



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – PROCESOS Y USO EFICIENTE DE ENERGÍA

ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR DEPENDIENTE DEL TIEMPO
EN MUROS DE BLOQUES HUECOS DE CONCRETO

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:
FÍS. LUCERO ANGELES DE LA CRUZ

TUTOR PRINCIPAL
DR. GUILLERMO BARRIOS DEL VALLE, IER UNAM

COMITÉ TUTORAL
DR. JORGE ANTONIO ROJAS MENÉNDEZ, IER UNAM
DRA. GUADALUPE HUELSZ LESBROS, IER UNAM
DRA. ANA CECILIA BORBÓN ALMADA, UNIVERSIDAD DE SONORA
DR. RAMÓN TOVAR OLVERA, IER UNAM

TEMIXCO, MORELOS, MARZO 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Rojas Menéndez Jorge Antonio

Secretario: Dra. Huelsz Lesbros Guadalupe

Vocal: Dr. Barrios Del Valle Guillermo

1er. Suplente: Dra. Borbón Almada Ana Cecilia

2do. Suplente: Dr. Tovar Olvera Ramón

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto de Energías Renovables UNAM

TUTOR DE TESIS:

Dr. Barrios del Valle Guillermo

FIRMA

(Segunda hoja)

Agradecimientos

Agradezco en primera instancia a mi asesor, por toda la ayuda, paciencia y apoyo brindado.

A mis sinodales, por su valiosa colaboración y aportación a mi trabajo.

Al conacyt por haberme otorgado el sustento económico durante dos años.

A todas las personas que estuvieron presentes en la trayectoria de mi maestría dentro y fuera del posgrado, en especial a a mi familia: Goyita, Emi, Mary, Chivis, Ale, David, Jeny, Fer, Chayo, Osbe, Isabellita y Diego; A mis amigos y amigas: Mara Campos, Ale Martínez, Amílcar Marín, Mary Silva, Lupi Morales, Shirley Flores, Chus León, Ezequiel, Mau, Chucho Capistrán, Gaby, Lalo, Charly, Alice, Chava, Miguel, Angel Aranda, Paty Ramos, Eri Arizmendi, Vic Mercado, Carlos Orozco, Poncho Beltrán etc.

A toda la comunidad del Instituto de Energías Renovables.

Contenido

1. Introducción	1
1.1. Energía en edificaciones en el marco mundial	1
1.2. Energía en edificaciones en el marco nacional	2
1.3. Motivación	3
1.4. Revisión bibliográfica	4
2. Transferencia de calor en sistemas constructivos de bloques huecos para muro	8
2.1. Modelo físico	8
2.2. Modelo teórico	11
2.3. Modelo numérico	16
2.3.1. Discretización	18
2.3.2. Solución de las ecuaciones	25
2.3.3. Criterios de convergencia	27
2.4. Resumen del capítulo	28
3. Validación	31
3.1. Condición para los coeficientes de transferencia de calor por convección	32
3.2. Validación del código numérico por medio de resultados experimentales	33
3.3. Validación del código numérico por medio de los resultados numéricos de Ait-taleb	36
3.4. Resumen del capítulo	38

4. Resultados	40
4.1. Características de las simulaciones	41
4.2. Resultados bajo condición sin aire acondicionado	46
4.2.1. Cálculo de los mecanismos de transferencia de calor	49
4.2.2. Desempeño térmico	58
4.3. Resultados bajo condición con aire acondicionado	64
4.3.1. Cálculo de los mecanismos de transferencia de calor	64
4.3.2. Desempeño térmico	69
4.4. Caso de estudio donde se disminuye la radiación	72
4.4.1. Resultados bajo condición sin aire acondicionado	72
4.4.2. Resultados bajo condición con aire acondicionado	79
4.5. Resumen de los resultados	82
5. Bibliografía	85

Lista de Figuras

1.1.	Consumo energético final total mundial de 1971- 2012 [1].	2
2.1.	Esquema de la transferencia de calor en un muro de bloque hueco de concreto, donde T_{sa} representa la temperatura sol-aire, T_{int} la temperatura del aire al interior de la habitación y T_c la temperatura del aire dentro de la cavidad.	9
2.2.	Esquema del análisis de transferencia de calor en un bloque hueco de concreto, T_{sa} representa la temperatura sol-aire, T_{int} la temperatura del aire al interior y T_c la temperatura del aire dentro de la cavidad, $e_{11}, e_{21}, e_{12}, a_{11}, a_{21}, a_{12}, a_{22}, a_{13}$ son las medidas del bloque, mostradas en la figura. Finalmente, la línea punteada representa la condición de adiabaticidad, $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$	10
2.3.	Condiciones a la frontera en un bloque hueco de concreto en dos dimensiones. Las fronteras $i - iv$, son las fronteras del bloque hueco, mientras que las fronteras $v - viii$ delimitan a la cavidad de aire, tal como se muestra en la figura. T_{sa} y h_o representan la temperatura sol-aire y el coeficiente de película de exterior, T_{int} y h_i la temperatura del aire al interior y el coeficiente de transferencia de calor por convección, finalmente T_c y h_c son la temperatura del aire dentro de la cavidad y el coeficiente de transferencia de calor por convección del aire dentro de la cavidad.	12
2.4.	Transferencia de calor radiativo, en la cavidad de un bloque hueco de concreto y factores de vista en superficies perpendiculares y superficies paralelas.	16
2.5.	Volumen de control en dos dimensiones.	17

2.6. Mallado de una placa hueca en el centro	18
2.7. Volumen de control interior (tipo 10).	19
2.8. Método línea por línea: reduce un sistema de ecuaciones de cinco incógnitas a uno de tres incógnitas, considerando dos de las cinco incógnitas con valores constantes.	27
2.9. Diagrama de flujo del código numérico para solucionar la transferencia de calor en un MBHC.	29
3.1. Muro de pruebas en los trabajos de Borbón <i>et al.</i> [2]	33
3.2. Dimensiones, en metros, del bloque analizado en los trabajos de Borbón <i>et al.</i> [2]	34
3.3. Arreglo de cavidades analizado en el trabajo de Ait-taleb <i>et al.</i>	36
4.1. Muro formado por el sistema constructivo de bloque hueco de concreto, la línea punteada representa una línea de simetría con respecto al flujo de calor.	42
4.2. Temperatura sol-aire (T_{sa}) y temperaturas del aire al interior de un MBHC (T_{int} MBHC) y un MH (T_{int} MH). Bajo condición sin aire acondicionado, en un día típico para la temporada fría de (a) Toluca, enero, orientación este, (b) Toluca, enero, orientación sur, (c) Monterrey, enero, orientación este y (d) Monterrey, enero, orientación sur.	47
4.3. Temperatura sol-aire (T_{sa}) y temperaturas del aire al interior de un MBHC (T_{int} MBHC) y un MH (T_{int} MH). Bajo condición sin aire acondicionado, en un día típico para la temporada cálida de (a) Temixco, mayo, orientación este, (b) Temixco, mayo, orientación sur, (c) Monterrey, mayo, orientación este y (d) Monterrey, mayo, orientación sur.	48
4.4. Flujo de calor Q'' [W/m^2] en un MBHC y en un MH, bajo condición sin aire acondicionado para la temporada fría de (a) Toluca, enero, orientación este, (b) Toluca, enero, orientación sur, (c) Monterrey, enero, orientación este y (d) Monterrey, enero, orientación sur.	50
4.5. Flujo de calor Q'' [W/m^2] en un MBHC y en un MH, bajo condición sin aire acondicionado para la temporada cálida de (a) Temixco, mayo, orientación este, (b) Temixco, mayo, orientación sur, (c) Monterrey, mayo, orientación este y (d) Monterrey, mayo, orientación sur.	51

4.6. Esquema de un bloque hueco de concreto, donde la línea punteada indica la posición donde se miden los mecanismos de transferencia de calor.	52
4.7. Transferencia de calor por unidad de longitud Q' [W/m] por cada mecanismo de transferencia de calor para un MBHC. Bajo condición sin aire acondicionado para la temporada fría de (a) Toluca, enero, orientación este, (b) Toluca, enero, orientación sur, (c) Monterrey, enero, orientación este y (d) Monterrey, enero, orientación sur.	54
4.8. Transferencia de calor por unidad de longitud Q' [W/m] por cada mecanismo de transferencia de calor para un muro de bloque hueco de concreto. Bajo condición sin aire acondicionado para la temporada cálida de (a) Temixco, mayo, orientación este, (b) Temixco, mayo, orientación sur, (c) Monterrey, mayo, orientación este y (d) Monterrey, mayo, orientación sur.	55
4.9. Porcentajes promedio e instantáneos de los mecanismos de transferencia de calor por unidad de longitud. Bajo condición sin aire acondicionado para (a) Toluca, enero, orientación este, (b) Toluca, enero, orientación sur, (c) Temixco, mayo, orientación este y (d) Temixco, mayo, orientación sur.	56
4.10. Transferencia de calor por unidad de longitud de los mecanismos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación para un día típico de Toluca en Enero (To), Temixco en Mayo (Te), Monterrey en Enero (Mo-Ene) y Monterrey en Mayo (Mo-May).	59
4.11. Energía transferida por unidad de área ET en un MBHC y un MH para las orientaciones (a) este y (b) sur. Bajo condición sin aire acondicionado, en un día típico para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May).	62
4.12. Factor de decremento sol-aire (FD_{sa}) (a)(b) y tiempo de retraso (TR) (c)(d) de un MBHC y su comparación con un MH. Bajo condición sin aire acondicionado, para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May).	63
4.13. T_{int} del MBHC, T_{int} del MH y temperatura de neutralidad T_n (línea negra) para un día típico en Toluca, enero, orientación este.	64

4.14. Transferencia de calor por unidad de longitud Q' [W/m] por mecanismo de transferencia de calor para un MBHC bajo condición con aire acondicionado para la temporada fría de (a) Toluca, enero, orientación este, (b) Toluca, enero, orientación sur, (c) Monterrey, enero, orientación este, (d) Monterrey, enero, orientación sur.	66
4.15. Flujo de calor total Q' [W/m] por mecanismo de transferencia de calor para un MBHC bajo condición con aire acondicionado para la temporada cálida de (a) Temixco, mayo, orientación este, (b) Temixco, mayo, orientación sur, (c) Monterrey, mayo, orientación este, (d) Monterrey, mayo, orientación sur.	67
4.16. Porcentajes promedio e instantáneos de los mecanismos de transferencia de calor bajo condición con aire acondicionado para (a) Toluca, enero, orientación este, (b) Toluca, enero, orientación sur, (c) Temixco, mayo, orientación este y (d) Temixco, mayo, orientación sur.	68
4.17. Transferencia de calor por unidad de longitud de los mecanismos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación para un día típico de los cuatro casos de estudio. Para un estudio bajo condición con aire acondicionado	70
4.18. Carga total CT , compuesta por la carga de calentamiento C_{cal} y enfriamiento C_{enf} de un MBHC y un MH, orientaciones este y sur. Bajo condición con aire acondicionado, para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May).	71
4.19. Factor de decremento superficial (FD_s) de un MBHC y un MH, orientaciones este (a) y sur (b). Con condición de aire acondicionado, para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May). . . .	72
4.20. Temperatura sol-aire (T_{sa}) y temperaturas del aire al interior de un MBHC0.03 (T_{int} MBHC0.03), un MBHC (T_{int} MBHC) y un MH (T_{int} MH), bajo condición sin aire acondicionado, en un día típico para la temporada fría de (a) Toluca, enero, orientación este, (b) Toluca, enero, orientación sur, (c) Monterrey, enero, orientación este y (d) Monterrey, enero, orientación sur.	73

