecuación contempla la transferencia de calor por conducción que llega a la superficie interior del muro masivo y así como las pérdidas convectivas y radiativas hacia la habitación en estado transitorio.

Posteriormente, realizado el balance de energía para cada uno de los elementos que conforman el sistema, manipulando y agrupando el sistema de ecuaciones queda de la siguiente manera:

$$T_g : \left(\frac{\rho_g c_g \delta x_g}{\Delta t} + h_{f-g}^{conv} + h_{abs-g}^{rad} + h_{g-amb}^{conv} + h_{g-sky}^{rad} \right) T_g^{t+\Delta t} - (h_{f-g}^{conv}) T_f^{t+\Delta t} - (h_{abs-g}^{rad}) T_{abs}^{t+\Delta t} \quad (2.19)$$

$$= \frac{\rho_g c_g \delta x_g}{\Delta t} T_g^t + h_{g-amb}^{conv} T_{amb}^t + h_{g-sky}^{rad} T_{sky}^t + \alpha_g^* G_s$$

$$T_f : - (h_{f-g}^{conv}) T_g^{t+\Delta t} + \left(\frac{\rho_f c_f \delta x_f}{\Delta t} + h_{abs-f}^{conv} + h_{f-g}^{conv} + M \right) T_f^{t+\Delta t} - (h_{abs-f}^{conv}) T_{abs}^{t+\Delta t} = \quad (2.20)$$

$$\frac{\rho_f c_f \delta x_f}{\Delta t} T_f^t + M T_{f,in,j}^t$$

$$T_{abs} : - (h_{abs-g}^{rad}) T_g^{t+\Delta t} - (h_{abs-f}^{conv}) T_f^{t+\Delta t} + \left(\frac{\rho_{abs} C_{P,abs} \delta x_{abs}}{\Delta t} + h_{abs-f}^{conv} + h_{abs-g}^{rad} + G_{abs} \right) T_{abs}^{t+\Delta t} \quad (2.21)$$

$$- (G_{abs}) T_w = \frac{\rho_{abs} C_{P,abs} \delta x_{abs}}{\Delta t} T_{abs}^{t+\Delta t} + \alpha_{abs} \tau_g G_s$$

$$T_w : - (G_{abs}) T_{abs}^{t+\Delta t} + \left(\frac{\rho_w C_{P,w} \delta x_w}{\Delta t} + G_{abs} + G_w \right) T_w^{t+\Delta t} - (G_w) T_{ws}^{t+\Delta t} = \frac{\rho_w C_{P,w} \delta x_w}{\Delta t} T_w^t \quad (2.22)$$

$$T_{ws} : - (G_w) T_w^{t+\Delta t} + \left(\frac{\rho_{ws} C_{ws} \delta x_{ws}}{\Delta t} + h_{ws-room}^{conv} + h_{ws-room}^{rad} + G_w \right) T_{ws}^{t+\Delta t} = \frac{\rho_{ws} C_{P,ws} \delta x_{ws}}{\Delta t} \quad (2.23)$$

$$T_{ws}^t + (h_{ws-room}^{conv} + h_{ws-room}^{rad}) T_{room}^t$$

4.4.2 Determinación del calor útil q_C en un volumen de control

Para determinar el calor útil trasferido por el fluido q_C presente en la Ec. (2.20) se hace uso del siguiente análisis: La Figura 2.4 muestra el balance de transferencia de calor hacia el flujo de aire a través del canal por convección natural entre la pared semitransparente y el absorbedor. Se considera que, las temperaturas de la pared semitransparente (T_g) así como, la temperatura del absorbedor (T_{abs}) son constantes para la condición de un pequeño volumen de control (j) y la transferencia de calor útil hacia el flujo de aire en el canal se expresa a partir del siguiente balance de energía:

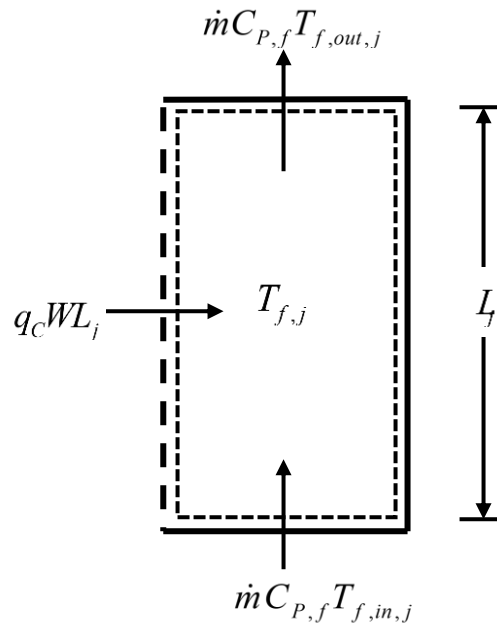


Figura 2.4. Balance de calor del flujo de aire en un volumen de control.

La temperatura del flujo de aire a la entrada de la sección del canal se define por, ($T_{f,in,j}$) y se considera como, uniforme a través de toda la sección transversal del volumen de control (j), el valor de la temperatura representativa del volumen de control (j) se defina como ($T_{f,j}$) y se considerada como una temperatura promedio mientras que, la temperatura del flujo de

aire a la salida de la sección del canal se define como, $(T_{f,out,j})$ y se considera uniforme a través de toda la sección transversal. Partiendo de la primera ley de la termodinámica y considerando que, no existe generación de calor ni almacenamiento, esto puede expresarse como:

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \quad (2.24)$$

donde:

$$\dot{E}_{in} = q_c WL_j + \dot{m}C_{P,f}T_{f,in,j} \quad (2.25)$$

$$\dot{E}_{out} = \dot{m}C_{P,f}T_{f,out,j} \quad (2.26)$$

La Ec. (24) expresa el balance de energía en el volumen de control a partir de este balance se sustituyen las Ecs. (2.25, 2.26) en la Ec. (2.24):

$$q_c WL_j + \dot{m}C_{P,f}T_{f,in,j} = \dot{m}C_{P,f}T_{f,out,j} \quad (2.27)$$

Despejando (q_c)

$$q_c = \frac{\dot{m}C_{P,f}(T_{f,out,j} - T_{f,in,j})}{\gamma WL_j} \quad (2.28)$$

La Ec. (2.28) expresa calor útil transferido al flujo de aire. La temperatura del aire promedio representativa del volumen de control (j) puede expresarse mediante una correlación emperica propuesta por Hirunlabh (1999).

$$T_f = (1 - \gamma)T_{f,in,j} + \gamma T_{f,out,j} \quad (2.29)$$

donde: $\gamma = 0.75$

Despejando $(T_{f,out,j})$ de la Ec. (2.29) y sustituyéndolo en la Ec. (2.28), obtenemos la siguiente expresión:

$$q_c = \frac{\dot{m}C_{P,f}(T_f - T_{f,in,j})}{\gamma WL_j} \quad (2.30)$$

Introduciendo M :

$$M = \frac{\dot{m}C_{P,f}}{\gamma WL_j} \quad (2.31)$$

W es el ancho de canal de 1 m y L_i es la altura de la sección j . Se sustituye la Ec. (2.31) en la Ec. (2.30). Se desarrolla y se acomoda de tal manera que se obtiene el modelo matemático del muro Trombe en manera matricial. ver Ec. (2.32).

$$\underbrace{\begin{bmatrix} a_1 & -b_1 & -c_1 & 0 & 0 \\ -a_2 & b_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ -a_3 & -b_3 & c_3 & -d_3 & 0 \\ 0 & 0 & -c_4 & d_4 & -e_4 \\ 0 & 0 & 0 & -d_5 & e_5 \end{bmatrix}}_{\substack{\text{Matriz de Coeficientes} \\ [A_{i,j}]}} \underbrace{\begin{bmatrix} T_g^{t+\Delta t} \\ T_f^{t+\Delta t} \\ T_{abs}^{t+\Delta t} \\ T_w^{t+\Delta t} \\ T_{ws}^{t+\Delta t} \end{bmatrix}}_{\substack{\text{Vector Incognita} \\ [\varphi_i]}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\rho_g C_{P,g} \delta x_g}{\Delta t} T_g^t + h_{g-amb}^{conv} T_{amb} + h_{g-sky}^{rad} T_{sky} + \alpha_g^* G_s \\ \frac{\rho_f C_{P,f} \delta x_f}{\Delta t} T_f^t + MT_{room} \\ \frac{\rho_{abs} C_{P,abs} \delta x_{abs}}{\Delta t} T_{abs}^t + \alpha_{abs}^* \tau_g^* G_s \\ \frac{\rho_w C_{P,w} \delta x_w}{\Delta t} T_w^t \\ \frac{\rho_{ws} C_{P,ws} \delta x_{ws}}{\Delta t} T_{ws}^t + (h_{ws-room}^{conv} + h_{ws-room}^{rad}) T_{room} \end{bmatrix}}_{\substack{\text{Vector Término Independiente} \\ [B_{i,j}]}}, \quad (2.32)$$

donde los coeficientes de la matriz Ec. (2.32) son:

$$a_1 = \left(\frac{\rho_g C_{P,g} \delta x_g}{\Delta t} + h_{f-g}^{conv} + h_{abs-g}^{rad} + h_{g-amb}^{conv} + h_{g-sky}^{rad} \right), \quad b_1 = h_{f-g}^{conv}, \quad c_1 = h_{abs-g}^{rad}$$

$$a_2 = h_{f-g}^{conv}, \quad b_2 = \left(\frac{\rho_f C_{P,f} \delta x_f}{\Delta t} + h_{abs-f}^{conv} + h_{f-g}^{conv} + M \right), \quad c_2 = h_{abs-f}^{conv}$$

$$a_3 = h_{abs-g}^{rad}, \quad b_3 = h_{abs-f}^{conv}, \quad c_3 = \left(\frac{\rho_{abs} C_{P,abs} \delta x_{abs}}{\Delta t} + h_{abs-f}^{conv} + h_{abs-g}^{rad} + G_{abs} \right), \quad d_3 = G_{abs}$$

$$c_4 = G_{abs}, \quad b_4 = \left(\frac{\rho_w C_{P,w} \delta x_w}{\Delta t} + G_{abs} + G_w \right), \quad e_4 = G_w$$

$$d_5 = G_w, \quad e_5 = \left(\frac{\rho_{ws} C_{P,ws} \delta x_{ws}}{\Delta t} + h_{ws-room}^{conv} + h_{ws-room}^{rad} + G_w \right)$$

En general la matriz Ec. (2.32) puede representarse de la siguiente forma:

$$[A_{i,j}][\varphi_{i,j}] = [B_{i,j}] \quad (2.33)$$

Para determinar el valor del vector resultante, este puede ser obtenido a través de la inversión de la matriz de coeficientes.

$$[\varphi_{i,j}] = [B_{i,j}][A_{i,j}]^{-1} \quad (2.34)$$

La solución del sistema de ecuaciones se realizó mediante el algoritmo iterativo de Gauss-seidel.

2.4.3 Coeficientes de transferencia de calor, pérdidas convectivas y radiativas

Para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor convectivo, radiativo y pérdidas convectivas y radiativas, se utilizaron las correlaciones que cita Ong (2003).

El coeficiente convectivo de la transferencia de calor por el viento está dado por McAdams (1954).

$$h_{g-amb}^{conv} = 5.7 + 3.8V_{wind} \quad (2.35)$$

Coeficiente de transferencia de calor por radiación de la pared semitransparente a la bóveda celeste, propuesto por Duffie and Beckman (1996).

$$h_{g-sky}^{rad} = \sigma \varepsilon_g (T_g + T_{sky}) (T_g^2 + T_{sky}^2) \quad (2.36)$$

Temperatura de cielo, puede ser calculada con la correlación presentada por Swinbank (1963).

$$T_{sky} = 0.0552T_{amb}^{1.5} \quad (2.37)$$

El coeficiente de transferencia radiativo entre el absorbedor y la pared semitransparente es calculado con la ecuación dada por Duffie and Beckman (1996).

$$h_{abs-g}^{rad} = \frac{\sigma (T_g^2 + T_{abs}^2) (T_g + T_{abs})}{\left(\frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{1}{\varepsilon_{abs}} - 1 \right)} \quad (2.38)$$

Los coeficientes de transferencia de calor por convección natural entre las superficies que conforman el canal vertical:

Coefficiente convectivo entre la pared semitransparente y el fluido aire:

$$h_{f-g}^{conv} = \frac{Nu_{f-g}^{conv} \lambda_f}{L_j} \quad (2.39)$$

Coefficiente convectivo entre el absorbedor el fluido aire:

$$h_{abs-f}^{conv} = \frac{Nu_{abs-f}^{conv} \lambda_f}{L_j} \quad (2.40)$$

Las propiedades del fluido aire son calculadas con una temperatura promedio de película definida como:

Para la pared semitransparente y el fluido aire:

$$T_{m,g} = \frac{T_g + T_f}{2} \quad (2.41)$$

Para el absorbedor y el fluido aire:

$$T_{m,abs} = \frac{T_{abs} + T_f}{2} \quad (2.42)$$

La correlación para el coeficiente convectivo por convección natural es presentado por Churchill y Chu (1975) para flujo laminar ($Ra < 10^9$):

$$Nu_{f-g} = 0.68 + \frac{(0.67Ra^{1/4})}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/16}} \quad (2.43)$$

Y para flujo turbulento ($10^9 < Ra$):

$$Nu_{f-g} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (2.44)$$

Las Ecs. (2.43) y (2.44) determinan, el coeficiente convectivo entre la pared semitransparente y el fluido aire. Donde el número de Prandtl (Pr) se define como:

$$Pr = \frac{C_{p,f}\mu_f}{\lambda_f} \quad (2.45)$$

El número de (Ra) se define como:

$$Ra = GrPr \quad (2.46)$$

El número de (Gr) se define como:

$$Gr = \left[\frac{g\beta_f(T_g - T_f)L_j}{\nu_f^2} \right] \quad (2.47)$$

$$\beta_f = 1/T_{m,g} \quad (2.48)$$

$$\beta_f = 1/T_{m,abs} \quad (2.49)$$

De manera similar, se determinó el coeficiente convectivo entre la superficie absorbedora y el fluido aire (h_{abs-f}^{conv}) con la temperatura de película $T_{m,abs} = (T_{abs} + T_f)/2$.

Por simplicidad, se supone que la densidad y la temperatura del aire en el espacio varía linealmente con altura. La velocidad media del aire a través del gap es propuesta por Duffie y Beckman (2006):

$$\bar{V} = \left[\frac{2gH_y}{C_1 \left(\frac{A_{v,1}}{A_{v,2}} \right)^2 + C_2} \frac{T_f - T_{room}}{T_f} \right] \quad (2.50)$$

donde:

$$C_1 \left(\frac{A_{v,1}}{A_{v,2}} \right)^2 + C_2 = \text{Representa la caída de presión en el canal y las ventilas.}$$

$$C_1 \text{ y } C_2 = \text{Son constantes empericas adimensionales evaluadas en 8.0 y 2.0 respectivamente por Utzinger (1979).}$$

Cálculo de flujo másico:

$$\dot{m} = \bar{V} \rho_f A_{i=0} \quad (2.51)$$

Propiedades termofísicas del aire:

Las propiedades termofísicas del fluido aire se asumen que varían linealmente. Las correlaciones fueron basadas en datos tabulados de Incropera y DeWitt (2002). Para un intervalo de 250 a 400 K. Para evaluar las propiedades del fluido se utiliza la temperatura media de película.

Viscosidad cinemática:

$$\mu_f = \left[2.2078 (T_{m,g}^{0.7756}) \right] \times 10^{-7} \quad (2.51)$$

Densidad:

$$\rho_f = \frac{351.9}{T_{m,g}} \quad (2.52)$$

Conductividad Térmica:

$$\lambda_f = \left[0.1723 (T_{m,g}^{0.8812}) \right] \times 10^{-3} \quad (2.33)$$

Calor específico:

$$C_{P,f} = \left[0.9125 (T_{m,g}^{0.0174}) \right] \times 10^3 \quad (2.54)$$

2.5 Procedimiento de solución

En esta sección se presenta el diagrama de flujo que se implementó al código numérico desarrollado en balances globales para dar solución al modelo matemático del muro Trombe. A continuación, se describe el procedimiento que se llevó a cabo:

La resolución del sistema de ecuaciones 5×5 se realizó mediante un código numérico en lenguaje FORTRAN.

1. En primera instancia, se declaran los parámetros constantes, se establecen condiciones iniciales y se elige un paso de tiempo Δt .
2. Se construye mediante una malla numérica un arreglo de puntos nodales en coordenadas (x, y) que se establecen como pequeños volúmenes de control que almacenan información para cada uno de los elementos que conformen el sistema TW.
3. Se establecen los siguientes contadores para establecer el proceso iterativo: 1) Contador de iteraciones máximas, 2) contador del paso de tiempo Δt .
4. Se construye una subrutina donde se generan los datos climáticos para la Ciudad de interés (Irradiación solar, velocidad del aire y temperatura ambiente) mediante funciones en intervalos de tiempo.
5. Se establece un siguiente contador para el número de secciones j en dirección (y) . Se construyó una subrutina donde se calculan los siguientes coeficientes de transferencia de energía: $h_{g-sky}^{rad}, h_{wind}^{conv}, h_{abs-g}^{rad}, h_{int}^{conv}, h_{int}^{rad}$.
6. Posteriormente, mediante una subrutina se calcula el número de Nusselt para cada una de las superficies que conforman el canal, y en base a ello se calcularon los coeficientes h_g h_{abs} .

7. Finalmente, se ejecuta el método iterativo Gauss-Seidel para invertir la matriz y así obtener una solución aproximada.
8. A partir de esta pasó, se presentan los distintos condicionales para llegar a un criterio de convergencia. En primera instancia, entra el primer condicional el cual establece, un proceso iterativo del solver n veces en dirección (y) hasta $j = N_y$ para todo i , cuando esté proceso termina se establece como una iteración.
9. El segundo condicional establece un criterio de convergencia espacial con un $\varepsilon = 0.01$ %, de no cumplirlo se repite el paso 8 hasta que el condicional sea satisfecho.
10. Finalmente, se estable un tercer condicional el cual lleva el conteo del paso de tiempo Δt , el condicional se ejecuta hasta que se hayan cumplido los primeros dos criterios sí, aun no se ha cumplido el tiempo de modelación, éste condicional hace que, el proceso iterativo se repita a partir del paso 4 con el nuevo tiempo de lo contrario, imprime y termina.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo implementado al código numérico desarrollado en balances globales en el cual, se puede apreciar el proceso descrito anteriormente. Ver, Figura 2.5.

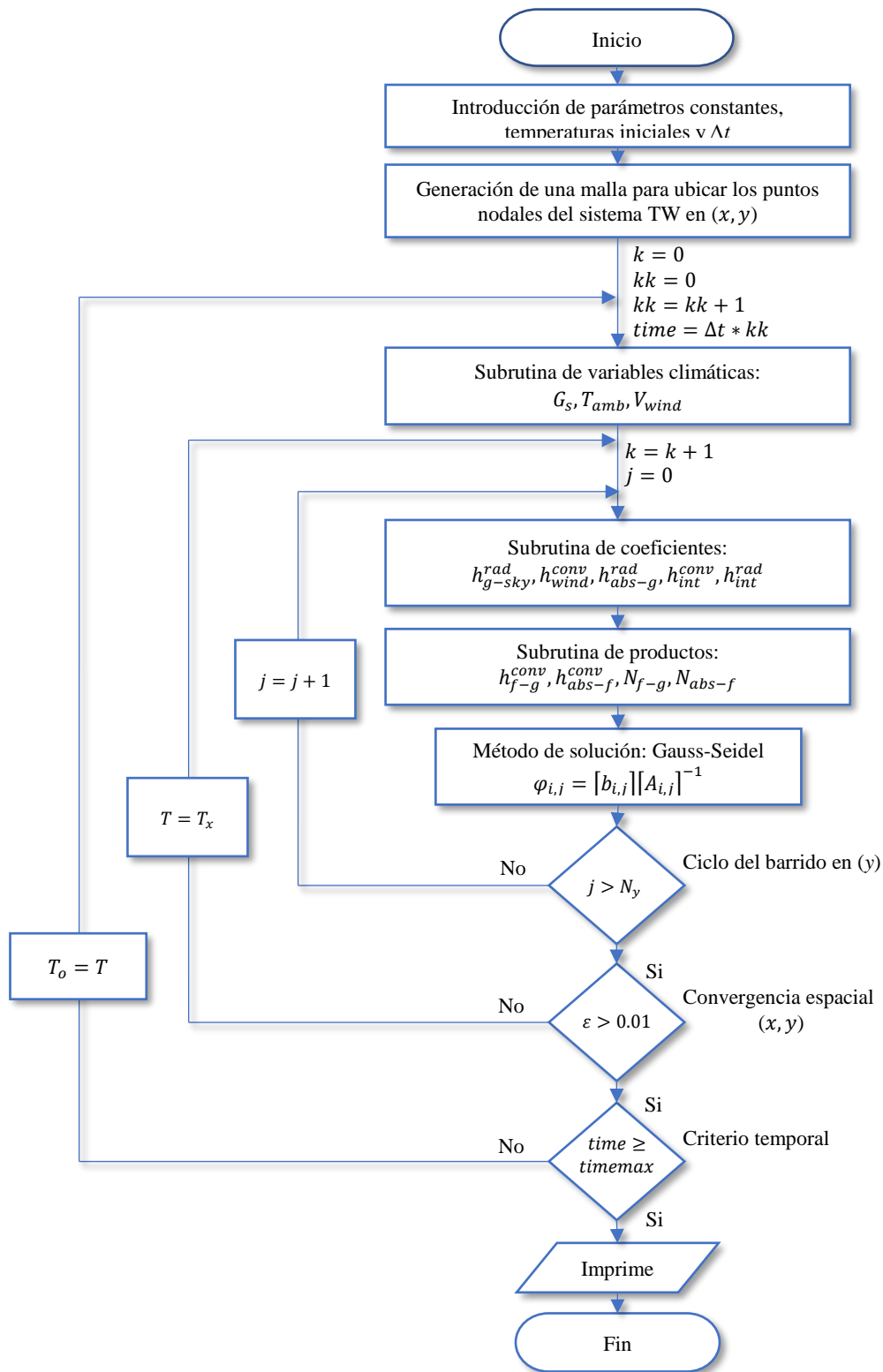


Figura 2.5. Diagrama de flujo del código desarrollado en estado transitorio.

A continuación, se expone el Capítulo 3 donde se aborda la verificación del código numero desarrollado.

CAPÍTULO III

VERIFICACIÓN DEL CÓDIGO NUMÉRICO

En este Capítulo se presenta la verificación del código realizado en el presente trabajo de investigación. Se resolvieron una serie de ejercicios con la finalidad de evaluar el desarrollo adecuado del código numérico del sistema TW. Estos ejercicios comienzan con problemas de conducción de calor y se concluye con la comparación con un trabajo de referencia reportado en la literatura por Ong (2003) el cual corresponde a la transferencia de calor conjugada en una chimenea solar. Finalmente, se presenta un estudio del efecto que existe tanto del número de secciones como del paso de tiempo en el sistema TW.

3.1 Balances globales de energía (BG).

Los balances globales de energía se rigen bajo la primera ley de la termodinámica, también conocida como el principio de conservación de la energía. En ésta se expresa que en el curso del proceso, la energía no se puede crear ni destruir; solo puede cambiar de forma. Por lo tanto, toda pequeña cantidad de energía debe tomarse en cuenta en el curso de un proceso. El proceso de conservación de la energía (o balance de energía) para cualquier sistema que pasa por cualquier proceso se puede expresar como sigue: *el cambio neto en la energía total de un sistema en el curso de un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale en el desarrollo de ese proceso*. Los BG se enfocan en determinar la cantidad de energía que intercambia y acumulada un sistema como resultado de una diferencia de temperatura desde un punto macroscópico.

3.2.1 Conducción unidimensional en estado permanente sujeto a condiciones de fronteras de Robín (No-Lineal) y Dirichlet.

El problema consiste en la conducción de calor en una dimensión en estado permanente de una losa de concreto con una conductividad térmica de ($\lambda = 1.70 \text{ W/m K}$) con un espesor de $L = 0.1 \text{ m}$. El sistema se encuentra sometido a una condición de frontera de Robín (No-lineal) en $x = 0$, y a una condición de Dirichlet en $x = L$. Se observa que el sistema está sometido a un flujo de calor (Q_s) de 750 W en $x = 0$. En esta misma frontera se consideran pérdidas por convección y radiación a un medio exterior. Por otro lado, en $x = L$ se impone una temperatura constante T_B . En la Figura 3.1 se muestra el modelo físico del sistema descrito.

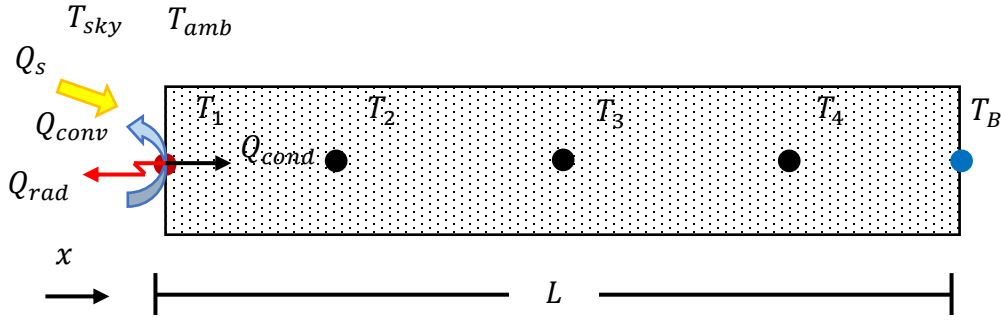


Figura 3.1. Modelo físico de una losa de concreto con condiciones de frontera de Robin (No-Lineal) y Dirichlet.

Para la determinación del perfil de temperaturas, se utilizó el método de BG considerando cinco nodos computacionales. El sistema de ecuaciones resultante se resolvió con el algoritmo de Thomas (TDMA) bajo una filosofía iterativa de Gauss-Seidel. Adicionalmente, se consideraron los siguientes parámetros: $h = 6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, $\varepsilon = 0.90$, $T_{amb} = T_{sky} = 303 \text{ K}$ y $A = 1 \text{ m}^2$. Los flujos de calor de la frontera $x = 0$ están definidos de la siguiente manera: $Q_{conv} = hA(T_1 - T_{amb})$ y $Q_{rad} = \varepsilon\sigma A(T_1 - T_{sky})$. Para verificar la solución numérica, se construyó una solución analítica (T^*) del problema. Esta solución está dada por la Ec. (3.1):

$$T^*(x) = C_1x + C_2 \quad (3.1)$$

donde:

$$C_1 = \frac{T_B - C_2}{L} \quad (3.2)$$

Para determinar C_2 es necesario resolver la siguiente ecuación de cuarto grado:

$$(\varepsilon\sigma L)C_2^4 + (\lambda + hL)C_2 + \left[-(\varepsilon\sigma LT_{sky}^4 + hLT_{amb} + Q_s C_1 L) \right] = 0 \quad (3.3)$$

De esta manera, la solución analítica es:

$$T^*(x) = -280.92x + 325.092, \text{ [K]} \quad (3.4)$$

En la Tabla 3.1 se muestra los valores de la temperatura obtenida mediante BG y de la solución analítica. Se observa que los resultados obtenidos con BG corresponden en su totalidad a los de la solución analítica.

Tabla 3.1. Comparación de la solución analítica vs el método de BG del ejercicio 3.2.1.

Posición x [m]	Solución analítica T [°C]	Presente estudio T [°C]	<i>Dif.</i> [%]
0.000	325.09	325.09	0.00
0.025	318.07	318.07	0.00
0.050	311.05	311.05	0.00
0.075	304.02	304.02	0.00
0.100	297.00	297.00	0.00

Con el propósito de verificar que el algoritmo desarrollado es correcto en el tratamiento de las condiciones de frontera, se realizó un ejercicio de simetría. Éste consiste en resolver el mismo problema, pero invirtiendo las condiciones de frontera. En este sentido, se espera que en esta situación el perfil se invierta de manera simétrica con respecto al problema original.

En la Figura 3.2 se muestran los resultados del ejercicio de simetría, en donde se observa que efectivamente los perfiles son simétricos. Así, se comprueba que el tratamiento de las condiciones de frontera en ambas es correcto.

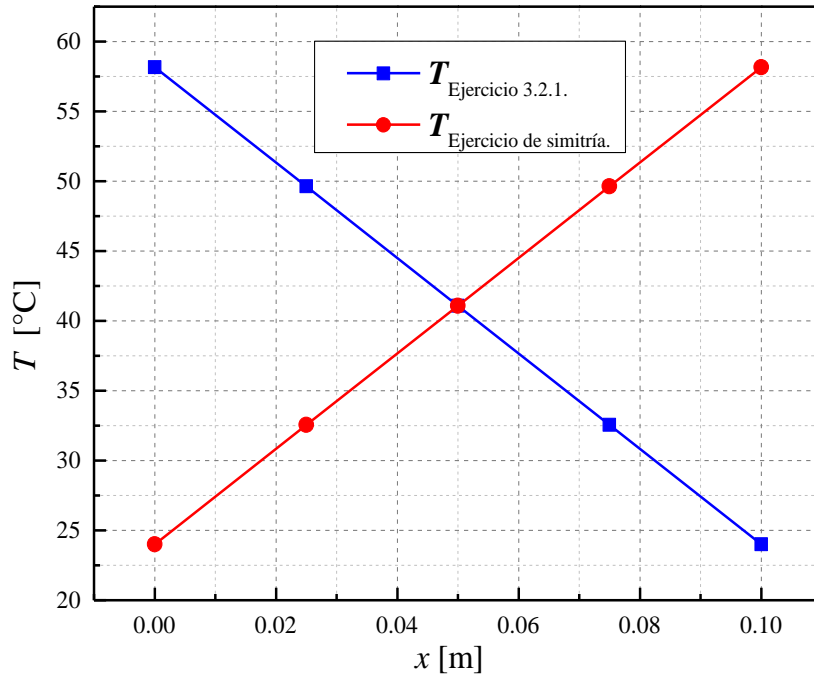


Figura 3.2. Estudio de simetría del ejercicio 3.2.1.

3.2.2 Conducción unidimensional en estado transitorio.

Se plantea un problema de conducción unidimensional en la cual solo existe la transferencia de calor por conducción sin generación de calor, en estado transitorio $T(x, t)$, en una losa con un espesor de $L = 0.10$ m. Se consideró un estudio para cada uno de los siguientes materiales: Concreto, Plomo y Aluminio. El sistema se encuentra sometido a condiciones de fronteras de Dirichlet. $T_A = 303$ K y $T_B = 297$ K con una condición inicial $T_0 = 313$ K. Con $\Delta t = 1$ s. En la Figura 3.3 se muestra el modelo físico correspondiente.

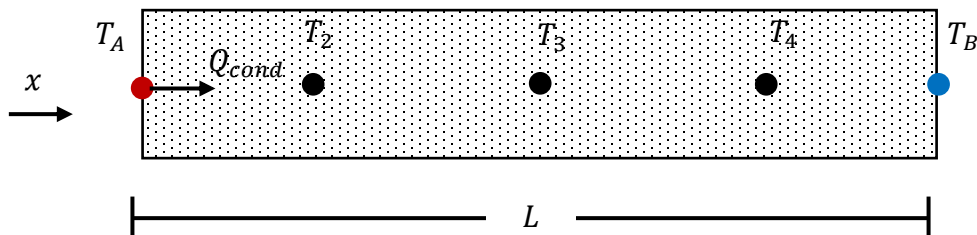


Figura 3.3. Modelo físico de una losa convencional homogénea.

El sistema fue resuelto mediante el método de BG considerando cinco nodos computacionales donde el sistema de ecuaciones resultante se resolvió a través del algoritmo TDMA iterativo. Las propiedades termofísicas de los materiales considerados (Xamán y Gijón-Rivera, 2016) se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Propiedades de los materiales considerados en el ejercicio 3.2.2.

Material	Conductividad Térmica [W/m K]	Densidad [Kg/m ³]	Calor específico [J/ kgK]
Concreto	1.70	2240	880
Plomo	35.30	11340	129
Aluminio	237	2702	903

Para propósitos de comparación, se utilizó la solución analítica del problema (Ozisik,1976).

$$T^*(x,t) = T_A + (T_B - T_A) \frac{x}{L} + \sum_{m=1}^{\infty} \left[f^*(x) \frac{2}{\beta_m x} [1 - \cos(\beta_m L)] \text{sen}(\beta_m x) e^{-\alpha \lambda t} \right] \quad (3.5)$$

$$f^*(x) = F(x) - T_A - (T_B - T_A) \frac{x}{L} \quad (3.6)$$

$$\beta_m = m\pi / L \quad (3.7)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (3.8)$$

En la Figura 3.4 se presenta un diagrama auxiliar para la realización de los BG para cada uno de los puntos computacionales. Esto con el propósito de facilitar la realización de los BG.

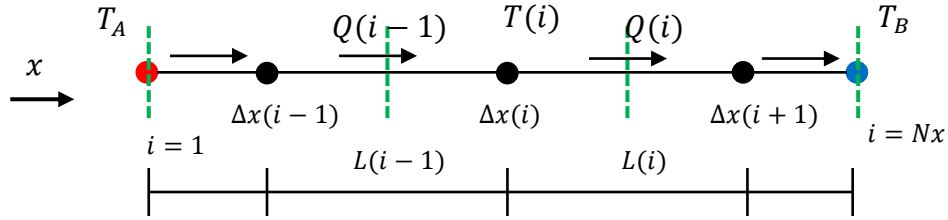


Figura 3.4. Diagrama auxiliar para implementación de BG en cada nodo.

Implementado el método de BG a cada nodo, se obtiene la siguiente relación:

$$G_i = \frac{A\lambda}{L(i)} \quad i = 1, 2, 3 \dots Nx \tag{3.9}$$

De esta manera el sistema resultante es el siguiente:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -G_1 & \frac{\rho C_p A \delta x_2}{\Delta t} + G_1 + G_2 & -G_2 & 0 & 0 \\ 0 & -G_2 & \frac{\rho C_p A \delta x_3}{\Delta t} + G_2 + G_3 & -G_3 & 0 \\ 0 & 0 & -G_3 & \frac{\rho C_p A \delta x_4}{\Delta t} + G_3 + G_4 & -G_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

Matriz de Coeficiente
[A_{i,j}]

$$\underbrace{\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix}}_{\text{Vector Incognita } [\phi_j]} \stackrel{t+\Delta t}{=} \underbrace{\begin{bmatrix} T_A \\ \frac{\rho C_p A \delta x_2}{\Delta t} T_2^t \\ \frac{\rho C_p A \delta x_3}{\Delta t} T_3^t \\ \frac{\rho C_p A \delta x_4}{\Delta t} T_4^t \\ T_B \end{bmatrix}}_{\text{Vector término independiente } [B_j]}$$

En las Figuras 3.5-3.7 se presentan los perfiles de temperatura obtenidos mediante el método de BG y comparándolos contra su solución analítica para cada uno de los materiales considerados, en diferentes instantes de tiempo y hasta alcanzar el estado permanente.

En la Figura 3.5 se muestra el perfil de temperatura de la losa de concreto. Se observa que los resultados obtenidos con BG corresponden de manera aceptable con la solución analítica, encontrándose una diferencia máxima de 2 % para el cuarto nodo computacional para $t = 500$ s.

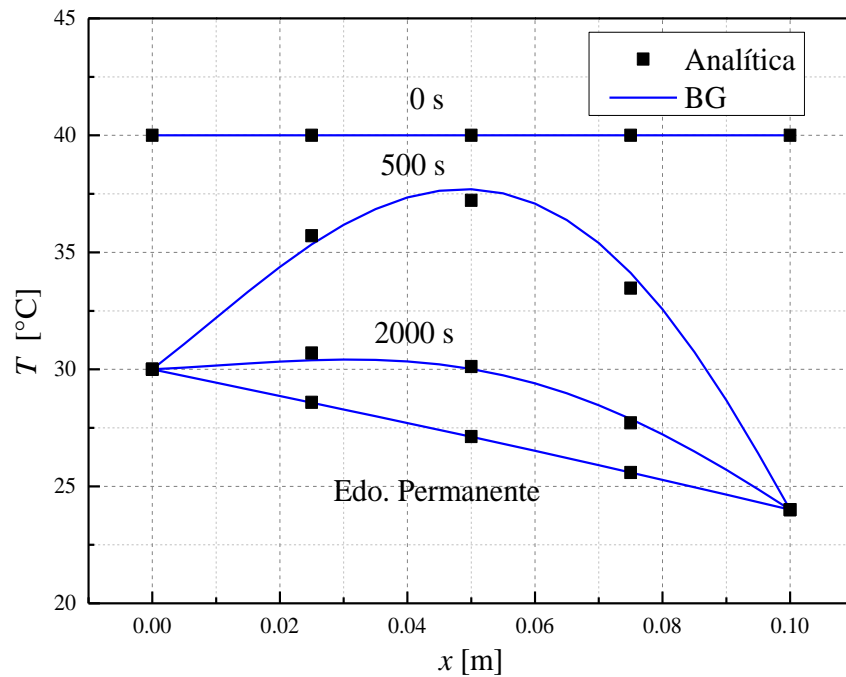


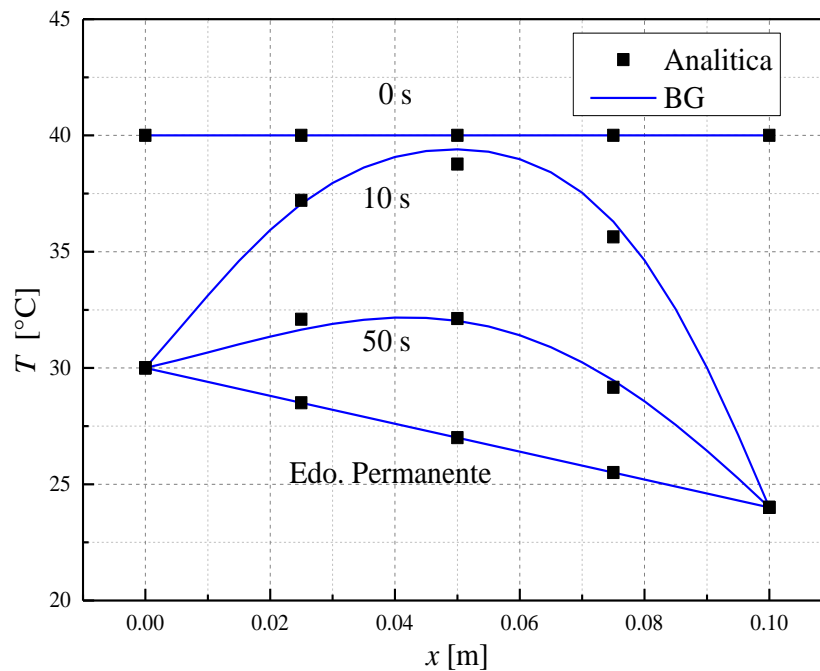
Figura 3.5. Comparación de la evaluación del perfil de temperatura para el concreto.

En la Tabla 3.3 se muestran los valores de temperatura obtenidos para una losa de concreto mediante el método de BG para distintos instantes de tiempo hasta alcanzar el estado permanente para $t = 5994$ s.

Tabla 3.3. Valores de temperatura de la losa de concreto para diferentes instantes del tiempo.

Posición x [m]	Temperatura Punto nodal	$t=0$ s T [°C]	$t=500$ s T [°C]	$t=2000$ s T [°C]	$t=5994$ s T [°C]
0.000	T_A	40.00	30.00	30.00	30.00
0.025	T_2	40.00	35.71	30.69	28.58
0.050	T_3	40.00	37.22	30.11	27.12
0.075	T_4	40.00	33.46	27.71	25.58
0.100	T_B	40.00	24.00	24.00	24.00

En la Figura 3.6 se muestra el comportamiento del perfil temperatura a través de una losa de plomo en la cual se comparan los resultados obtenidos del problema mediante el método de BG contra su solución analítica. Se observa que la solución a través del método de BG corresponde a la solución analítica encontrando una diferencia máxima de 1.8 % para el cuarto nodo computacional para $t = 10$ s.

**Figura 3.6.** Comparación de la evaluación del perfil de temperatura para el plomo.

En la Tabla 3.4. Se muestran los resultados obtenidos para la losa de plomo mediante el método de BG para distintos instantes de tiempo hasta que el sistema alcanzó su estado permanente cuando $t = 366$ s.

Tabla 3.4. Valores de temperatura de la losa de plomo para diferentes instantes del tiempo.

Posición x [m]	Temperatura Punto nodal	$t = 0$ s T [$^{\circ}C$]	$t = 10$ s T [$^{\circ}C$]	$t = 50$ s T [$^{\circ}C$]	$t = 366$ s T [$^{\circ}C$]
0.000	T_A	40.00	30.00	30.00	30.00
0.025	T_2	40.00	37.21	32.09	28.50
0.050	T_3	40.00	38.76	32.12	27.00
0.075	T_4	40.00	35.63	29.16	25.50
0.100	T_B	40.00	24.00	24.00	24.00

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos mediante su solución analítica, así como los obtenidos por el método BG para una losa de aluminio. En la Figura 3.7. se muestra el comportamiento de la temperatura a través del muro de aluminio para distintos instantes de tiempo hasta alcanzar su condición de estado de equilibrio térmico. Se observa que los resultados obtenidos mediante el método de BG presentan concordancia con respecto a su solución analítica presentando una diferencia máxima de 1.8 % en el segundo nodo computacional para $t = 10$ s.

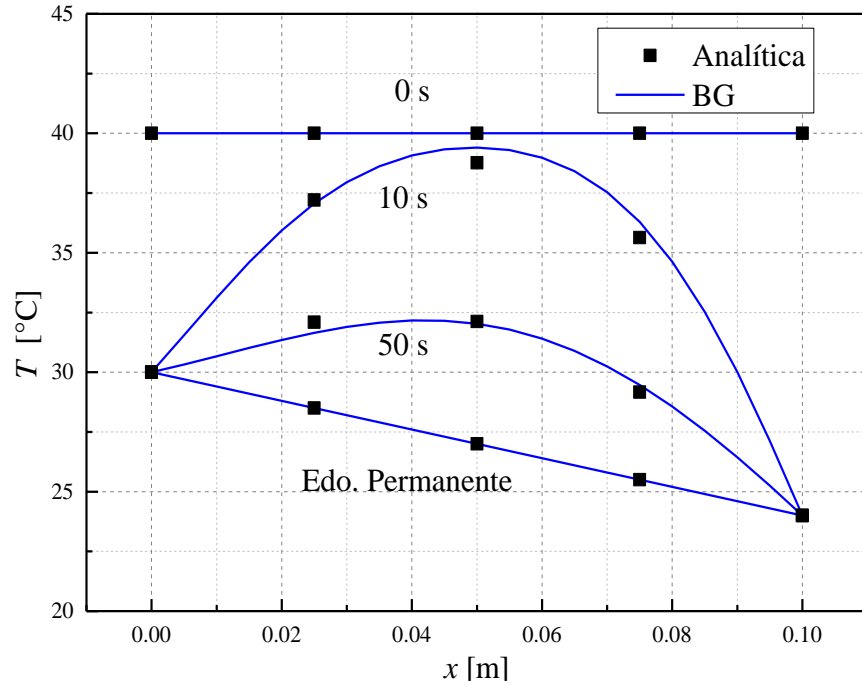


Figura 3.7. Comparación de la evaluación del perfil de temperatura para el aluminio.

En la Tabla 3.5 se muestran los resultados obtenidos para la losa de aluminio mediante el método de BG para distintos instantes de tiempo hasta alcanzar el estado permanente para $t = 110$ s.

Tabla 3.5. Valores de temperatura de la losa de aluminio para diferentes instantes del tiempo.

Posición x [m]	Temperatura Punto nodal	$t = 0$ s T [°C]	$t = 5$ s T [°C]	$t = 10$ s T [°C]	$t = 110$ s T [°C]
0.000	T_A	40.00	30.00	30.00	30.00
0.025	T_2	40.00	35.51	33.06	28.50
0.050	T_3	40.00	36.82	33.52	27.00
0.075	T_4	40.00	33.28	30.26	25.50
0.100	T_B	40.00	24.00	24.00	24.00

3.2.3 Comportamiento térmico de un canal vertical (convección natural).

El modelo que se implementó es el presentado por Ong, 2003. La geometría de este modelo es muy similar al concepto de muro Trombe. Este modelo se construyó con el método de BG. De los balances se obtuvo un sistema de ecuaciones algebraicas que representan el modelo matemático de una chimenea solar de un solo canal. El modelo matemático permite determinar la variación de la temperatura en cada uno de los elementos (vidrio, fluido-Aire, absorbedor) que constituyen una chimenea solar y las pérdidas de calor al interior de la habitación.

En la Figura 3.8 se muestra el modelo físico de una chimenea solar. Este sistema consiste de una pared semitransparente normalmente de vidrio (colector), una superficie pintada de negro para mejorar su absorptividad (absorbedor), un espacio de aire formado entre el colector y el absorbedor, y en la parte posterior se coloca una pared de aislante.

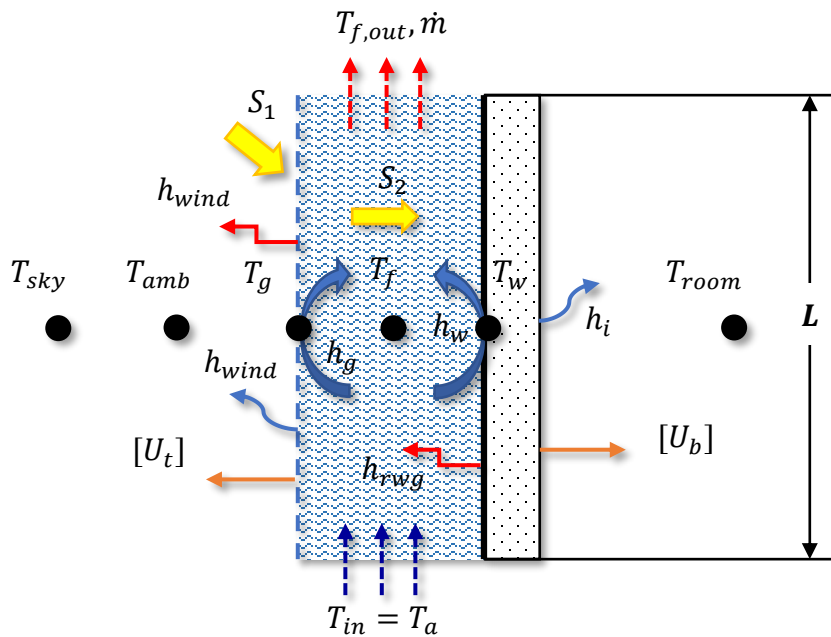


Figura 3.8. Modelo físico de la chimenea solar en estado permanente.

En la Figura 3.9 se muestra el diagrama resistivo térmico que permite ilustrar de una manera más simplificada a los mecanismos de transferencia involucrados en el sistema TW.

Al realizar el balance sobre cada uno de los puntos mostrados en la Figura 3.9, se obtiene el modelo matemático el cual consiste de un sistema de ecuaciones (3.11). La resolución del sistema de ecuaciones se realizó mediante un código numérico en FORTRAN.

$$\begin{bmatrix} (h_g + h_{r_{wg}} + U_t) & -h_g & -h_{r_{wg}} \\ -h_g & (h_g + h_w + M) & -h_w \\ -h_{r_{wg}} & -h_w & (h_w + h_{r_{wg}} + U_b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_g \\ T_f \\ T_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_t T_a + S_1 \\ M T_{f.in} \\ S_2 + U_b T_{room} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

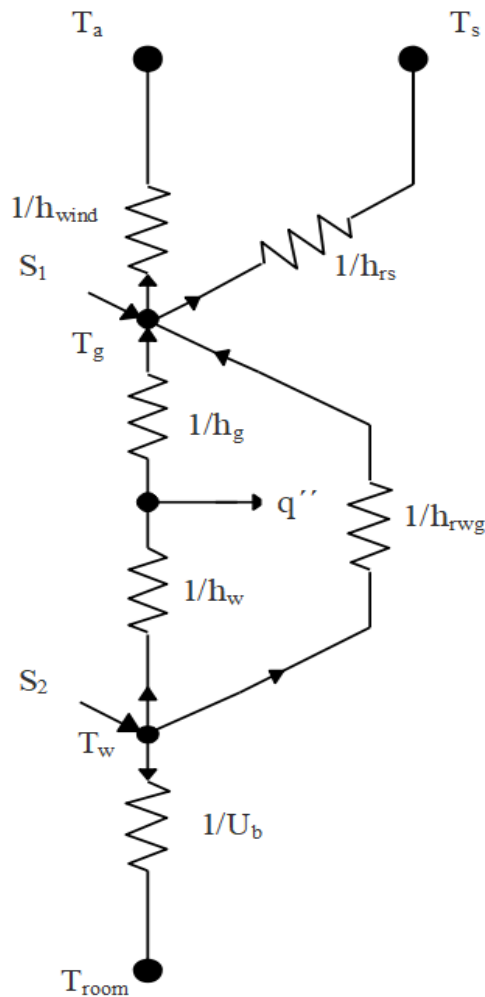


Figura 3.9. Diagrama térmico resistivo de una chimenea solar Edo. permanente.

Para la solución de este modelo, se estableció la siguiente metodología descrita en siete pasos:

Paso 1.- Declaración de los parámetros constantes, inicialización del campo inicial de temperatura.

Paso 2.- Se genera un arreglo de puntos nodales mediante una malla en dirección $[x]$, se establece un punto nodal por elemento y se divide en secciones pequeñas en dirección $[y]$, donde el modelo matemático es válido.

Paso 3.- Se calculan los siguientes coeficientes que se consideraron como constantes: temperatura de cielo $[T_{sky}]$, coeficiente convectivo hacia el interior de la habitación $[h_i]$, coeficiente de radiación solar absorbida para cada una de las superficies $[S_1, S_2]$ y coeficientes de pérdidas de calor hacia el interior de la habitación $[U_b]$.

Paso 4.- A partir de este punto comienza el proceso iterativo para el número de secciones en dirección $[y]$. Se calculan los coeficientes que dependen de la variable temperatura: $[h_w, h_g, h_{rwg}, M, U_t]$.

Paso 5.- Se ejecuta el método de solución implementado "JACOBI". Se compara un criterio de convergencia, de acuerdo con la literatura los autores recomiendan un valor de 0.01 %.

Paso 6.- Finalmente, si el criterio de convergencia es satisfecho se renombra el campo de la variable temperatura con el nuevo campo de la iteración resiente y el contador de las secciones en dirección $[y]$ quedaría de la siguiente forma: $[j = j + 1]$ mientras que, si no cumple se continúa iterando hasta que el criterio sea satisfecho.

Paso 7.- Imprime y finaliza el programa.

Finalmente, en la Figura 3.10 se presenta el diagrama de flujo implementado al código numérico.

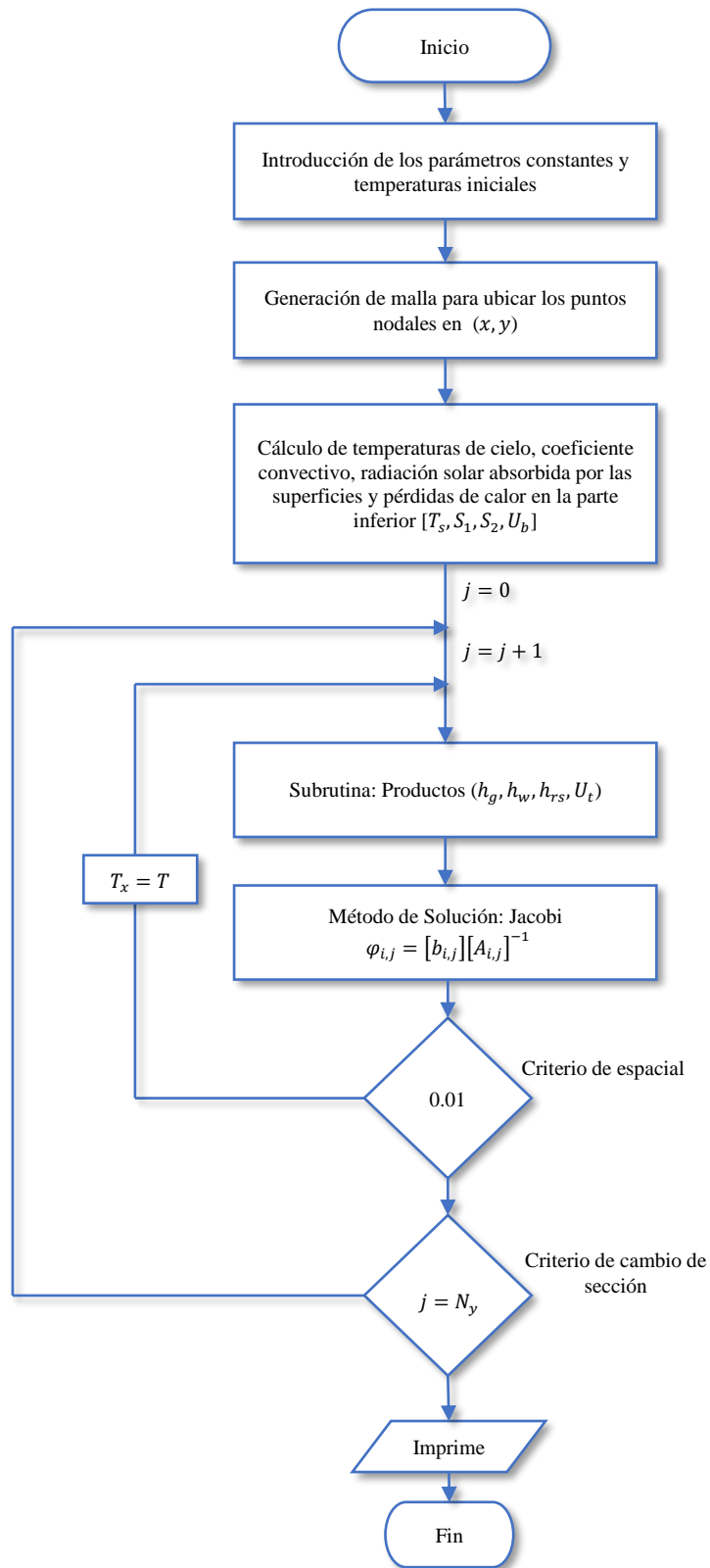


Figura 3.10 Diagrama de flujo implementado para un canal vertical Ong, 2003.

Se compararon los resultados obtenidos con el código desarrollado contra los resultados presentados por Ong, 2003 para la chimenea solar. A continuación, se muestran las Tablas 3.6 y 3.7 donde se presentan los parámetros utilizados.

Tabla 3.6. Parámetros que utilizó Ong, 2003 para las Figuras 3.11 y 3.12.

$G_s = 400 \text{ W/m}^2$	Irradiación solar
$A_o = A_i = 0.025 \text{ m}^2$	Áreas de entrada y salida.
$d = 0.145 \text{ m}$	Separación entre las placas paralelas del canal.

Tabla 3.7. Parámetros que utilizó Ong, 2003 para las Figuras 3.13 y 3.14.

$L = 2 \text{ m}$	Altura de la chimenea.
$A_o = A_i = 0.025 \text{ m}^2$	Áreas de entrada y salida.
$d = 0.145 \text{ m}$	Separación entre las placas paralelas del canal.

En la Figura 3.11 se observa una comparación entre la distribución de las temperaturas para cada uno de los distintos elementos que conforman la chimenea en función de la longitud del sistema. Se puede observar un comportamiento muy similar entre el presente estudio y el de Ong, 2003. Se observa que, el absorbedor es el elemento que presenta un mayor incremento en su temperatura con respecto a los demás elementos que constituyen el sistema. Esto se debe, a la función del absorbedor que es recibir toda la energía que llega a través de la cubierta de vidrio para ser absorbida y convertida en energía térmica y volver a emitirla hacia el fluido en forma de calor mientras que, la cubierta de vidrio bloquea esa energía térmica provocando un efecto invernadero que, junto a todo lo anterior provocan un movimiento ascendente del fluido por el cambio de densidades en ciertas zonas del canal.

En la Figura 3.12, se presentan las eficiencias y los flujos máxicos obtenidos de los perfiles de las temperaturas de la Figura 3.11. Como puede observar de manera cualitativa los resultados presentados por Ong, 2003 y los obtenidos por el presente estudio presentan un comportamiento muy similar.

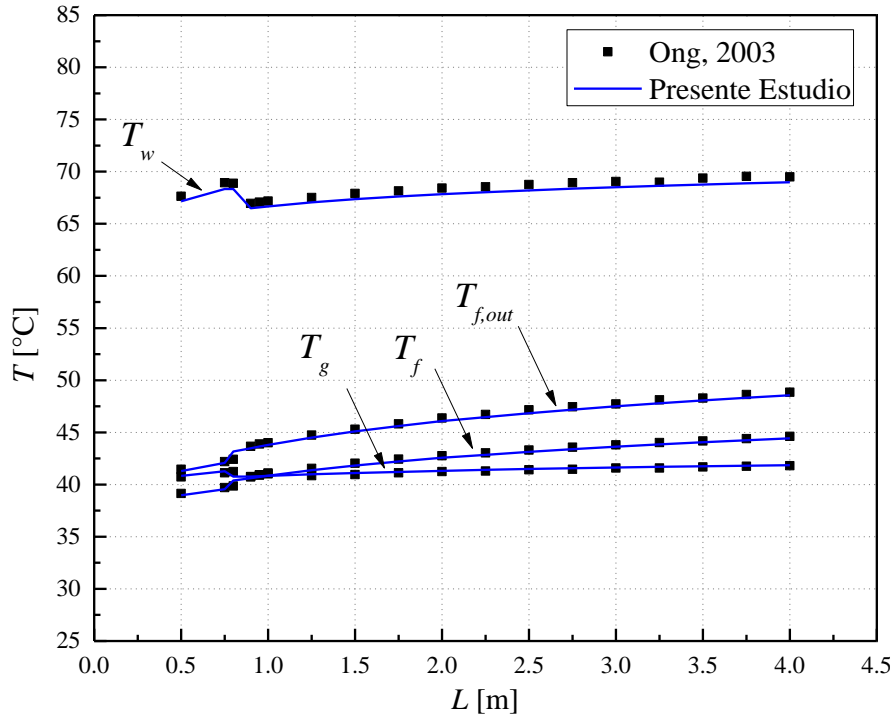


Figura 3.11. Variación de la temperatura en función de la altura de la chimenea Ong, 2003.

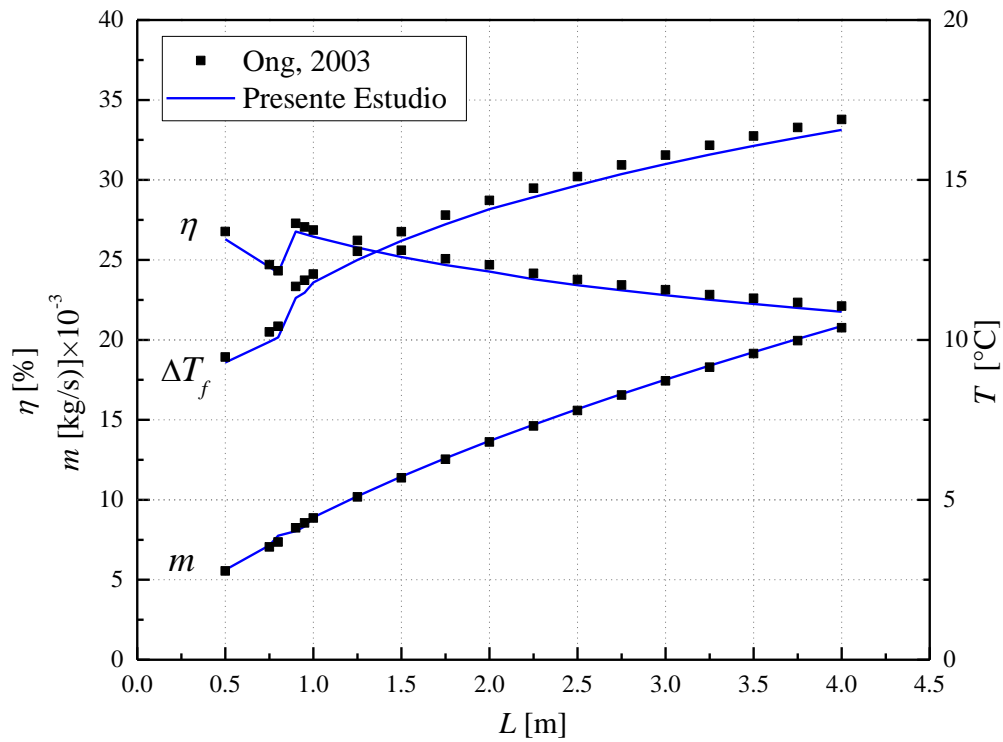


Figura 3.12. Eficiencia y flujo másico en función de la altura de la chimenea Ong, 2003.

De estos valores de eficiencia y flujos másicos se puede decir que, conforme se aumenta la altura de la chimenea la eficiencia desciende y el flujo másico aumenta.

En la Figura 3.13. Se presenta el desempeño de la chimenea presentada por (Ong 2003) para diferentes valores de irradiación solar, este intervalo va desde 100 hasta 600 W/m² como era de esperarse el absorbedor presenta el mayor incremento de temperatura, esto debido a lo mencionado anteriormente de la Figura 3.11. De manera cualitativa puede observarse que el comportamiento presentado en entre (Ong 2003) y el presente estudio es muy similar.

Finalmente, en la Figura 3.14 se presentan los perfiles de la eficiencia y flujo másico para los datos presentados en la Figura 3.13. Se puede observar que la eficiencia y el flujo másico se incrementan en función de la radiación solar incidente, esto por el aumento de la temperatura en el sistema por el aumento de la radiación solar. De forma cualitativa se observan comportamientos entre (Ong 2003) y el presente estudio muy similar.

Con base en los resultados mostrados entre (Ong 2003) y el presente estudio se puede decir que, de manera cualitativa la comparación de la distribución de la temperatura así mismo como la eficiencia y flujo másico prácticamente se enciman. Por lo tanto, se puede decir que el código da resultados satisfactorios.

A continuación, se realiza la comparación cuantitativa de los resultados presentados por (Ong 2003). Para ello se eligieron los resultados presentados en la Figura 3.13.

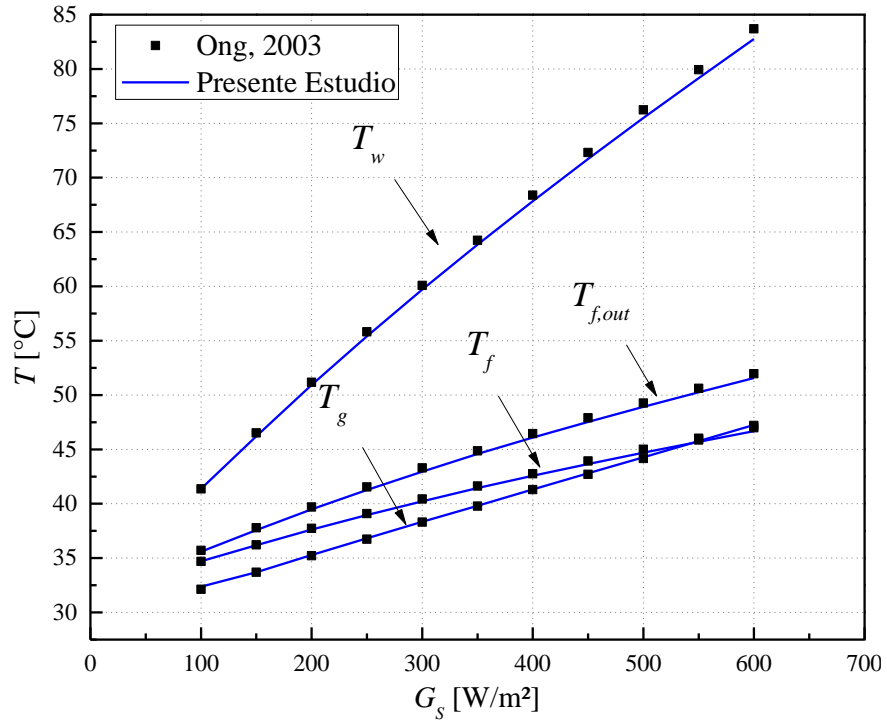


Figura 3.13. Distribución de las temperaturas en función de la radiación solar incidente Ong, 2003.

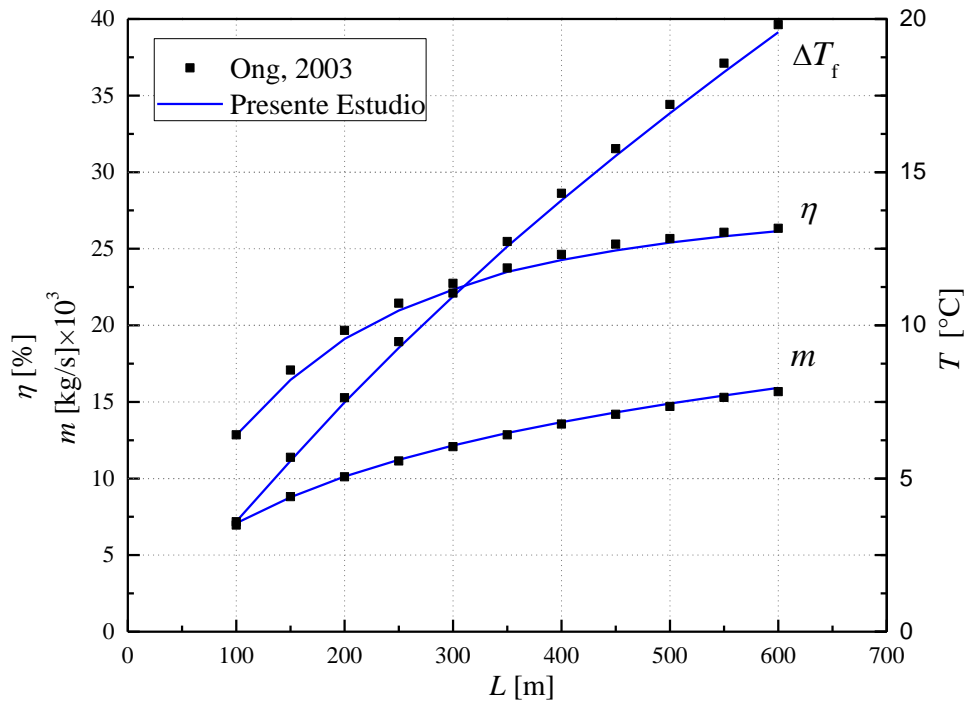


Figura 3.14. Eficiencia y flujo másico en función de la radiación solar incidente Ong, 2003.

La comparación cuantitativa de los resultados obtenidos se presenta en la Tabla 3.8. la diferencia relativa porcentual para cada uno de los elementos de la chimenea solar se muestra en la misma tabla. Se encontró una diferencia máxima porcentual de 1.12 %. Ésta corresponde al caso de $G_s=600 \text{ W/m}^2$ en la temperatura de la superficie absorbadora (T_w). Con base en los resultados, se puede aseverar que el código numérico desarrollado reproduce satisfactoriamente los resultados presentados por Ong, 2003 y de este modo, garantiza la solución correcta de la transferencia de calor conjugada en el sistema TW.

Tabla 3.8. Comparación de los resultados para la Figura 3.13 entre Ong, 2003 y el presente estudio.

G_s [W/m ²]	Presente Estudio			Ong, 2003		
	T_g [°C]	T_f [°C]	T_w [°C]	T_g [°C]	T_f [°C]	T_w [°C]
100	32.37 (0.78)	34.71 (0.03)	41.38 (0.05)	32.12	34.70	41.36
200	35.28 (0.17)	37.62 (0.32)	50.92 (0.49)	35.22	37.74	51.17
300	38.34 (0.08)	40.21 (0.57)	59.70 (0.65)	38.31	40.44	60.09
400	41.31 (0.02)	42.57 (0.42)	67.84 (0.79)	41.30	42.75	68.38
500	44.28 (0.25)	44.70 (0.69)	75.49 (0.98)	44.17	45.01	76.24
600	47.25 (0.57)	46.68 (1.10)	82.76 (1.12)	46.98	47.20	83.70

Valores en () corresponden a la diferencia relativa porcentual.