4.21. Temperatura sol-aire (T_{sa}) y temperaturas del aire al interior de un MBHC-E0.03 (T_{int} MBHC-E0.03), un MBHC (T_{int} MBHC) y un MH (T_{int} MH), bajo condición sin aire acondicionado, en un día típico para la temporada cálida de (a) Toluca, enero, orientación este, (b) Toluca, enero, orientación sur, (c) Monterrey, enero, orientación este y (d) Monterrey, enero, orientación sur.	74
4.22. Flujo de calor Q'' [W/m^2] en un MBHC-E0.03, un MBHC y un MH, bajo condición sin aire acondicionado, en un día típico para la temporada fría de (a) Toluca, enero, orientación este, (b) Toluca, enero, orientación sur, (c) Monterrey, enero, orientación este y (d) Monterrey, enero, orientación sur.	76
4.23. Flujo de calor Q'' [W/m^2] en un MBHC-E0.03, un MBHC y un MH, bajo condición sin aire acondicionado, en un día típico para la temporada cálida de (a) Temixco, mayo, orientación este, (b) Temixco, mayo, orientación sur, (c) Monterrey, mayo, orientación este y (d) Monterrey, mayo, orientación sur.	77
4.24. Energía transferida por unidad de área ET , en un MBHC-E0.03, un MBHC y un MH (sólido) para las orientaciones este (a) y sur (b). Bajo condición sin aire acondicionado, en un día típico para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May).	79
4.25. Factor de decremento sol-aire (FD_{sa}) y tiempo de retraso (TR) de un MBHC-E0.03, un MBHC y un MH para las orientaciones este (a) y sur (b). Bajo condición sin aire acondicionado, en un día típico para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May). (a) FD este, (b) FD sur, (c) TR este y (d) TR sur	80
4.26. Carga total CT , compuesta por la carga de calentamiento (C_{cal}) y enfriamiento (C_{enf}) de MBHC-E0.03, un MBHC y un MH, en las orientaciones este (a) y sur (b). Bajo condición con aire acondicionado, para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May).	82
4.27. Factor de decremento superficial (FD_s) de un MBHC-E0.03, un MBHC y un MH, bajo condición con aire acondicionado. Bajo condición con aire acondicionado, para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May).	83

Resumen

Actualmente en México, el 44 % de la energía usada en el sector residencial doméstico con climatización, es utilizada en sistemas de aire acondicionado de calentamiento y enfriamiento [3]. La envolvente de la edificación, muros y techos, es de gran importancia en el desempeño térmico de una edificación, pues en esta se da, en gran parte, la transferencia de calor con el exterior. El uso de sistemas constructivos adecuados en la envolvente de la edificación, podría reducir e incluso evitar el uso de sistemas aire acondicionado de calentamiento y enfriamiento.

A nivel nacional un sistema constructivo de muros usado ampliamente es el bloque hueco de concreto, siendo en algunas regiones el 100 % de las viviendas ofertadas las que usan este sistema constructivo [4] [5]. Existen varios trabajos que han estudiado de manera experimental o numérica la transferencia de calor independiente del tiempo a través de este sistema constructivo y pocos estudios que han considerado la variación temporal.

En este trabajo se desarrolla un código numérico para calcular la transferencia de calor dependiente del tiempo, en un muro de bloque hueco de concreto estándar, con una emisividad $e = 0.9$ en las superficies de la cavidad de aire (MBHC). El código es empleado para determinar la contribución de cada mecanismo de transferencia de calor y evaluar el desempeño térmico del muro bajo condición sin y con aire acondicionado de enfriamiento y calentamiento, en las orientaciones este y sur, para los casos de Temixco, Morelos, en un día típico de mayo; Toluca, Estado de México, en un día típico de enero; Monterrey, Nuevo León, en un día típico de enero y en un día típico de mayo. Los resultados obtenidos del MBHC, con emisividad $e = 0.9$ en las superficies de la cavidad de aire, son comparados con los resultados de un muro de bloque homogéneo

de concreto (MH) y el mismo MBHC, con un recubrimiento de baja emisividad ($e = 0.03$) en las superficies de la cavidad de aire (MBHC-E0.03).

Se concluye que el sistema constructivo con mejor desempeño térmico es el MBHC-E0.03, seguido del MBHC y finalmente el MH, para el caso con aire acondicionado (de calentamiento y enfriamiento). Para el caso bajo condición sin aire acondicionado, el mejor desempeño térmico lo tiene el MBHC-E0.03, seguido del MH y finalmente el MBHC. Asimismo, se determinó, que en un MBHC bajo condición sin y con aire acondicionado (de calentamiento y enfriamiento), la transferencia de calor por radiación es la más importante, seguida de la transferencia de calor por conducción y finalmente la transferencia de calor por convección.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Energía en edificaciones en el marco mundial

El consumo energético a nivel mundial se ha incrementado de una manera drástica en los últimos años, de 1971 hasta el 2012, se ha duplicado alcanzando un valor de aproximadamente 9,000 Mtoe (megatoneladas de petróleo equivalente), que corresponde a 559,817 petajoules, Figura 1.1. De los cuales aproximadamente el 75 % provienen de combustibles fósiles [6].

El sector residencial representa el 32 % del consumo de energía final total, que en términos de energía primaria representa el 40 % [6]. A este sector se le asocia el 21 % de las emisiones de CO_2 totales. Hay estudios que afirman que el acondicionamiento del aire al interior de las edificaciones en el sector residencial llega a utilizar entre 40 -70 % de la energía consumida, seguida de la energía para calentamiento de agua con un gasto de 17-26 %, finalmente la iluminación y otros gastos representan del 16 al 32 % [7]. La energía usada en el acondicionamiento del aire al interior, puede ser reducida con un buen diseño de las edificaciones, el cual incluye una correcta elección del sistema constructivo de muros y techos en contacto con el exterior.

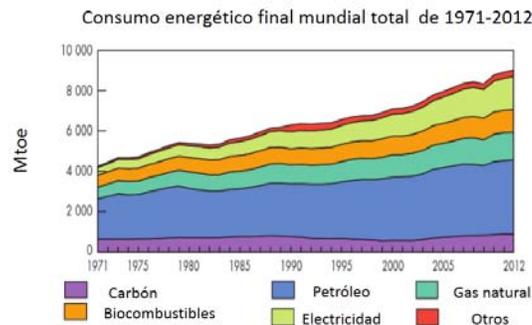


Figura 1.1: Consumo energético final total mundial de 1971- 2012 [1].

1.2. Energía en edificaciones en el marco nacional

A nivel nacional en el 2013, el consumo de energía alcanzó por primera vez a la producción energética [8], lo que nunca había sucedido en México. De acuerdo con el balance nacional de energía 2013 [8], el consumo de energía total en el 2013 fue de 5,132 petajoules, de los cuales más del 90 % se produjeron por medio de combustibles fósiles. El sector energético más demandante fue el transporte, con el 46 %; seguido del sector industrial, con el 33 %; el sector residencial, con el 14 %; el sector comercial, con casi el 3 % y el sector público con menos del 1 %.

En el sector residencial doméstico con climatización, el 44 % de la energía es utilizada en calefacción y aire acondicionado, representando el mayor consumo; seguido de la iluminación y electrodomésticos (exceptuando del refrigerador), con el 33 %; el refrigerador, con el 14 %; y el calentador de agua y estufa, con el 9 % [3].

1.3. Motivación

En México existen normativas con las que se pretende generar un ahorro energético en las edificaciones, la NOM-008-ENER-2001 [9], eficiencia energética de edificaciones, envolvente de edificios no residenciales y la NOM-020-ENER-2011 [10], eficiencia energética de edificaciones, envolvente de edificios residenciales. Dichas normas tienen como objetivo, limitar la ganancia de calor a través de la envolvente de las edificaciones, para racionalizar el uso de energía en los sistemas de enfriamiento. Las dos normas arriba descritas tienen limitaciones, algunas de ellas son:

- Se basan en un análisis de transferencia de calor independiente del tiempo, por lo que únicamente analizan la capacidad que tiene un sistema constructivo de aislar (resistencia térmica).
- Únicamente contemplan edificaciones con condición de aire acondicionado para enfriamiento.
- No consideran la absorción solar en las superficies externas.

En el país un sistema constructivo muy utilizado es el bloque hueco de concreto. En algunos estados de la república representa hasta el 100 % de los sistemas constructivos ofertados (sistemas constructivos de las viviendas que están en venta en ese momento). En la tabla 1.1 se muestra el porcentaje que representa el bloque hueco de concreto como sistema constructivo en muros.

Existen razones importantes para hacer un análisis de la transferencia de calor dependiente del tiempo en muros de bloques huecos de concreto, entre ellas, que la normatividad mexicana no incluye estudios de la transferencia de calor dependiente del tiempo y que no existen estudios de los mecanismos de transferencia de calor en dichos sistemas constructivos.

La ventaja de un análisis dependiente del tiempo es que no sólo considera la conductividad térmica (k), sino también las propiedades térmicas de la envolvente de la edificación; la densidad (ρ) y el calor específico (c). Es decir, se considera la capacidad de la envolvente para aislar, pero también su capacidad para almacenar la energía en su interior, lo cual es importante cuando las oscilaciones de la temperatura exterior son grandes y la ganancia de radiación solar alta, como sucede en la mayor parte del país. El objetivo de esta tesis es hacer el análisis numérico de la transferencia de calor en un muro construido con bloques huecos de concreto, bajo un estudio dependiente del tiempo, que considere los tres

Porcentaje de uso del bloque hueco de concreto, como sistema constructivo en muros.

Zona	porcentaje de BHC [%]
ZNCM	86
Temixco	69
Colima- Villa de Álvarez	100
Tampico	100

Tabla 1.1: Porcentaje de uso del sistema constructivo de bloque hueco de concreto (BHC), en viviendas ofertadas para las zonas de: zona norte de la ciudad de México (ZNCM); Temixco, Morelos; Colima-Villa de Álvarez, Colima y Tampico, Tamaulipas.

mecanismos de transferencia de calor (conducción, convección y radiación), para evaluar el desempeño térmico bajo condiciones sin y con aire acondicionado, tanto de enfriamiento como de calentamiento.

1.4. Revisión bibliográfica

Para contextualizar este trabajo se presenta una revisión bibliográfica sobre estudios numéricos y experimentales de la transferencia de calor en sistemas no homogéneos, construidos con bloques huecos. Varios autores han analizado la transferencia de calor de manera numérica por varios métodos: método de volúmenes de control [11–14], cuadraturas finitas [15], diferencias finitas [16–18], elemento finito [19], funciones de transferencia [20]. En la mayoría de los casos, solucionan las ecuaciones de Navier Stokes [11–15, 19, 20]. Algunos otros autores han hecho el estudio de manera experimental [2, 17, 21, 22].

En varios trabajos se analiza el comportamiento de la resistencia térmica como parámetro de desempeño térmico [12, 14, 16–19, 21]. Antar [14] reporta que el valor de la resistencia térmica aumenta hasta en un 43 % modificando el número de cavidades en un bloque de una hasta cinco, soluciona la transferencia de calor en un análisis independiente del tiempo en dos dimensiones, por medio del método de volumen finito, considerando la transferencia de calor conductiva, convectiva (por medio de la solución de la mecánica de fluidos) y radiativa (por medio del método de radiosidades). Al-Jabri *et al.* [21] reportan que variando de una a dos

cavidades se encuentra un aumento en la resistencia térmica del 21 %, y de una a tres cavidades aumenta en un 28 %. Éstos resultados los encontraron evaluando la resistencia térmica de manera experimental, mediante la construcción y de muros de pruebas de bloques huecos con distintas características en las cavidades y cambiando su composición.

Borbón *et al.* afirman que la resistencia térmica de un muro disminuye desde 0.174 hasta 0.167 $^{\circ}Cm^2/W$ si la diferencia de temperaturas entre sus extremos aumenta de 13.6 a 39.8 $^{\circ}C$ [2], analizando la transferencia de calor de forma experimental por medio del método de placa caliente protegida, en un muro de bloques huecos de concreto sujeto a temperatura constante en sus extremos. Asimismo, analizan de manera numérica este mismo problema, simulando por medio de diferencias finitas en un análisis unidimensional independiente del tiempo, confirmando los resultados obtenidos experimentalmente [16, 17].