3.2.4. Estudio del efecto del número de secciones

Se presenta el estudio de secciones en dirección y . En primera instancia se presentan los parámetros fijos utilizados: irradiación solar, velocidad del viento y temperatura ambiente. Posteriormente, se determina el número de secciones en que se dividirá el sistema muro Trombe en dirección y .

El estudio de secciones determina el número de secciones óptimo, en el cual los resultados no muestren cambios significativos y por ende sean independientes al número de secciones. A continuación, se presentan los parámetros climáticos empleados en el estudio de secciones. Para ello, se eligió un valor de irradiación solar 778.42 W/m^2 , temperatura ambiente de $16.2 \text{ }^\circ\text{C}$ y la velocidad del viento exterior de 0.73 m/s . Estos datos climáticos pertenecen a las 5:00 p.m. del 18 de enero del año 2014 de la ciudad de Tulancingo, Hidalgo.

Para determinar el número de secciones óptimo se comenzó dividiendo la altura del canal en 5 secciones posterior se probaron 10 secciones y así sucesivamente hasta donde la variable temperatura no presenta cambios significativos en la solución en estado permanente del sistema de muro Trombe. Para ello, se determinó un campo inicial de temperaturas siendo el valor de la temperatura ambiente.

En la Tabla 3.9, se presenta el concentrado de todas las corridas realizadas para el estudio de secciones en dirección y. Donde se muestra el error relativo porcentual para cada uno de los diferentes números de secciones. Se consideró, un criterio para el cambio de la variable temperatura menor al 1%.

Con base al criterio se observa que, la solución del sistema de muro Trombe se obtiene con un número de secciones de 5×15 . Como se observa, el valor de temperatura para la pared semitransparente se mantiene $35.71 \text{ }^\circ\text{C}$, el fluido alcanza $33.26 \text{ }^\circ\text{C}$ y el absorbedor llega hasta $72.04 \text{ }^\circ\text{C}$.

Si, aumentamos el número de secciones se observa que, el valor de temperatura de la pared semitransparente se mantiene en $35 \text{ }^\circ\text{C}$ mientras que, la temperatura en el fluido presenta un comportamiento oscilatorio, pero se mantiene en $33 \text{ }^\circ\text{C}$ y el absorbedor mantiene un comportamiento oscilatorio aproximado de $71\text{-}72 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tabla 3.9. Estudio de secciones en dirección y del sistema de muro Trombe.

No. Secciones	T_g^{ave} [°C]	T_f^{ave} [°C]	T_{abs}^{ave} [°C]	<i>Dif.</i> [%]	<i>Dif.</i> [%]	<i>Dif.</i> [%]
5	35.64	32.56	72.39	---	---	---
10	35.74	33.53	71.90	0.28	2.89	0.68
15	35.71	33.26	72.04	0.08	0.80	0.21
20	35.73	33.59	71.86	0.07	0.96	0.25
25	35.64	33.30	72.07	0.26	0.86	0.28

Como se observa estas variaciones son menores al 1%. Por lo tanto, se establece que a partir de número de secciones 5×15 ya no existen variaciones significativas en la solución del sistema de muro Trombe.

3.2.5 Estudio del efecto del paso de tiempo.

Establecido el número de secciones, se procede a realizar la dependencia temporal esto consiste variar el paso de tiempo para determinar el paso de tiempo óptimo hasta donde la solución alcanza un comportamiento dinámico constante en el tiempo o dependiendo del fenómeno también se dice que alcanza un estado permanente oscilatorio.

Al abordar problemas donde se requiera observar la evolución del sistema en el tiempo es necesario realizar un estudio de dependencia de malla temporal. Esto se debe a que el modelo matemático que representa la contribución del tiempo es un modelo diferencial, por lo tanto, fue discretizado mediante el esquema totalmente implícito, por tener la peculiaridad de ser condicionalmente estable, pero tiene un error de truncamiento de primer orden con respecto al tiempo, debido a esto, requiere pasos de tiempo pequeños para aseverar la exactitud de los resultados.

Dado que, se pretende evaluar el sistema de muro Trombe para condiciones climáticas de México, se eligió la Ciudad de Tulancingo Hidalgo por su tipo de clima normalmente frío.

Los datos obtenidos fueron cada 10 min. Se eligió el día más frío de todo el año que corresponde al 18 de enero. A continuación, se presenta los datos climáticos en intervalos de una 1 h. para el día seleccionado. Para percibir la liberación de la energía del muro masivo se consideró, tomar a partir de la primera hora que hubiera radiación solar siendo a las 7:00 a.m. del día más frío hasta las 7:00 a.m. del siguiente, de este modo, el sistema interactúa con las condiciones climáticas del día más frío para posteriormente, durante el periodo nocturno liberar la energía almacenada.

Los datos que corresponden a la radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento se muestran en la Tabla A.1 del Anexo A. La radiación solar fue proyectada sobre la superficie vertical Sur. Por otro lado, dado que la velocidad del viento presenta un comportamiento irregular, se optó por usar datos promedios de cada hora.

Así, se generaron funciones que representen de manera continua el comportamiento de las variables climáticas a través del tiempo. Para ello se realizó un análisis de datos para general una función continua para las condiciones climáticas. En la Tabla A.3 del Anexo A, se muestran las funciones para la radiación solar y temperatura ambiente.

En las Figuras 3.15 y 3.16 se presenta el comportamiento de la radiación solar y la temperatura ambiente, así como las curvas obtenidas mediante el ajuste de las funciones para cada una de ellas. Se puede concluir que las funciones se ajustan correctamente a los datos de la G_s y T_{amb} .

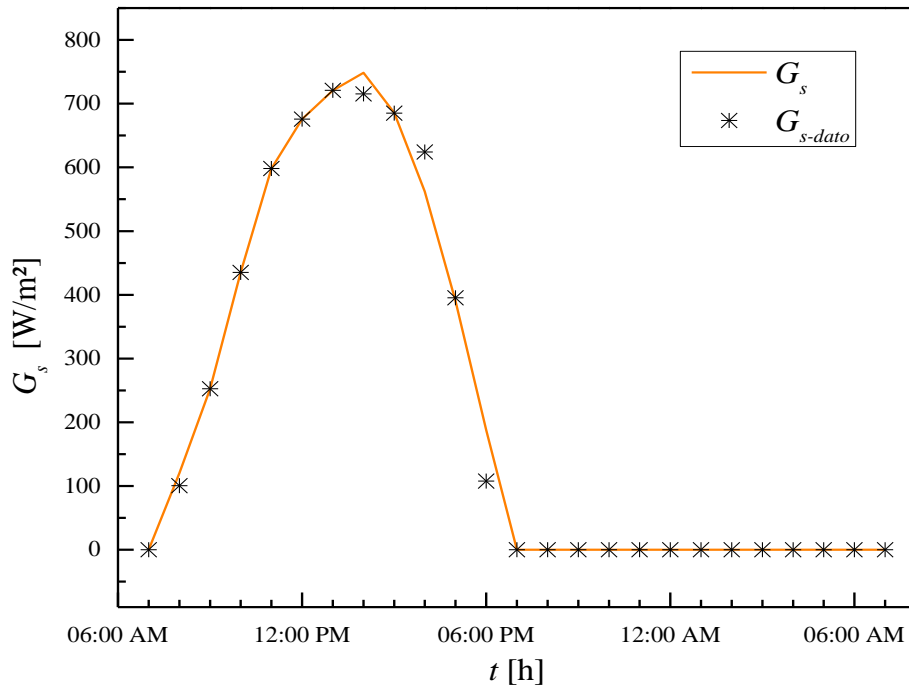


Figura 3.15. Comportamiento de la radiación solar del día más frío de Tulancingo, Hidalgo.

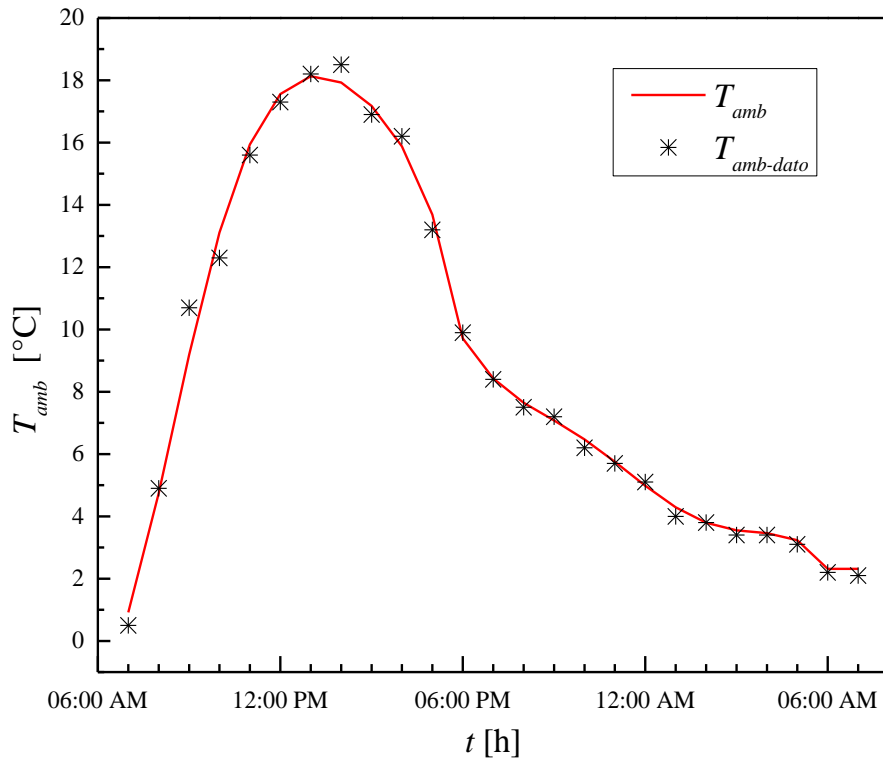


Figura 3.16. Comportamiento de la temperatura ambiente del día más frío de Tulancingo, Hidalgo.

En las Figuras 3.17, 3.18 y 3.19, se presentan los resultados de manera cualitativa para las temperaturas promedio para la pared de vidrio, fluido y absorbedor para distintos Δt respectivamente. Se observa el comportamiento térmico para cada uno de los elementos del sistema muro Trombe para distintos pasos de tiempo para todo el día frío de modelación.

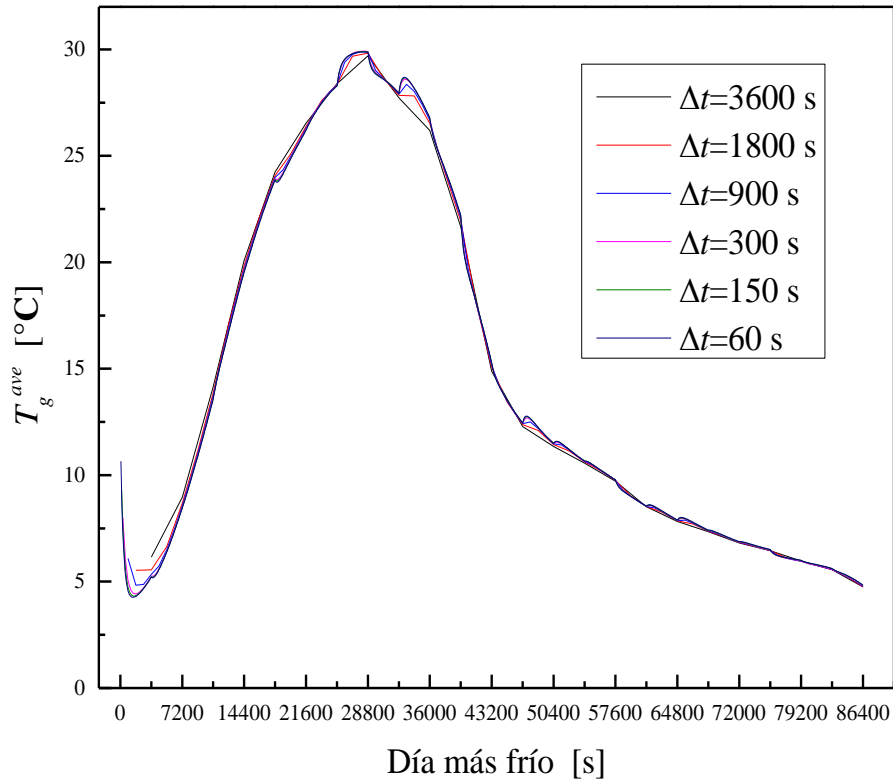


Figura 3.17. Temperatura promedio del vidrio para distintos pasos de tiempo Δt .

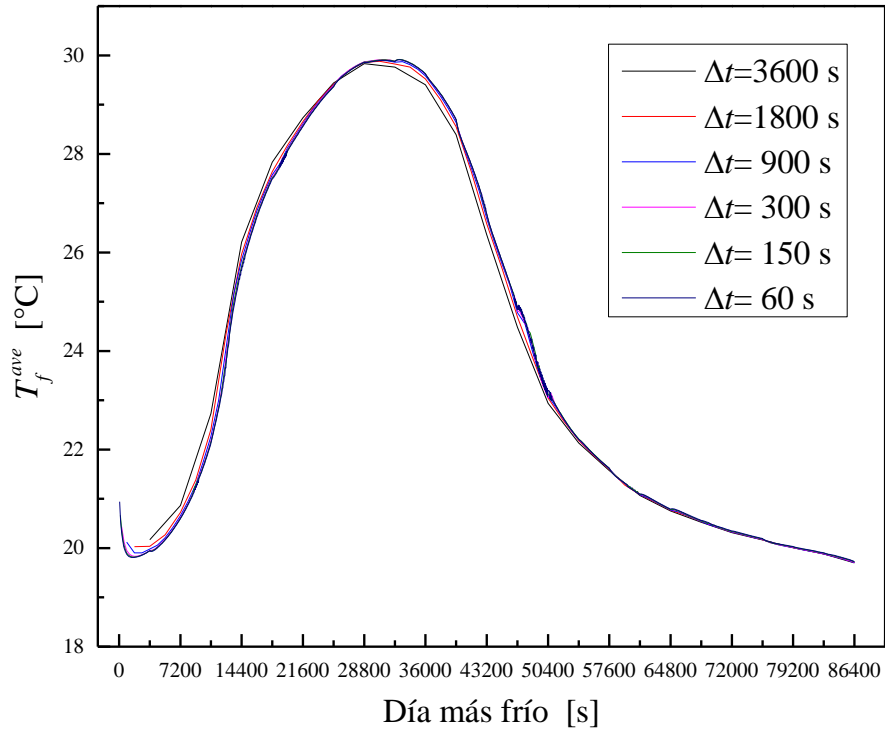


Figura 3.18. Temperatura promedio del fluido para distintos pasos de tiempo Δt .

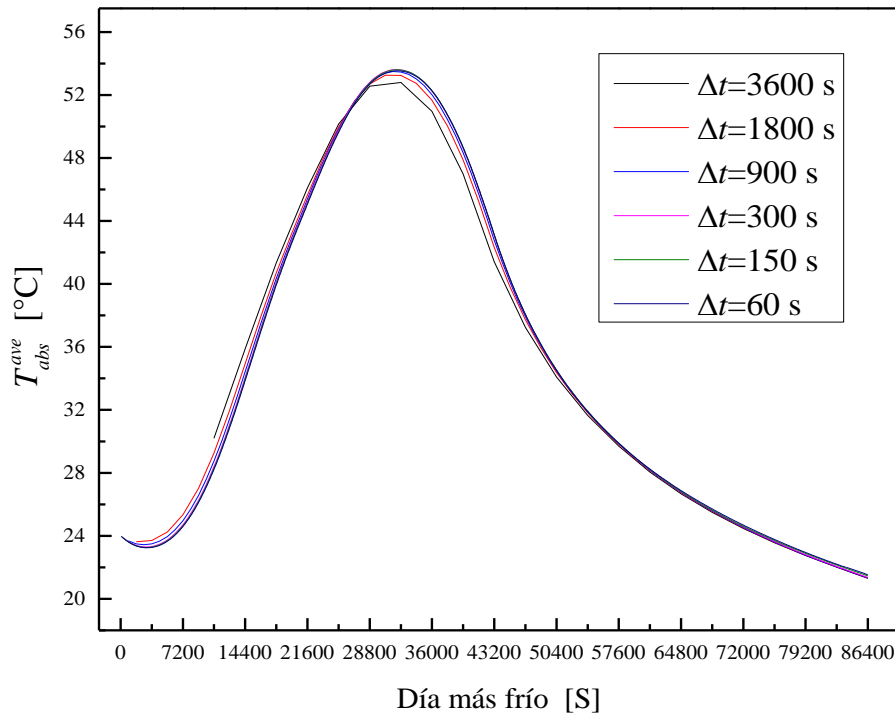


Figura 3.19. Temperatura promedio del absorbedor para distintos pasos de tiempo Δt .

Como se puede apreciar de manera cualitativa para pasos de tiempo menor a un $\Delta t < 60$ s, no se perciben cambios significativos en el comportamiento de los elementos que conforman el sistema de muro Trombe. Para determinar el paso de tiempo óptimo se obtuvo el flujo de calor promedio hacia el interior de la habitación para los distintos pasos de tiempo, ver Figura 3.20.

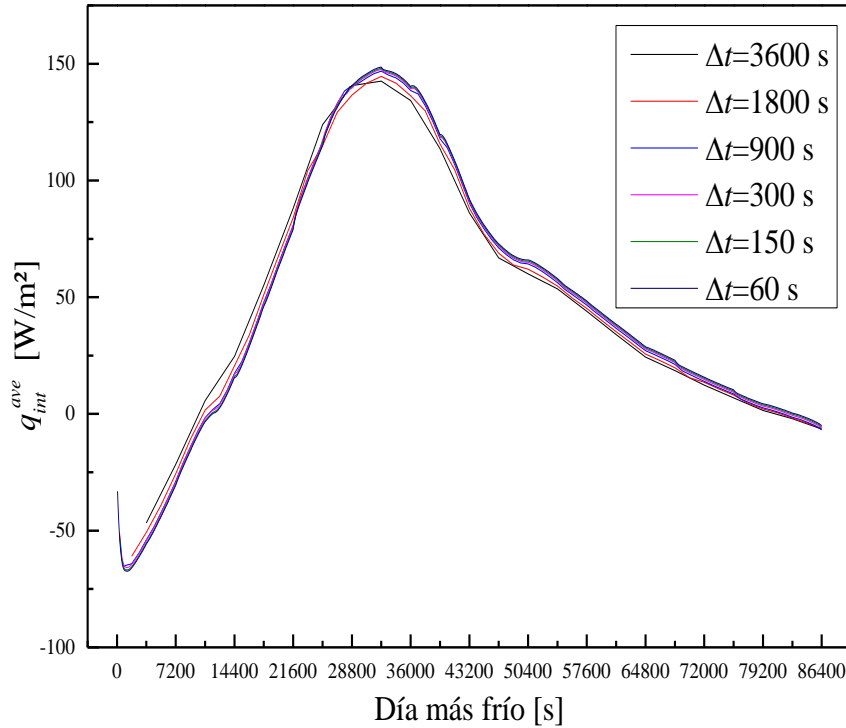


Figura 3.20. Flujos de calor hacia la habitación a través del muro masivo para distintos pasos de tiempo Δt .

En la Tabla 3.10, se presentan los flujos de calor al interior. El estudio de dependencia de malla de manera cuantitativa para ello, se utilizaron los valores promedio de cada hora del flujo de calor hacia el interior de la habitación. Para el cálculo de Q_{int} se determina con la Ec. (3.12). En ella, la integración de q_{int}^{ave} se aproxima mediante la regla del trapecio (Chapra y Canale, 2006).

$$Q_{int} = \int_{00:00}^{24:00} q_{int}^{ave}(t) dt \approx \frac{\Delta t}{2} \left[q_{int}^{ave}(00:00) + 2 \sum_{01:00}^{23:00} q_{int}^{ave}(t) + q_{int}^{ave}(24:00) \right] \quad (3.12)$$

Tabla 3.10. Estudio del efecto del Δt para sistema de muro Trombe.

Δt [s]	Q_{int} [kWh/m ²]	<i>Dif.</i> [%]	\dot{m} [kg/s] $\times 10^{-3}$	<i>Dif.</i> [%]
3600	1.22	---	16.12	---
1800	1.21	0.82	16.09	0.17
900	1.17	3.31	16.14	0.29
300	1.15	1.71	16.17	0.19
150	1.16	0.87	16.14	0.16
60	1.15	0.86	16.12	0.14

Como se puede observar, a medida que el paso de tiempo se vuelve más pequeño, comienza a presentarse una tendencia donde el cambio de la variable es cada vez menor, siendo cambios menores al 1%. Por lo tanto, se puede aseverar que el paso de tiempo Δt óptimo es de 60 s. Finalmente, con esto damos cierre a la verificación del código numérico y damos paso al Capítulo 4 de resultados.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados del sistema muro Trombe (TW) para la configuración de calentamiento. El capítulo está constituido por las siguientes secciones: parámetros de estudio, estudio del efecto de la inercia térmica, estudio paramétrico del material en el muro y evaluación térmica bajo las condiciones climáticas de dos ciudades de clima generalmente frío durante todo el año.

4.1 Parámetro de estudio

El sistema TW fue evaluado térmicamente bajo las condiciones climáticas de dos ciudades de clima generalmente frío durante todo el año. Se consideró que el TW tiene una orientación al Sur. De esta manera, el sistema recibe la mayor cantidad de irradiación solar durante todo el día. Las ciudades elegidas fueron Tulancingo, Hidalgo y Ciudad de México en la alcaldía de Tacubaya. Para ambas ciudades, se evaluaron el sistema durante el día más frío, así como el día más cálido de cada mes de todo un año 2014.

La evaluación térmica se realizó durante todo un día (24 h) a partir de la primera hora de la radiación solar (típicamente a las 06:00 h). Para evaluar el sistema TW en estado dinámico, se generaron funciones continuas a partir de los datos de la radiación solar y temperatura ambiente. Mientras que para la velocidad del viento, se tomó como un valor constante por hora. Los datos climáticos correspondientes al día más frío y más cálido a la ciudad de Tulancingo, Hidalgo y Ciudad de México alcaldía de Tacubaya, así como las funciones generadas a partir de estos datos son presentados en el ANEXO A.

Hernández-López (2016) realizó un estudio paramétrico del sistema TW en donde determinó las dimensiones óptimas para el funcionamiento del mismo. Estas dimensiones son utilizadas en el presente estudio. En este sentido, el sistema TW tiene un ancho de canal de aire de $L_C = 20$ cm, una apertura de ventilas en la parte superior e inferior de $L_{v1} = L_{v2} = 20$ cm, y un espesor de muro masivo de $L_w = 30$ cm. Esto se aplica para una habitación cuya altura es de $H_y = 3$ m y $T_{room} = 297$ K.

4.2 Estudio del efecto de la inercia térmica

Dado que, el sistema busca un nuevo estado de equilibrio térmico con su entorno partiendo de un estado de equilibrio inicial ($t = 0$ s), es necesario determinar si existe un efecto considerable en los resultados debido a las condiciones iniciales de la simulación dinámica. Para ello, se optó por comparar el comportamiento del sistema sin considerar la inercia térmica del día anterior al de interés (Caso 1) con respecto al caso en el que sí se toma en

cuenta esta inercia (Caso 2). Así, para este ejercicio, se eligieron las condiciones climáticas de la Ciudad de Tulancingo, Hidalgo para su día más frío del 2014.

La Figura 4.1 muestra el comportamiento térmico del absorbedor a lo largo del día. Como puede observarse, para el Caso 1, el absorbedor logra alcanzar una temperatura de 50.6 °C. Por otro lado, en el Caso 2 se alcanzan 52.5 °C. Este incremento en el absorbedor es causado por la inercia térmica del día anterior.

En la Figura 4.2 se compara el flujo de calor total promedio hacia la habitación (q_{int}^{ave}). Se puede observar que el Caso 1, para la primera hora de modelación el sistema muro Trombe está cediendo energía al medio ambiente. Esto se mantiene hasta las 10:30 AM. Posteriormente, el sistema comienza a entregar energía a la habitación alcanza su valor máximo aproximadamente a las 4:00 PM con 150 W/m² para posteriormente ir disminuyendo hasta que el sistema deja de aportar energía a la habitación siendo aproximadamente las 6:00 a.m. del día siguiente.

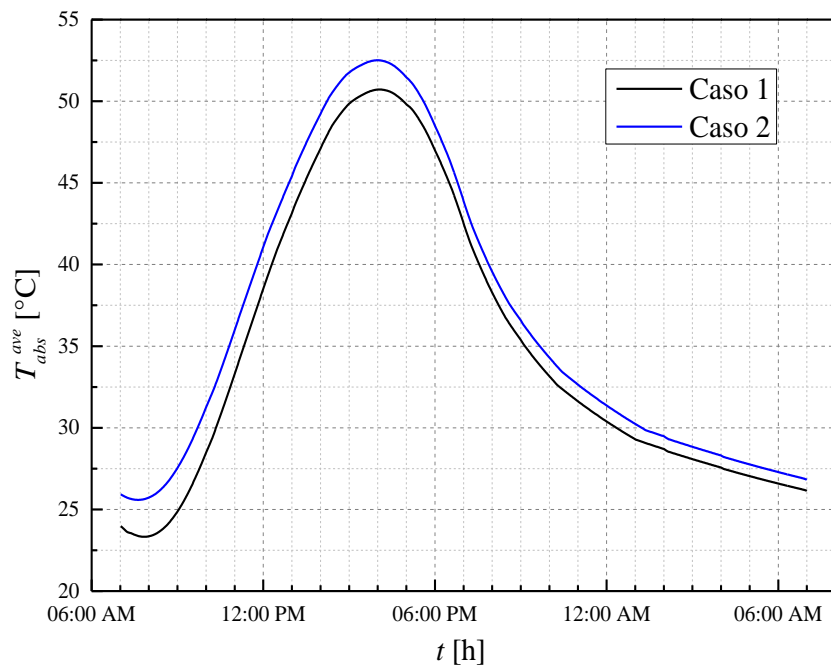


Figura 4.1. Temperatura del absorbedor durante el día más frío de Tulancingo, Hidalgo.

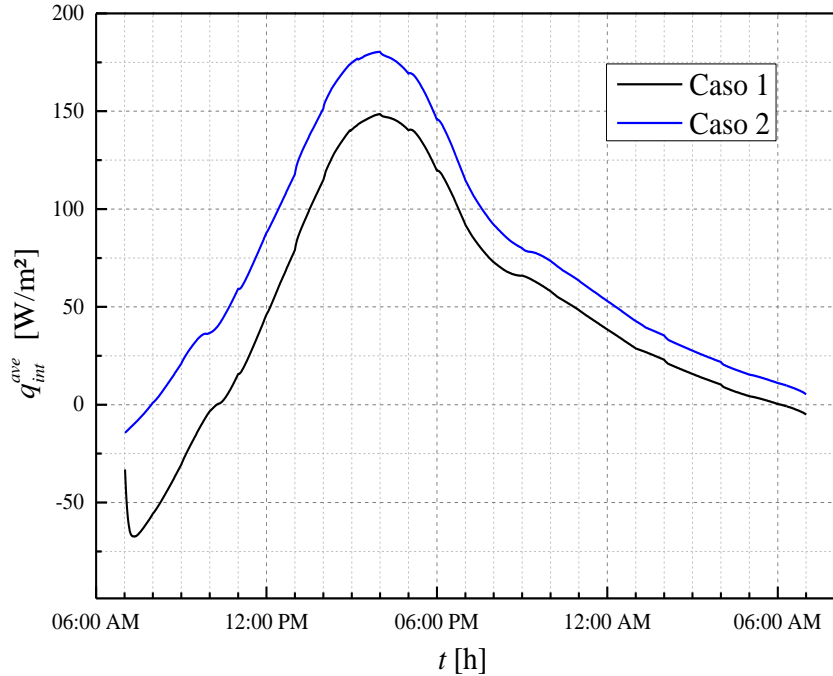


Figura 4.2. Flujo de calor total promedio hacia la habitación del día más frío de Tulancingo, Hidalgo.

Por otro lado, para el Caso 2 se puede observar que el flujo de calor hacia la habitación presenta un comportamiento similar al Caso 1, alcanza su valor máximo de igual manera a las 4:00 PM, pero con un valor de 180 W/m² para posteriormente ir disminuyendo. Sin embargo, a diferencia del Caso 1, el sistema de TW es capaz de seguir suministrar energía a la habitación hasta las 7:00 a.m. del día siguiente.

En otras palabras, esta diferencia de 20 W/m² entre los valores máximos entre ambos casos, es lo suficiente como para que el muro logre suministrar un flujo de calor promedio hacia la habitación por una hora más durante el periodo nocturno.

Con el propósito de realizar una comparación cuantitativa entre ambos casos, se obtuvo el calor total hacia la habitación (Q_{int}) mediante la Ecuación (3.12). En la Tabla 4.1 se muestra la comparación entre el Caso 1 y el Caso 2. Se observa que existe una diferencia porcentual de 35.96 % entre ambos.

Con base en los resultados, puede concluirse que el hecho de considerar o no el modelado del día anterior influye sustancialmente en la predicción del desempeño térmico del sistema durante el día de interés alcanzándose diferencias de hasta 35.96 % calor total suministrado a la habitación. Por lo tanto, para el presente estudio se considera el Caso 2 para la evaluación térmica del sistema TW.

Tabla 4.1. Calor total suministrado por el sistema TW para el día más frío de Tulancingo, Hidalgo.

Caso	Q_{int} [kWh/m ²]	<i>Dif.</i> [%]
1	1.14	---
2	1.78	35.96

4.3 Estudio paramétrico del material en el muro.

El estudio paramétrico se realizó bajo las condiciones reales de operación para el día más frío de Tulancingo, Hidalgo en el año 2014.

La elección del material de construcción para el muro masivo se determinó mediante un estudio paramétrico del mismo. Se estudiaron tres distintos materiales típicos usados en la construcción de edificaciones en la República Mexicana (concreto, ladrillo y adobe).

Las variables auxiliares para el análisis de estos resultados son: (1) Temperatura en los elementos que conforman el sistema TW ($T_g^{ave}, T_f^{ave}, T_{abs}^{ave}, T_{ws}^{ave}$), (2) flujo másico en el canal (\dot{m}) y el calor total hacia la habitación (Q_{int}).

En la Tabla 4.2 se presentan las propiedades termofísicas y radiativas de los materiales que fueron evaluados en el TW así como para el vidrio simple.

Tabla 4.2. Propiedades termofísicas y radiativas.

Pared semitransparente		Concreto ²	Ladrillo ²	Adobe ¹
$\varepsilon_g^* = 0.85$		$\varepsilon_C^* = 0.90$	$\varepsilon_B^* = 0.93$	$\varepsilon_A^* = 0.90$
$\rho_g^* = 0.08$	$\lambda_g = 1.40$	$\lambda_C = 1.70$	$\lambda_B = 0.70$	$\lambda_A = 0.49$
$\tau_g^* = 0.78$	$\rho_g = 2500$	$\rho_C = 2240$	$\rho_B = 1600$	$\rho_A = 1306$
$\alpha_g^* = 0.14$	$c_{p_g} = 750$	$c_{p_C} = 880$	$c_{p_B} = 1073$	$c_{p_A} = 1150$
--	$\alpha_g = 7.47 \times 10^{-7}$	$\alpha_C = 8.62 \times 10^{-7}$	$\alpha_B = 4.08 \times 10^{-7}$	$\alpha_A = 3.26 \times 10^{-7}$

1 Chávez-Galán et al. (2007)

2 ASHRAE, 2009

En la Figura 4.3 se presenta la evolución de la temperatura promedio de la superficie del absorbedor (T_{abs}^{ave}) para los tres materiales considerados. Se observa que el comportamiento de T_{abs}^{ave} es similar para los tres materiales. Al inicio del día (7:00 AM), T_{abs}^{ave} presenta valores de 22, 24 y 26 °C para el adobe, ladrillo y concreto, respectivamente. A partir de ese tiempo y hasta las 10:00 AM, la temperatura de la superficie absorbidora del adobe se encuentra por debajo de la correspondiente al ladrillo y ésta debajo de la del concreto. Sin embargo, en el periodo comprendido desde las 10:00 a.m. hasta las 11:00 PM, este efecto se invierte. T_{abs}^{ave} del concreto presenta los menores valores de temperatura de los tres casos cuyos máximos valores se alcanzan a las 4:00 PM: 53 °C para el concreto, 60 °C para el ladrillo y 65 °C para el adobe.

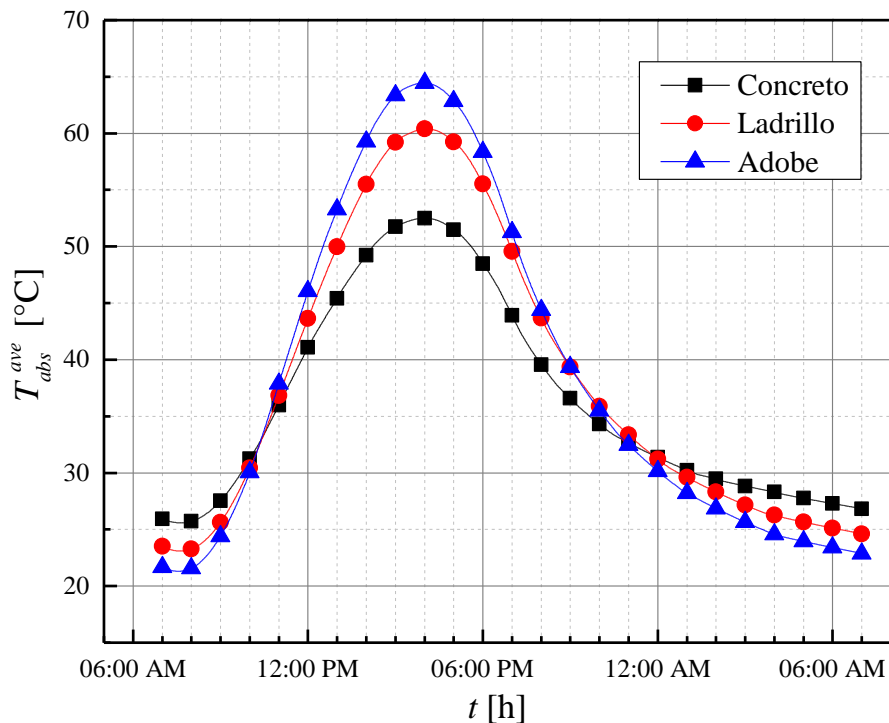


Figura 4.3. Efecto del material en el muro sobre la temperatura promedio de la superficie absorbidora.