Varios autores, haciendo el estudio de manera numérica, afirman que el flujo de calor disminuye (la resistencia térmica aumenta) conforme se aumenta el tamaño de la cavidad, [12, 13]. A. Mahmoud *et al.* [13] afirman que se obtiene una menor tasa de transferencia de calor si se hace más grande el tamaño de la cavidad con respecto a un tamaño establecido (reducciones de 55 %) que si se ponen varias pequeñas con respecto a una (reducciones de 10 %), ellos solucionan la transferencia de calor por medio del método de volumen finito, considerando la transferencia de calor conductiva, convectiva (por medio de la solución de la mecánica de fluidos) y radiativa (por medio del método de radiosidades), en un análisis independiente del tiempo, en dos dimensiones. Al-Khameis *et al.* [12] afirman que la resistencia térmica aumenta conforme se aumenta el tamaño de la cavidad manteniendo fijo el tamaño del bloque, obteniendo una disminución del calor transferido de 18, 30 y 46 % si el tamaño de la cavidad es 60, 70 y 80 % el tamaño del bloque, considerando como referencia el calor transferido en un muro sin hueco. Ellos solucionan la transferencia de calor por medio del método de volumen finito, considerando la transferencia de calor conductiva, convectiva (por medio de la solución de la mecánica de fluidos) y radiativa (por medio del método de radiosidades), en un análisis dependiente del tiempo, en dos dimensiones, considerando como frontera al exterior una señal de datos de clima reales, dependientes del tiempo y manteniendo la temperatura del aire al interior constante.

Ait-taleb *et al.* [11] encuentran que el calor transferido aumenta, cuando se disminuye la razón de aspecto de la cavidad, encuentran la transferencia de calor en un techo de bloques huecos de concreto por medio del método de volumen finito, considerando la transferencia de calor conductiva, convectiva (por medio

de la solución de la mecánica de fluidos) y radiativa (por medio del método de radiosidades), en un análisis independiente del tiempo, en dos dimensiones.

Por otro lado, varios autores incluyen los tres modos de transferencia de calor en sus análisis [11–14, 18, 20], algunos de ellos determinaron la contribución de éstos a la transferencia de calor total, en un muro de bloques huecos de concreto [11, 18]. Pérez *et al.* [18] encuentran que hay una aportación de la transferencia de calor conductiva del 25 %, convectiva de 19 % y radiativa de 56 %, analizan de manera numérica la transferencia de calor, simulando por medio de diferencias finitas, en un modelo unidimensional independiente del tiempo en un muro hueco sujeto a temperatura constante en sus extremos. Mientras que Ait-taleb *et al.* [11] reportan aportaciones conductivas entre 51-60 %, convectivas entre 10-16 % y radiativas entre 28-32 % en un muro de bloques huecos con diferenciales de temperatura entre las paredes desde 5 a 30 °C.

Al-Khameis *et al.* y Antar [12, 14], analizaron el comportamiento de la transferencia de calor, variando el valor de la emisividad, ambos coinciden en que el valor de la resistencia térmica aumenta si se disminuye la emisividad de las paredes de la cavidad.

Según la American Society for Testing and Materials (ASTM), una barrera radiativa es una superficie de baja emisividad (emisividad 0.1 o menor) que se adhiere a la envolvente de la edificación, que reduce el flujo de energía radiante hacia y desde el componente de construcción [23]. Las barreras radiativas más comunes son elaboradas con papel aluminizado que se adhiere a alguna de las componentes de la envolvente de la edificación, reduciendo la ganancia o pérdida de calor de hasta el 40 %, reduciendo los costos de calentamiento o enfriamiento en las edificaciones hasta en un 17 % [24, 25].

En los trabajos arriba citados, podemos notar que son pocos los trabajos que hacen un análisis de la transferencia de calor dependiente del tiempo, asimismo no existen trabajos que realicen análisis en condiciones sin aire acondicionado. Es por ello que este trabajo se encarga de analizar la transferencia de calor en muros construidos con el sistema constructivo de bloque hueco de concreto, mediante un análisis dependiente del tiempo y que compara las situaciones bajo condición con aire acondicionado (de calentamiento y enfriamiento) y sin aire acondicionado.

El procedimiento utilizado para el cálculo numérico de la transferencia de calor dependiente del tiempo en un muro de bloques huecos de concreto estándar con emisividad 0.9 al interior de los huecos (MBHC), se presenta en el capítulo dos. En el capítulo tres se presenta la validación del código numérico, por medio de la comparación con un trabajo experimental y otro numérico. En el capítulo

cuatro se presenta el desempeño térmico y el cálculo de las contribuciones de los mecanismos de transferencia de calor de un MBHC y su comparación con otros dos casos: el mismo sistema constructivo, muro de bloque hueco de concreto pero con emisividad $e = 0.03$ en las superficies de la cavidad de aire (MBHC-E0.03) y un muro de bloque homogéneo de concreto (MH). Para cuatro casos de la república mexicana: dos casos en temporada fría; Temixco y Monterrey en mayo, y dos casos en temporada fría; Toluca y Monterrey en un día típico de enero. Finalmente, en el capítulo cuatro se muestran las conclusiones finales.

Capítulo 2

Transferencia de calor en sistemas constructivos de bloques huecos para muro

En este capítulo se presenta el método utilizado para el cálculo numérico de la transferencia de calor dependiente del tiempo en un muro de bloques huecos de concreto, con una emisividad $e = 0.9$ en las superficies de la cavidad de aire (MBHC).

En la sección 2.1 se plantea el problema general de la transferencia de calor en un MBHC. En la sección 2.2 se describen las ecuaciones de transporte de calor dependiente del tiempo y las condiciones a la frontera. Finalmente en la sección 2.3 se muestra el método numérico.

2.1. Modelo físico

La Figura 2.1 muestra un esquema del problema a resolver, un muro de bloques huecos de concreto, con una emisividad $e = 0.9$ en las superficies de la cavidad de aire (MBHC). Sobre este se realiza un análisis de la transferencia de calor dependiente del tiempo. Se considera como sistema de referencia el sistema coordenado mostrado en la figura 2.1. Debido a que la transferencia de calor se

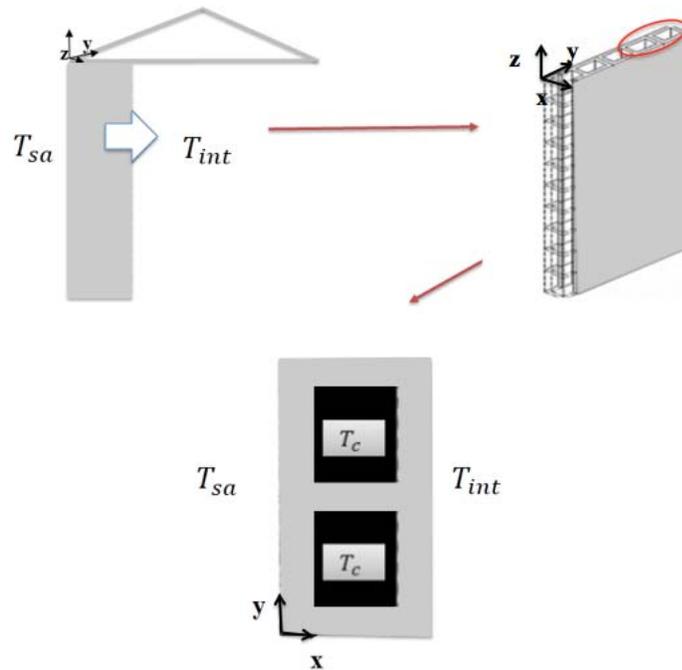


Figura 2.1: Esquema de la transferencia de calor en un muro de bloque hueco de concreto, donde T_{sa} representa la temperatura sol-aire, T_{int} la temperatura del aire al interior de la habitación y T_c la temperatura del aire dentro de la cavidad.

da principalmente en la dirección transversal al muro, se considera un análisis bidimensional en un plano transversal al muro xy (figura 2.1).

Tal como muestra la Figura 2.2, el lado izquierdo del muro se encuentra expuesto a la temperatura sol-aire, que considera la radiación solar incidente, el intercambio de energía radiante con el cielo y el intercambio de calor convectivo con el aire al exterior [26]. En las partes sólidas del muro la transferencia de calor se realiza de manera conductiva, mientras que las superficies de la cavidad mantienen un intercambio de calor por convección (con el aire dentro de la cavidad) y radiación (con las demás paredes de la cavidad).

La transferencia de calor por convección se calcula por medio de la ley de enfriamiento de Newton en los tres casos: los extremos del muro y al interior de la cavidad. Para el caso de la cavidad se usan correlaciones para determinar el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección y se asume

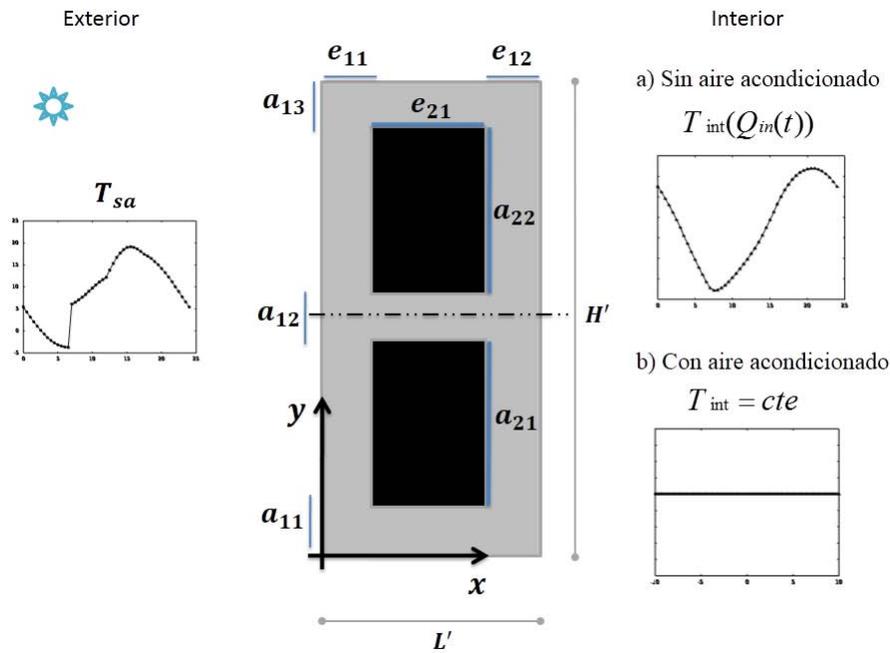


Figura 2.2: Esquema del análisis de transferencia de calor en un bloque hueco de concreto, T_{sa} representa la temperatura sol-aire, T_{int} la temperatura del aire al interior y T_c la temperatura del aire dentro de la cavidad, e_{11} , e_{21} , e_{12} , a_{11} , a_{21} , a_{12} , a_{22} , a_{13} son las medidas del bloque, mostradas en la figura. Finalmente, la línea punteada representa la condición de adiabaticidad, $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$.

mezclado instantáneo, es decir, la temperatura del aire al interior de la cavidad T_c es homogénea y depende únicamente del flujo de calor que entra y sale de la cavidad. La transferencia de calor por radiación se resuelve por medio del método de radiosidades [27], considerando como temperatura superficial la temperatura superficial promedio de cada superficie de la cavidad, también se considera que las superficies de la cavidad tienen la misma emisividad y que el aire es un medio no participativo en dicho mecanismo de transferencia de calor.

El extremo derecho del muro está en contacto con el aire al interior T_{int} , por lo que el flujo de calor a través de esta superficie es calculado por medio de la ley de enfriamiento de Newton usando correlaciones para el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección conforme a lo establecido en la norma NOM-020-ENER-2011 [10]. La temperatura del aire al interior depende de la condición de uso y no uso de aire acondicionado: bajo condición sin aire acondicionado la temperatura del aire al interior depende únicamente del flujo de calor a través del muro y se asume también mezclado instantáneo. Mientras que bajo condición con aire acondicionado, siempre que se mencione aire acondicionado se asumirá que es aire acondicionado tanto de calentamiento como de enfriamiento a menos que se indique lo contrario, la temperatura al interior es constante.

2.2. Modelo teórico

Para calcular la transferencia de calor dependiente del tiempo en un bloque de concreto hueco, se soluciona la ecuación de conducción de calor en un sólido en dos dimensiones dependiente del tiempo

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (2.1)$$

donde $T(x, y)$ es la temperatura, k es la conductividad térmica, ρ es la densidad y c es el calor específico. La Figura 2.2 muestra un esquema del bloque hueco de concreto, la línea punteada representa una condición de adiabaticidad, debida a la simetría con respecto al flujo de calor. Por lo anterior solo se analiza el bloque hueco de concreto de una sola cavidad, mostrado en la figura 2.3. A continuación se muestran las ecuaciones de las condiciones de frontera del bloque hueco de concreto.

La frontera i) es la frontera a la izquierda del bloque en $x = 0$, a lo largo de

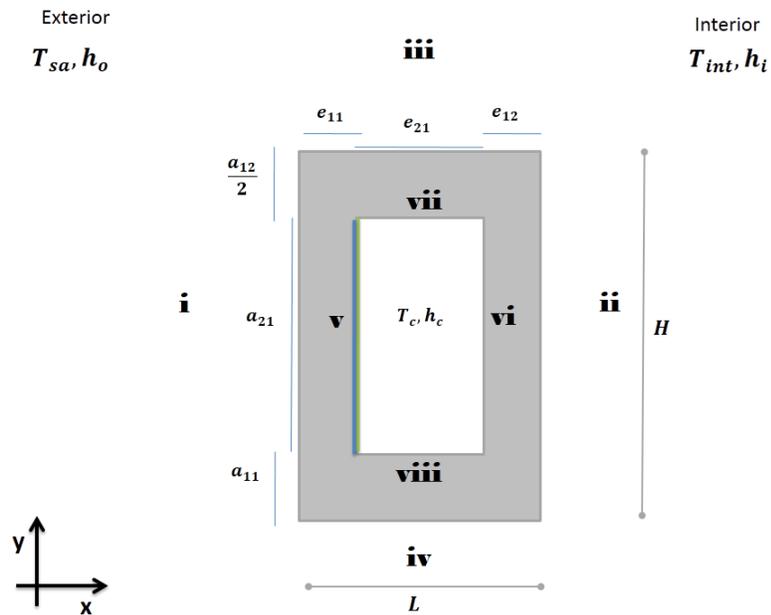


Figura 2.3: Condiciones a la frontera en un bloque hueco de concreto en dos dimensiones. Las fronteras $i - iv$, son las fronteras del bloque hueco, mientras que las fronteras $v - viii$ delimitan a la cavidad de aire, tal como se muestra en la figura. T_{sa} y h_o representan la temperatura sol-aire y el coeficiente de película de exterior, T_{int} y h_i la temperatura del aire al interior y el coeficiente de transferencia de calor por convección, finalmente T_c y h_c son la temperatura del aire dentro de la cavidad y el coeficiente de transferencia de calor por convección del aire dentro de la cavidad.

la dirección y , desde $y = 0$ hasta $y = H[m]$ y su ecuación de balance es

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = h_0 (T_{sa} - T_{x=0}), \quad (2.2)$$

donde $h_0[W/m^2K]$ es el coeficiente de película del aire al exterior, $T_{x=0}[^\circ C]$ es la temperatura en $x = 0$. La temperatura sol-aire $T_{sa}[^\circ C]$ está dada por

$$T_{sa} = T_a + \frac{Ia}{h_o} + CF, \quad (2.3)$$

con $I[W/m^2]$ la irradiancia solar que incide sobre la superficie, $a[-]$ la absortancia solar de la superficie, $T_a[^\circ C]$ la temperatura ambiente y $CF[^\circ C]$ el factor de corrección debido a las pérdidas radiativas de onda larga y es $-3.9^\circ C$ para techos y cero para paredes verticales.

La frontera $ii)$ es la frontera derecha del bloque hueco, en $x = L$ a lo largo de la dirección y , desde $y = 0$ hasta $y = H$ y su ecuación de balance está dada por

$$h_i (T_{int} - T_{x=L}) = k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L}, \quad (2.4)$$

con $h_i[W/m^2K]$ el coeficiente de transferencia de calor convectivo al interior, $L[m]$ el espesor del bloque y $T_{x=L}[K]$ la temperatura superficial interior del muro. Si es analizado el caso bajo condición sin aire acondicionado, T_{int} depende del flujo total de calor a través de la superficie interior $Q'_{in}[W/m]$ y debe cumplirse la condición

$$\frac{dT_{int}}{dt} = \frac{Q'_{in}}{\rho_a c_a L_a H}. \quad (2.5)$$

donde $\rho_a[kg/m^3]$ y $c_a[J/kg^\circ C]$ son la densidad y el calor específico del aire respectivamente y $L_a[m]$ es la longitud característica de la habitación, en este caso la distancia hacia la otra pared de la habitación. Dicha condición establece que el cambio de la temperatura del aire al interior depende del flujo de calor a través de la superficie interior. Si es analizado el caso bajo condición con aire acondicionado, T_{int} tiene un valor constante que es un valor predeterminado por el termostato. Dicho valor puede ser fijado a la temperatura de neutralidad T_n determinada por:

$$T_n = 13.5^\circ C + 0.54\overline{T_a}, \quad (2.6)$$

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

Las fronteras *iii)* y *iv)* son las fronteras que delimitan al bloque en la dirección x ; en $y = 0$ y $y = H$, respectivamente, desde $x = 0$ hasta $x = L$. Debido a la simetría en el flujo de calor del bloque éstas fronteras son consideradas adiabáticas, por lo que sus ecuaciones toman la forma:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=H} = 0. \quad (2.7)$$

Las fronteras de *v)* - *viii)* son las fronteras de la cavidad al interior del bloque. La frontera *v)* es la frontera izquierda de la cavidad, en $x = e_{11}$, desde $y = a_{11}$ hasta $y = a_{11} + a_{21}$

$$h_c (T_c - T_{x=e_{11}}) + \frac{Q'_{rad1}}{a_{21}} = k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=e_{11}}, \quad (2.8)$$

con $h_c [W/m^2K]$ el coeficiente de transferencia de calor convectivo del aire al interior de la cavidad, $e_{11} [m]$ la posición mostrada en la Figura 2.3 y $T_{x=e_{11}} [^{\circ}C]$ la temperatura superficial izquierda de la cavidad. El término Q'_{rad1} es el flujo de calor radiativo sobre la superficie de la frontera en cuestión y será explicado al final de la sección. La frontera *vi)* es la frontera derecha de la cavidad, evaluada en $x = e_{11} + e_{21}$, desde $y = a_{11}$ hasta $y = a_{11} + a_{21}$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=e_{11}+e_{21}} = h_c (T_c - T_{x=e_{11}+e_{21}}) + \frac{Q'_{rad2}}{a_{21}}, \quad (2.9)$$

donde $T_{x=e_{11}+e_{21}} [^{\circ}C]$ es la temperatura en $x = e_{11} + e_{21}$. El término Q'_{rad2} es el flujo de calor radiativo sobre la superficie de la frontera en cuestión.

La frontera *vii)* es la frontera de la cavidad en la dirección x y evaluada en $y = a_{11} + a_{21}$, desde $x = e_{11}$ hasta $x = e_{11} + e_{21}$

$$h_c (T_c - T_{y=a_{11}+a_{21}}) + \frac{Q'_{rad3}}{e_{21}} = k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=a_{11}+a_{21}}, \quad (2.10)$$

donde $T_{y=a_{11}+a_{21}} [^{\circ}C]$ es la temperatura en $y = a_{11} + a_{21}$. El término Q'_{rad3} es el flujo de calor radiativo sobre la superficie de la frontera en cuestión.

La frontera *viii)* es la frontera inferior de la cavidad, evaluada en $y = a_{11}$, desde $x = e_{11}$ hasta $x = e_{11} + e_{21}$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=a_{11}} = h_c (T_c - T_{y=a_{11}}) + \frac{Q'_{rad4}}{e_{21}}, \quad (2.11)$$

donde $T_{y=a_{11}} [^{\circ}C]$ es la temperatura en $y = a_{11}$. El término Q'_{rad4} es el flujo de calor radiativo sobre la superficie de la frontera en cuestión.

El cambio en la temperatura del aire dentro de la cavidad T_c depende del flujo de calor hacia ella Q'_c y de la masa térmica del aire dentro de la cavidad

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{Q'_c}{\rho_a c_a e_{21} a_{21}}, \quad (2.12)$$

con

$$\begin{aligned} Q'_c = & - \int_{e_{11}}^{e_{11}+e_{21}} h_c(T_c - T(x, y = a_{11}+a_{21})) dx - \int_{e_{11}}^{e_{11}+e_{21}} h_c(T_c - T(x, y = a_{11})) dx \\ & - \int_{a_{11}}^{a_{11}+a_{21}} h_c(T_c - T(x = e_{11}+e_{21}, y)) dy - \int_{a_{11}}^{a_{11}+a_{21}} h_c(T_c - T(x = e_{11}, y)) dy, \end{aligned} \quad (2.13)$$

con Q'_c el flujo de calor por convección al interior de la cavidad.

Método de radiosidades

Los términos $Q'_{rad1}, Q'_{rad2}, Q'_{rad3}, Q'_{rad4}$ de las ecuaciones 2.8-2.11 son las contribuciones radiativas en cada una de las superficies de la cavidad. Por ejemplo, el flujo de calor por radiación sobre la superficie 1, Q'_{rad1} de la Figura 2.4 es calculado de la siguiente manera:

$$Q_{rad1} = J_1 A_1 - G_1 A_1, \quad (2.14)$$

donde J_1 es la radiosidad de la superficie 1 y la G_1 es la irradiancia sobre la superficie 1. La relación entre J_1 y G_1 es:

$$A_1 G_1 = \sum_{j=1}^4 A_1 F_{j1} J_j, \quad (2.15)$$

y

$$J_i = \epsilon_i \sigma (T_i^4) + (1 - \epsilon) G_i, \quad (2.16)$$

con la condición $A_1 F_{1j} = A_j F_{j1}$, el flujo de calor radiativo toma la forma

$$Q'_{rad1} = \sum_{j=1}^4 F_{1j} (J_1 - J_j) a_{21}, \quad (2.17)$$

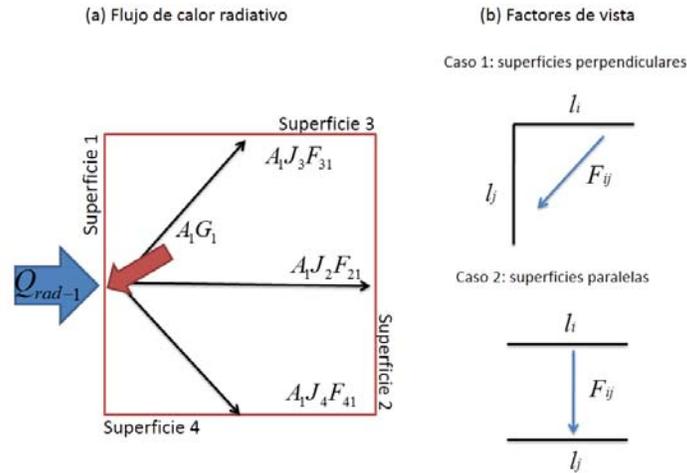


Figura 2.4: Transferencia de calor radiativo, en la cavidad de un bloque hueco de concreto y factores de vista en superficies perpendiculares y superficies paralelas.

con F_{1j} el factor de vista de la superficie 1 hacia las superficies j y a_{21} la longitud de la superficie. Desarrollando la ecuación anterior, el flujo de calor por radiación sobre la superficie 1 está dado por:

$$Q'_{rad1} = a_{21} [F_{12}(J_1 - J_2) + F_{13}(J_1 - J_3) + F_{14}(J_1 - J_4)], \quad (2.18)$$

de una forma análoga se calculan los términos Q'_{rad2} , Q'_{rad3} y Q'_{rad4} , [27].