Esta diferencia se debe a un factor muy importante: la difusividad térmica. Esta propiedad se interpreta como la relación que existe entre la capacidad de difusión del calor y la capacidad calorífica por unidad de volumen (ρC_p) en un material. En otras palabras, una alta

difusividad térmica indica que el material difundirá más rápido el calor con respecto a su rapidez de almacenamiento en el mismo. Mientras que una baja difusividad térmica indica que el material almacenará más energía que la podrá transportar por difusión. Esto último conlleva a que un material con baja difusividad térmica se caliente más que uno con alta. En ese sentido, como puede observarse en la Tabla 4.2, un arreglo de mayor a menor de la difusividad térmica de los materiales considerados queda como $\alpha_C > \alpha_B > \alpha_A$. Esto explica la razón de que el adobe se caliente más que el concreto ($\alpha_C \approx 2.65\alpha_A$) y el ladrillo ($\alpha_B \approx 1.25\alpha_A$): el adobe tiende a retener más energía que el concreto y el ladrillo, mientras que estos últimos tienden a difundir más energía a través del muro con dirección hacia la superficie interior de la habitación. Por otro lado, para el periodo nocturno, después de las 11:00 PM, T_{abs}^{ave} para el concreto permanece por encima de los valores que corresponden para los casos del ladrillo y del adobe hasta las 7:00 PM del día siguiente, en donde se alcanza una diferencia máxima de 5 °C entre el concreto y el adobe. Esto se debe a que la capacidad calorífica volumétrica del concreto ($\rho_C C_{pC} = 1.97 \text{ MJ/m}^3\text{K}$) le proporciona mayor capacidad de almacenamiento de la energía térmica al final del día que la de los otros dos materiales ($\rho_B C_{pB} = 1.71 \text{ MJ/m}^3\text{K}$, $\rho_A C_{pA} = 1.59 \text{ MJ/m}^3\text{K}$).

En la Figura 4.4 se muestra el comportamiento de la temperatura promedio del vidrio (T_g^{ave}). Se puede apreciar que el efecto del material del muro sobre la T_g^{ave} es moderado en los intervalos de 7:00 a.m. a 12:00 PM y de 10:00 PM a 7:00 a.m. de la mañana siguiente. Sin embargo, en el periodo comprendido de 12:00 PM a 10:00 PM existen diferencias. En el caso del concreto, se presentan las menores temperaturas, mientras que en el caso del adobe se presentan las mayores. Esto puede deberse al proceso de transferencia de calor radiativa con la superficie absorbidora. De acuerdo con la Figura 4.3, T_{abs}^{ave} del adobe es mayor que la del concreto prácticamente para ese mismo periodo de tiempo (12:00 PM-10:00 PM). Esto ocasiona que la superficie del absorbedor ceda energía radiativa hacia el vidrio la cual es transformada en energía interna y se refleja en el incremento de temperatura del vidrio. Así, a mayor T_{abs}^{ave} , mayor T_g^{ave} . La diferencia de temperaturas máxima entre el caso del concreto y el adobe ocurre a 4:00 PM y es de 4 °C, siendo 28.5 °C para el primero y 32.5 °C para el segundo. Para los tres casos, T_g^{ave} disminuye gradualmente después de las 3:00 PM hasta alcanzar un valor de aproximadamente 6.5 °C a las 7:00 a.m. del día siguiente.

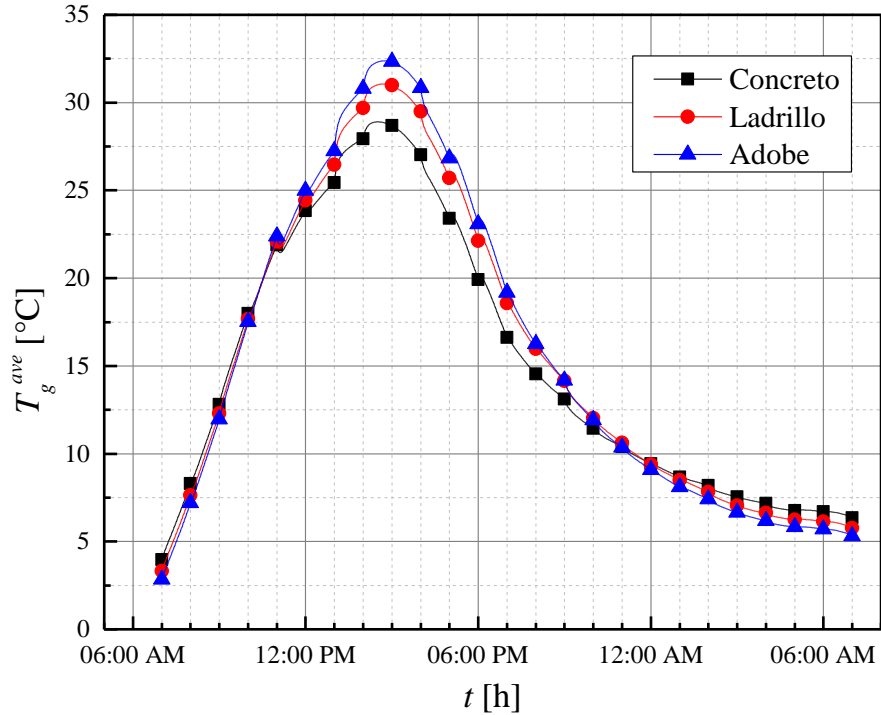


Figura 4.4. Efecto del material en el muro sobre la temperatura promedio del vidrio.

En la Figura 4.5 se presenta el comportamiento de la temperatura promedio del fluido en el canal (T_f^{ave}). Se observa que T_f^{ave} tiene un comportamiento similar a T_g^{ave} para los tres materiales, es decir, fuera del intervalo de 11:00 a.m. a 10:00 PM, T_f^{ave} presenta poca dependencia del material del muro masivo. Sin embargo, dentro de ese intervalo, si existe un efecto significativo, en especial cerca de las 4:00 PM. En esta hora se alcanzan los valores máximos de T_f^{ave} : 31.5 °C para el adobe, 31°C para el ladrillo y 29.8 °C para el concreto. Como es de esperarse, estos valores de T_f^{ave} son consecuencia del intercambio convectivo entre las paredes de vidrio y del absorbedor con el aire en el canal.

El adobe presentó los mayores valores de temperatura en estas paredes por lo cual es predecible que el aire para este caso se caliente más que para los otros dos casos. Asimismo, dado que el caso del muro de concreto presentó los menores valores de temperatura en las paredes, se espera que el fluido alcance menor temperatura en este caso, así como lo demuestra la Figura 4.5. De manera similar a T_g^{ave} , T_f^{ave} para los tres casos disminuye

después de alcanzar su valor pico. Después de las 11:00 PM esta disminución es menos acentuada en el caso del concreto. Esto hace que, para este caso, T_f^{ave} sea ligeramente mayor (aproximadamente 1 °C) que para el ladrillo y el adobe durante el periodo nocturno.

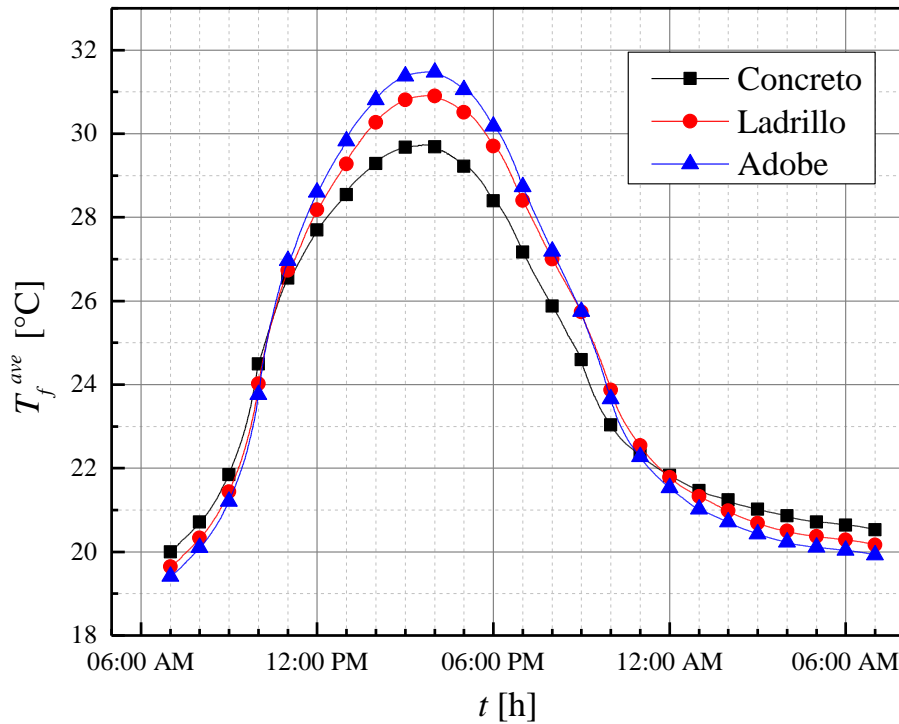


Figura 4.5. Efecto del material en el muro sobre la temperatura promedio del fluido en el canal.

En la Figura 4.6 se muestra el comportamiento de la temperatura promedio de la superficie interior del muro masivo T_{ws}^{ave} . Se observa que a diferencia de T_g^{ave} , T_{abs}^{ave} y T_f^{ave} , T_{ws}^{ave} es un parámetro más sensible al material del muro. Se aprecia que para el caso del muro de ladrillo y de adobe, se presenta un comportamiento muy sistemático de T_{ws}^{ave} .

Por otro lado, para el caso del muro de concreto, las variaciones en la temperatura son más drásticas, es decir, la amplitud entre el valor máximo (29.1 °C) y el valor mínimo (26.2 °C) alcanza los 3 °C, mientras que para el ladrillo y el adobe esta amplitud es de 1.2 °C y 1 °C, respectivamente. Además, se observa que T_{ws}^{ave} para el concreto alcanza valores mayores que

los otros dos materiales, en especial para después de las 5:00 PM. Esto garantiza que el intercambio convectivo y radiativo entre la pared interior del muro y la habitación sea siempre de la primera hacia la segunda en particular durante el periodo nocturno que es cuando no se cuenta con la radiación solar.

Así pues, se observa que la mayor diferencia entre la T_{ws}^{ave} del concreto y la del adobe es de 3.1 °C, misma que ocurre a las 9:00 PM. Esta diferencia disminuye de manera moderada durante la noche hasta alcanzar 2 °C a las 7:00 a.m. del siguiente día.

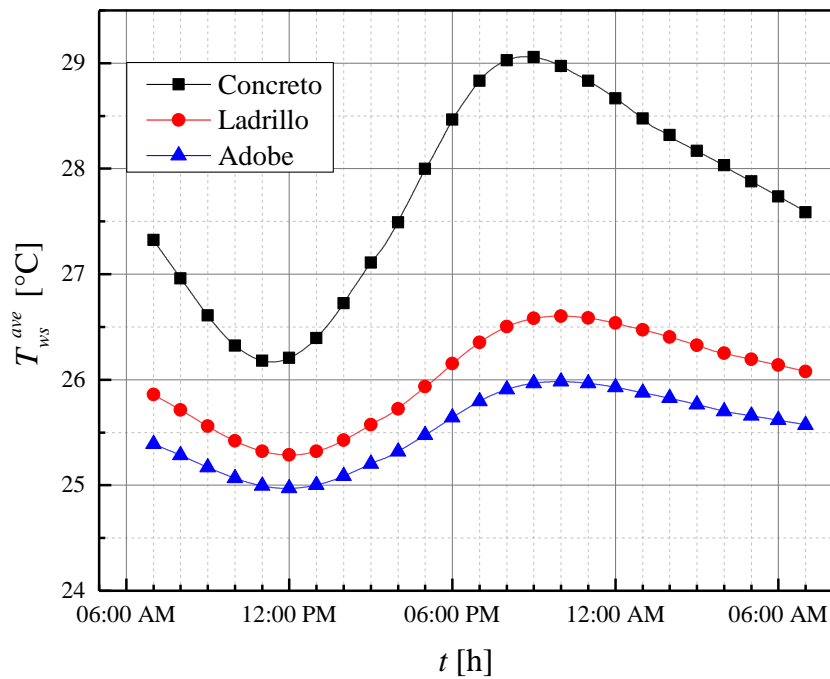


Figura 4.6. Efecto del material en el muro masivo sobre la temperatura promedio en la superficie interior.

Desde el punto de vista de T_{ws}^{ave} , el uso del concreto como material para el muro masivo presentó el mejor comportamiento térmico en comparación con el ladrillo y el adobe. Esto se debe a la mayor capacidad calorífica volumétrica del concreto. En otras palabras, a que el concreto puede almacenar más energía que los otros dos materiales.

Finalmente, se presentan los flujos de calor suministrados por el TW. El flujo de calor promedio total suministrado a la habitación se define como la suma del flujo de calor promedio suministrado por el fluido del canal (q_C^{ave}) y el flujo de calor suministrado por el intercambio radiativo y convectivo de la superficie interior del muro (q_{wall}^{ave}). q_C^{ave} se define con la Ec. (4.1) (Utzinger et al. 1980), mientras que q_{wall}^{ave} se determina con la Ec. (4.2):

$$q_C^{ave} = \dot{m}C_{p,f}(T_f^{ave} - T_{room}) \quad (4.1)$$

$$q_{wall}^{ave} = (h_{ws-room}^{conv} + h_{ws-room}^{rad}) \cdot (T_{ws}^{ave} - T_{room}) \quad (4.2)$$

Las Figuras 4.7-4.9 muestran el comportamiento de los flujos de calor promedio suministrados por el sistema. En la Figura 4.7 se presenta el caso correspondiente al concreto. Se observa que la energía proporcionada por el canal q_C^{ave} es negativa durante las primeras tres horas del día. Esto indica que, en lugar de suministrar energía a la habitación, la extrae de ella. Esto se debe a que la temperatura del fluido es menor a la de la habitación. A partir de las 10:00 AM, el flujo de fluido en el canal comienza a suministrar energía alcanzando un valor máximo de 125 W/m² a las 3:00 PM. Posterior a esta hora, se presenta una disminución muy pronunciada debido a que la radiación solar incidente en el absorbedor disminuye. Este comportamiento en q_C^{ave} se presenta hasta las 9:00 PM. Después de esta hora, el fluido extrae energía de la habitación y la cede hacia el ambiente exterior a través del vidrio. Así, q_C^{ave} disminuye gradualmente hasta las 7:00 AM, tiempo en el que alcanza un valor de -50 W/m². Por otro lado, el calor suministrado por el muro hacia la habitación q_{wall}^{ave} siempre es positivo en todo el día de modelación. Inicia suministrando 50 W/m² a las 7:00 a.m. y disminuye muy ligeramente hasta alcanzar un valor mínimo de 26 W/m² al mediodía.

Después, comienza a incrementarse gradualmente hasta alcanzar a suministrar un valor máximo de 75 W/m² a las 9:00 PM. A partir de esta hora, comienza a disminuir muy lentamente hasta las 7:00 AM, hora en que presenta un suministro de energía de 51 W/m².

Este comportamiento se debe a que q_{wall}^{ave} es la energía almacenada durante el día y que es liberada de manera paulatina durante la noche. Además, en la misma figura se observa que el flujo de calor total suministrado q_{int}^{ave} presenta mucha influencia de q_c^{ave} en periodo diurno. Sin embargo, q_{wall}^{ave} permite amortiguar el descenso en el suministro de energía por el flujo de fluido. Esto ayuda a mantener el suministro de energía hasta las 7:00 a.m. de la mañana siguiente, en la cual, q_{int}^{ave} presenta un valor cercano a 0.0 W/m².

Así, con base en las observaciones del comportamiento del q_{int}^{ave} , sería recomendable emplear una configuración que inhabilitara el lazo convectivo entre el canal y la habitación para disminuir las pérdidas a través del vidrio durante la noche y de esta manera, proporcionar una suministró óptimo de calentamiento a la habitación en ese periodo.

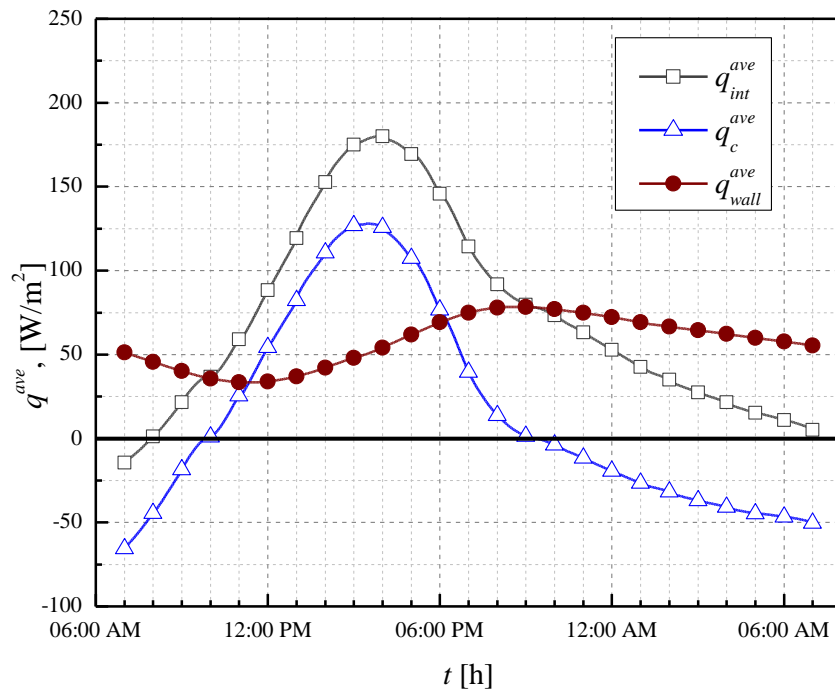


Figura 4.7. Flujos de calor suministrados por el sistema: muro de concreto.

Del mismo modo, en las Figuras 4.8 y 4.9 se muestran los flujos de calor suministrados para el muro de ladrillo y el muro de adobe, respectivamente. En general, éstos presentan un comportamiento muy similar: q_c^{ave} suministra energía en el intervalo de tiempo de 10:00 a.m. a 10:00 PM. Ambos casos alcanzan su valor máximo a las 4:00 PM, los cuales son de 180

W/m^2 para el ladrillo y de $220 W/m^2$ para el adobe. Fuera de este intervalo, el fluido extrae energía de la habitación. Por otro lado, q_{wall}^{ave} oscila a lo largo del día entre $24 W/m^2$ y $42 W/m^2$ para el ladrillo y entre $15 W/m^2$ y $26 W/m^2$ para el adobe. Debido a estos valores en el q_{wall}^{ave} , éste no es capaz de compensar las pérdidas nocturnas a través del vidrio, razón por la cual, el calor total suministrado q_{int}^{ave} es negativo después de las 2:00 a.m. para el ladrillo y después de la medianoche para el adobe.

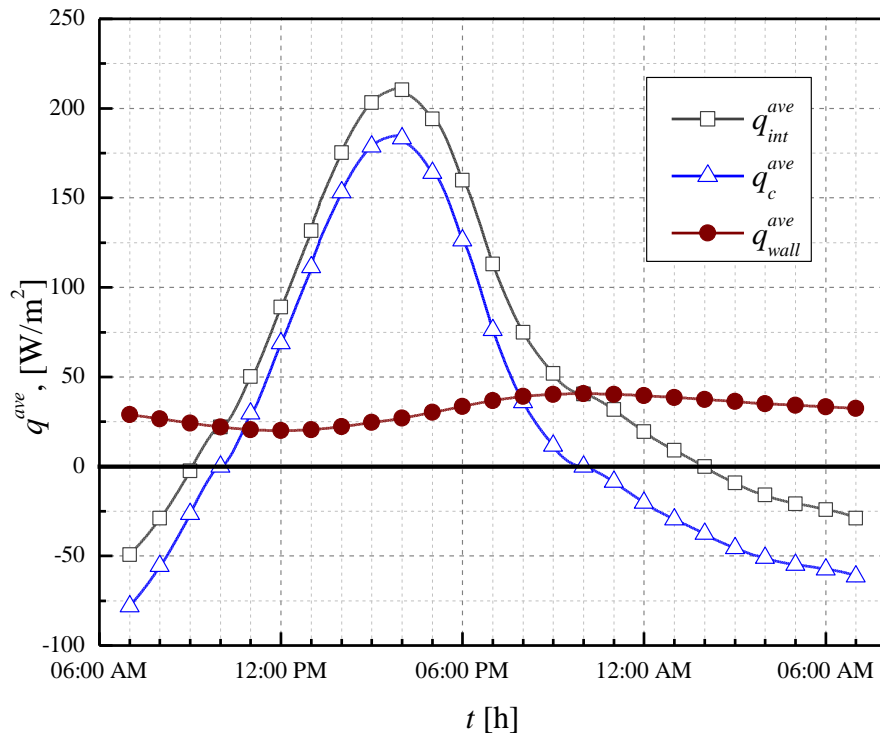


Figura 4.8. Flujos de calor suministrados: muro de ladrillo.

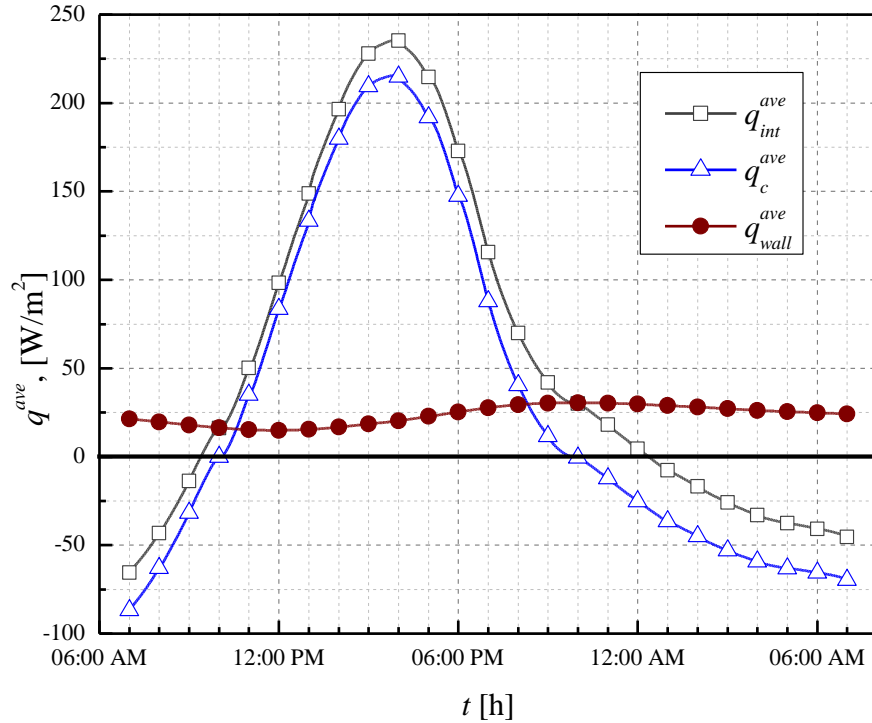


Figura 4.9. Flujos de calor suministrados: muro de adobe.

En la Figura 4.10 se presenta la comparación de los q_{int}^{ave} para los tres materiales. En esta figura se observa el comportamiento de q_{int}^{ave} a lo largo del día. En general, se observa que a el adobe es la mejor opción para proporcionar calentamiento diurno. Sin embargo, es la peor para calentamiento nocturno. Tanto el caso del ladrillo como el adobe inician su proceso de calentamiento a partir de las 9:00 AM, mientras que el caso del concreto inicia una hora antes. Sin embargo, el muro de concreto prolonga el calentamiento hasta las 7:00 a.m. del siguiente día. Pero tanto el muro de adobe como el muro de ladrillo no son capaces de proporcionar calentamiento después de medianoche.

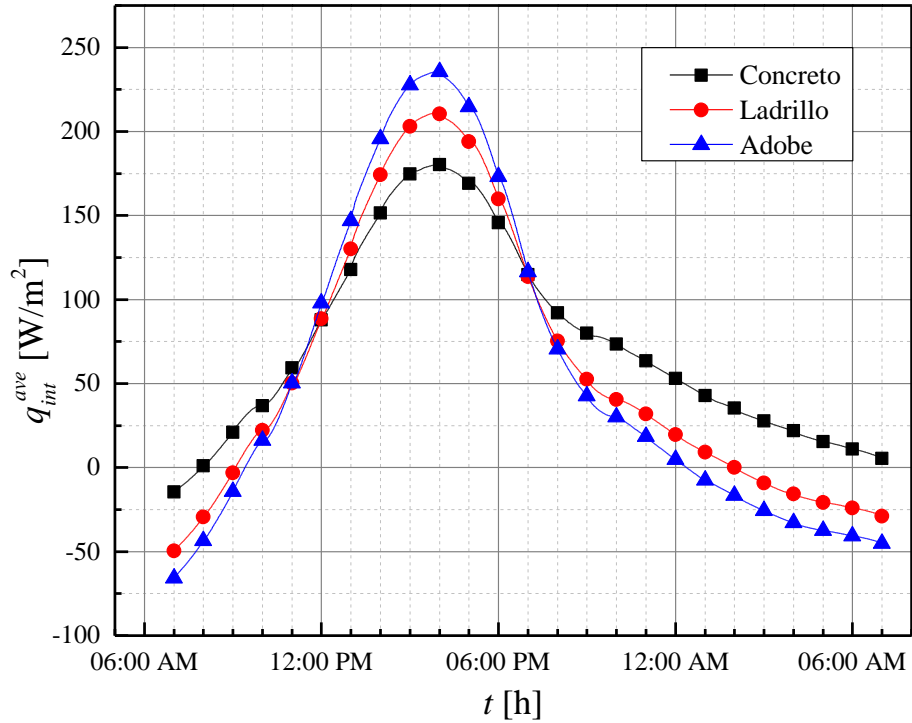


Figura 4.10. Efecto del material en el muro masivo sobre el flujo de calor total suministrado a la habitación.

Finalmente, en la Tabla 4.3 se presentan los valores promedio del día para las temperaturas T_g^{ave} , T_f^{ave} , T_{abs}^{ave} , T_{ws}^{ave} , el flujo másico en el canal (\dot{m}), y la energía total suministrada a la habitación (Q_{int}).

De acuerdo con la Tabla 4.3, se observa que con respecto a las temperaturas promedio de todo el día, no se presentan diferencias significantes en cuanto a T_g^{ave} , T_f^{ave} y T_{abs}^{ave} . Sin embargo, T_{ws}^{ave} para el caso del concreto es ligeramente superior a los casos que corresponden a los otros materiales: por 1.73 °C con respecto al ladrillo y por 2.21 °C con respecto al adobe. En cuanto al flujo másico, el caso del concreto es notablemente inferior al caso del adobe y del ladrillo. Esto impacta en el flujo de calor total proporcionado por el fluido a la habitación: para el concreto resulta ser el menor de los tres casos. Pero sus valores superiores de T_{ws}^{ave} ocasionan que el concreto sea mejor material para proporcionar calentamiento nocturno.

Por último, con respecto a la energía total suministrada por el TW a la habitación, en la Tabla 4.3 se observa que el muro de concreto presenta la mayor cantidad: 1.78 kWh/m². Lo que significa 23% más que el ladrillo y 30% más que el adobe.

En este sentido, y de acuerdo con los resultados obtenidos en el estudio paramétrico del material del muro, se encuentra que el concreto presenta mejor desempeño térmico para el calentamiento solar pasivo en un TW. Así, este material es elegido para realizar la evaluación térmica del sistema bajo condiciones de clima de México.

Tabla 4.3. Efecto del material del muro.

Material	T_g^{ave} [°C]	T_f^{ave} [°C]	T_{abs}^{ave} [°C]	T_{ws}^{ave} [°C]	\dot{m} [kg/s] × 10 ⁻³	Q_{int} kWh/m ²
Concreto	15.15	24.45	36.53	27.74	12.50	1.78
Ladrillo	15.71	24.81	38.27	26.01	15.84	1.44
Adobe	15.88	24.86	38.73	25.53	14.63	1.37

4.4 Evaluación térmica del sistema muro Trombe.

El sistema TW se evaluó térmicamente bajo las condiciones climáticas de dos ciudades que presentan un clima generalmente frío. estas ciudades son: Tulancingo, Hidalgo y Ciudad de México en la alcaldía Tacubaya 2014.

4.4.1 Tulancingo, Hidalgo 2014

En primera instancia, se presenta el comportamiento térmico del muro masivo para el día más frío, así como el día más cálido de todo el año. Posteriormente, se analizan los flujos de calor hacia la habitación y finalmente se presenta el calor total anual suministrado por el sistema TW.

Día más frío

La Figura 4.11, muestra el comportamiento de la temperatura promedio del absorbedor (T_{abs}^{ave}), la superficie interior del muro masivo (T_{ws}^{ave}) y la temperatura ambiente T_{amb} . El día comienza con $T_{amb} = 0$ °C a las 7:00 AM. Conforme avanza el día, la radiación solar comienza a intensificarse mientras la temperatura ambiente alcanza su valor máximo a la 1:30 PM con 19 °C. El absorbedor hace lo propio comenzado con un valor $T_{abs}^{ave} = 25.9$ °C y alcanzado su valor máximo hasta las 4:00 PM con $T_{abs}^{ave} = 52.5$ °C. Este comportamiento se debe a que existe un periodo de tiempo en el que el muro masivo comienza a almacenar energía para posteriormente liberarla (inercia térmica). Esto provoca que la temperatura de la superficie interior del muro (T_{ws}^{ave}), presente un amortiguamiento, mismo que se manifiesta en un comportamiento suave a lo largo del día.

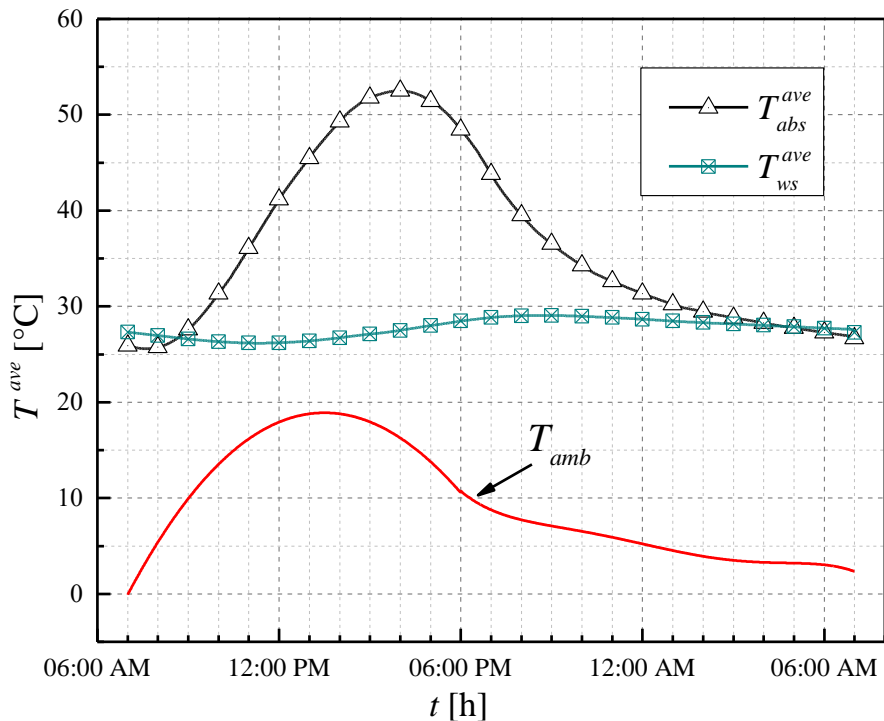


Figura 4.11. Comportamiento de la temperatura en el muro masivo: día más frío de Tulancingo.

Finalmente, en el periodo nocturno, el muro masivo comienza a liberar su energía manteniendo una T_{ws}^{ave} por encima de la temperatura ambiente durante toda la noche, comenzado desde las 8:00 PM con un valor de 29.5 °C y descendiendo ligeramente hasta alcanzar 27.6 °C a las 7:00 a.m. del día siguiente. Puede observarse que aun después del periodo de descarga, T_{ws}^{ave} está por arriba de la temperatura de la habitación. Lo cual indica que el muro masivo tiene la capacidad de suministrar energía durante todo el periodo nocturno.

Para determinar la cantidad de energía que logró suministrar el sistema TW a la habitación, se analizan los flujos de calor hacia la habitación por parte del muro masivo q_{wall}^{ave} , así como del proporcionado por el canal q_c^{ave} .

De acuerdo con la Figura 4.12, se muestra el comportamiento de los flujos de calor hacia el interior de la habitación a lo largo de todo el día. Se observa que, el flujo de calor que suministra el muro masivo hacia la habitación comienza con un valor $q_{wall}^{ave} = 50 \text{ W/m}^2$. Por el contrario, el flujo de calor proporcionado por el canal $q_c^{ave} = -70 \text{ W/m}^2$ siendo las 7:00 AM. El flujo negativo por parte de q_c^{ave} , significa que la habitación está perdiendo energía por parte del canal. Sin embargo, q_c^{ave} comienza a corregirse conforme aumenta la radiación gracias al efecto invernadero formado por el canal y el vidrio, siendo a las 10:00 a.m. cuando el q_c^{ave} logra ser positivo. Esto significa que la temperatura de salida del canal es mayor a la temperatura de la habitación. A medida que transcurre el día, la radiación solar alcanza su valor máximo de 740 W/m^2 a las 2:00 PM, mientras que el flujo de calor máximo hacia la habitación por parte de q_c^{ave} lo alcanza a las 3:00 PM tendiendo un valor de 126 W/m^2 . Se observa que existe un desfase de una hora con respecto al valor máximo alcanzado por la radiación solar.

A las 7:00 PM la radiación solar es prácticamente nula. Sin embargo, q_c^{ave} logra suministrar energía a la habitación por dos horas más. Posteriormente, en lugar de suministrar energía a la habitación, se cede energía hacia el medio ambiente mediante la pared semitransparente, alcanzando su valor negativo máximo a las 7:00 a.m. del día siguiente con -49 W/m^2 .