2.3. Modelo numérico

Existen varios tipos de discretización, pero en este trabajo se utiliza el método del volumen de control que consiste en dividir el dominio de cálculo en volúmenes de control, no sobrepuestos, que contienen a cada nodo de la malla (Figura 2.5). El análisis aquí realizado se hace con base en los trabajos de Suhas A. Patankar [28].

El mallado espacial se realiza en un plano xy , con x e y las coordenadas transversales al muro hueco. Se procede a dividir dicho plano en nodos contenidos en volúmenes de control, para cada uno de los nodos se considera las condiciones

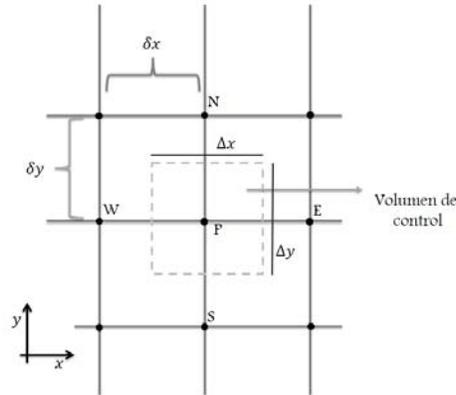


Figura 2.5: Volumen de control en dos dimensiones.

de referencia T_P , los términos T_N , T_S , T_E y T_W , son los términos norte, sur, este y oeste, respectivamente, con respecto a dicho punto referencial (Figura 2.5). Se definen δx y δy como las distancias entre los nodos y Δx , Δy como las caras horizontal y vertical, respectivamente, del volumen de control. En este caso se cumplen las condiciones

$$\delta x = \Delta x \quad (2.19)$$

y

$$\delta y = \Delta y. \quad (2.20)$$

Debido a que se realiza un estudio dependiente del tiempo, la solución evoluciona con respecto al tiempo, encontrando una solución en cada paso temporal Δt . Los valores “actuales” de la solución serán denotados con un superíndice cero, por ejemplo, T_p^0 representa el valor “actual” en la posición de referencia y los términos sin superíndice representan los valores en el tiempo siguiente $t + \Delta t$.

Si se considera que las dimensiones del bloque simulado son H y L , en la dirección x e y respectivamente.

$$\Delta x = \frac{H}{n_x} \quad (2.21)$$

$$\Delta y = \frac{L}{n_y} \quad (2.22)$$

Donde n_x y n_y son el número de nodos en la dirección x e y respectivamente.

2.3.1. Discretización

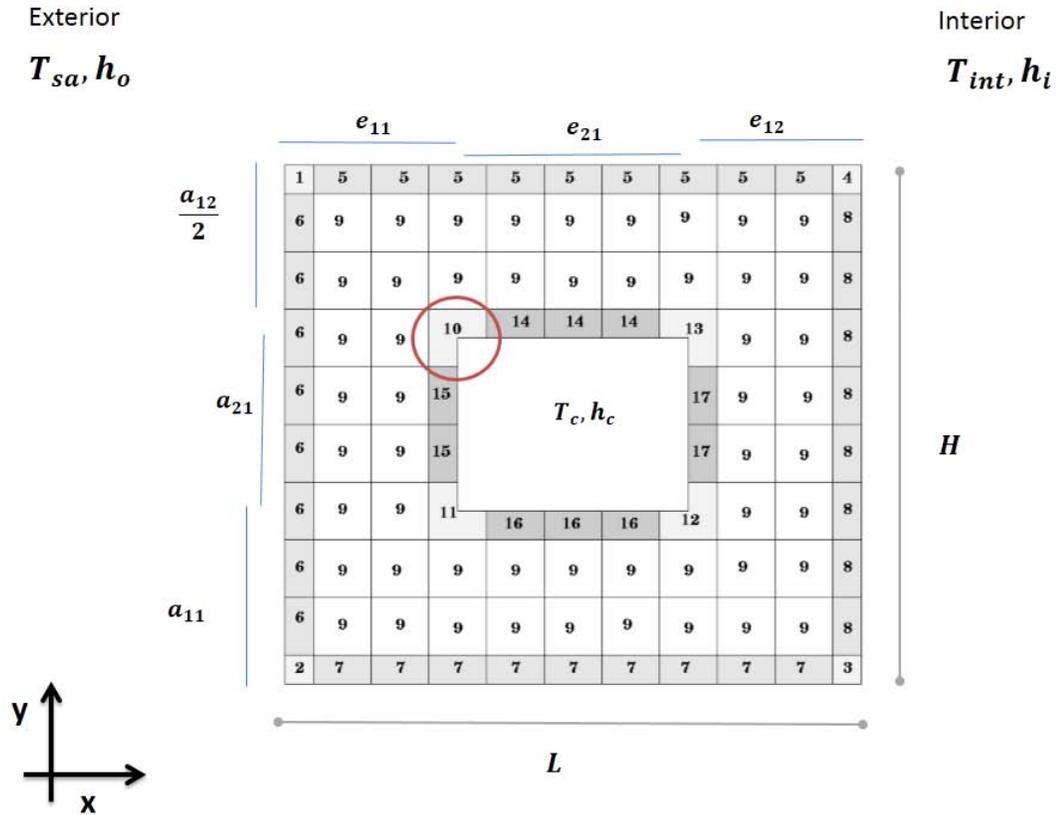


Figura 2.6: Mallado de una placa hueca en el centro

Si se toma el bloque hueco analizado en la sección anterior y se divide en n_x divisiones horizontalmente y n_y divisiones verticalmente, se genera un mallado como el mostrado en la Figura 2.6. Debido a las condiciones a la frontera, el bloque queda dividido en $n_x \times n_y$ volúmenes de control con diecisiete tipos de volúmenes de control distintos, cada uno de ellos con una ecuación asociada. Dichas ecuaciones se construyen realizando un balance de energía con sus correspondiente condiciones a la frontera.

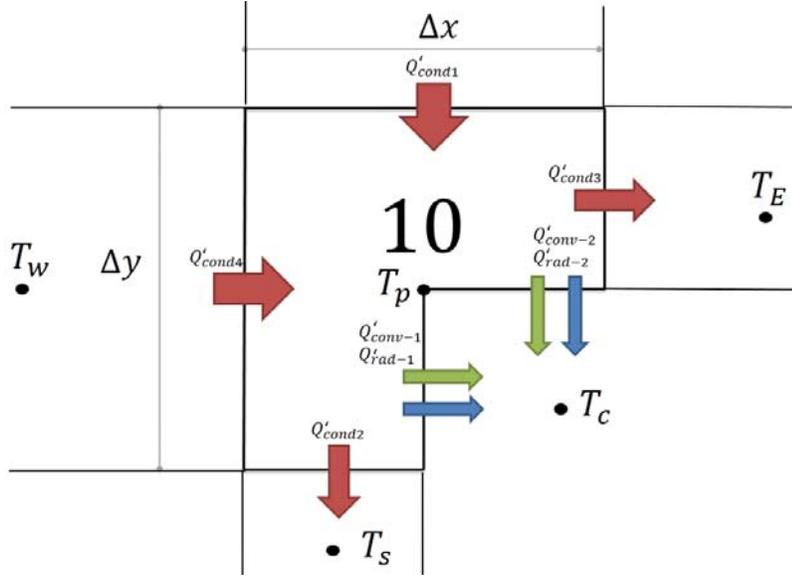


Figura 2.7: Volumen de control interior (tipo 10).

Para el nodo diez, por ejemplo, hay ocho contribuciones de transferencia de calor, como se muestra en la Figura 2.7. El balance de la transferencia de calor toma la forma:

$$\begin{aligned}
 Q'_{acum} &= Q'_{cond1} + Q'_{cond2} \\
 &+ Q'_{cond3} + Q'_{cond4} \\
 &+ Q'_{conv1} + Q'_{conv2} \\
 &+ Q'_{rad1} + Q'_{rad2},
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

donde las contribuciones de tipo conductivo toman la forma

$$Q'_{cond1} = k_N \frac{\Delta x}{\Delta y} (T_P - T_N), \tag{2.24}$$

$$Q'_{cond2} = -\frac{k_S}{2} \frac{\Delta x}{\Delta y} (T_S - T_P), \tag{2.25}$$

$$Q'_{cond3} = -\frac{k_E}{2} \frac{\Delta y}{\Delta x} (T_E - T_P), \tag{2.26}$$

$$Q'_{cond4} = k_W \frac{\Delta y}{\Delta x} (T_P - T_W), \tag{2.27}$$

con k_N, k_S, k_E y k_W las conductividades térmicas en la dirección norte, sur, este y oeste respectivamente y las contribuciones convectivas

$$Q'_{conv1} = h_c(T_c - T_P) \frac{\Delta x}{2}, \quad (2.28)$$

$$Q'_{conv2} = h_c(T_c - T_P) \frac{\Delta y}{2}, \quad (2.29)$$

mientras que las contribuciones radiativas son

$$Q'_{rad1} = [F_{12}(J_1 - J_2) + F_{13}(J_1 - J_3) + F_{14}(J_1 - J_4)] \frac{\Delta y}{2} \quad (2.30)$$

y

$$Q'_{rad2} = [F_{21}(J_2 - J_1) + F_{23}(J_2 - J_3) + F_{24}(J_2 - J_4)] \frac{\Delta x}{2}. \quad (2.31)$$

El término Q'_{acum} es el término de acumulación de calor en el volumen de control en cada paso temporal

$$Q'_{acum} = \frac{3\rho c \Delta x \Delta y}{4\Delta t} (T_P - T_P^0). \quad (2.32)$$

Sustituyendo en la ecuación (2.23) con las anteriores, obtenemos

$$\begin{aligned} \frac{3\rho c \Delta x \Delta y}{4\Delta t} (T_P - T_P^0) &= k_N \frac{\Delta x}{\Delta y} (T_P - T_N) - \frac{k_S}{2} \frac{\Delta x}{\Delta y} (T_S - T_P) \quad (2.33) \\ &+ k_W \frac{\Delta y}{\Delta x} (T_P - T_W) - \frac{k_E}{2} \frac{\Delta y}{\Delta x} (T_E - T_P) \\ &+ h_c(T_c - T_P) \frac{\Delta x}{2} + h_c(T_c - T_P) \frac{\Delta y}{2} \\ &+ \frac{Q'_{rad1}}{2} + \frac{Q'_{rad2}}{2}, \end{aligned}$$

reordenando términos y usando

$$a_P^0 = \frac{\rho c \Delta x \Delta y}{\Delta t}, \quad (2.34)$$

$$a_N = \frac{k_N \Delta x}{(\Delta y)}, \quad (2.35)$$

$$a_S = \frac{k_S \Delta x}{(\Delta y)}, \quad (2.36)$$

$$a_E = \frac{k_E \Delta y}{(\Delta x)}, \quad (2.37)$$

y

$$a_W = \frac{k_W \Delta y}{(\Delta x)}, \quad (2.38)$$

se obtiene

$$\left(\frac{3a_p^0}{4} + a_N + \frac{a_S}{2} + \frac{a_E}{2} + a_W + \frac{h_c \Delta x}{2} + \frac{h_c \Delta y}{2} \right) T_P = a_N T_N + \frac{a_S T_S}{2} + \frac{a_E T_E}{2} + a_W T_W + \frac{h_c T_c \Delta x}{2} + \frac{h_c T_c \Delta y}{2} + \frac{Q'_{rad1}}{2} + \frac{Q'_{rad2}}{2} + \frac{3a_p^0 T_P^0}{4}, \quad (2.39)$$

que es una ecuación de la forma

$$a_P T_P = a_N T_N + \frac{a_S T_S}{2} + \frac{a_E T_E}{2} + a_W T_W + b. \quad (2.40)$$

con

$$a_P = \frac{3a_p^0}{4} + a_N + \frac{a_S}{2} + \frac{a_E}{2} + a_W + \frac{h_c \Delta x}{2} + \frac{h_c \Delta y}{2} \quad (2.41)$$

y

$$b = \frac{h_c T_c \Delta x}{2} + \frac{h_c T_c \Delta y}{2} + \frac{Q'_{rad1}}{2} + \frac{Q'_{rad2}}{2} + \frac{3a_p^0 T_P^0}{4}. \quad (2.42)$$

De forma similar pueden escribirse las ecuaciones de discretización para los demás nodos. A continuación se presentan las ecuaciones resultantes de los balances de energía para los diecisiete tipos de nodos diferentes.

Nodo 1:

$$a_P T_P = \frac{a_S}{2} T_S + \frac{a_E}{2} T_E + b, \quad (2.43)$$

con

$$a_P = \frac{a_P^0}{4} + \frac{a_E}{2} + \frac{a_S}{2} + \frac{h_0 \Delta y}{2} \quad \text{y} \quad b = \frac{h_o \Delta y}{2} T_{sa} + \frac{a_P^0}{4} T_P^0.$$

Nodo 2:

$$a_P T_P = \frac{a_N}{2} T_N + \frac{a_E}{2} T_E + b, \quad (2.44)$$

con

$$a_P = \frac{a_P^0}{4} + \frac{a_E}{2} + \frac{a_N}{2} + \frac{h_0 \Delta y}{2} \quad \text{y} \quad b = \frac{h_o \Delta y}{2} T_{sa} + \frac{a_P^0}{4} T_P^0.$$

Nodo 3:

$$a_P T_P = \frac{a_N}{2} T_N + \frac{a_W}{2} T_W + b, \quad (2.45)$$

con

$$a_P = \frac{a_P^0}{4} + \frac{a_W}{2} + \frac{a_N}{2} + \frac{h_i \Delta y}{2} \quad y \quad b = \frac{h_i \Delta y}{2} T_{int} + \frac{a_P^0}{4} T_P^0.$$

Nodo 4:

$$a_P T_P = \frac{a_S}{2} T_S + \frac{a_W}{2} T_W + b, \quad (2.46)$$

con

$$a_P = \frac{a_P^0}{4} + \frac{a_W}{2} + \frac{a_S}{2} + \frac{h_i \Delta y}{2} \quad y \quad b = \frac{h_i \Delta y}{2} T_{int} + \frac{a_P^0}{4} T_P^0.$$

Nodos 5:

$$a_P = a_P T_P = a_S T_S + \frac{a_W}{2} T_W + \frac{a_E}{2} T_E + b, \quad (2.47)$$

con

$$\frac{a_P^0}{2} + a_S + \frac{a_E}{2} + \frac{a_W}{2} \quad y \quad b = \frac{a_P^0}{2} T_P^0.$$

Nodos 6:

$$a_P T_P = a_E T_E + \frac{a_S}{2} T_S + \frac{a_N}{2} T_N + b, \quad (2.48)$$

con

$$a_P = \frac{a_P^0}{2} + a_E + \frac{a_S}{2} + \frac{a_N}{2} + h_o \Delta y \quad y \quad b = h_o \Delta y T_{sa} + \frac{a_P^0}{2} T_P^0.$$

Nodos 7:

$$a_P T_P = a_N T_N + \frac{a_W}{2} T_W + \frac{a_E}{2} T_E + b, \quad (2.49)$$

con

$$a_P = \frac{a_P^0}{2} + a_N + \frac{a_E}{2} + \frac{a_W}{2} \quad y \quad b = \frac{a_P^0}{2} T_P^0.$$

Nodos 8:

$$a_P T_P = a_W T_W + \frac{a_S}{2} T_S + \frac{a_N}{2} T_N + b, \quad (2.50)$$

con

$$a_P = \frac{a_P^0}{2} + a_W + \frac{a_S}{2} + \frac{a_N}{2} + h_i \Delta y \quad y \quad b = h_i \Delta y T_{int} + \frac{a_P^0}{2} T_P^0.$$

Nodos 9:

$$a_P T_P = a_S T_S + a_N T_N + a_E T_E + a_W T_W + b, \quad (2.51)$$

con

$$a_P = a_P^0 + a_N + a_S + a_E + a_W \quad y \quad b = a_P^0 T_P^0.$$

Nodo 10:

$$a_P T_P = a_N T_N + \frac{a_S T_S}{2} + \frac{a_E T_E}{2} + a_W T_W + b. \quad (2.52)$$

con

$$a_P = \frac{3a_P^0}{4} + a_N + \frac{a_S}{2} + \frac{a_E}{2} + a_W + \frac{h_c \Delta x}{2} + \frac{h_c \Delta y}{2}$$

y

$$b = \frac{h_c T_c \Delta x}{2} + \frac{h_c T_c \Delta y}{2} + \frac{Q'_{rad1}}{2} + \frac{Q'_{rad2}}{2} + \frac{3a_P^0 T_P^0}{4}$$

Nodo 11:

$$a_P T_P = \frac{a_N T_N}{2} + a_S T_S + \frac{a_E T_E}{2} + a_W T_W + b \quad (2.53)$$

con

$$a_P = \frac{3a_P^0}{4} + \frac{a_N}{2} + a_S + \frac{a_E}{2} + a_W + \frac{h_c}{2}(\Delta x + \Delta y)$$

y

$$b = \frac{h_c T_c}{2}(\Delta x + \Delta y) + \frac{3a_P^0}{4} T_P^0 + \frac{1}{2}(Q'_{rad1} + Q'_{rad4}).$$

Nodo 12:

$$a_P T_P = \frac{a_N T_N}{2} + a_S T_S + \frac{a_W T_W}{2} + a_E T_E + b, \quad (2.54)$$

con

$$a_P = \frac{3a_P^0}{4} + \frac{a_N}{2} + a_S + \frac{a_W}{2} + a_E + \frac{h_c}{2}(\Delta x + \Delta y)$$

y

$$b = \frac{h_c T_c}{2}(\Delta x + \Delta y) + \frac{3a_P^0}{4} T_P^0 + \frac{1}{2}(Q'_{rad4} + Q'_{rad3}).$$

Nodo 13:

$$a_P T_P = a_N T_N + \frac{a_S T_S}{2} + a_E T_E + \frac{a_W T_W}{2} + b, \quad (2.55)$$

con

$$a_P = \frac{3a_P^0}{4} + a_N + \frac{a_S}{2} + a_E + \frac{a_W}{2} + \frac{h_c}{2}(\Delta x + \Delta y)$$

y

$$b = \frac{h_c T_c}{2}(\Delta x + \Delta y) + \frac{3a_P^0}{4} T_P^0 + \frac{1}{2}(Q'_{rad3} + Q'_{rad2}).$$

Nodos 14:

$$a_P T_P = a_N T_N + \frac{a_E T_E}{2} + \frac{a_W T_W}{2} + b, \quad (2.56)$$

con

$$a_P = \frac{a_P^0}{2} + a_N + \frac{a_E}{2} + h_c \Delta x + \frac{a_W}{2} \quad y \quad b = h_c T_c \Delta x + \frac{a_P^0}{2} T_P^0.$$

Nodos 15:

$$a_P T_P = a_W T_W + \frac{a_S}{2} T_S + \frac{a_N}{2} T_N + b, \quad (2.57)$$

con

$$a_P = \frac{a_P^0}{2} + a_W + \frac{a_S}{2} + h_c \Delta y + \frac{a_N}{2} \quad \text{y} \quad b = h_c T_c \Delta y + \frac{a_P^0}{2} T_P^0.$$

Nodos 16:

$$a_P T_P = a_S T_S + \frac{a_E}{2} T_E + \frac{a_W}{2} T_W + b, \quad (2.58)$$

con

$$a_P = \frac{a_P^0}{2} + a_S + \frac{a_E}{2} + h_c \Delta x + \frac{a_W}{2} \quad \text{y} \quad b = h_c T_c \Delta x + \frac{a_P^0}{2} T_P^0.$$

Nodos 17:

$$a_P T_P = a_E T_E + \frac{a_S}{2} T_S + \frac{a_N}{2} T_N + b, \quad (2.59)$$

con

$$a_P = \frac{a_P^0}{2} + a_E + \frac{a_S}{2} + h_c \Delta y + \frac{a_N}{2} \quad \text{y} \quad b = h_c T_c \Delta y + \frac{a_P^0}{2} T_P^0.$$

Coefficientes de transferencia de calor por convección

Los valores considerados para los coeficientes de película son $h_o = 13W/m^2K$ y $h_i = 8.1W/m^2K$, consideradps con base en la norma de eficiencia energética en edificaciones, envolventes de edificios no residenciales NOM-020-ENER-2011 [10].

El coeficiente de película al interior de la cavidad h_c está dado por la correlación del Elsherbiny [29]:

$$h_c = \frac{Nu k_a}{e_{21}}, \quad (2.60)$$

donde k_a es la conductividad del aire, e_{21} es la longitud característica de la cavidad y Nu es el número de Nusselt, que es el máximo entre Nu_1 , Nu_2 y Nu_3 donde

$$Nu_1 = 0.0605 Ra^{1/3}, \quad (2.61)$$

$$Nu_2 = \left[1 + \left(\frac{0.104 Ra^{0.293}}{1 + \left(\frac{6310}{Ra} \right)^{1.36}} \right)^3 \right]^{1/3} \quad (2.62)$$

y

$$Nu_3 = 0.242 \left(\frac{Ra}{A} \right)^{0.272} \quad (2.63)$$

con $Ra = \frac{g\beta\Delta T e_{21}^3}{\nu\alpha}$ el número de Rayleigh, donde $g[m/s^2]$ es el valor de la aceleración de la gravedad, $\beta[1/K]$ el coeficiente de expansión volúmetrico, $\Delta T[K]$ es la diferencia de temperatura entre las paredes de la cavidad, en la dirección del flujo de calor, $e_{21}[m]$ la longitud característica de la cavidad, $\nu[m^2/s]$ la viscosidad cinemática, $\alpha[m^2/s]$ la difusividad térmica y $A = \frac{a_{21}}{e_{21}}$ la razón de aspecto de la cavidad, con a_{21} la longitud vertical de la cavidad.

2.3.2. Solución de las ecuaciones

De las ecuaciones de los nodos se obtiene un sistema de ecuaciones de forma pentadiagonal (cada valor de la temperatura en un nodo de referencia T_P depende de el valor de sus temperaturas vecinas T_N, T_S, T_E y T_W). Por lo que las ecuaciones (2.43)-(2.59) muestran un sistema de ecuaciones con cinco incógnitas: T_P, T_N, T_S, T_E y T_W . Patankar [28] propone solucionar este tipo de sistemas de ecuaciones de manera implícita, con el método para matrices tridiagonales en dos dimensiones ($TDMA - 2d$), también llamado método $TDMA$ línea a línea, que es la extensión del método $TDMA$ en una dimensión.