Por otro lado, desde las 7:00 AM, q_{wall}^{ave} presenta un ligero descenso hasta 12:00 PM. Posterior a esta hora q_{wall}^{ave} comienza a incrementarse hasta alcanzar su valor máximo de 75 W/m^2 hasta que comienza a descender muy ligeramente. Esto se debe a la liberación gradual de la energía almacenada en el muro. Se observa que, durante toda la noche, q_{wall}^{ave} suministra energía hacia la habitación llegando a las 7:00 a.m. del día siguiente con un valor de 50 W/m^2 .

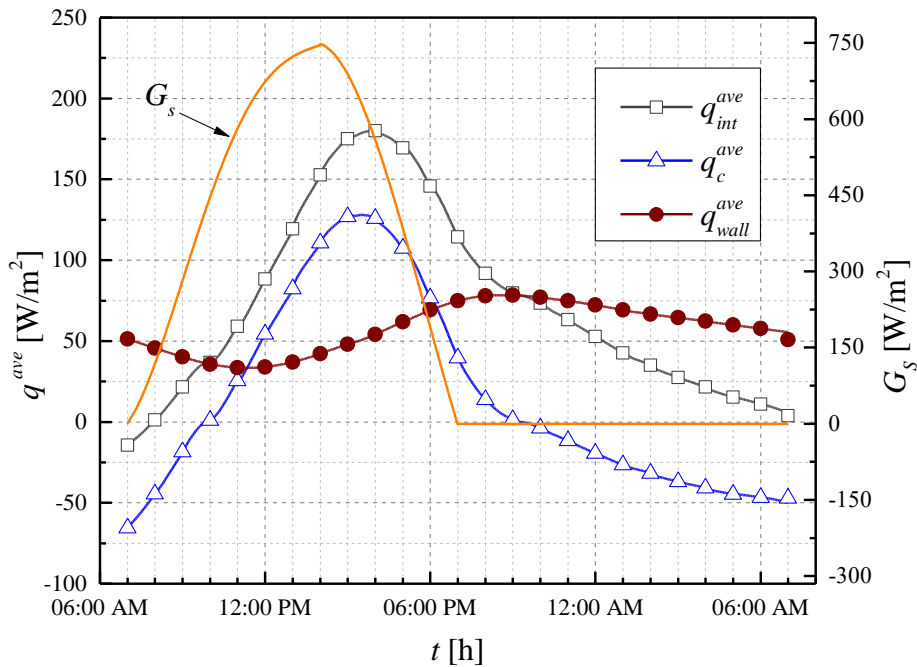


Figura 4.12. Comportamiento del flujo de calor promedio hacia la habitación: día más frío de Tulancingo.

El flujo de calor total suministrado hacia la habitación ($q_{int}^{ave} = q_{wall}^{ave} + q_c^{ave}$) muestra que a pesar de que q_c^{ave} deja de suministrar energía a partir de las 9:00 PM, el q_{wall}^{ave} es lo suficiente como para suministrar energía durante todo el periodo nocturno logrando llegar a las 7:00 a.m. del día siguiente con $q_{int}^{ave} = 1 W/m^2$, como se observa en la Figura 4.12. Con base en lo anterior, se puede decir que el sistema TW tiene la capacidad de suministrar energía a una habitación por lo menos 9 horas después de la ausencia de la radiación solar.

Con la finalidad de observar el comportamiento térmico del sistema de TW, a continuación, se muestra el comportamiento anual de la temperatura promedio de la superficie interior del muro T_{ws}^{ave} para el día más frío. En la Figura 4.13, se observa que T_{ws}^{ave} se mantiene en un intervalo de 25 a 28 °C durante todo el año. Se observa que para el mes de mayo se obtiene la temperatura más baja dentro de este intervalo. Sin embargo el sistema TW logra mantener la T_{ws}^{ave} durante todo el año por encima de la temperatura de la habitación. El sistema TW amortigua las oscilaciones de la temperatura ambiente durante todo el año, para el día más frío. Esto ayuda a mantener un confort térmico en la habitación.

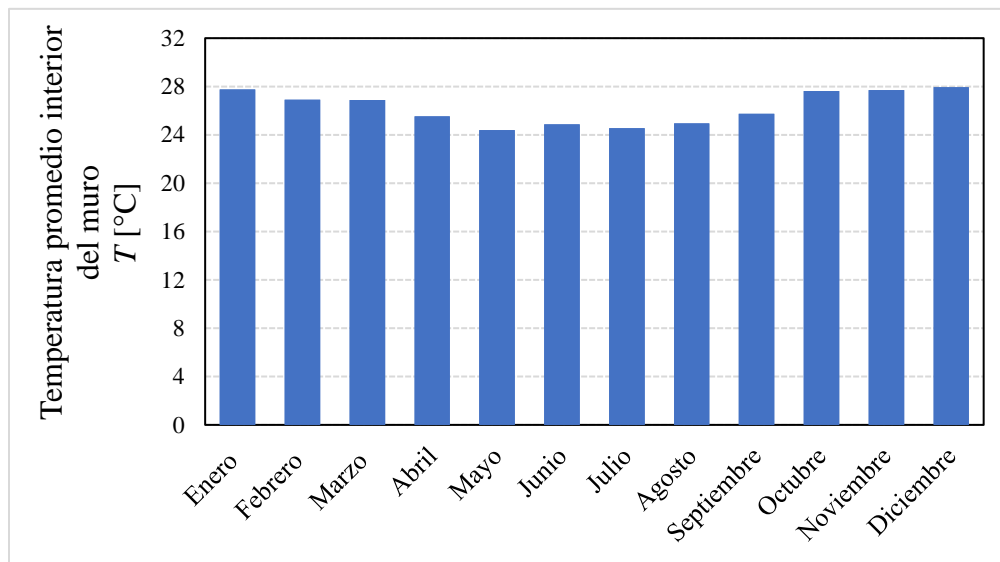


Figura 4.13. Comportamiento anual de la temperatura de la superficie interior del muro masivo: días más fríos de Tulancingo.

Día más cálido

En la Figura 4.14, se muestra el comportamiento de la temperatura del absorbedor T_{abs}^{ave} y de la superficie interior del muro T_{ws}^{ave} . Se observa, que el absorbedor y la superficie interior del muro comienzan prácticamente con la misma temperatura de 25.5 °C y con una temperatura ambiente de 16.4 °C. Mientras transcurre el día, la temperatura ambiente alcanza un valor máximo a las 2:00 PM con un valor de 31 °C. Mientras que la temperatura máxima alcanzada por el absorbedor presenta un retraso de 1 hora, alcanzando su valor máximo de 37 °C a las 3:00 PM. A pesar de ello, la temperatura de la superficie interior del muro masivo

presenta un valor de 25.5 °C para la misma hora siendo 5.5 °C aproximadamente menor que la temperatura ambiente. Esto es beneficioso para el día cálido. Esto se debe a que existe un tiempo en el cual el muro masivo almacena energía para posteriormente cederla a la habitación (inercia térmica). En este periodo de carga, se provoca un desfaseamiento entre los valores máximos del absorbedor con la superficie interior del muro como se observa en la Figura 4.14. Posteriormente, a partir de las 4:00 PM la T_{abs}^{ave} comienza a disminuir mientras que, la T_{ws}^{ave} comienza a ascender alcanzando su valor máximo hasta las 10:00 PM con $T_{ws}^{ave} = 26.3$ °C, y $T_{amb} = 18$ °C.

Finalmente, para las 6:00 a.m. del día siguiente, T_{abs}^{ave} descendió hasta 25.4 °C y T_{ws}^{ave} se mantuvo en el rango de 26 °C. Por otro lado, T_{amb} descendió hasta 10 °C. Con base en lo mostrado, se observa que debido a la inercia térmica que tiene el concreto, éste permite mantener T_{ws}^{ave} entre 25 y 26 °C a lo largo de todo el día.

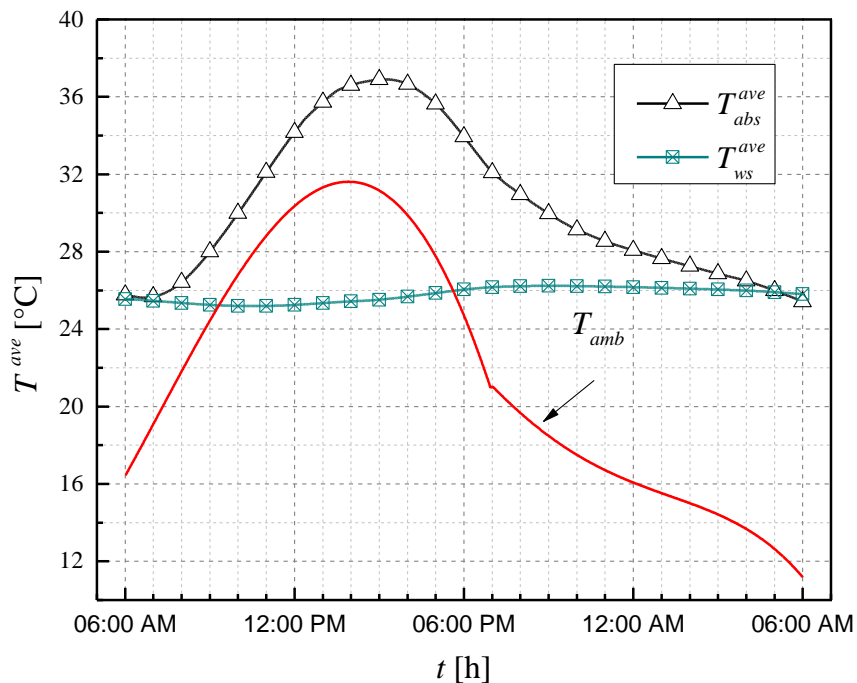


Figura 4.14. Comportamiento de la temperatura del muro: día más cálido de Tulancingo.

En la Figura 4.15 se muestra el comportamiento de los flujos de calor hacia la habitación a lo largo de todo el día. Se observa que, al inicio del día el flujo de calor que suministra el muro tiene un valor de $q_{wall}^{ave} = 24 \text{ W/m}^2$ mientras que, el flujo de calor que suministra el canal q_C^{ave} es de -15 W/m^2 . Sin embargo, q_C^{ave} comienza a elevarse conforme aumenta la radiación solar. A partir de las 9:00 AM, el q_C^{ave} logra ser positivo lo que significa que la temperatura de salida del canal es mayor a la temperatura de la habitación. Conforme el día transcurre y la radiación solar aumenta, G_S alcanza su valor máximo de 325 W/m^2 a las 12:40 PM. Mientras, el flujo de calor máximo hacia la habitación por parte de q_C^{ave} se alcanza a las 2:00 PM teniendo un valor de 55 W/m^2 .

A partir de las 7:00 PM, cuando la radiación solar es prácticamente nula, el q_C^{ave} logra suministrar energía a la habitación por 2 horas más para posteriormente, extraerla hacia el medio ambiente a través del vidrio, alcanzando su valor negativo máximo a las 6:00 a.m. del día siguiente con -30 W/m^2 .

Por otro lado, desde las 6:00 AM, q_{wall}^{ave} presenta un ligero descenso. Este comportamiento se mantiene hasta las 11:00 AM. Posterior a esta hora el q_{wall}^{ave} comienza a incrementarse alcanzado su valor máximo hasta las 9:00 PM con un valor de 35 W/m^2 . Posteriormente, comienza a descender ligeramente. Esto se debe a la liberación gradual de la energía almacenada en el muro a razón de su difusividad térmica y de las condiciones medio ambientales. Se observa que, durante toda la noche, q_{wall}^{ave} suministra energía a la habitación llegando a las 6:00 a.m. del día siguiente con un valor de 28 W/m^2 .

Con respecto al flujo de calor total hacia la habitación q_{int}^{ave} , se aprecia que a pesar de que q_C^{ave} deja de aportar energía a la habitación a partir de las 9:00 PM, el q_{wall}^{ave} es lo suficiente como para aportar un flujo de calor durante todo el periodo nocturno logrando llegar a las 6:00 a.m. del día siguiente con un $q_{int}^{ave} = -2 \text{ W/m}^2$.

Con base en lo anterior, se puede decir que el sistema TW tiene la capacidad de aportar energía a una habitación por lo menos 10 horas y media después de la ausencia de la radiación solar.

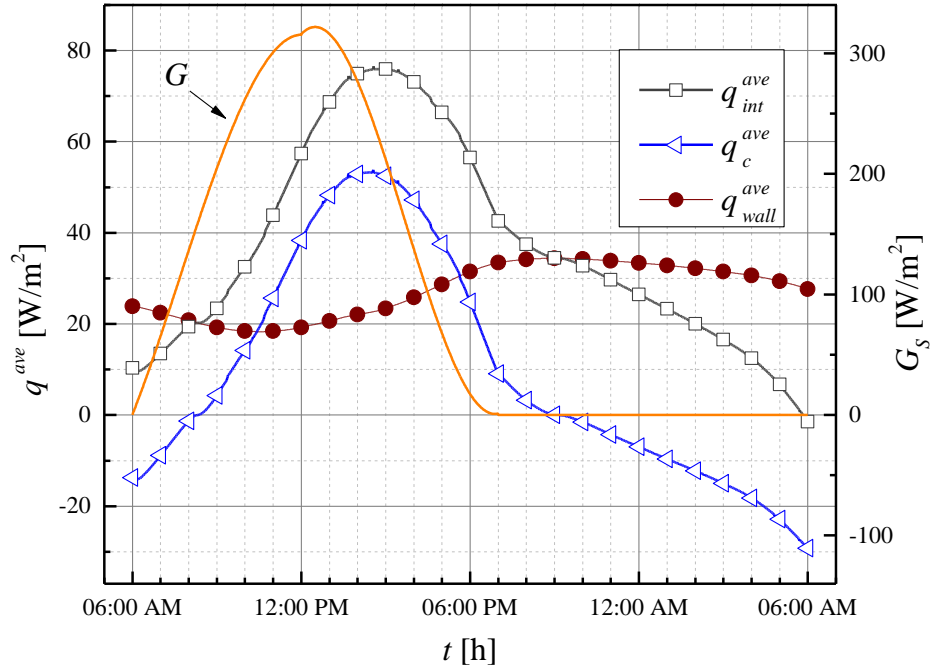


Figura 4.15. Comportamiento del flujo de calor promedio hacia la habitación: día más cálido de Tulancingo.

Con el propósito de observar el comportamiento térmico del sistema TW, la Figura 4.16 muestra el comportamiento anual de la temperatura en la superficie interior del muro. T_{ws}^{ave} se mantiene en un intervalo de 25 a 28 °C durante todo el año. Se observa que para el mes de junio se obtiene la temperatura más baja dentro de este intervalo. Sin embargo, el sistema TW tiene la capacidad de amortiguar las oscilaciones de la temperatura ambiente durante todo el año, para el día más cálido. Esto ayuda a mantener un confort térmico dentro de la habitación.

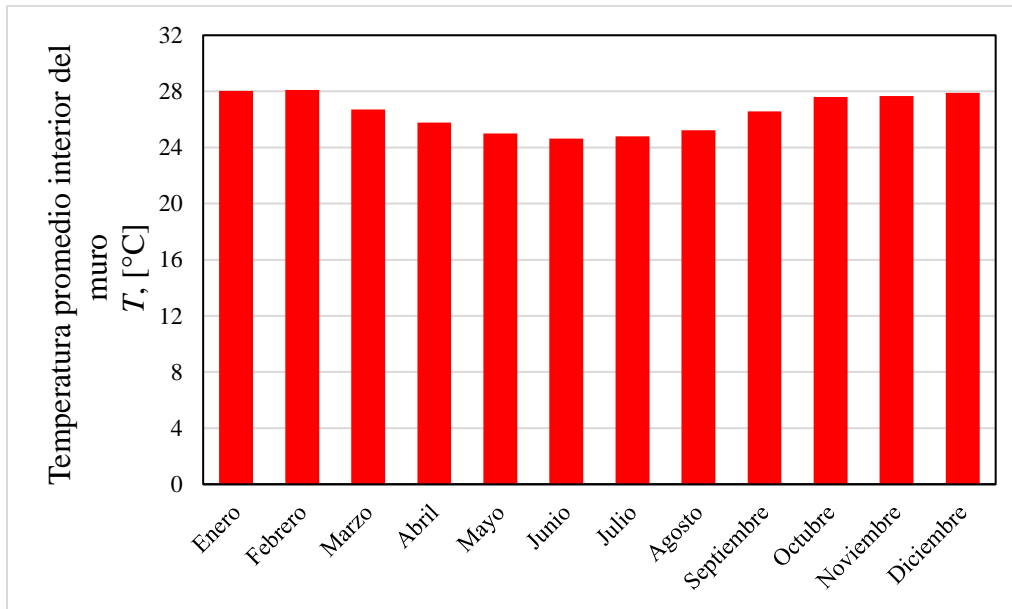


Figura 4.16. Comportamiento anual de la temperatura de la superficie interior: del muro masivo: días más cálidos de Tulancingo.

Calor neto suministrado por el sistema TW para la Ciudad de Tulancingo, Hidalgo

En la Tabla 4.4 se presenta un concentrado de la evaluación anual del calor total suministrado hacia la habitación por el sistema TW. De acuerdo, con lo mostrado en la tabla, se puede observar el calor total anual suministrado por el sistema TW, tanto para los días más fríos y cálidos de cada mes. Correspondiente, a los días más fríos de cada mes se observa que, en los meses de invierno el sistema TW entrega al final del día, mayor calor a la habitación en comparación con los meses de verano, inclusive para los meses de mayo, junio y julio el sistema TW termina extrayendo calor de la habitación.

Por otro lado, para los días más cálidos de cada mes se presentó un comportamiento muy similar al obtenido por los días más fríos. Sin embargo, para estos días se obtuvieron los mayores valores de calor total suministrado para los meses de invierno. Este comportamiento sucede debido a que el sistema de TW está pensado para percibir una menor cantidad de radiación solar en los meses de verano, a pesar de que los meses de veranos son los que presentan un mayor valor de radiación solar sobre la horizontal, pero al descomponer la

radiación solar sobre la vertical este valor desciende considerablemente. En cambio, para los meses de invierno, el valor de la radiación solar sobre la vertical es mayor que la horizontal esto debido por la posición de la tierra con respecto al sol y siendo la radiación solar la fuerza impulsora del sistema pasivo TW da como resultado este comportamiento.

Tabla 4.4. Evaluación anual del calor total suministrado a la habitación: Tulancingo.

Mes	Día más frío [kWh/m ²]	Día más cálido [kWh/m ²]
Enero	1.78	2.59
Febrero	1.44	2.67
Marzo	1.43	1.64
Abril	0.04	0.89
Mayo	-0.87	0.36
Junio	-0.04	-0.12
Julio	-0.32	0.01
Agosto	0.01	0.31
Septiembre	0.67	1.46
Octubre	2.01	2.21
Noviembre	1.88	2.25
Diciembre	2.19	2.38
Total	10.22	16.65

*Meses de invierno: 21 de diciembre a 21 marzo. Meses de verano: 21 junio a 21,23 de septiembre.

Finalmente, la evaluación anual del sistema TW bajo las condiciones climáticas de la Ciudad de Tulancingo, Hidalgo. Se determinó que el sistema TW proporciona 10.22 kWh/m² para los días más fríos de cada mes, mientras que para los días más cálidos de cada mes el sistema TW proporciona 16.65 kWh/m².

4.4.2 Ciudad de México, alcaldía de Tacubaya 2014

En primera instancia se presenta el comportamiento térmico del muro masivo para la Ciudad de México. Posteriormente, se analizan los flujos de calor hacia la habitación y finalmente se presenta el calor total anual suministrado por el sistema TW.

Día más frío

En la Figura 4.17 se muestra el comportamiento de la temperatura promedio del absorbedor T_{abs}^{ave} , la de superficie interior del muro masivo T_{ws}^{ave} y la temperatura ambiente T_{amb} . El día comienza con una $T_{amb} = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (7:00 AM). Conforme el día transcurre, la radiación solar comienza a intensificarse mientras la temperatura ambiente alcanza su valor máximo a la 3:30 PM con $17.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, el absorbedor hace lo propio comenzado con un valor de $T_{abs}^{ave} = 24.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y alcanzado su valor máximo hasta las 4:00 PM con $T_{abs}^{ave} = 50.9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

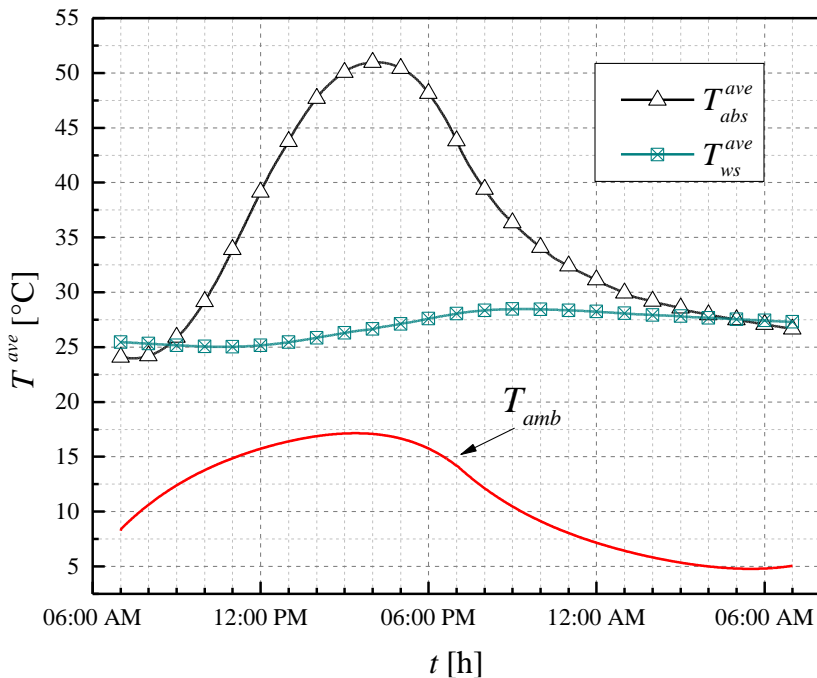


Figura 4.17. Comportamiento de la temperatura del muro masivo: día más frío de la Ciudad de México.

Después, en el periodo nocturno, el muro masivo comienza a liberar su energía manteniendo una T_{ws}^{ave} por arriba de la temperatura ambiente durante toda la noche, comenzando desde las 8:00 PM con un valor de 28.4 °C y descendiendo ligeramente hasta alcanzar 27.5 °C a las 7:00 a.m. del día siguiente. Puede observarse que aun después del periodo de descarga, T_{ws}^{ave} se mantiene con un valor por encima de la habitación. Esto indica que el muro masivo posee la capacidad de suministrar energía durante todo el periodo nocturno.

En la Figura 4.18, se muestra el comportamiento de los flujos de calor hacia la habitación a lo largo de todo el día. Se observa que, al inicio del día el flujo de calor que suministra el muro tiene un valor de $q_{wall}^{ave} = 24 \text{ W/m}^2$ mientras que, el flujo de calor que suministra el canal q_c^{ave} es de -50 W/m^2 , el flujo negativo por parte de q_c^{ave} significa que la habitación está perdiendo energía por parte del canal, sin embargo, el valor de q_c^{ave} comienza a elevarse conforme aumenta la radiación solar, esto se debe gracias al efecto invernadero formado por el canal. A partir de las 10:00 a.m. el q_c^{ave} logra ser positivo lo que significa que la temperatura de salida del canal es mayor a la temperatura de la habitación. Conforme el día transcurre y la radiación solar aumenta, alcanza su valor máximo de 730 W/m^2 a las 13:30 PM, mientras que el flujo de calor máximo hacia la habitación por parte de q_c^{ave} lo alcanza a las 4:00 PM teniendo un valor máximo de 130 W/m^2 .

Por otro lado, a las 7:00 PM la radiación solar es nula. Sin embargo, q_c^{ave} logra suministrar energía a la habitación por dos horas más para posteriormente, en lugar de aportar energía hacia la habitación éste cede energía hacia el medio ambiente mediante la pared semitransparente, alcanzando su valor negativo máximo a las 7:00 a.m. del día siguiente con un valor de $q_c^{ave} = -49 \text{ W/m}^2$.

Para el caso del q_{wall}^{ave} , presenta un ligero descenso desde las 7:00 a.m. hasta las 11:00 a.m. para posterior a esta hora el q_{wall}^{ave} comienza a incrementar ligeramente hasta alcanzar su valor máximo de 70 W/m^2 para posteriormente comenzar a descender muy ligeramente. Esto se debe a la liberación gradual de la energía almacenada en el muro. Se observa que, durante toda la noche, q_{wall}^{ave} suministra energía hacia la habitación llegando a las 7:00 a.m. del día siguiente con un valor de 50.8 W/m^2 .

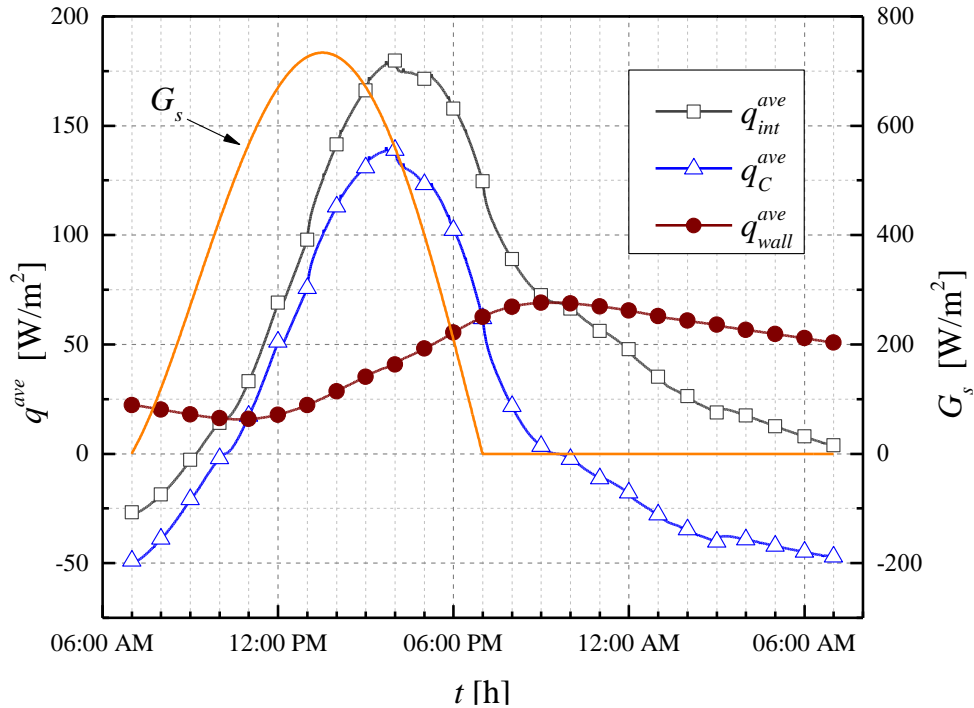


Figura 4.18. Comportamiento del flujo de calor promedio hacia la habitación: día más frío de la Ciudad de México.

El flujo de calor total suministrado hacia la habitación q_{int}^{ave} muestra que a pesar de que q_C^{ave} deja de suministrar energía a partir de las 9:00 PM, el q_{wall}^{ave} es lo suficiente como para suministrar energía durante todo el periodo nocturno logrando llegar a las 7:00 a.m. del día siguiente con un $q_{int}^{ave} = 3.4 \text{ W/m}^2$, como se observa en la Figura 4.18.

En la Figura 4.19, se observa que T_{ws}^{ave} se mantiene en un intervalo de 25 a 27 °C durante todo el año. Se observa que para el mes de junio se obtiene la temperatura más baja dentro de este intervalo. Sin embargo el sistema TW logra mantener la T_{ws}^{ave} durante todo el año por encima de la temperatura de la habitación. El sistema TW amortigua las oscilaciones de la temperatura ambiente durante todo el año, para el día más frío. Esto ayuda a mantener un confort térmico en la habitación.

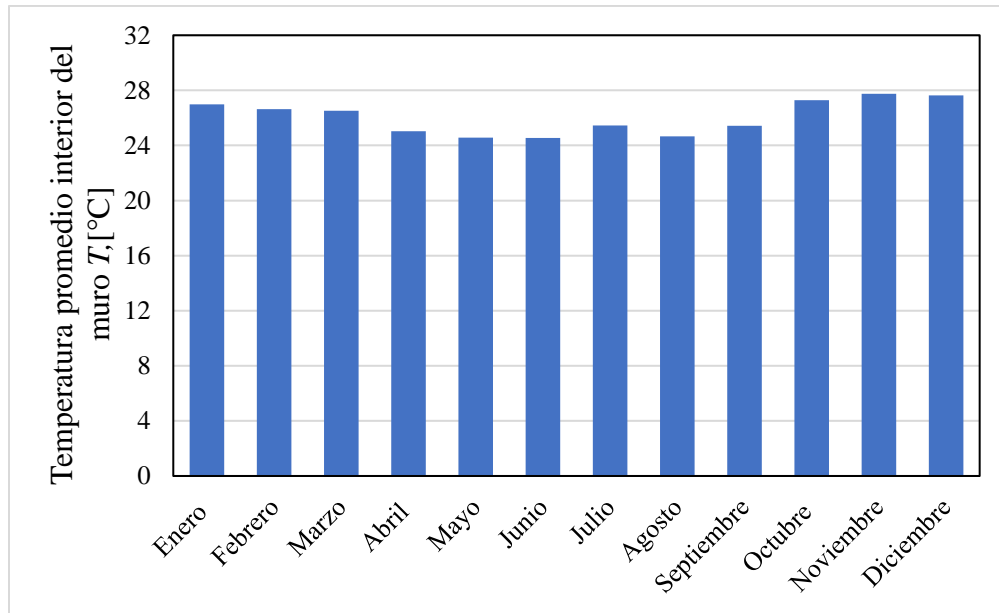


Figura 4.19. Comportamiento térmico de la temperatura interior promedio anual: día más frío de la Ciudad de México.

Día más cálido

La Figura 4.20 muestra el comportamiento de T_{abs}^{ave} , T_{ws}^{ave} y de la T_{amb} . El día comienza con una T_{amb} de 17.2 °C (6:00 AM). Conforme avanza el día, la radiación solar comienza a intensificarse, mientras que la temperatura ambiente alcanza su valor máximo a la 2:30 PM con 30.5 °C. El absorbedor hace lo propio comenzando con un valor de $T_{abs}^{ave} = 26$ °C y alcanzando su valor máximo hasta las 3:00 PM con un valor de $T_{abs}^{ave} = 35.4$ °C. Este comportamiento se debe a que existe un periodo de tiempo en el que el muro masivo comienza a almacenar energía para posteriormente liberarla (inercia térmica). Esto provoca que la T_{ws}^{ave} presente un amortiguamiento, siendo esto beneficioso para el día cálido.

Finalmente, en el periodo nocturno, el muro masivo comienza a liberar su energía manteniendo una T_{ws}^{ave} por encima de la temperatura ambiente durante toda la noche, comenzando desde las 9:00 PM con un valor de 26 °C y descendiendo ligeramente hasta alcanzar 25.5 °C a las 6:00 a.m. del día siguiente. Se observa que aun después del periodo de descarga, T_{ws}^{ave} se encuentra por arriba del valor de la temperatura de la habitación.

Esto indica que el muro masivo tiene la capacidad de aportar energía durante todo el periodo nocturno.

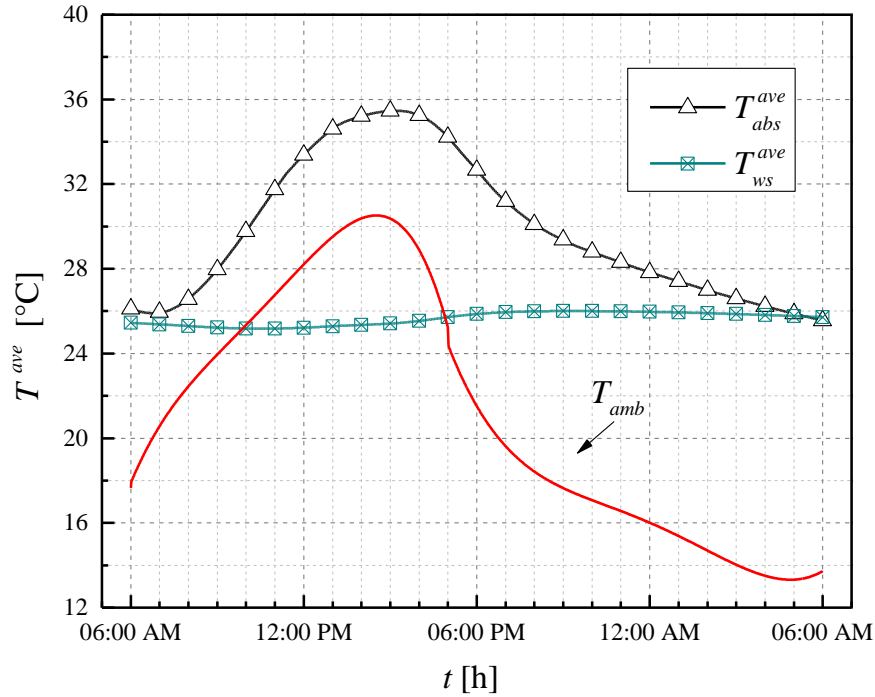


Figura 4.20. Comportamiento térmico del muro masivo: día más cálido de la Ciudad de México.

De acuerdo con la Figura 4.21, se muestra el comportamiento de los flujos de calor hacia el interior de la habitación a lo largo de todo el día. Se observa que, el flujo de calor que suministra el muro masivo hacia la habitación comienza con un valor $q_{wall}^{ave} = 22 \text{ W/m}^2$. Por el contrario, el flujo de calor proporcionado por el canal $q_c^{ave} = -11 \text{ W/m}^2$ siendo las 6:00 AM, el flujo negativo por parte de q_c^{ave} significa que la habitación está perdiendo energía por parte de canal. Sin embargo, q_c^{ave} comienza a corregirse conforme aumenta la radiación solar y debido al efecto invernadero que se forma en el canal, siendo a partir de las 8:00 a.m. cuando el flujo de calor comienza hacer positivo lo que significa que la temperatura de salida del canal es mayor a la temperatura de la habitación. A medida que transcurre el día, la radiación solar alcanza su valor máximo a las 12:00 PM teniendo un valor de 297 W/m^2 .

El flujo de calor máximo hacia la habitación por parte de q_c^{ave} , lo alcanza a las 3:00 PM tendiendo un valor de 50 W/m² observándose que existe un desfase de una hora con respecto al valor máximo alcanzado por la radiación solar de tres horas.

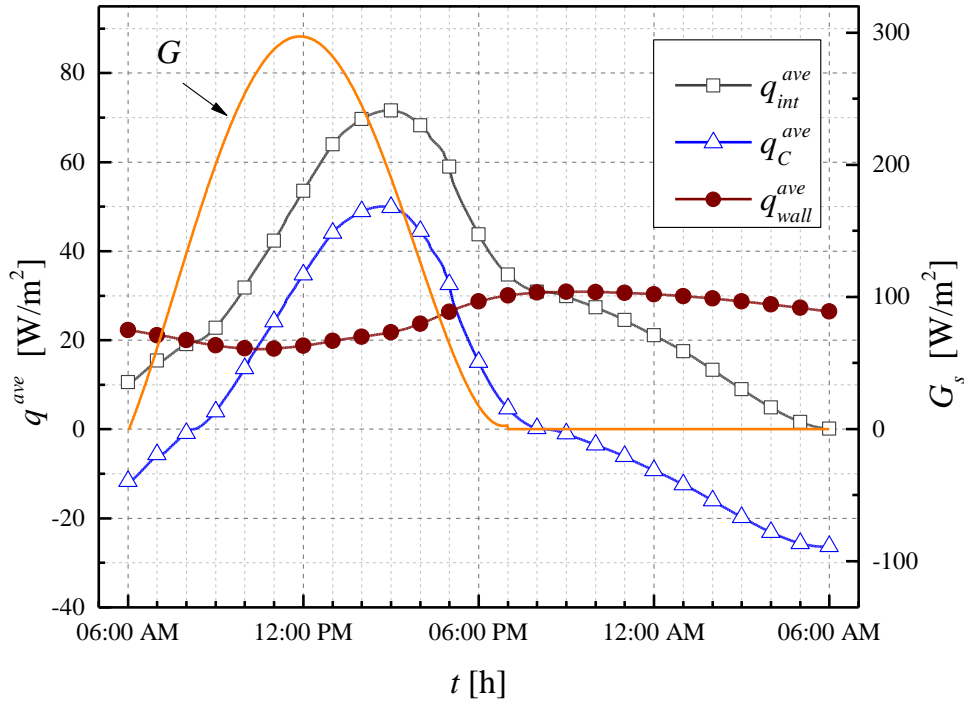


Figura 4.21. Comportamiento térmico del flujo de calor promedio hacia la habitación: día más cálido para la Ciudad de México.

Por otro lado, a las 7:00 PM q_c^{ave} logra suministrar energía a la habitación por una hora más para posteriormente, en lugar de suministrar energía a la habitación, comienza a extraerla de ésta, alcanzando su valor negativo máximo a las 6:00 a.m. del día siguiente con -26 W/m². Teniendo en cuenta que desde las 6:00 AM, q_{wall}^{ave} presenta un ligero descenso, esto se mantiene hasta las 11:00 AM. Posteriormente a esta hora, el q_{wall}^{ave} comienza a incrementarse hasta alcanzar su valor máximo de 30.8 W/m² hasta que comienza a descender muy ligeramente. Esto se debe a la liberación gradual de la energía almacenada por parte del muro. Se observa que, durante toda la noche, q_{wall}^{ave} suministra energía hacia la habitación llegando a las 6:00 a.m. del día siguiente con un valor de 26.5 W/m².

El flujo de calor total suministrado hacia la habitación q_{int}^{ave} muestra que a pesar de que q_c^{ave} deja de suministrar energía a partir de las 8:00 PM, el q_{wall}^{ave} es lo suficiente como para suministrar energía durante todo el periodo nocturno logrando llegar a las 6:00 a.m. del día siguiente con $q_{int}^{ave} = 0.1 \text{ W/m}^2$, como se observa en la Figura 4.21. De esta manera, se puede decir que el sistema TW tiene la capacidad de suministrar energía a una habitación por lo menos 10 horas después de la ausencia de la radiación solar.

En la Figura 4.22, se observa que T_{ws}^{ave} , se mantiene en un intervalo de 25 a 28 °C durante todo el año. Se observa que para el mes de julio se obtiene la temperatura más baja dentro de este intervalo. Sin embargo, el sistema TW tiene la capacidad de amortiguar las oscilaciones de la temperatura ambiente durante todo el año, para el día más cálido. Esto ayuda a mantener un confort térmico dentro de la habitación.

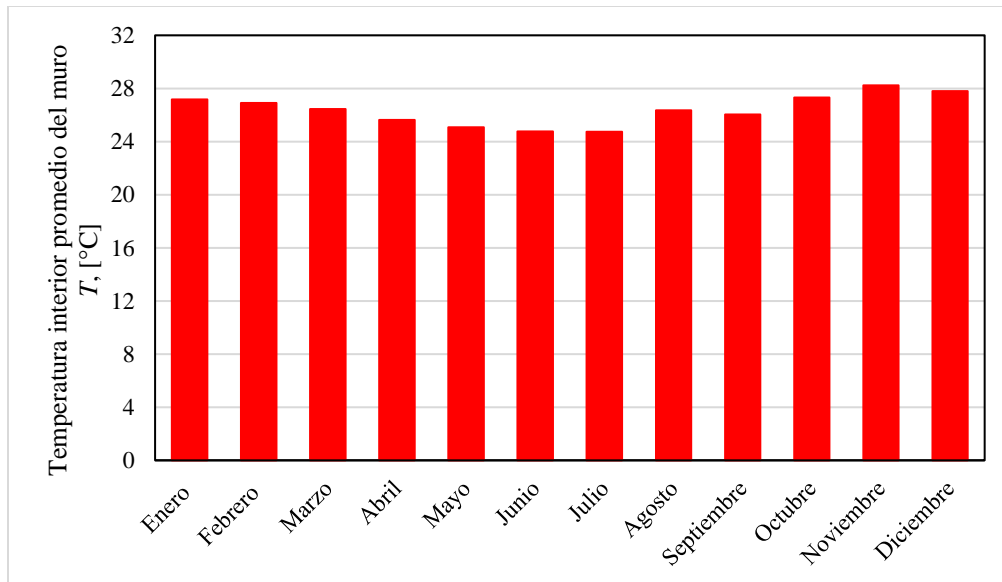


Figura 4.22. Comportamiento anual de la temperatura de la superficie interior del muro masivo: días más cálidos de la Ciudad de México.

Calor neto suministrado por el sistema TW para la Ciudad de Ciudad de México

En la Tabla 4.5 se presenta la evaluación anual del calor total suministrado hacia la habitación por el sistema TW. Correspondiente a la evaluación del sistema TW para los días más fríos de cada mes, se observa que, en los meses de invierno, el sistema TW entrega al final del día mayor calor a la habitación en comparación con los meses de verano. Inclusive para los meses de verano (junio a septiembre), el sistema TW termina extrayendo calor de la habitación. Por otro lado, para los días más cálidos de cada mes, se presentó un comportamiento muy similar al presentado por el día frío. De este modo, la evaluación anual del sistema TW bajo las condiciones climáticas de la Ciudad de México de la alcaldía de Tacubaya, se determinó que el sistema TW proporciona 10.64 kWh/m² para los días más fríos de cada mes durante todo el año, mientras que para los días más cálidos de cada mes durante todo el año el sistema TW proporciona 16.55kWh/m².

Tabla 4.5. Evaluación anual del calor total suministrado a la habitación: Ciudad de México.

Mes	Día más frío [kWh/m ²]	Día más cálido [kWh/m ²]
Enero	1.58	1.82
Febrero	1.35	1.80
Marzo	1.17	1.51
Abril	0.14	0.78
Mayo	-0.38	0.42
Junio	-0.30	0.17
Julio	0.57	0.01
Agosto	0.02	1.42
Septiembre	0.51	1.15
Octubre	1.72	2.09
Noviembre	2.17	2.88
Diciembre	2.09	2.50
Total	10.64	16.55

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este Capítulo se presentan las conclusiones de los resultados presentados en el Capítulo IV, así como las recomendaciones para la elaboración de trabajos futuros. En primer lugar, se presentan las conclusiones de la evaluación térmica del sistema de TW para ambas ciudades con clima frío de la República Mexicana. Posteriormente, se proporcionan las recomendaciones a manera de sugerencia para trabajos futuros relacionados con el sistema TW.

5.1 Conclusiones

Se realizó un estudio paramétrico del material en el muro masivo donde se evaluaron tres distintos materiales típicamente utilizados en la industria de la construcción (concreto, ladrillo y adobe) en la República Mexicana. Y se evaluó el sistema TW bajo condiciones climáticas de las ciudades de Tulancingo, Hidalgo y Ciudad de México. Con basen en los resultados, puede concluirse lo siguiente:

- El comportamiento de las temperaturas del vidrio (T_g^{ave}), aire en el canal (T_f^{ave}), absorbedor (T_{abs}^{ave}) y de la superficie expuesta a la habitación (T_{ws}^{ave}) es muy similar indistintamente del material que se utilice. No obstante, se encontró que T_{ws}^{ave} es el parámetro más sensible al tipo de material en el muro. Esto garantiza que el intercambio convectivo y radiativo entre la pared interior del muro y la habitación siempre sea de la primera a la segunda durante el periodo nocturno.
- De acuerdo con la energía total suministrada (Q_{int}), se encontró que el concreto aporta 1.78 kWh/m² durante el día más frío del año, es decir un 23% más que el ladrillo y 30% más que el adobe. Por lo tanto, el uso de concreto presenta el mejor desempeño térmico del sistema muro Trombe. Adicionalmente, desde el punto de vista del flujo de calor suministrado por el muro y por el canal a la habitación (q_{int}^{ave}), el uso del concreto produce el mejor comportamiento térmico del sistema en comparación con el uso del adobe y del ladrillo. Se encontró que, a pesar de que el flujo de calor debido al lazo convectivo entre el canal y la habitación (q_c^{ave}) tiende a invertirse durante la noche, el flujo de calor suministrado por el muro (q_{wall}^{ave}) permite compensar estas pérdidas a través del vidrio, lo cual prolonga el calentamiento pasivo en la habitación hasta el día siguiente. Para el caso del muro de adobe y de ladrillo el suministro de energía en periodo nocturno concluye a medianoche para el primero y a las 2:00 a.m. para el segundo.
- De acuerdo con los resultados de la evaluación térmica, se encontró que, para Tulancingo, para el día más frío del año, la energía total suministrada por el sistema

(Q_{int}) fue de 1.78 kWh/m². Mientras que, para el día más cálido, el sistema aportó 0.83 kWh/m². Adicionalmente, se obtuvo un suministro total anual de 26.87 kWh/m² de los cuales, 10.22 kWh/m² corresponden a los días más fríos y 16.65 kWh/m² a los días más cálidos. Para el caso de la Ciudad de México, la energía total suministrada fue de 1.58 kWh/m² y de 0.78 kWh/m² para el día más frío y el más cálido, respectivamente. El suministro total anual fue de 27.19 kWh/m² siendo 10.64 kWh/m² durante los días más fríos y 16.55 kWh/m² durante los días más cálidos.

- Se encontró que la mayor aportación de energía se presentó durante los meses de invierno, alcanzando un máximo de 2.19 kWh/m² para el día más frío de diciembre y de 2.67 kWh/m² para el día más cálido de febrero. Por otro lado, el total de energía suministrada durante los días más cálidos fue de 16.65 kWh/m², presentando valores mínimos durante los meses de verano: -0.87 kWh/m² para el día menos cálido de mayo y de -0.12 kWh/m² para el día más cálido de junio. De igual manera que para el caso de Tulancingo, en la Ciudad de México se presentan los valores máximos durante los meses de invierno (2.17 kWh/m² para el día más frío de noviembre y con 2.88 kWh/m² para el día más cálido de diciembre) y los mínimos durante los meses de verano (-0.38 kWh/m² para el día más frío de mayo y 0.01 kWh/m² para el día más cálido de julio). Los valores negativos en la energía total suministrada indican que en realidad el sistema TW es superado por las pérdidas a través de la pared semitransparente. Sin embargo, es importante comentar que durante ese periodo del año no se requiere un calentamiento. Razón por la cual podría prescindirse del uso del sistema en ese tiempo.

Como conclusión general, se puede decir que el sistema de muro Trombe tiene el potencial para implementarse en ciudades de clima generalmente frío de México como Tulancingo, Hidalgo y la Ciudad de México, las cuales presenta un tipo de clima templado subhúmedo. Con ello, se busca disminuir el gasto corriente en el consumo de energía eléctrica en una edificación y así alcanzar una eficiencia energética. Mientras que, se ayuda a mantener una condición de confort térmico dentro de una edificación.

A manera de conclusión final, se afirma que tanto el objetivo general como los objetivos específicos y el alcance se cumplieron satisfactoriamente.

5.2 Recomendaciones para trabajos futuros.

Con la intención de dar seguimiento al estudio realizado en este trabajo, se recomiendan los siguientes puntos para estudios posteriores:

- Realizar un estudio socio económico de la implementación del sistema muro Trombe en la República Mexicana.
- Analizar el comportamiento térmico del sistema muro Trombe para condiciones climáticas de otros climas de la República Mexicana.
- Realizar un estudio paramétrico considerando la incorporación de materiales de cambio de fase (PCM) en el muro masivo con el propósito de disminuir el espesor del muro y a su vez el espacio ocupado por el mismo sin comprometer la capacidad de almacenamiento.
- Considerar un estudio de la gestión de ventilación mediante la implementación de una configuración que inhabilite el lazo convectivo entre el canal y la habitación para disminuir las pérdidas a través del vidrio durante la noche.
- Realizar un estudio experimental de un sistema de muro Trombe con el propósito de obtener información para validar el modelo teórico y de esta manera darle un mayor soporte.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abbassi F., Dimassi N., Dehmani L., Energetic Study Of A Trombe Wall System Under Diferent Tunisian Building Configurations. *Energy And Buildings*, Vol. 80, Págs. 302-308, 2014.
2. Adbeen A., Serageldin A., Ibrahim M., El-Zarafarny A., Ookawara S., Murata R., Experimental, Analytical, And Numerical Investigation Into The Feasibility Of Integratin A Passive Trombe Wall Into A Single Room. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 154, Pág. 751-768, 2019.
3. Akbarzadeh A., Charters W., Lesslie D., Thermocirculation Characteristics Of ATrombe Wall Passive Test Cell. *Solar Energy*, Vol. 28, Págs. 641-468, 1982.
4. Al-Saadi S. y Zhai Z., A New Validated TRNSYS Module For Simulating Latent Stotage Walls. *Energy and Building*, Vol. 109, Págs. 274-290, 2015.
5. ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. *Fundamentals handbook*, E.U.A., 2009.
6. ASHRAE, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy Approve*, Standard 55-2004.
7. Balcomb J., Hedstrom J., Mcfarland R., Simulation Analysis Of Passive Solar Heated Buildings-Preliminary Results. *Solar Energy*, Vol. 19, Págs. 277-282, 1977.
8. Chapra S. y Canale R., *Métodos Numéricos Para Ingenieros*. 5ta edición, Mc Graw Hill, 2006
9. Chávez-Galán P.T., Almanza R y Rodríguez N., Experimental measurements of termal properties for mexican building materials to simulate behaviour to save energy. *Proceedings of ISES world congress*, I-V:496-501, 2007.
10. Cuevas-Figueroa G., *Análisis de la Transferencia de Calor Conjugada en un Sistema Solar Pasivo de Muro Trombe*. Tesis de Maestría, CENIDET, Cuernavaca, Mor. (México), 2008.
11. Demoun A. y Grigoriadis D., 1D Model For The Energy Yiel Calculation Of Natural Convection Solar Air Collector. *Renewable Energy*, Vol. 119, Págs. 649-661, 2018.

12. Duffie, J., Beckman, W., Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley and Sons, Inc., 2006.
13. Ferziger J., Peric M., Computational Methods For Fluid Dynamics. Springer, New York, 2002.
14. Francesco F., Trombe Walls For Lightweight Buildings In Temperature and Hot Climates. Exploring The Use Of Phase-Change Materials For Performances Improvement. Energy Promedia, Vol. 30, Págs. 110-119, 2012.
15. Hami K., Draoui B., Hami O., The Thermal Performances Of A Solar Wall. Energy, Vol. 39, Págs. 11-16, 2012.
16. Hernández I., Análisis de la Transferencia de Calor Conjugada En Un Sistema Solar Pasivo De Muro Trombe Para Calentamiento o Ventilación. Tesis de Doctorado, CENIDET, Cuernavaca, Mor., México, 2016.
17. Hernández-López I., Xamán J., Chávez Y., Hernández-Pérez I., Alvarado R., Thermal Energy Storage And Losses In A Room-Trombe Wall System Located In Mexico. Energy, Vol. 109, Págs. 512-524, 2016.
18. Incropera, F., and De Witt, D. P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 5ta edición., John Wiley, New York, 2002.
19. INEGI, Encuesta Intercensal, 2015.
20. Jaber S., Ajib S., Optimum Desing Of Trombe Wall System In Mediterranean Region. Solar Energy, Vol 85, Págs. 1891-1898, 2011.
21. Krüger E., Suzuki E. y Matoski A., Evaluation Of A Trombe Wall System In A Subtropical Location. Energy and Buildings, Vol. 66, Págs. 364-372, 2013.
22. Liu X., Zhou Y., Zhang G., Numerical Study On Cooling Performance Of A Ventilated Trombe Wall With Phase Change Materials. Building Simulation, Vol. 11, Págs. 677-694, 2018.
23. Liu Y., Wang D., Ma C., Liu J., A Numerical And Experimental Analysis Of The Air Vent Management And Heat Storage Characteristics Of A Trombe Wall. Solar Energy, Vol. 91, Págs. 1-10, 2013.

24. Morse ES, Warming and ventilating apartments by the suns' rays, U.S. Patent, Págs. 246-626, 1881.
25. Nwachukwu N. y Okonkwo W., Effect of an Absorptive Coating on Solar Energy Storage in a Trombe wall system. *Energy and Buildings*, Vol. 40, Págs. 371-374, 2008.
26. Ohanessian P. y Charters W., Thermal Simulation Of A Passive Solar House Using A Trombe-Michel Wall Structure. *Solar Energy*, Vol. 20, Págs. 275-281, 1978.
27. Ong K., A Mathematical Model Of A Solar Chimney. *Renewable Energy*, Vol. 28, Págs. 1047-1060, 2003.
28. Ozisik, M. Necati, Heat Conduction. 2da edición, John Wiley & Song, Inc., 1976.
29. Rabani M., Kalangtar V., Rabani M., Heat Transfer Analysis Of A Trombe Wall With A Projecting Channel A Desing. *Energy*, Vol. 134, Págs. 943-950, 2017.
30. Rabani M., Kalantar V., Faghieh A., Rabani M., Rabani R., Numerical Simulation Of A Trombe Wall To Predict The Energy Storage Rate And Time Duration Of Room Heating During The Non-Sunny Periods. *Heat Mass Transfer*, Vol. 49, Págs. 1395-1404, 2013.
31. SENER, Balance Nacional de Energía, 2016.
32. Utzinger D., Klein S., Mitchell J., The Effect Of Air Rate In Collector-Storage Wall. *Solar Energy*, Vol. 25, Págs. 511-519, 1980.
33. Xamán J., Gijón-Rivera M., Dinámica De Fluidos Computacional Para Ingenieros. Palibrio, 2016.
34. Xie J., Wang W., Liu J., Pan S., Thermal Performance Analisis Of PCM Wallboards For Building Application Based On Numerical Simulation. *Solar Energy*, Vol. 162, Págs. 533-540, 2018.
35. Yu B., He W., Li N., Wang L., Cai J., Chen H., Ji J., Xu G., Experimental And Numerical Performance Analysis Of A TC-Trombe Wall. *Applied Energy*, Vol. 206, Págs. 70-82, 2017.

ANEXO A: Datos climáticos y funciones ajustadas.

Tabla A.1. Datos climáticos del día más frío de la Ciudad Tulancingo, Hidalgo 2014.

Fecha	Hora	G_s [W/m ²]	T_{amb} [°C]	V_{wind} [m/s]
18/01/2014	7:00:00 a.m.	0.00	0	0.47
18/01/2014	8:00:00 a.m.	22.46	-0.1	0.95
18/01/2014	9:00:00 a.m.	252.73	4.9	0.98
18/01/2014	10:00:00 a.m.	435.07	10.7	0.60
18/01/2014	11:00:00 a.m.	598.13	12.3	0.65
18/01/2014	12:00:00 p.m.	675.71	15.6	1.08
18/01/2014	1:00:00 p.m.	720.96	17.3	1.05
18/01/2014	2:00:00 p.m.	715.36	18.2	0.53
18/01/2014	3:00:00 p.m.	684.99	18.5	0.97
18/01/2014	4:00:00 p.m.	634.21	16.9	0.38
18/01/2014	5:00:00 p.m.	778.42	16.2	0.73
18/01/2014	6:00:00 p.m.	7.84	13.2	2.08
18/01/2014	7:00:00 p.m.	0.00	9.9	2.60
18/01/2014	8:00:00 p.m.	0.00	8.4	1.55
18/01/2014	9:00:00 p.m.	0.00	7.5	1.05
18/01/2014	10:00:00 p.m.	0.00	7.2	0.88
18/01/2014	11:00:00 p.m.	0.00	6.2	1.43
19/01/2014	12:00:00 a.m.	0.00	5.7	0.98
19/01/2014	1:00:00 a.m.	0.00	5.1	0.45
19/01/2014	2:00:00 a.m.	0.00	4	0.32
19/01/2014	3:00:00 a.m.	0.00	3.8	0.22
19/01/2014	4:00:00 a.m.	0.00	3.4	0.60
19/01/2014	5:00:00 a.m.	0.00	3.4	0.73
19/01/2014	6:00:00 a.m.	0.00	3.1	0.88
19/01/2014	7:00:00 a.m.	0.00	2.2	0.88

Tabla A.2. Datos climáticos del día más cálido de la Ciudad Tulancingo, Hidalgo 2014.

Fecha	Hora	G_s [W/m ²]	T_{amb} [°C]	V_{wind} [m/s]
14/04/2014	6:00:00 a.m.	0.00	16.6	0.9
14/04/2014	7:00:00 a.m.	56.80	17.7	0.6
14/04/2014	8:00:00 a.m.	135.35	21.7	0.5
14/04/2014	9:00:00 a.m.	204.77	24.6	1.9
14/04/2014	10:00:00 a.m.	261.75	27.9	0.3
14/04/2014	11:00:00 a.m.	294.11	29.5	0.5
14/04/2014	12:00:00 p.m.	315.11	30.3	0.8
14/04/2014	1:00:00 p.m.	314.67	31.2	1.6
14/04/2014	2:00:00 p.m.	280.90	31.4	1.7
14/04/2014	3:00:00 p.m.	208.37	31.3	1.8
14/04/2014	4:00:00 p.m.	109.78	29.9	1.8
14/04/2014	5:00:00 p.m.	67.42	28.2	2.9
15/04/2014	6:00:00 p.m.	12.60	24	3.5
15/04/2014	7:00:00 p.m.	0.00	20.7	1.0
15/04/2014	8:00:00 p.m.	0.00	19.5	0.9
15/04/2014	9:00:00 p.m.	0.00	19	1.9
15/04/2014	10:00:00 p.m.	0.00	17.3	2.2
15/04/2014	11:00:00 p.m.	0.00	16.7	2.1
15/04/2014	12:00:00 a.m.	0.00	15.6	1.4
15/04/2014	1:00:00 a.m.	0.00	15.5	0.9
15/04/2014	2:00:00 a.m.	0.00	14.4	2.4
15/04/2014	3:00:00 a.m.	0.00	14.4	0.9
15/04/2014	4:00:00 a.m.	0.00	13.6	0.4
15/04/2014	5:00:00 a.m.	0.00	11.7	0.7
15/04/2014	6:00:00 a.m.	0.00	10.9	1.4

Tabla A.3. Funciones para la radiación solar y temperatura ambiente del día más frío de Tulancingo Hidalgo.

Día	Horario	Funciones
		Radiación solar
Frío	7 a.m.- 1 p.m.	$G_s(t) = -0.00704 + 0.0491t - 8.48005 \times 10^{-6}t^2 + 1.42407 \times 10^{-9}t^3 - 8.29762 \times 10^{-14}t^4 + 1.55844 \times 10^{-18}t^5$
	1 p.m.- 7 p.m.	$G_s(t) = -11004.39738 + 1.74124t - 1.03784 \times 10^{-4}t^2 + 3.15824 \times 10^{-9}t^3 - 4.94387 \times 10^{-14}t^4 + 3.12597 \times 10^{-19}t^5$
	7 p.m.- 7 a.m.	$G_s(t) = 0$
		Temperatura ambiente
	7 a.m.-7 p.m.	$T_{amb}(t) = 272.78009 - 2.35234 \times 10^{-4}t + 2.04132 \times 10^{-7}t^2 - 1.19421 \times 10^{-11}t^3 + 2.69247 \times 10^{-16}t^4 - 2.23097 \times 10^{-21}t^5$
	7 p.m.-7 a.m.	$T_{amb}(t) = 1199.28064 - 0.07413t - 2.37822 \times 10^{-6}t^2 - 3.77872 \times 10^{-11}t^3 + 2.96463 \times 10^{-16}t^4 - 9.18268 \times 10^{-22}t^5$

Tabla A.4. Funciones para la radiación solar y temperatura ambiente del día más cálido de Tulancingo Hidalgo.

Día	Horario	Funciones
		Radiación solar
Cálido	6 a.m.-12 p.m.	$G_s(t) = 38924.93081 - 1.47315t + 1.99033 \times 10^{-5}t^2 - 1.12293 \times 10^{-10}t^3 + 2.19005 \times 10^{-16}t^4$
	12 p.m.-7 p.m.	$G_s(t) = -91454.08835 + 2.30847t - 1.92101 \times 10^{-5}t^2 + 5.28071 \times 10^{-11}t^3$
	7 p.m.- 6 a.m.	$G_s(t) = 0$
		Temperatura ambiente
	6 a.m.-1 p.m.	$T_{amb}(t) = 805.62238 - 0.02048t + 2.78574 \times 10^{-7}t^2 - 1.51578 \times 10^{-12}t^3 + 2.71875 \times 10^{-18}t^4$
	1 p.m.-6 a.m.	$T_{amb}(t) = -1033.60963 + 0.04169t - 4.73018 \times 10^{-7}t^2 + 2.32392 \times 10^{-12}t^3 - 4.20898 \times 10^{-18}t^4$

Tabla A.5. Datos climáticos del día más frío de delegación Tacubaya, Ciudad de México 2014.

Fecha	Hora	G_s [W/m ²]	T_{amb} [°C]	V_{wind} [m/s]
17/01/2014	7:00:00 a.m.	0.00	8.40	0.4
17/01/2014	8:00:00 a.m.	124.06	10.50	0.0
17/01/2014	9:00:00 a.m.	263.10	12.40	0.3
17/01/2014	10:00:00 a.m.	427.67	13.90	0.7
17/01/2014	11:00:00 a.m.	574.25	14.80	0.3
17/01/2014	12:00:00 p.m.	667.69	15.70	0.4
17/01/2014	1:00:00 p.m.	724.47	16.30	2.1
17/01/2014	2:00:00 p.m.	718.50	16.80	0.6
17/01/2014	3:00:00 p.m.	669.71	17.15	0.5
17/01/2014	4:00:00 p.m.	567.64	17.20	0.1
17/01/2014	5:00:00 p.m.	401.39	16.60	1.2
18/01/2014	6:00:00 p.m.	198.40	15.60	0.6
18/01/2014	7:00:00 p.m.	0.00	14.20	0.3
18/01/2014	8:00:00 p.m.	0.00	12.00	1.8
18/01/2014	9:00:00 p.m.	0.00	10.30	1.9
18/01/2014	10:00:00 p.m.	0.00	9.10	2.0
18/01/2014	11:00:00 p.m.	0.00	8.00	2.0
18/01/2014	12:00:00 a.m.	0.00	7.20	1.0
18/01/2014	1:00:00 a.m.	0.00	6.30	1.6
18/01/2014	2:00:00 a.m.	0.00	5.70	2.0
18/01/2014	3:00:00 a.m.	0.00	5.10	2.2
18/01/2014	4:00:00 a.m.	0.00	5.00	0.2
18/01/2014	5:00:00 a.m.	0.00	4.70	0.1
18/01/2014	6:00:00 a.m.	0.00	4.80	0.1
18/01/2014	7:00:00 a.m.	0.00	4.90	0.2

Tabla A.6. Datos climáticos del día más cálido de delegación Tacubaya, Ciudad de México 2014.

Fecha	Hora	G_s [W/m ²]	T_{amb} [°C]	V_{wind} [m/s]
14/04/2014	6:00:00 a.m.	0.0	17.70	0.1
14/04/2014	7:00:00 a.m.	58.86	20.14	1.2
14/04/2014	8:00:00 a.m.	133.64	22.00	0.0
14/04/2014	9:00:00 a.m.	199.94	23.90	0.9
14/04/2014	10:00:00 a.m.	255.80	25.10	1.4
14/04/2014	11:00:00 a.m.	289.44	26.50	2.1
14/04/2014	12:00:00 p.m.	297.38	27.70	1.0
14/04/2014	1:00:00 p.m.	279.48	29.14	2.6
14/04/2014	2:00:00 p.m.	247.46	30.00	0.9
14/04/2014	3:00:00 p.m.	190.44	30.10	0.4
14/04/2014	4:00:00 p.m.	121.50	28.60	0.7
15/04/2014	5:00:00 p.m.	64.19	24.80	1.7
15/04/2014	6:00:00 p.m.	23.82	21.40	3.5
15/04/2014	7:00:00 p.m.	0.0	19.65	4.2
15/04/2014	8:00:00 p.m.	0.0	18.85	2.3
15/04/2014	9:00:00 p.m.	0.0	18.00	5.3
15/04/2014	10:00:00 p.m.	0.0	17.40	1.0
15/04/2014	11:00:00 p.m.	0.0	16.70	1.7
15/04/2014	12:00:00 a.m.	0.0	16.20	0.1
15/04/2014	1:00:00 a.m.	0.0	15.55	0.9
15/04/2014	2:00:00 a.m.	0.0	14.80	2.5
15/04/2014	3:00:00 a.m.	0.0	14.30	2.7
15/04/2014	4:00:00 a.m.	0.0	13.90	2.1
15/04/2014	5:00:00 a.m.	0.0	13.70	1.6
15/04/2014	6:00:00 a.m.	0.0	13.90	1.8

Tabla A.7. Funciones para la radiación solar y temperatura ambiente del día más frío para delegación Tacubaya, Ciudad de México.

Día	Horario	Funciones
		Radiación solar
Frío	7 a.m.- 7 p.m.	$G_s(t) = 166697.12398 - 6.428t + 9.08145 \times 10^{-5}t^2 - 5.56169 \times 10^{-10}t^3 + 1.24665 \times 10^{-15}t^4$
	7 p.m.- 7 a.m.	$G_s(t) = 0$
		Temperatura ambiente
	7 a.m.-7 p.m.	$T_{amb}(t) = -773.75158 + 0.03792t - 5.18264 \times 10^{-7}t^2 + 3.20707 \times 10^{-12}t^3 - 7.54881 \times 10^{-1}t^4$
	7 p.m.-7 a.m.	$T_{amb}(t) = 2751.37378 - 0.06192t + 5.89281 \times 10^{-7}t^2 - 2.51629 \times 10^{-12}t^3 + 4.06141 \times 10^{-18}t^4$

Tabla A.8. Funciones para la radiación solar y temperatura ambiente del día más cálido para delegación Tacubaya, Ciudad de México.

Día	Horario	Funciones
		Radiación solar
Frío	7 a.m.- 7 p.m.	$G_s(t) = 84012.72879 - 3.3357t + 4.866 \times 10^{-5}t^2 - 3.08921 \times 10^{-1}t^3 + 7.2122 \times 10^{-16}t^4$
	7 p.m.- 7 a.m.	$G_s(t) = 0$
		Temperatura ambiente
	7 a.m.-7 p.m.	$T_{amb}(t) = -3644.94243 + 0.15339t - 2.24652 \times 10^{-6}t^2 + 1.46473 \times 10^{-11}t^3 - 3.57797 \times 10^{-17}t^4$
	7 p.m.-7 a.m.	$T_{amb}(t) = 7777.543 - 0.19773t + 1.95796 \times 10^{-6}t^2 - 8.6101 \times 10^{-12}t^3 + 1.41754 \times 10^{-17}t^4$

ANEXO B: Productos Obtenidos.

En este anexo se presenta el producto obtenido durante la elaboración del trabajo de tesis.

- i. Escritura de un borrador de artículo.

Estudio numérico sobre el comportamiento dinámico de un sistema de muro trombe para climas fríos de México.

E. Vázquez-Beltrán^a, I. Hernández-López^b, Y. Chávez^a, J. Xamán^a

¹ Tecnológico Nacional de México/Cenidet, Prol. Av. Palmira S/N Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, C.P. 62490, México.

² Universidad de Sonora, Unison, Blvd. Encinas y Rosales S/N Col. Centro, Hermosillo, Sonora, C.P. 8300, México.

Nomenclatura

G_s	Radiación solar [W/m ²]
V_{wind}	Velocidad del viento [m/s]
q^{rad}	Flujo de calor por radiación [W/m ²]
q^{conv}	Flujo de calor por convección [W/m ²]
q^{cond}	Flujo de calor por conducción [W/m ²]
h^{rad}	Coefficiente radiativo [W/m ² K]
h^{conv}	Coefficiente convectivo [W/m ² K]
h_{wind}	Coefficiente convectivo debido al viento [W/m ² K]
\dot{m}	Flujo másico [kg/s]
C_p	Calor específico [J/kgK]
g	Constante de gravedad [9.81 m/s ²]

Superíndice

ave	Valor promedio
-------	----------------

Subíndice

g	Pared de vidrio
f	Fluido (aire)
abs	Superficie absorbedora
w	Muro
ws	Superficie interior del muro

Símbolos griegos

λ	Conductividad térmica [W/mK]
ρ	Densidad [kg/m ³]
α	Difusividad térmica [m ² /s]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [W/m ² K ⁴]
α^*	Absortividad
ρ^*	Reflectividad
τ^*	Transmisividad

1. Introducción

El crecimiento exponencial de la población mundial ha detonado la demanda de consumo del sector energético y de acuerdo con cifras de IEA [1], el consumo mundial de energía aumento a casi el doble la tasa promedio de crecimiento desde 2010, impulsado por una economía global robusta y mayores necesidades de calefacción y refrigeración en las edificaciones. Como resultado, las emisiones de CO₂ incrementaron un 1.7 % a nivel mundial. Es por esto que resulta imperativo buscar alternativas que permitan alcanzar la eficiencia energética en edificaciones. Para propósitos de calentamiento en edificaciones con clima frío, una alternativa es el aprovechamiento de la energía solar. Esto se logra aplicando distintos elementos auxiliares que permitan incrementar la ganancia de energía solar en la envolvente de la edificación (techos, paredes, ventanas). Una estrategia aplicada en las paredes es el muro Trombe (TW), éste es un sistema solar pasivo de ganancia indirecta. Este sistema fue diseñado y patentado por Edward Morse a finales del siglo XIX [2]. Más tarde, el ingeniero francés Félix Trombe y el arquitecto francés Jacques Michel integraron el sistema de Trombe como elementos arquitectónicos en edificios y popularizándolo en la década de 1960 [3].