Método TDMA en una dimensión

Supongamos que se tiene un sistema de ecuaciones, que tienen la forma:

$$a_i T_i = b_i T_{i+1} + c_i T_{i-1} + d_i \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, N, \quad (2.64)$$

donde la temperatura de un volumen de control T_i depende de sus vecinos inmediatos T_{i+1} , T_{i-1} y de un término constante d_i . Para el término frontera $i = 1$ se tiene la condición

$$c_1 = 0. \quad (2.65)$$

La condición anterior implica que T_1 está determinada por T_2 y el término d_1 , que es constante, para el término $i = 2$, el término T_2 depende de sus vecinos T_1 y T_3 , y así sucesivamente hasta el término $N - 1$. Para el término N , se tiene la condición

$$b_N = 0, \quad (2.66)$$

por lo que el término N sólo depende del término $N - 1$ y el valor constante d_N . Debido a ésto se puede hacer una “sustitución hacia atrás”, es decir, conociendo el valor de N podemos encontrar el valor de $N - 1$, y con $N - 1$ podemos encontrar el valor de $N - 2$ y así sucesivamente, siguiendo esta secuencia se puede obtener el valor de todos los valores. Lo anterior puede transmitirse a ecuaciones, cada término T_i se pueden expresar en términos de su vecino posterior T_{i+1} ,

$$T_i = P_i T_{i+1} + Q_i, \quad (2.67)$$

$$T_{i-1} = P_{i-1} T_i + Q_{i-1}. \quad (2.68)$$

sustituyendo la ecuación (2.68) en (2.64). Los coeficientes P_i y Q_i quedan determinados por

$$P_i = \frac{b_i}{a_i - c_i P_{i-1}} \quad (2.69)$$

y

$$Q_i = \frac{d_i + c_i Q_{i-1}}{a_i - c_i P_{i-1}}, \quad (2.70)$$

donde se puede ver que P_i y Q_i están en términos de P_{i-1} y Q_{i-1} . Para inicializar el proceso de recurrencia se hace la igualación de las ecuaciones (2.64) y (2.67) y considerando la ecuación (2.65)

$$P_1 = \frac{b_1}{a_1} \quad y \quad Q_1 = \frac{d_1}{a_1}. \quad (2.71)$$

Ahora, en el otro extremo, cuando $i = N$, $b_N = 0$, entonces $P_N = 0$ y de la ecuación (2.67) obtenemos:

$$T_N = Q_N. \quad (2.72)$$

Todo el proceso puede resumirse en los siguientes pasos

- Calcular P_1 y Q_1 de la ecuación (2.71).
- Usar las relaciones de recurrencia (2.69) y (2.70) para obtener P_i y Q_i para $i = 2, 3, \dots, N$.
- Calcular $T_N = Q_N$.
- Usar la ecuación (2.67) para $i = N - 1, N - 2, \dots, 3, 2, 1$ para obtener $T_{N-1}, T_{N-2}, \dots, T_3, T_2, T_1$.

Método TDMA en dos dimensiones

El método *TDMA* en dos dimensiones, también llamado Método *TDMA* línea a línea, resuelve sistemas de ecuaciones pentadiagonales, como en este caso. En este método se elige una línea (Figura 2.8), supongamos en la dirección y y se asume que los vecinos de esa línea (en la dirección x) tienen valores conocidos. Al establecer conocidos los valores para las temperaturas vecinas, el sistema de ecuaciones pasa de un sistema de ecuaciones pentadiagonal a un sistema de ecuaciones tridiagonal, que ya puede resolverse con el método *TDMA* en una dimensión. El proceso se repite para cada una de las líneas del dominio de cálculo, una vez encontrada la solución sobre todo el dominio de cálculo, se compara con la solución a la iteración anterior, si la comparación cumple el criterio de convergencia establecido se finaliza el cálculo, en el caso contrario se repite.

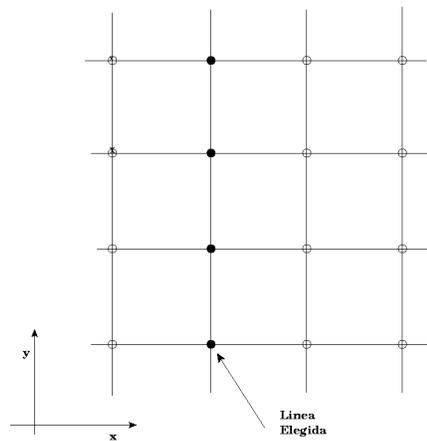


Figura 2.8: Método línea por línea: reduce un sistema de ecuaciones de cinco incógnitas a uno de tres incógnitas, considerando dos de las cinco incógnitas con valores constantes.

2.3.3. Criterios de convergencia

La Figura 2.9 muestra un esquema general del algoritmo de solución del problema. En un inicio se establecen las condiciones iniciales (punto 1 Figura 2.9). Una condición inicial de temperaturas,

$$T_0[i, j] = T_n \quad i = 1, 2, 3, \dots, n_x, j = 1, 2, 3, \dots, n_y, \quad (2.73)$$

que establece las temperaturas al tiempo cero en todo el volumen de cálculo, que son fijadas a una temperatura constante T_n (aunque pueden ser fijadas a cualquier otro valor). Dichos valores de entrada T_0 entran a un ciclo temporal que calcula la temperatura en cada tiempo (punto 2 Figura 2.9.), desde el inicio del día $t_{inicial} = 0s$ hasta el final del día $t_{final} = 86,400s$ (Punto 3 Figura 2.9.).

Para asegurar la convergencia de la solución, se verifica que la diferencia de la solución en cierto tiempo anterior T_{ij}^t y cierto tiempo nuevo Tn_{ij}^t sea tan pequeña como se quiera, supongase menor a cierto valor $CC_{TDMA} [^{\circ}C]$. Lo anterior puede resumirse en la siguiente ecuación, que representa el criterio de convergencia del *TDMA*:

$$\frac{\sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} |T_{ij}^t - Tn_{ij}^t|}{n_x n_y} < CC_{TDMA} \quad (2.74)$$

donde T_{ij}^t es la temperatura en la posición $[i, j]$ del tiempo $t - \Delta t$ en cierta iteración del método *TDMA* y Tn_{ij}^t es la temperatura en la posición $[i, j]$ del tiempo t en la iteración siguiente del método *TDMA*.

Una vez que se calcula el campo de temperaturas al final del día, se establece una condición de continuidad de la solución encontrada al final de un día y el inicio del día siguiente: criterio de convergencia del permanente oscilatorio, CC_{PO} (punto 5 Figura 2.9.), cuya ecuación puede escribirse como:

$$\frac{\sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} |T_{ij}^{0h} - T_{ij}^{24h}|}{n_x n_y} < CC_{PO}, \quad (2.75)$$

donde T_{ij}^{0h} es la temperatura en la posición $[i, j]$ en el tiempo $t = 0h$ y T_{ij}^{24h} es la temperatura en la posición $[i, j]$ en $t = 24h$.

Cabe destacar que la condición forzante, temperatura sol-aire T_{sa} es una función periódica, de periodo de un día.

2.4. Resumen del capítulo

En este capítulo se presentó el procedimiento utilizado para el cálculo numérico de la transferencia de calor dependiente del tiempo en un bloque de concreto hueco, estableciendo las condiciones a la frontera. En la sección 2.1 se planteó el problema general de la transferencia de calor en un bloque de concreto hueco. En la sección 2.2 se describieron las ecuaciones de transporte de calor y las condiciones a la frontera, en un análisis bidimensional dependiente del tiempo,

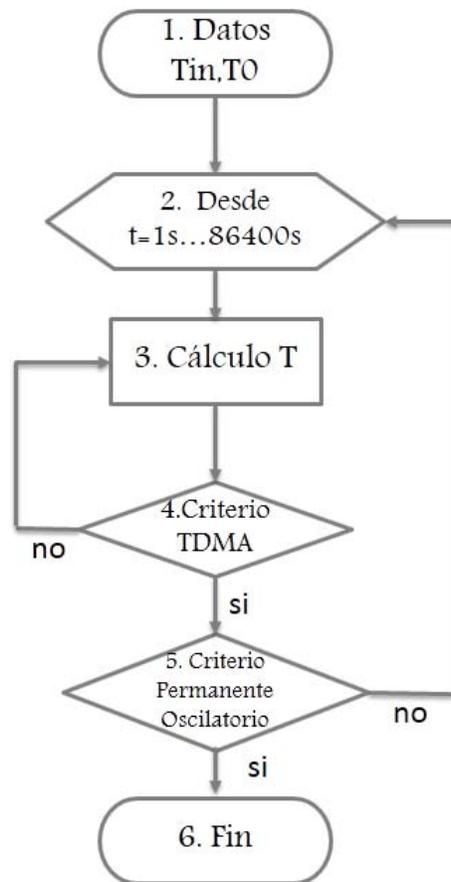


Figura 2.9: Diagrama de flujo del código numérico para solucionar la transferencia de calor en un MBHC.

tanto en las fronteras del bloque como en las fronteras de la cavidad. Finalmente en la sección 2.3 se describió el método numérico, donde se discretizó el problema, utilizando el método de volúmenes de control, a través de un método de solución implícito. En dicho método numérico se dividió el dominio de cálculo en volúmenes de control y se asoció una ecuación a cada tipo de volumen de control, generándose un sistema de ecuaciones lineales que se solucionó por medio del método TDMA línea a línea. Se consideró la transferencia de calor conductiva en las partes sólidas del bloque y transferencia de calor convectiva y radiativa en las superficies de la cavidad. Asimismo, se establecieron los criterios de convergencia del TDMA CC_{TDMA} como del permanente oscilatorio CC_{PO} .

Capítulo 3

Validación

En este capítulo se presenta el proceso de validación del código numérico desarrollado en este trabajo, mediante la comparación del flujo de calor a través de un bloque hueco de concreto, en un muro construido por Borbón *et al.* y uno numérico para techos realizado por Ait-Taleb *et al.* La comparación se realiza por medio de la comparación con dos trabajos:

a) Un estudio experimental realizado por Borbón *et al.*. En donde se calcula la resistencia térmica y el flujo de calor a través de un muro de pruebas, construido con bloques huecos de concreto, por medio de el método de placa caliente protegida [2]. En este método se fijan las temperaturas superficiales del muro para generar un flujo de calor uniforme y unidimensional. Este calor es transmitido por medio de un intercambiador de calor hacia un fluido de trabajo y determinando el aumento en la temperatura del fluido de trabajo es determinado también flujo de calor en el muro de pruebas.

b) Un estudio numérico en dos dimensiones, realizado por Ait-Taleb *et al.*, donde se calcula el flujo de calor independiente del tiempo a través de un arreglo con tres bloques huecos de concreto, y el coeficiente global de la transferencia de calor. El arreglo bloques fue calentado en dos formas distintas: uniformemente desde la superficie inferior y desde la superficie superior. Una vez determinadas las temperaturas se consideraron fijas y se analizó la transferencia de calor por conducción en las partes sólidas del arreglo y en los huecos la transferencia de calor por convección y por radiación. Reportan como resultados: las líneas de

corriente e isothermas al interior de la cavidad, la contribución de cada mecanismo de transferencia de calor, la transferencia de calor el coeficiente global de transferencia de calor. Variando la diferencia de temperatura entre las superficies de 5 a 30 °C y la razón de aspecto de la cavidad de aire.

3.1. Condición para los coeficientes de transferencia de calor por convección

Ambos problemas tienen condiciones de frontera de temperatura constante en la superficie y el código que se desarrolló tiene condición de frontera de tipo convectiva, por lo que el punto clave que permitió hacer la validación de nuestro código, con fronteras convectivas, fue considerar valores muy grandes de los coeficientes de transferencia de calor por convección en los extremos del muro de hueco de concreto. De esta forma se obtiene una resistencia casi nula entre el aire circundante y la superficie de la pared. Lo cual se traduce en que la temperatura del fluido y la temperatura de la superficie en contacto tienen casi el mismo valor, entre más grande es el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección menor es la diferencia en dichas temperaturas. Consideremos la frontera entre el aire al exterior del muro y el bloque hueco de concreto

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{Y=0} = h_0 (T_{sa} - T_{Y=0}), \quad (3.1)$$

donde k es la conductividad térmica del bloque, T es la temperatura del bloque, h_0 es el coeficiente de película del aire al exterior, T_{sa} la temperatura del aire al exterior y $Y = 0$ es la posición de la frontera. Pasando h_0 al otro lado de la ecuación y tomando el límite h_0 , tenemos:

$$- \lim_{h_0 \rightarrow \infty} \frac{k}{h_0} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{Y=0} = (T_{sa} - T_{Y=0}) \quad (3.2)$$

el límite a la derecha es cero, por lo que

$$T_{sa} = T_{Y=0} \quad (3.3)$$

y lo mismo sucede para la otra frontera. En este caso se utilizó un valor finito de

$$h_0 = h_i = 1 \times 10^5 \frac{W}{m^2C}. \quad (3.4)$$

3.2. Validación del código numérico por medio de resultados experimentales

Estudio experimental desarrollado por Borbón *et al.*

Borbón *et al.* [2, 16–18] realizan el estudio de la transferencia de calor en muros de bloques huecos de concreto con fronteras a temperatura constante. Diseñaron y construyeron un dispositivo de pruebas (Figura 3.1) que se basa en el sistema de placa caliente, que consiste en fijar la temperatura a los lados del muro, con intercambiadores de calor y equipos de control de temperatura. Reprodujeron diferentes condiciones de operación que generaron diferenciales de temperatura, con los que evaluaron la resistencia térmica y el flujo de calor.