Posteriormente, Balcomb et al. realizaron el análisis teórico para identificaron el potencial del sistema muro Trombe. Concluyendo que, para una misma área de vidriado, el rendimiento es comparable al de un sistema de colector convencional de aire o liquido refrigerado, esto se puede alcanzar con un sistema de calentamiento solar pasivo de diseño optimizado [4]. Ohanessia y Charters establecieron un espesor óptimo de 25 cm para un muro de hormigón con uso de calefacción auxiliar. Encontrando que la ventaja térmica de la implementación de un vidrio doble es mínima y, por lo tanto, no lo recomiendan para zonas de clima moderado.

Concluyendo que es posible obtener ahorros de energía de aproximadamente el 40 % [5]. Akbarzabeh et al. sugirieron que los procesos de transferencia de calor en el canal, se pueden modelar como un problema de convección natural turbulenta entre dos placas isotérmicas verticales independientes [6]. Hami et al. realizaron un estudio numérico en estado transitorio en régimen de flujo laminar bajo las condiciones climáticas de la ciudad de Bechar, Argelia. Los autores determinaron que, en pleno invierno, las temperaturas en la habitación se encuentran entre 18°C a 24°C. Concluyendo que, el tipo de material del muro es un factor determinante en el desempeño térmico. Por otro lado, la gestión correcta respiraderos y ventilas permiten tener una eficiencia hasta del 48 % [7]. Rabani et al. realizaron un estudio numérico falso transitorio en régimen de flujo laminar donde se evaluaron distintos materiales: ladrillo, concreto, sal hidratada y cera de parafina (PCM). Encontraron que, el muro de PCM mantiene una mayor temperatura en la habitación en comparación con los otros materiales durante aproximadamente 9 horas [8]. Addassi et al. realizaron un estudio energético teórico-experimental de un sistema de muro Trombe para edificios típicos de Túnez. Concluyendo que, áreas de muro para 3 m², 4 m², 8 m² presentan ahorros de energía auxiliar anual de 63, 50 y 77 % respectivamente [9]. Hernández-López et al. realizaron un estudio numérico en régimen de flujo turbulento bajo las condiciones climáticas de dos ciudades de México (Huitzilac y Toluca). Determinaron que, para ambas ciudades el día más frío y cálido, la energía almacenada es de aproximadamente 109 MJ y 70 MJ con pérdidas de 56 a 62 % y 57.3 a 64.6 % respectivamente. Manteniendo una temperatura en la habitación superior a 35 °C [10]. Yu et al. realizaron un estudio teórico-experimental que combina la tecnología catalítica con el muro Trombe para temporadas de calefacción y purificación de aire en interiores en Hefei, China. Obteniendo una eficiencia de 41.3 %, teniendo ahorros de energía de hasta 97.4 kWh/m² [11]. Adbeen et al. mejoraron el confort térmico, variando las dimensiones del muro Trombe, bajo las condiciones climáticas típicas para una semana de invierno para la ciudad de Alexandria, Egipto. Determinaron que, las dimensiones optimas son: 1.7 m de altura y un espesor de 0.3 m y una profundidad de 0.22 m. Concluyendo que, este diseño podría alcanzar el rango de confort estándar de 293.15 a 298.15 K basado en el modelo adaptativo (ANSI/ASHRAE Standard 55-2010). Logrando condiciones satisfactorias de confort térmico durante toda la temporada de invierno de un 43.88 % [12]. De acuerdo a la revisión del estado del arte se encontró, un estudio para condiciones de clima frío en México. Sin embargo, éste se

limita a predecir la cantidad de energía almacenada. La principal causa de esto es que el modelado de la turbulencia con una formulación completamente transitoria conlleva un alto costo computacional. Así, resulta ventajosa la aplicación del método de balances globales (GB). Por lo tanto, el gol de éste trabajo es realizar la evaluación dinámica del desempeño térmico para dos ciudades de México (Ciudad de México y Tulacingo, Hidalgo) durante todo un año.

2. Modelo teórico

2.1 Modelo físico

En la Figura 1, se presenta el modelo Físico del sistema muro Trombe para una sección transversal. La pared de vidrio considera pérdidas convectivas y radiativas hacia el medio ambiente. Posteriormente, la sección del canal se considera la transferencia de calor por convección por parte del fluido e intercambio radiativo superficial entre la superficie absorbidora y la pared de vidrio. Finalmente, el muro masivo considera la transferencia de calor por conducción así cómo pérdidas convectivas y radiativas hacia la habitación.

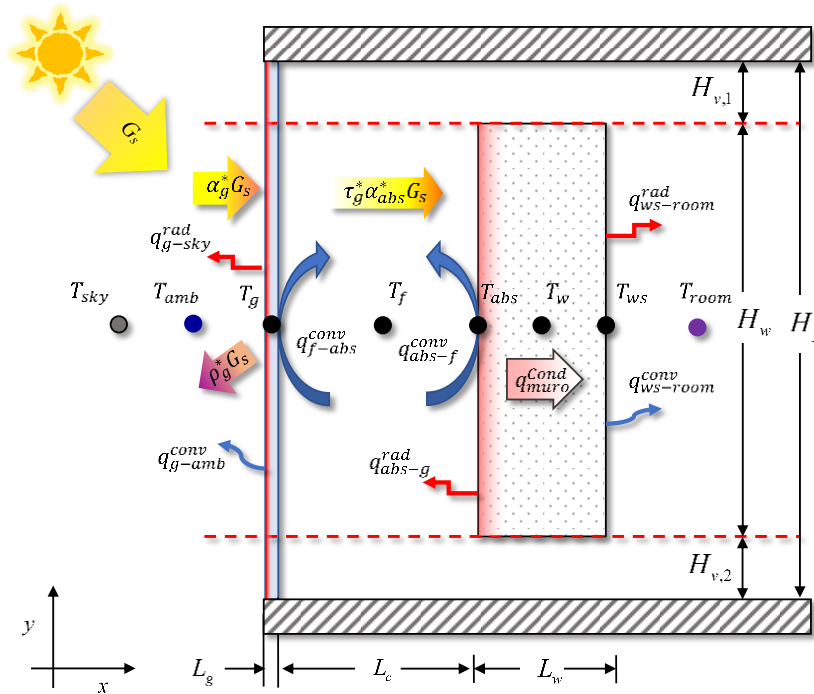


Figura 1. Modelo físico del muro Trombe.

2.2 Modelo analítico

Las consideraciones para la realización del modelo analítico del muro Trombe se enlistan a continuación:

- Flujo Newtoniano
- Fluido incompresible
- Estado transitorio
- Disipación viscosa despreciable
- Fluido radiativamente no participante
- Se considera un flujo bidimensional (x, y) y los efectos en la dirección (z) se desprecian

A continuación, se presentan los balances de energía en estado transitorio para cada uno de los elementos que conforman el sistema TW.

Pared de vidrio:

$$T_g: \rho_g C_{P,g} V_g \frac{\partial(T)}{\partial t} = \alpha_g^* G_s + h_{f-g}^{conv} (T_f - T_g) + h_{abs-g}^{rad} (T_{abs} - T_g) - h_{g-amb}^{conv} (T_g - T_{amb}) - h_{g-sky}^{rad} (T_g - T_{sky}) \quad (1)$$

Fluido:

$$T_f: \rho_f C_{P,f} V_f \frac{\partial(T)}{\partial t} = h_{abs-f}^{conv} (T_{abs} - T_f) - h_{f-g}^{conv} (T_f - T_g) + q_C \quad (2)$$

Superficie absorbedora:

$$T_{abs}: \rho_{abs} C_{P,abs} V_{abs} \frac{\partial(T)}{\partial t} = \alpha_{abs}^* \tau_g^* G_s - h_{abs-f}^{conv} (T_{abs} - T_f) - h_{abs-g}^{rad} (T_{abs} - T_g) - \frac{L_3}{\lambda_{abs}} (T_{abs} - T_w) \quad (3)$$

Muro:

$$T_w : \rho_w C_{P,w} V_w \frac{\partial(T)}{\partial t} = \frac{L_3}{\lambda_{abs}} (T_{abs} - T_w) - \frac{L_4}{\lambda_w} (T_w - T_{ws}) \quad (4)$$

Superficie interior del muro:

$$T_{ws} : \rho_{ws} C_{P,ws} V_{ws} \frac{\partial(T)}{\partial t} = \frac{L_4}{\lambda_w} (T_w - T_{ws}) - h_{ws-room}^{conv} (T_{ws} - T_{room}) + h_{ws-room}^{rad} (T_{ws} - T_{room}) \quad (5)$$

Para determinar el calor útil trasferido por el fluido q_C presente en la Ec. (2) se hace uso del siguiente análisis: La Figura 2 muestra el balance de transferencia de calor hacia el flujo de aire a través del canal por convección natural entre la pared vidrio y la superficie absorbedora. Se considera que, T_g y T_{abs} son constantes para la condición de un pequeño volumen de control (j).

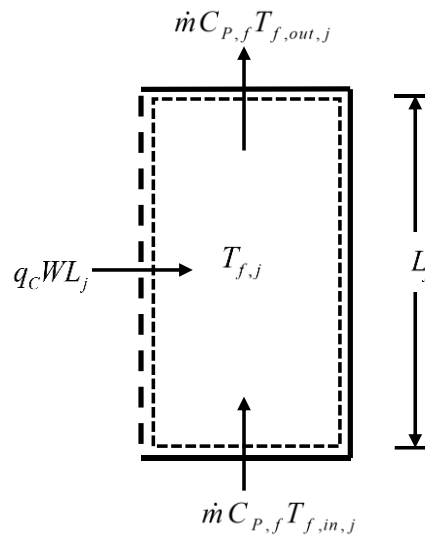


Figura 2. Balance de calor del flujo de aire en un volumen de control.

La temperatura del flujo de aire a la entrada de la sección (j) esta definida por, $(T_{f,in,j})$ mientras que, la temperatura a la salida de la sección es definida como, $(T_{f,out,j})$ y se consideran uniforme a través de toda la sección transversal.

La transferencia de calor útil hacia el flujo de aire en el canal se expresa a partir del siguiente balance de energía:

$$q_C WL_j + \dot{m} C_{P,f} T_{f,in,j} = \dot{m} C_{P,f} T_{f,out,j} \quad (6)$$

Resolviendo para q_C , se obtiene:

$$q_C = \frac{\dot{m} c_f (T_{f,out,j} - T_{f,in,j})}{\gamma WL_j} \quad (7)$$

La temperatura del aire promedio representativa del volumen de control (j) puede expresarse mediante una correlación emperica propuesta por Hirunlabh [13]:

$$T_f = (1 - \gamma) T_{f,in,j} + \gamma T_{f,out,j} \quad (8)$$

donde: $\gamma = 0.75$

Despejando ($T_{f,out,j}$) y sustituyéndolo en la Ec. (7), obtenemos la siguiente expresión:

$$q_C = M (T_f - T_{f,in,j}) \quad (9)$$

donde:

$$M = \dot{m} C_{P,f} / \gamma WL_j \quad (10)$$

donde W es el ancho del canal de 1 m y L_j es la altura de la sección j . Expresando el sistema de ecuaciones algebraicas obtenido del sistema TW en forma de matriz, como:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} a_1 & -b_1 & -c_1 & 0 & 0 \\ -a_2 & b_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ -a_3 & -b_3 & c_3 & -d_3 & 0 \\ 0 & 0 & -c_4 & d_4 & -e_4 \\ 0 & 0 & 0 & -d_5 & e_5 \end{bmatrix}}_{\substack{\text{Matriz de Coeficientes} \\ [A_{i,j}]}} \underbrace{\begin{bmatrix} T_g^{t+\Delta t} \\ T_f^{t+\Delta t} \\ T_{abs}^{t+\Delta t} \\ T_w^{t+\Delta t} \\ T_{ws}^{t+\Delta t} \end{bmatrix}}_{\substack{\text{Vector Incognita} \\ [\varphi_i]}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\rho_g C_{P,g} \delta x_g}{\Delta t} T_g^t + h_{g-amb}^{conv} T_{amb} + h_{g-sky}^{rad} T_{sky} + \alpha_g^* G_s \\ \frac{\rho_f C_{P,f} \delta x_f}{\Delta t} T_f^t + M T_{room} \\ \frac{\rho_{abs} C_{P,abs} \delta x_{abs}}{\Delta t} T_{abs}^t + \alpha_{abs}^* \tau_g^* G_s \\ \frac{\rho_w C_{P,w} \delta x_w}{\Delta t} T_w^t \\ \frac{\rho_{ws} C_{P,ws} \delta x_{ws}}{\Delta t} T_{ws}^t + (h_{ws-room}^{conv} + h_{ws-room}^{rad}) T_{room} \end{bmatrix}}_{\substack{\text{Vector Término Independiente} \\ [B_{i,j}]}} \quad (11)$$

$$a_1 = \left(\frac{\rho_g C_{P,g} \delta x_g}{\Delta t} + h_{f-g}^{conv} + h_{abs-g}^{rad} + h_{g-amb}^{conv} + h_{g-sky}^{rad} \right), \quad b_1 = h_{f-g}^{conv}, \quad c_1 = h_{abs-g}^{rad}$$

$$a_2 = h_{f-g}^{conv}, \quad b_2 = \left(\frac{\rho_f C_{P,f} \delta x_f}{\Delta t} + h_{abs-f}^{conv} + h_{f-g}^{conv} + M \right), \quad c_2 = h_{abs-f}^{conv}$$

$$a_3 = h_{abs-g}^{rad}, \quad b_3 = h_{abs-f}^{conv}, \quad c_3 = \left(\frac{\rho_{abs} C_{P,abs} \delta x_{abs}}{\Delta t} + h_{abs-f}^{conv} + h_{abs-g}^{rad} + G_{abs} \right), \quad d_3 = \frac{L_3}{\lambda_{abs}}$$

$$c_4 = \frac{L_3}{\lambda_{abs}}, \quad b_4 = \left(\frac{\rho_w C_{P,w} \delta x_w}{\Delta t} + \frac{L_3}{\lambda_{abs}} + \frac{L_4}{\lambda_w} \right), \quad e_4 = \frac{L_4}{\lambda_w}$$

$$d_5 = \frac{L_4}{\lambda_w}, \quad e_5 = \left(\frac{\rho_{ws} C_{P,ws} \delta x_{ws}}{\Delta t} + h_{ws-room}^{conv} + h_{ws-room}^{rad} + \frac{L_4}{\lambda_w} \right)$$

Donde T_g, T_f, T_{abs}, T_w y T_{ws} son las temperaturas descocidas del vidrio, fluido, absorbedor, muro y la superficie interior del muro, respectivamente. En general, la matriz de la Ec. (11) puede expresarse como:

$$[A_{i,j}][\varphi_{i,j}] = [B_{i,j}] \quad (12)$$

Se determinó el valor del vector resultante, a través de la inversión de la matriz de coeficientes mediante el algoritmo iterativo de Gauss-seidel.

$$[\varphi_{i,j}] = [B_{i,j}][A_{i,j}]^{-1} \quad (13)$$

Temperatura de cielo, puede ser calculada con la correlación presentada por Swinbank 1963 y referenciado por Duffie and Beckman [14].

$$T_{sky} = 0.0552T_{amb}^{1.5} \quad (14)$$

El coeficiente convectivo de la transferencia de calor por el viento está dado por McAdams 1954 y referenciado por Duffie and Beckman [14].

$$h_{g-amb}^{conv} = 5.7 + 3.8V_{wind} \quad (15)$$

Coficiente de transferencia de calor por radiación de la pared semitransparente a la bóveda celeste, propuesto por Duffie and Beckman [14].

$$h_{g-sky}^{rad} = \sigma \varepsilon_g (T_g + T_{sky}) (T_g^2 + T_{sky}^2) \quad (16)$$

El coeficiente de transferencia radiativo entre la superficie absorbadora y la pared de vidrio. Es calculado con la ecuación dada por Duffie and Beckman [14]. Donde σ es la constante de Stephan-Boltzman ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$).

$$h_{abs-g}^{rad} = \frac{\sigma (T_g^2 + T_{abs}^2) (T_g + T_{abs})}{\left(\frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{1}{\varepsilon_{abs}} - 1 \right)} \quad (17)$$

Por simplicidad, se supone que la densidad y la temperatura del aire en el espacio varía linealmente con altura. La velocidad media del aire a través del gap es propuesta por Duffie y Beckman [15]:

$$\bar{V} = \left[(2gH_y) / C_1 \left(\left[A_{v,1} / A_{v,2} \right]^2 + C_2 \right) \right] \left[(T_f - T_{room}) / T_f \right] \quad (18)$$

donde:

$C_1 (A_{v,1} / A_{v,2})^2 + C_2 =$ Representa la caída de presión en el canal y las ventilas.

C_1 y $C_2 =$ Son constantes empericas adimensionales evaluadas en 8.0 y 2.0 respectivamente por Utzinger [16].

El caudal másico se definió como:

$$\dot{m} = \bar{V} \rho_f A_f \quad (19)$$

Coefficiente convectivo entre la pared de vidrio y el fluido se define por:

$$h_{f-g}^{conv} = \frac{Nu_{f-g} \lambda_{f,1}}{L_j} \quad (20)$$

Donde la conductividad térmica del fluido ($\lambda_{f,1}$) se determina con la temperatura media de película (T_{mg}), definida como el promedio aritmético entre la temperatura del fluido con la pared de vidrio.

$$T_{m,g} = \frac{T_g + T_f}{2} \quad (21)$$

La correlación para el coeficiente convectivo por convección natural es presentada Churchill y Chu [17] y referenciado por Incropera y De Witt [18] para flujo de régimen laminar ($Ra \leq 10^9$):

$$Nu_{f-g} = 0.68 + (0.67 Ra^{1/4}) / \left[1 + (0.492 / Pr_1)^{9/16} \right]^{4/9} \quad (22)$$

Y para flujo régimen turbulento ($Ra \geq 10^9$):

$$Nu_{f-g} = \left\{ 0.825 + (0.387 Ra_1^{1/16}) / \left[1 + (0.492 / Pr_1)^{9/16} \right]^{8/27} \right\}^2 \quad (23)$$

Las Ecs. (22) y (23) determinan, el coeficiente convectivo entre la pared de vidrio y el fluido. Donde el número de Prandtl (Pr) se define como:

$$Pr_1 = (C_{p,f,1} \mu_{f,1}) / \lambda_{f,1} \quad (24)$$

El número de Rayleigh (Ra) se define como:

$$Ra_1 = Gr_1 Pr_1 \quad (25)$$

El número de Grashof (Gr) se define como:

$$Gr_1 = \left[g \beta_{f,1} (T_g - T_f) L_j \right] / \nu_{f,1}^2 \quad (26)$$

El coeficiente de expansión volumétrica ($\beta_{f,1}$) y la viscosidad cinemática ($\nu_{f,1}^2$) se avalúan en función de la temperatura de película ($T_{m,g}$):

$$\nu_{f,1} = \mu_{f,1} / \rho_{f,1} \quad (27)$$

$$\beta_{f,1} = 1/T_{m,g} \quad (28)$$

Las propiedades termofísicas del fluido aire se asumen que varían linealmente. Las correlaciones fueron basadas en datos tabulados de Incropera y De Witt [18]. Para un intervalo de 250 a 400 K. Para evaluar las propiedades del fluido se utiliza la temperatura media de película.

Viscosidad cinemática:

$$\mu_{f,1} = \left[2.2078(T_{m,g}^{0.7756}) \right] \times 10^{-7} \quad (29)$$

Densidad:

$$\rho_{f,1} = 321.9/T_{m,g} \quad (30)$$

Conductividad térmica:

$$\lambda_{f,1} = \left[0.1723(T_{m,g}^{0.8812}) \right] \times 10^{-3} \quad (31)$$

Calor específico:

$$C_{p,f,1} = \left(0.9125[T_{m,g}^{0.0174}] \right) \times 10^3 \quad (32)$$

De manera similar, se determinó el coeficiente convectivo entre la superficie absorbedora y el fluido aire (h_{abs-f}^{conv}) con la temperatura de película $T_{m,abs} = (T_{abs} + T_f)/2$.

2.3 Verificación

Se realizó la verificación del código desarrollado comparándolo con el modelo presentado por Ong [19], Dado que, la geometría de este modelo es muy similar al concepto del TW. La comparación cuantitativa de los resultados obtenidos se presenta en la Tabla 1. La diferencia relativa porcentual para cada uno de los elementos de la chimenea solar se muestra en la misma tabla. Se encontró una diferencia máxima de 1.12 %. Ésta corresponde al caso de $G_s=600 \text{ W/m}^2$ en la temperatura de la superficie absorbadora (T_w).

Tabla 1. Comparación de los resultados entre Ong [19] y el presente estudio.

G_s [W/m ²]	Presente Estudio			Ong [19]		
	T_g [°C]	T_f [°C]	T_w [°C]	T_g [°C]	T_f [°C]	T_w [°C]
100	32.37 (0.78)	34.71 (0.03)	41.38 (0.05)	32.12	34.70	41.36
200	35.28 (0.17)	37.62 (0.32)	50.92 (0.49)	35.22	37.74	51.17
300	38.34 (0.08)	40.21 (0.57)	59.70 (0.65)	38.31	40.44	60.09
400	41.31 (0.02)	42.57 (0.42)	67.84 (0.79)	41.30	42.75	68.38
500	44.28 (0.25)	44.70 (0.69)	75.49 (0.98)	44.17	45.01	76.24
600	47.25 (0.57)	46.68 (1.10)	82.76 (1.12)	46.98	47.20	83.70

Valores en () corresponden a la diferencia relativa porcentual.

Con base en los resultados, se puede aseverar que el código numérico desarrollado reproduce satisfactoriamente los resultados presentados por Ong [19] y de este modo, garantiza la solución correcta de la transferencia de calor conjugada en el sistema TW.

3. Resultados y discusión

3.1 Parámetros de estudio

Las ciudades elegidas fueron Tulancingo, Hidalgo y Ciudad de México en la alcaldía de Tacubaya. Para ambas ciudades, se evaluaron el sistema durante el día más frío, así como el

día más cálido de cada mes de todo el año del 2014. La evaluación térmica se realizó durante todo un día (24 h) a partir de la primera hora de la radiación solar (típicamente a las 06:00 h). Las dimensiones óptimas del sistema TW fueron determinadas por Hernández I. [20]. En este sentido, se tiene un ancho de canal de aire de $L_C = 20$ cm, una apertura de ventilas en la parte superior e inferior de $L_{v1} = L_{v2} = 20$ cm, y un espesor de muro masivo de $L_w = 30$ cm. Esto se aplica para una habitación cuya altura es de $H_y = 3$ m y $T_{room} = 297$ K. Con un paso de tiempo $\Delta t = 1$ min.

3.2 Estudio paramétrico del material en el muro

El estudio paramétrico se realizó bajo las condiciones reales de operación para el día más frío de Tulancingo, Hidalgo. Se estudiaron tres distintos materiales típicos usados en la construcción de edificaciones en la República Mexicana (concreto, ladrillo y adobe). En la Tabla 2 se presentan las propiedades termofísicas y radiativas de los materiales que fueron evaluados en el TW, así como para el vidrio simple.

Tabla 2. Propiedades termofísicas y radiativas.

Pared semitransparente		Concreto	Ladrillo	Adobe
$\varepsilon_g^* = 0.85$		$\varepsilon_C^* = 0.90$	$\varepsilon_B^* = 0.93$	$\varepsilon_A^* = 0.90$
$\rho_g^* = 0.08$	$\lambda_g = 1.40$	$\lambda_C = 1.70$	$\lambda_B = 0.70$	$\lambda_A = 0.49$
$\tau_g^* = 0.78$	$\rho_g = 2500$	$\rho_C = 2240$	$\rho_B = 1600$	$\rho_A = 1306$
$\alpha_g^* = 0.14$	$c_{p_g} = 750$	$c_{p_C} = 880$	$c_{p_B} = 1073$	$c_{p_A} = 1150$
---	$\alpha_g = 7.47 \times 10^{-7}$	$\alpha_C = 8.62 \times 10^{-7}$	$\alpha_B = 4.08 \times 10^{-7}$	$\alpha_A = 3.26 \times 10^{-7}$

En la Figura 3 se presenta la comparación de los q_{int}^{ave} para los tres materiales. En esta figura se observa el comportamiento de q_{int}^{ave} a lo largo del día. En general, se observa que el adobe es la mejor opción para proporcionar calentamiento diurno. Sin embargo, es la peor para calentamiento nocturno. Tanto el caso del ladrillo como el adobe inician su proceso de calentamiento a partir de las 9:00 AM, mientras que el caso del concreto inicia una hora antes. Sin embargo, el muro de concreto prolonga el calentamiento hasta las 7:00 a.m. del siguiente

día. Pero tanto el muro de adobe como el muro de ladrillo no son capaces de proporcionar calentamiento después de medianoche.

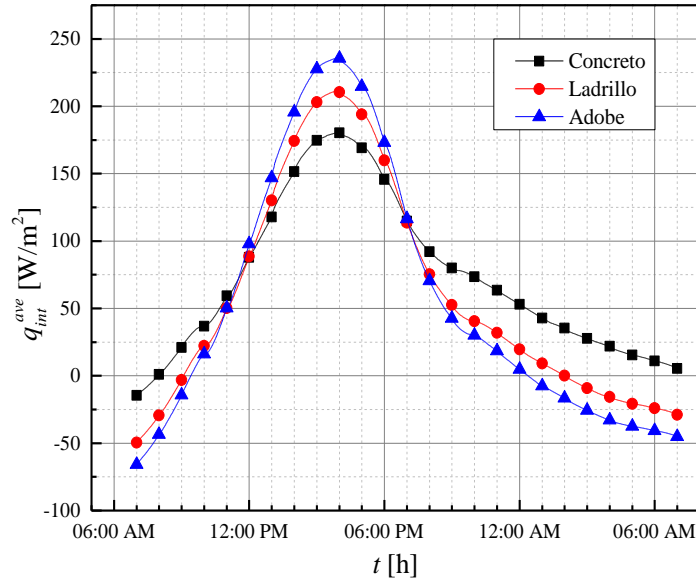


Figura 3. Efecto del material en el muro masivo sobre el flujo de calor total suministrado a la habitación.

De acuerdo con la Tabla 3, se observa que con respecto a las temperaturas promedio de todo el día, no se presentan diferencias significantes en cuanto a T_g^{ave} , T_f^{ave} y T_{abs}^{ave} . Sin embargo, T_{ws}^{ave} para el caso del concreto es ligeramente superior a los casos que corresponden a los otros materiales: por 1.73 °C con respecto al ladrillo y por 2.21 °C con respecto al adobe.

En cuanto al flujo másico, el caso del concreto es notablemente inferior al caso del adobe y del ladrillo. Esto impacta en el flujo de calor total proporcionado por el fluido a la habitación: para el concreto resulta ser el menor de los tres casos. Pero sus valores superiores de T_{ws}^{ave} ocasionan que el concreto sea mejor material para proporcionar calentamiento nocturno.

Tabla 3. Efecto del material del muro.

Material	T_g^{ave} [°C]	T_f^{ave} [°C]	T_{abs}^{ave} [°C]	T_{ws}^{ave} [°C]	\dot{m} [kg/s] $\times 10^{-3}$	Q_{int} kWh/m ²
Concreto	15.15	24.45	36.53	27.74	12.50	1.78
Ladrillo	15.71	24.81	38.27	26.01	15.84	1.44

Adobe	15.88	24.86	38.73	25.53	14.63	1.37
-------	-------	-------	-------	-------	-------	------

Por último, con respecto a la energía total suministrada por el TW a la habitación, en la Tabla 3 se observa que el muro de concreto presenta la mayor cantidad: 1.78 kWh/m². Lo que significa 23% más que el ladrillo y 30% más que el adobe. En este sentido, y de acuerdo con los resultados se encuentra, que el concreto presenta el mejor desempeño térmico. Así, este material es elegido para realizar la evaluación térmica del sistema bajo condiciones de clima de México.

3.3 Evaluación térmica Tulancingo, Hidalgo 2014

Día más frío

La Figura 4, muestra el comportamiento de la temperatura promedio del absorbedor (T_{abs}^{ave}), la superficie interior del muro masivo (T_{ws}^{ave}) y la temperatura ambiente T_{amb} . Conforme avanza el día, la temperatura ambiente alcanza su valor máximo a la 1:30 PM con 19 °C. El absorbedor hace lo propio alcanzado su valor máximo hasta las 4:00 PM con $T_{abs}^{ave} = 52.5$ °C. Por otro lado, T_{ws}^{ave} presenta un amortiguamiento en el comportamiento de la temperatura a lo largo del día.

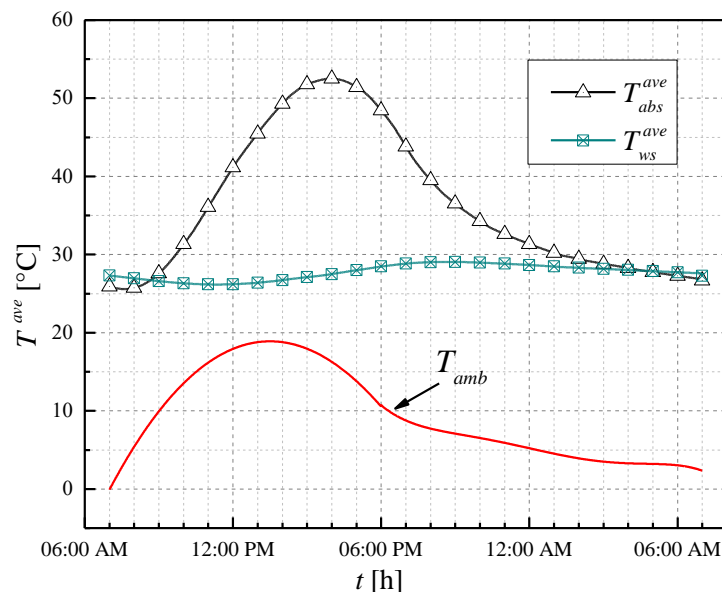


Figura 4. Comportamiento de la temperatura en el muro masivo: día más frío de Tulancingo.

Finalmente, en el periodo nocturno, el muro masivo comienza a liberar su energía manteniendo una T_{ws}^{ave} por encima de la temperatura ambiente durante toda la noche, teniendo un valor de 27.6 °C a las 7:00 a.m. del día siguiente. Puede observarse que aun después del periodo de descarga, T_{ws}^{ave} está por arriba de la T_{room} .

De acuerdo con la Figura 5, muestra el comportamiento de los flujos de calor hacia el interior de la habitación a lo largo de todo el día. Se observa que, q_{wall}^{ave} comienza con un valor de 50 W/m². Mientras que, q_c^{ave} presenta un valor de -70 W/m². El flujo negativo significa que la habitación está perdiendo energía por parte del canal. Sin embargo, q_c^{ave} se corrige las 10:00 a.m. alcanzando su valor máximo 3:00 PM con 126 W/m². Posteriormente, a las 7:00 PM cuando la radiación solar es prácticamente nula, q_c^{ave} logra suministrar energía a la habitación por dos horas más. Posteriormente, q_c^{ave} llega a las 7:00 a.m. del día siguiente con -49 W/m².

Por otro lado, q_{wall}^{ave} tiene la capacidad de suministrar energía hacia la habitación a lo largo de todo el día (24 h). Presentando un ligero descenso hasta las 12:00 PM. Para posteriormente, alcanzar su valor máximo a las 8:00 PM con 75 W/m² para finalizar con un flujo de calor de 50 W/m² para las 7:00 a.m. del día siguiente.

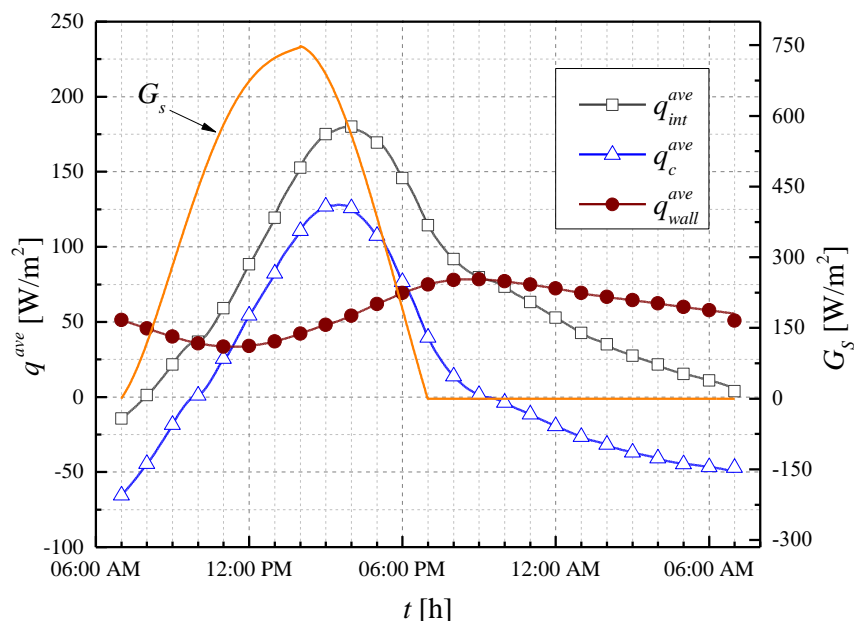


Figura 5. Comportamiento del flujo de calor promedio hacia la habitación: día más frío de Tulancingo. El flujo de calor total suministrado hacia la habitación ($q_{int}^{ave} = q_{wall}^{ave} + q_C^{ave}$) muestra que a pesar de que q_C^{ave} deja de suministrar energía a partir de las 9:00 PM, el q_{wall}^{ave} es lo suficiente como para suministrar energía durante todo el periodo nocturno logrando llegar a las 7:00 a.m. del día siguiente con $q_{int}^{ave} = 1 \text{ W/m}^2$. Con base en lo anterior, el sistema TW tiene la capacidad de suministrar energía a una habitación durante todo el periodo nocturno.

En la Figura 6, se muestra que la T_{ws}^{ave} se mantiene en un intervalo de 25 a 28 °C durante todo el año. Se observa que para el mes de mayo se obtiene la temperatura más baja dentro de este intervalo. Sin embargo, el sistema TW logra mantener la T_{ws}^{ave} durante todo el año por encima de la T_{room} .

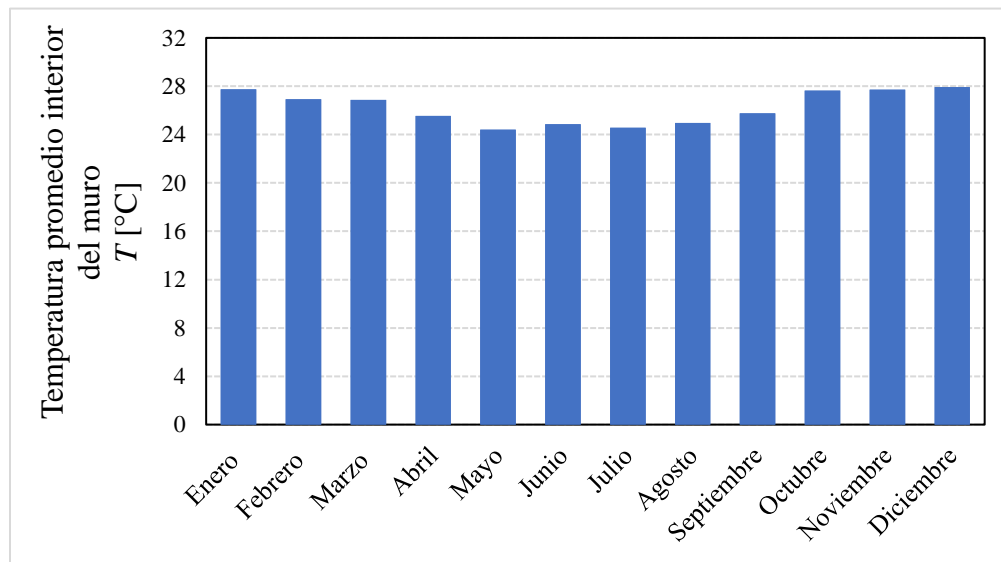


Figura 6. Comportamiento anual de la temperatura de la superficie interior del muro masivo: días más fríos de Tulancingo.

Día más cálido

En la Figura 7, se observa que el absorbedor y la superficie interior del muro comienzan a la misma temperatura de 25.5 °C y con una T_{amb} de 16.4 °C. Mientras transcurre el día, la T_{amb} alcanza un valor máximo a las 2:00 PM con 31 °C. Mientras, T_{abs}^{ave} alcanza su valor máximo de 37 °C a las 3:00 PM. A pesar de ello, la T_{abs}^{ave} presenta un valor de 25.5 °C para la misma hora siendo 5.5 °C menor que la T_{amb} .

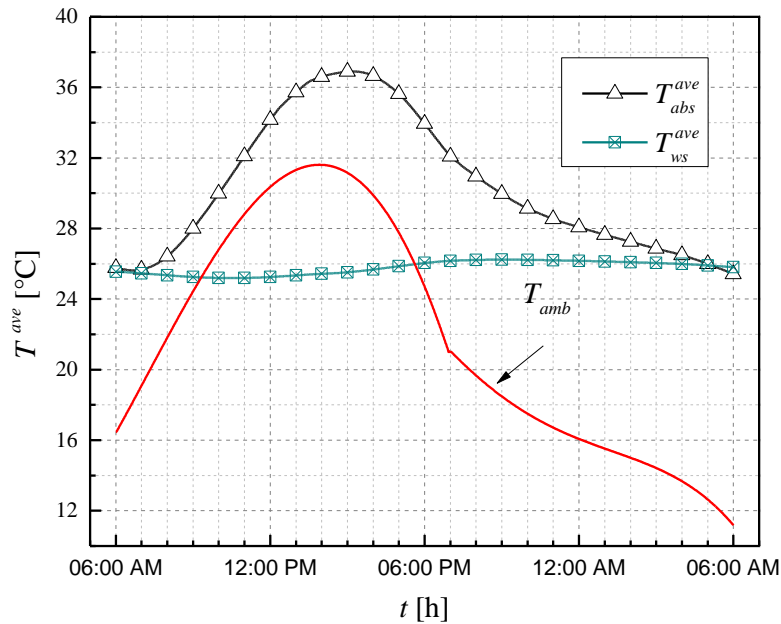


Figura 7. Comportamiento de la temperatura del muro: día más cálido de Tulancingo.

Posteriormente, a partir de las 4:00 PM la T_{abs}^{ave} comienza a disminuir mientras que, la T_{ws}^{ave} comienza a ascender alcanzando su valor máximo hasta las 10:00 PM con $T_{ws}^{ave} = 26.3$ °C, y $T_{amb} = 18$ °C. Finalmente, para las 6:00 a.m. del día siguiente, T_{abs}^{ave} descendió hasta 25.4 °C y T_{ws}^{ave} se mantuvo en el rango de 26 °C. Por otro lado, T_{amb} descendió hasta 10 °C. Con base en lo mostrado, se observa que debido a la inercia térmica que tiene el concreto, éste permite mantener T_{ws}^{ave} entre 25 y 26 °C a lo largo de todo el día.

En la Figura 8. Se observa que, al inicio del día q_{wall}^{ave} comienza con 24 W/m² mientras que, el $q_c^{ave} = 15$ W/m². Sin embargo, q_c^{ave} se corrige a partir de las 9:00 AM. Conforme el día transcurre y la radiación solar aumenta, q_c^{ave} se alcanza su valor máximo a las 2:00 PM con 55 W/m². Para llegar a las 6:00 a.m. del día siguiente con -30 W/m². Por otro lado, desde las 6:00 AM, q_{wall}^{ave} presenta un ligero descenso. Este comportamiento se mantiene hasta las 11:00 AM. Posterior a esta hora el q_{wall}^{ave} comienza a incrementarse alcanzado su valor máximo hasta las 9:00 PM con un valor de 35 W/m².

Posteriormente, durante toda la noche, q_{wall}^{ave} suministra energía a la habitación llegando a las 6:00 a.m. del día siguiente con un valor de 28 W/m².

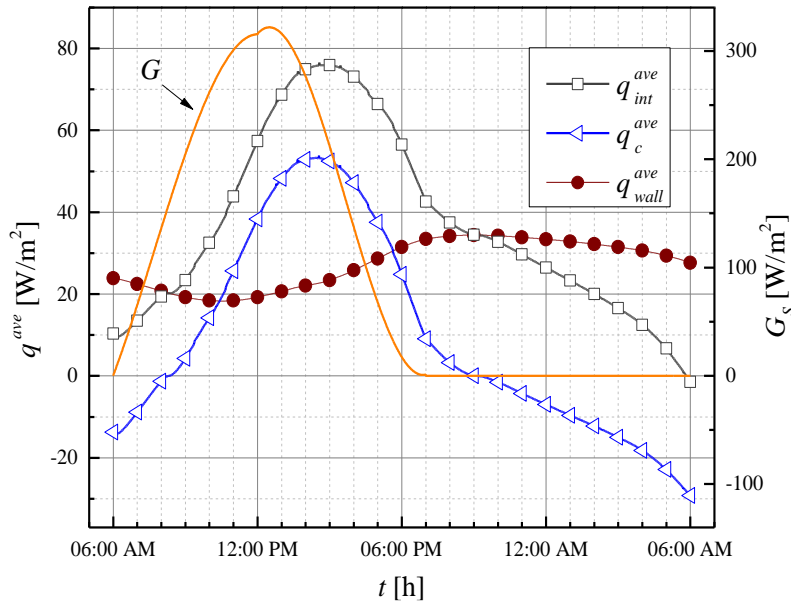


Figura 8. Comportamiento del flujo de calor promedio hacia la habitación: día más cálido de Tulancingo.

Con respecto al flujo de calor total hacia la habitación q_{int}^{ave} , se aprecia que a pesar de que q_c^{ave} deja de aportar energía a la habitación a partir de las 9:00 PM, el q_{wall}^{ave} es lo suficiente como para aportar un flujo de calor durante todo el periodo nocturno logrando llegar a las 6:00 a.m. del día siguiente con un $q_{int}^{ave} = -2 \text{ W/m}^2$. Con base en lo anterior, el sistema TW tiene la capacidad de aportar energía por lo menos 10 horas y media después de la ausencia de la radiación solar.

En la Figura 9, se observa que la T_{ws}^{ave} se mantiene en un intervalo de 25 a 28 °C durante todo el año. A demás, el mes de junio se obtiene la temperatura más baja dentro de este intervalo. Sin embargo, el sistema TW tiene la capacidad de amortiguar las oscilaciones de la temperatura ambiente durante todo el año, para los días más cálidos. Esto ayuda a mantener un confort térmico dentro de la habitación.

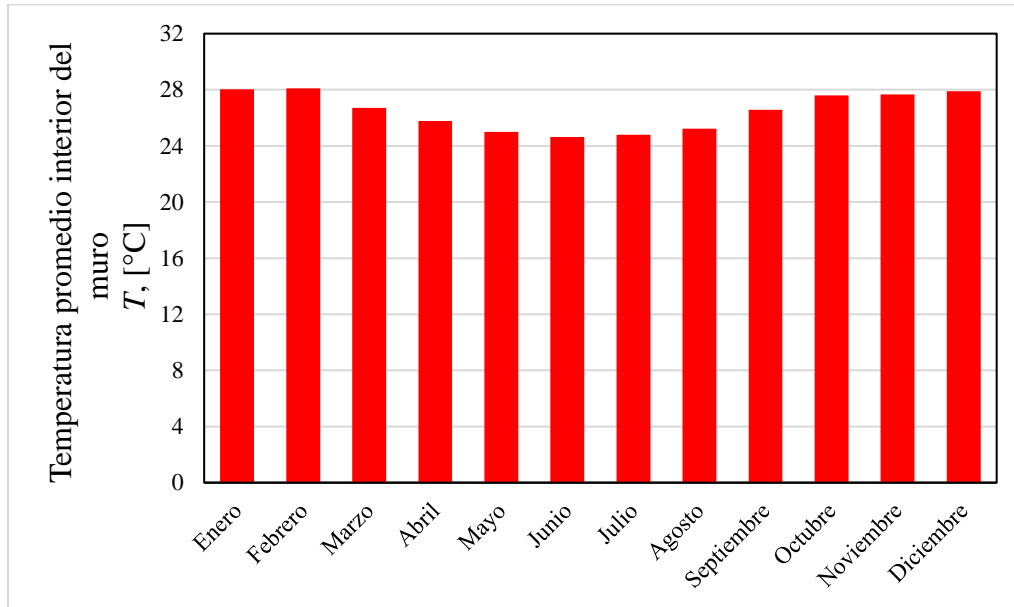


Figura 9. Comportamiento anual de la temperatura de la superficie interior: del muro masivo: días más cálidos de Tulancingo.

Calor neto suministrado por el sistema TW para la ciudad de Tulancingo, Hidalgo

En la Tabla 4 se presenta un concentrado de la evaluación anual del calor total suministrado hacia la habitación por el sistema TW.

Finalmente, la evaluación anual del sistema TW bajo las condiciones climáticas de la ciudad de Tulancingo, Hidalgo. Se determinó que el sistema TW proporciona 10.22 kWh/m² para los días más fríos de cada mes, mientras que para los días más cálidos de cada mes el sistema TW proporciona 16.65 kWh/m².

Tabla 4. Evaluación anual del calor total suministrado a la habitación: Tulancingo.

Mes	Día más frío [kWh/m ²]	Día más cálido [kWh/m ²]
Enero	1.78	2.59
Febrero	1.44	2.67
Marzo	1.43	1.64
Abril	0.04	0.89
Mayo	-0.87	0.36
Junio	-0.04	-0.12
Julio	-0.32	0.01
Agosto	0.01	0.31
Septiembre	0.67	1.46
Octubre	2.01	2.21
Noviembre	1.88	2.25
Diciembre	2.19	2.38
Total	10.22	16.65

*Meses de invierno: 21 de diciembre a 21 marzo. Meses de verano: 21 junio a 21,23 de septiembre.

3.4 Ciudad de México, alcaldía de Tacubaya 2014

Día más frío

En la Figura 10, se observa que, el día comienza con una T_{amb} de 8 °C. Conforme el día transcurre, alcanza su valor máximo a la 3:30 PM con 17.1 °C, el absorbedor hace lo propio comenzado con un valor de $T_{abs}^{ave} = 24.5$ °C y alcanzado su valor máximo hasta las 4:00 PM con 50.9 °C.

Después, en el periodo nocturno, el muro masivo comienza a liberar su energía manteniendo una T_{ws}^{ave} por arriba de T_{amb} durante toda la noche, comenzando desde las 8:00 PM con un valor de 28.4 °C y descendiendo ligeramente hasta alcanzar 27.5 °C a las 7:00 a.m. del día siguiente. Puede observarse que aun después del periodo de descarga, T_{ws}^{ave} se mantiene con un valor por encima de la T_{room} .

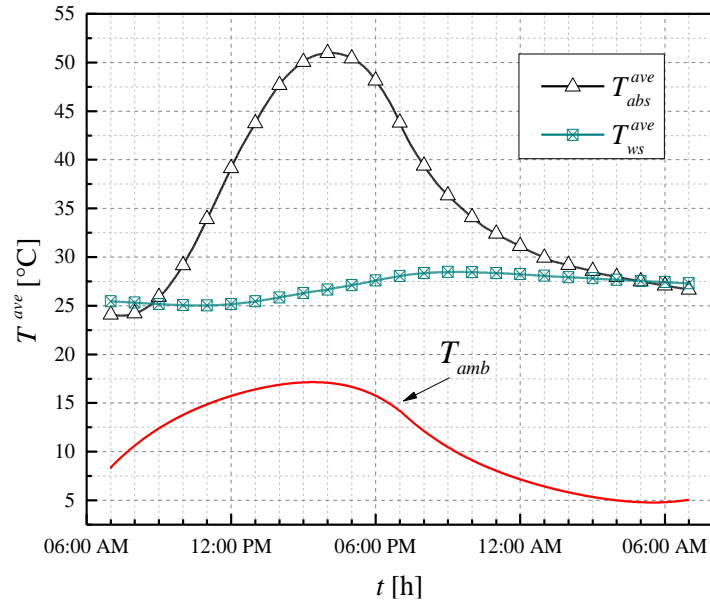


Figura 10. Comportamiento de la temperatura del muro masivo: día más frío de la Ciudad de México.

En la Figura 11. Se observa que, q_c^{ave} presenta un valor de -50 W/m^2 al inicio del día. Sin embargo, éste logra ser positivo a partir de las 10:00 AM. Alcanzando su valor máximo a las 4:00 PM con 130 W/m^2 . Posteriormente, q_c^{ave} logra suministrar energía a la habitación hasta las 9:00 PM llegando a las 7:00 a.m. del día siguiente con un valor de $q_c^{ave} = -49 \text{ W/m}^2$.

Para el caso del q_{wall}^{ave} , presenta un ligero descenso desde las 7:00 a.m. hasta las 11:00 a.m. para posterior a esta hora el q_{wall}^{ave} alcanza su valor máximo de 70 W/m^2 para posteriormente comenzar a descender muy ligeramente. Esto se debe a la liberación gradual de la energía almacenada en el muro. Se observa que, durante toda la noche, q_{wall}^{ave} suministra energía hacia la habitación llegando a las 7:00 a.m. del día siguiente con un valor de 50.8 W/m^2 .

El flujo de calor total suministrado hacia la habitación q_{int}^{ave} muestra que a pesar de que q_c^{ave} deja de suministrar energía a partir de las 9:00 PM, el q_{wall}^{ave} es lo suficiente como para suministrar energía durante todo el periodo nocturno logrando llegar a las 7:00 a.m. del día siguiente con un $q_{int}^{ave} = 3.4 \text{ W/m}^2$.

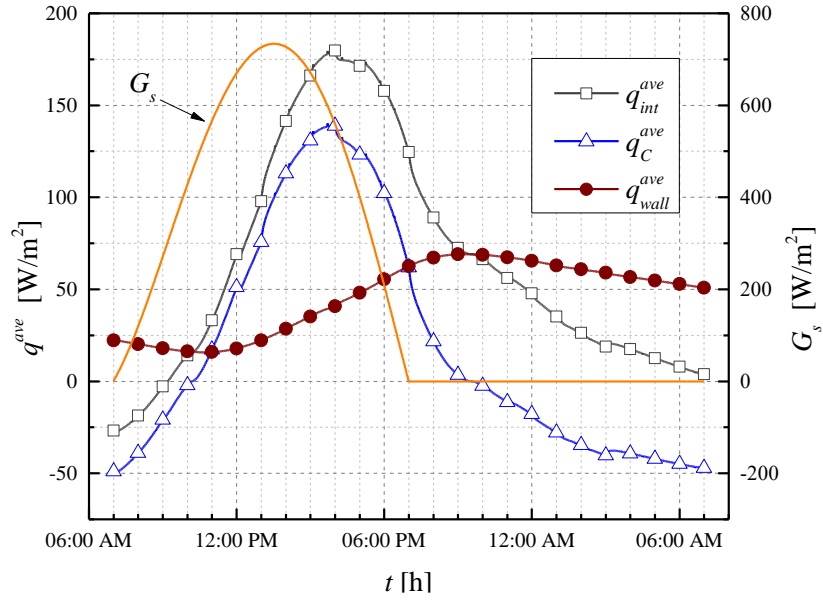


Figura 11. Comportamiento del flujo de calor promedio hacia la habitación: día más frío de la Ciudad de México.

En la Figura 12, se observa que T_{ws}^{ave} se mantiene en un intervalo de 25 a 27 °C durante todo el año. Se observa que, el sistema TW amortigua las oscilaciones de la temperatura ambiente durante todo el año, para el día más frío. Esto ayuda a mantener un confort térmico en la habitación.

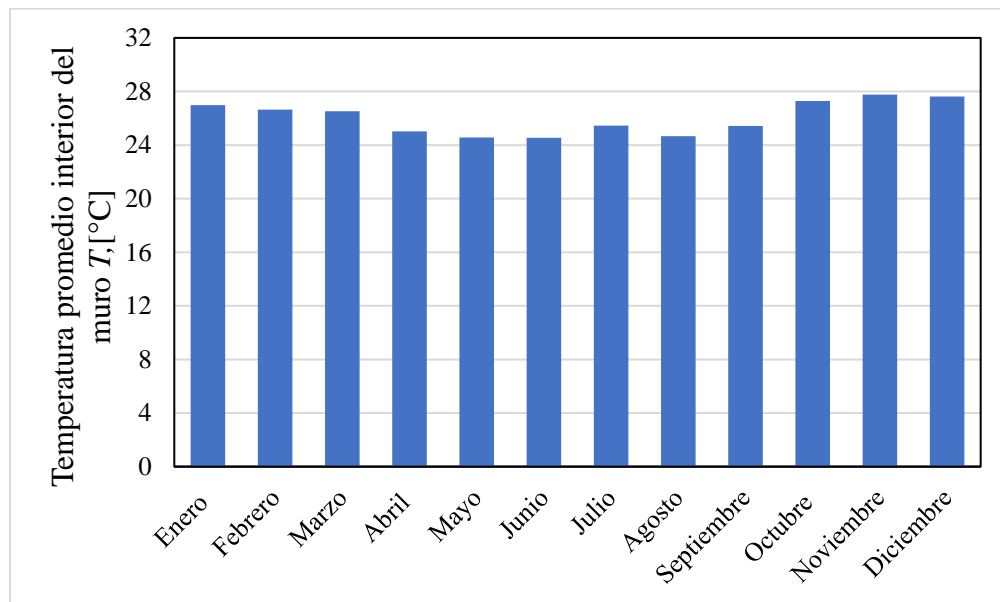


Figura 12. Comportamiento térmico de la temperatura interior promedio anual: día más frío de la Ciudad de México.

Día más cálido

La Figura 13 muestra el comportamiento de la T_{abs}^{ave} , T_{ws}^{ave} y de la T_{amb} . El día comienza con una T_{amb} de 17.2 °C (6:00 AM). Conforme avanza el día, la T_{amb} alcanza su valor máximo a la 2:30 PM con 30.5 °C. El absorbedor hace lo propio comenzando con un valor de $T_{abs}^{ave} = 26$ °C y alcanzando su valor máximo hasta las 3:00 PM con un valor de $T_{abs}^{ave} = 35.4$ °C. Debido a la inercia térmica del muro provoca que la T_{ws}^{ave} presente un amortiguamiento, siendo esto beneficioso para el día cálido. Finalmente, en el periodo nocturno, el muro masivo comienza a liberar su energía manteniendo una T_{ws}^{ave} por encima de la T_{amb} durante toda la noche, comenzando desde las 9:00 PM con un valor de T_{ws}^{ave} 26 °C y descendiendo ligeramente hasta alcanzar 25.5 °C a las 6:00 a.m. del día siguiente. Se observa que aun después del periodo de descarga, T_{ws}^{ave} se encuentra por arriba del valor de la T_{room} .

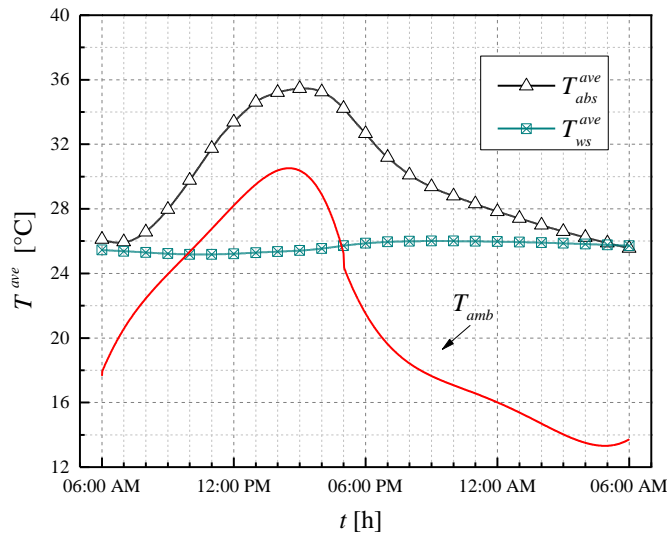


Figura 13. Comportamiento térmico del muro masivo: día más cálido de la Ciudad de México.

De acuerdo con la Figura 14, se observa que, q_c^{ave} comienza el día con -11 W/m². Sin embargo, el q_c^{ave} comienza a corregirse a partir de las 8:00 a.m. siendo positivo alcanzado su valor máximo a las 3:00 PM con 50 W/m², logrando suministrar energía a la habitación hasta las 8:00 PM para posteriormente llegar con un valor de -26 W/m² a las 6:00 a.m. del día siguiente.

Teniendo en cuenta que desde las 6:00 AM, q_{wall}^{ave} presenta un ligero descenso, esto se mantiene hasta las 11:00 AM. Posteriormente, q_{wall}^{ave} comienza a incrementarse hasta alcanzar su valor máximo a las 8:00 PM con 30.8 W/m^2 . Se observa que, durante toda la noche, q_{wall}^{ave} suministra energía hacia la habitación llegando a las 6:00 a.m. del día siguiente con un valor de 26.5 W/m^2 .

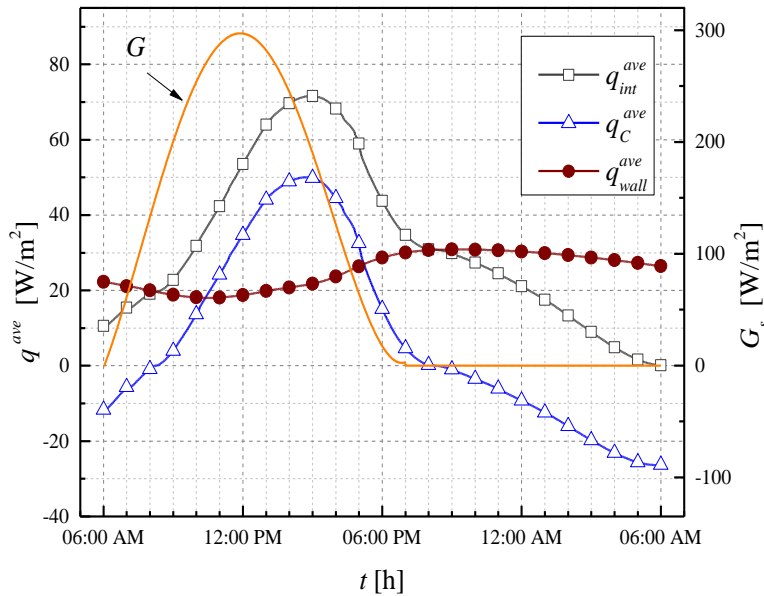


Figura 14. Comportamiento térmico del flujo de calor promedio hacia la habitación: día más cálido para la Ciudad de México.

El flujo de calor total suministrado hacia la habitación q_{int}^{ave} muestra que a pesar de que q_C^{ave} deja de suministrar energía a partir de las 8:00 PM, el q_{wall}^{ave} es lo suficiente como para suministrar energía durante todo el periodo nocturno logrando llegar a las 6:00 a.m. del día siguiente con $q_{int}^{ave} = 0.1 \text{ W/m}^2$. De esta manera, el sistema TW tiene la capacidad de suministrar energía a una habitación por lo menos 10 horas después de la ausencia de la radiación solar.

En la Figura 15, se observa que T_{ws}^{ave} , se mantiene en un intervalo de 25 a 28 °C durante todo el año. Además, el sistema TW tiene la capacidad de amortiguar las oscilaciones de la T_{amb} durante todo el año, para el día más cálido. Esto ayuda a mantener un confort térmico dentro de la habitación.

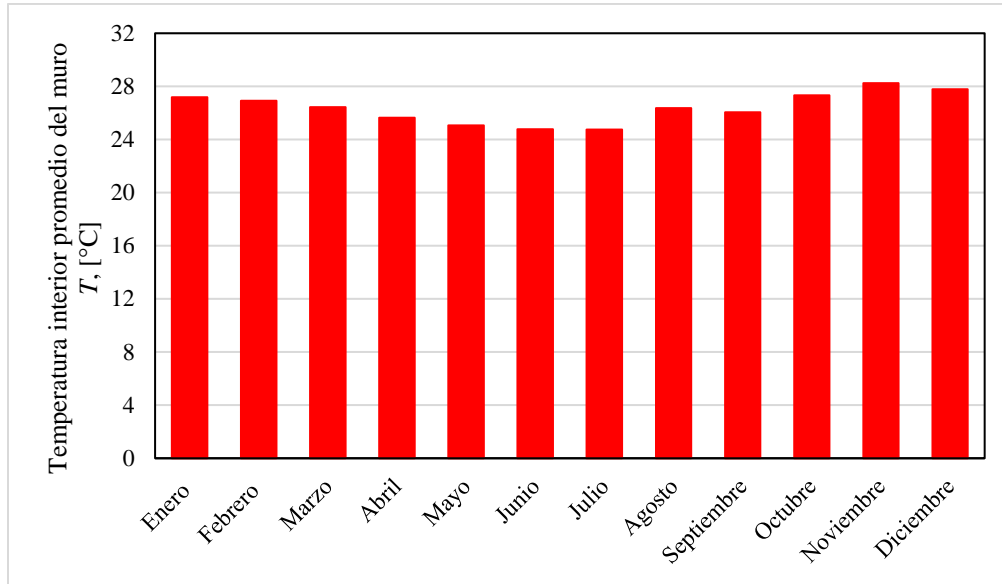


Figura 15. Comportamiento anual de la temperatura de la superficie interior del muro masivo: días más cálidos de la Ciudad de México.

Calor neto suministrado por el sistema TW para la ciudad de Ciudad de México

En la Tabla 5, se presenta un concentrado de la evaluación anual del calor total suministrado hacia la habitación por el sistema TW para la Ciudad de México.

De este modo, la evaluación anual del sistema TW bajo las condiciones climáticas de la Ciudad de México de la alcaldía de Tacubaya, se determinó que el sistema TW proporciona 10.64 kWh/m^2 para los días más fríos de cada mes durante todo el año, mientras que para los días más cálidos de cada mes durante todo el año el sistema TW proporciona 16.55 kWh/m^2 .

Tabla 5. Evaluación anual del calor total suministrado a la habitación: Ciudad de México.

Mes	Día más frío [kWh/m ²]	Día más cálido [kWh/m ²]
Enero	1.58	1.82
Febrero	1.35	1.80
Marzo	1.17	1.51
Abril	0.14	0.78
Mayo	-0.38	0.42
Junio	-0.30	0.17
Julio	0.57	0.01
Agosto	0.02	1.42
Septiembre	0.51	1.15
Octubre	1.72	2.09
Noviembre	2.17	2.88
Diciembre	2.09	2.50
Total	10.64	16.55

5. Conclusiones

- De acuerdo con la energía total suministrada (Q_{int}), se encontró que el concreto aporta 1.78 kWh/m² durante el día más frío del año, es decir un 23% más que el ladrillo y 30% más que el adobe. Por lo tanto, el uso de concreto presenta el mejor desempeño térmico del sistema muro Trombe.
- Se determinó que, para Tulancingo, el día más frío del año, la energía total suministrada por el sistema (Q_{int}) fue de 1.78 kWh/m². Mientras que, para el día más cálido, fue de 0.83 kWh/m². Adicionalmente, se obtuvo un suministro total anual de 26.87 kWh/m² de los cuales, 10.22 kWh/m² corresponden a los días más fríos y 16.65 kWh/m² a los días más cálidos.
- Para el caso de la Ciudad de México, la energía total suministrada fue de 1.58 kWh/m² y de 0.78 kWh/m² para el día más frío y el más cálido, respectivamente. El suministro total anual fue de 27.19 kWh/m² siendo 10.64 kWh/m² durante los días más fríos y 16.55 kWh/m² durante los días más cálidos.

- Como conclusión general, se puede decir que el sistema de muro Trombe tiene el potencial para implementarse en ciudades de clima generalmente frío de México como Tulancingo, Hidalgo y la Ciudad de México, las cuales presenta un tipo de clima templado subhúmedo. Con ello, se busca disminuir el gasto corriente en el consumo de energía eléctrica en una edificación y así alcanzar una eficiencia energética. Mientras que, se ayuda a mantener una condición de confort térmico dentro de una edificación.

Referencias

- [1] IEA, Global Energy and CO₂ Status Report, 2018.
- [2] Morse ES, Warming and ventilating apartments by the sun's rays, U.S. Patent, pags. 246-626, 1881.
- [3] Binggeli C., Building Systems For Interior Designers, John Wiley & Sons, 2003.
- [4] Balcomb J., Hedstrom J., Mcfarland R., Simulation Analysis Of Passive Solar Heated Buildings-Preliminary Results. Solar Energy, Vol. 19, Págs. 277-282, 1977.
- [5] Ohanessian P. y Charters W., Thermal Simulation Of A Passive Solar House Using A Trombe-Michel Wall Structure. Solar Energy, Vol. 20, Págs. 275-281, 1978.
- [6] Akbarzadeh A., Charters W., Lesslie D., Thermocirculation Characteristics Of ATrombe Wall Passive Test Cell. Solar Energy, Vol. 28, Págs. 641-468, 1982.
- [7] Hami K., Draoui B., Hami O., The Thermal Performances Of A Solar Wall. Energy, Vol. 39, Págs. 11-16, 2012.
- [8] Rabani M., Kalantar V., Faghieh A., Rabani M., Rabani R., Numerical Simulation Of A Trombe Wall To Predict The Energy Storage Rate And Time Duration Of Room Heating During The Non-Sunny Periods. Heat Mass Transfer, Vol. 49, Págs. 1395-1404, 2013.
- [9] Abbassi F., Dimassi N., Dehmani L., Energetic Study Of A Trombe Wall System Under Diferent Tunisian Building Configurations. Energy And Buildings, Vol. 80, Págs. 302-308, 2014.

- [10] Hernández-López I., Xamán J., Chávez Y., Hernández-Pérez I., Alvarado R., Thermal Energy Storage And Losses In A Room-Tromb Wall System Located In Mexico. *Energy*, Vol. 109, Págs. 512-524, 2016.
- [11] Yu B., He W., Li N., Wang L., Cai J., Chen H., Ji J., Xu G., Experimental And Numerical Performance Analysis Of A TC-Trombe Wall. *Applied Energy*, Vol. 206, Págs. 70-82, 2017.
- [12] Adbeen A., Serageldin A., Ibrahim M., El-Zarafarny A., Ookawara S., Murata R., Experimental, Analytical, And Numerical Investigation Into The Feasibility Of Integratin A Passive Trombe Wall Into A Single Room. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 154, Págs. 751-768, 2019.
- [13] Hirunlabh, J., Kongduang, W., Namprakai, P., and Khedari, J., “Study of Natural Ventilation of Houses by a Metallic Solar Wall Under Tropical Climate,” *Renewable Energy*, 18, Págs. 109–119, 1999.
- [14] Duffie, A. y Beckman, A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley. New York, 1996.
- [15] Duffie, A., Beckman, A., *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley and Sons, Inc., 2006.
- [16] Utzinger D., Klein S., Mitchell J., The Effect Of Air Rate In Collector-Storage Wall. *Solar Energy*, Vol. 25, Págs. 511-519, 1980.
- [17] Churchill S. y Chu H., Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection From a Vertical Plate,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, 18, Págs. 1323–1329, 1975.
- [18] Incropera, F. and De Witt, D., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 5ta edición, John Wiley, New York, 2002.
- [19] Ong K., A Mathematical Model Of A Solar Chimney. *Renewable Energy*, Vol. 28, Págs. 1047-1060, 2003.
- [20] Hernández I., Análisis de la Transferencia de Calor Conjugada En Un Sistema Solar Pasivo De Muro Trombe Para Calentamiento o Ventilación. Tesis de Doctorado, CENIDET, Cuernavaca, Mor., México, 2016.