Las temperaturas fijadas en el muro son la temperatura a la derecha T_{ED} y la temperatura a la izquierda T_{EI} , y se realizaron siete experimentos con diferentes valores de $\Delta T = T_{EI} - T_{ED}$

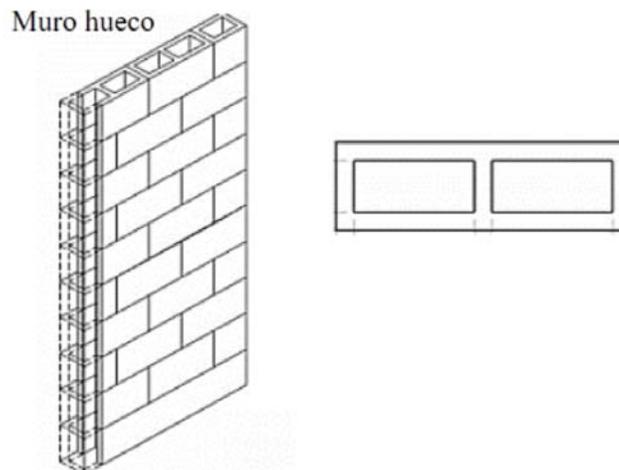


Figura 3.1: Muro de pruebas en los trabajos de Borbón *et al.* [2]

Los resultados obtenidos para el flujo de calor por unidad de área dependiente de la diferencia de temperaturas son mostrados en la tabla 3.1 donde q es el flujo de calor a través del muro y $A = 2.4m^2$ (el área total del muro). El error experimental reportado en la resistencia térmica es de 3.7%.

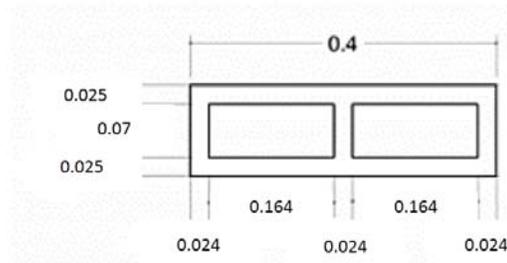


Figura 3.2: Dimensiones, en metros, del bloque analizado en los trabajos de Borbón *et al.* [2]

Estudio numérico desarrollado en este trabajo

Los parámetros utilizados son: las dimensiones geométricas del muro (mostradas en la Figura 3.2), la conductividad térmica $k = 1.1 W/mK$, la densidad del material $\rho = 1000 kg/m^3$, calor específico $c = 1.8 \times 10^3 J/kgK$ y se utiliza un valor para el criterio de convergencia del *TDMA* de $CC_{TDMA} = 1 \times 10^{-5}$.

Comparación de los resultados experimentales obtenidos por Borbón *et al.* y resultados numéricos obtenidos en este trabajo

Con los datos anteriormente establecidos se hicieron las simulaciones numéricas correspondientes para poder comparar con los valores obtenidos por Borbón *et al.*

La tabla 3.2 muestra que los resultados numéricos obtenidos con el código numérico y los experimentales encontrados por Borbón *et al.* son muy parecidos, pues muestran un error relativo entre 0.1 y 8.1%, siendo el error promedio de 3.1%. Considerando que el error experimental obtenido es del 3.7% el programa aquí presentado queda validado.

3.2 Validación del código numérico por medio de resultados experimentales 35

Experimentos realizados por Borbón <i>et al.</i>				
Experimento	TED [°C]	TEI [°C]	ΔT [°C]	q'' [W/m ²]
1	28.7	42.3	13.5	78.03
2	24.7	41.6	16.8	93.52
3	30.5	50.8	20.0	112.47
4	16.7	40.0	23.3	135.50
5	32.4	59.3	26.9	163.12
6	33.3	63.4	30.1	171.27
7	21.7	61.5	39.8	238.07

Tabla 3.1: Experimentos realizados y resultados obtenidos por Borbón *et al.* TED y TEI son las temperaturas a la derecha y a la izquierda de la cavidad, $\Delta T = TED - TEI$ y q'' el flujo de calor por unidad de área del muro

Comparación con los trabajos de Borbón <i>et al.</i>				
Experimento	ΔT [°C]	q''_{exp} [W/m ²]	q''_{num} [W/m ²]	error relativo [%]
1	13.5	78.0	77.48	0.7
2	16.8	93.5	96.09	2.7
3	20.0	112.4	119.62	6.4
4	23.3	135.5	131.58	2.9
5	26.9	163.1	163.32	0.1
6	30.1	171.2	185.23	8.1
7	39.8	238.1	241.35	1.3

Tabla 3.2: Comparación del flujo de calor obtenido en este trabajo y el flujo de calor obtenido en los trabajos de Borbón *et al.* Donde ΔT es la diferencia de temperaturas entre las superficies del muro, q''_{exp} es el flujo de calor por unidad de área obtenido en el trabajo experimental de Borbón *et al.* y q''_{num} es el flujo de calor por unidad de área obtenido en este trabajo de manera numérica.

3.3. Validación del código numérico por medio de los resultados numéricos de Ait-taleb

Estudio numérico desarrollado por Ait-taleb *et al.*

Ait-Taleb *et al.* [11] realizan el estudio numérico de la transferencia de calor bidimensional e independiente del tiempo en un arreglo de bloques huecos con $N_x = 3$ cavidades en su interior, como se muestra en la Figura 3.3. Dicho arreglo de bloques fue calentado en dos formas distintas: uniformemente desde la superficie inferior y desde la superficie superior. Se conservan fijas las temperaturas tanto en la superficie exterior como en la superficie interior. Analizan la transferencia de calor total, además de la transferencia de calor por conducción en las partes sólidas de la estructura y en los huecos la transferencia de calor por convección y por radiación. La solución numérica es encontrada resolviendo las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía, utilizando la aproximación de Boussinesq y considerando flujo laminar, por medio del método de diferencias finitas con una aproximación a volúmenes de control con un esquema de ley de potencias que es solucionado por el algoritmo SIMPLE. Reportan resultados para un arreglo con tres cavidades: líneas de corriente e isotermas en la cavidad para distintas diferencias de temperatura y razón de aspecto de la cavidad de aire, contribución de cada uno de los mecanismos de transferencia calor, transferencia de calor total en la dirección vertical y el coeficiente global de transferencia de calor U . Los resultados son presentados para $T_i = 20\text{ }^\circ\text{C}$ y $1 \leq \Delta T \leq 40$: donde $T_o = T_i - \Delta T$ para el caso de calentamiento desde la superficie inferior y $T_o = T_i + \Delta T$ para el caso del calentamiento arriba.

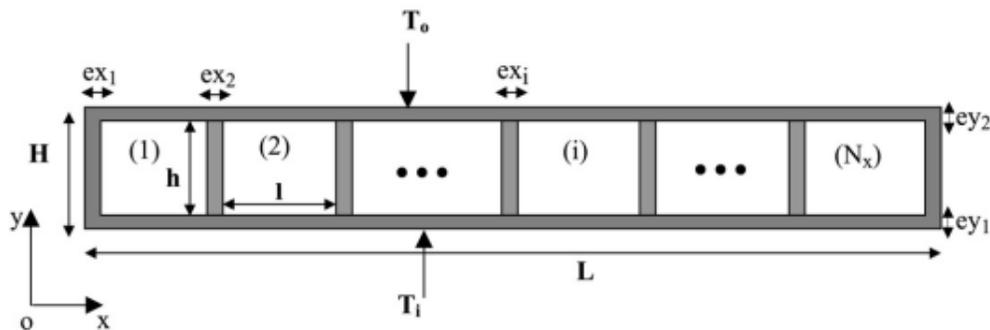


Figura 3.3: Arreglo de cavidades analizado en el trabajo de Ait-taleb *et al.*

Comparación con los resultados de Ait-Taleb para calentamiento desde la superficie inferior			
Razón de aspecto	u_{bAT} [W/m ² °C]	u_b [W/m ² °C]	error [%]
$A_c \approx 1/4$	4.83	4.50	6.70
$A_c \approx 1/2$	4.12	3.80	7.50
$A_c \approx 1$	3.63	3.47	4.20

Tabla 3.3: Resultados encontrados para el coeficiente global de transferencia de calor de Ait-Taleb y su comparación con los obtenidos en este trabajo, para condición de calentamiento desde la superficie inferior. Donde A_c es la razón de aspecto, u_{bAT} es el valor del coeficiente global de transferencia de calor determinado en los trabajos de Ait-Taleb, u_b es el valor del coeficiente global de transferencia de calor determinado en este trabajo y error es el error relativo entre los dos valores.

Las medidas usadas, corresponden a razones de aspecto distintas, manteniendo fijos los valores para $e_{x1} = e_{x2} = e_{x3} = e_{x4} = e_x = 0.025m$, $e_{y1} = e_{y2} = e_y = 0.02m$ y $l = 0.13m$. Son analizadas las razones de aspecto $A_c \approx 1/4$, $A_c \approx 1/2$ y $A_c \approx 1$, correspondientes a $h = 0.035m$, $h = 0.07m$ y $h = 0.1m$, respectivamente.

Estudio numérico desarrollado en este trabajo

Se considera una malla de $n_x = 100$ y $n_y = 166$ nodos y un valor para el criterio de convergencia del TDMA de $CC_{TDMA} = 1 \times 10^{-5}$. Los valores de la parte sólida son: la conductividad térmica $k = 1.1 W/mK$, la densidad del material $\rho = 1000 kg/m^3$ y el calor específico $c = 1.8 \times 10^3 J/kgK$, mientras que las propiedades usadas para el aire son: el coeficiente conductivo $k_a = 0.262 W/mK$, la densidad $\rho_a = 1.66 kg/m^3$ y el calor específico $c_a = 1668.7 J/kgK$.

Comparación de los resultados numéricos calculados en los trabajos de Ait-Taleb et al. y resultados numéricos obtenidos en este trabajo

La tabla 3.3 muestra que, para el caso de calentamiento por abajo, los valores para el coeficiente global de transferencia de calor calculados por Ait-taleb y los valores del coeficiente global de transferencia de calor calculados con el código

Comparación con los resultados de Ait-Taleb para calentamiento desde la superficie superior			
Razón de aspecto	u_{aAT} [W/m ² °C]	u_a [W/m ² °C]	error [%]
$Ac \approx 1/4$	3.92	4.40	12.20
$Ac \approx 1/2$	3.15	3.65	16.11
$Ac \approx 1$	2.83	3.27	15.70

Tabla 3.4: Resultados encontrados para el coeficiente global de transferencia de calor de Ait-Taleb y su comparación con los obtenidos en este trabajo, para condición de calentamiento desde la superficie superior. Donde A_c es la razón de aspecto, u_{aAT} es el valor del coeficiente global de transferencia de calor determinado en los trabajos de Ait-Taleb, u_a es el valor del coeficiente global de transferencia de calor determinado en este trabajo y error es el error relativo entre los dos valores.

aquí desarrollado, encontrándose un error relativo entre 4.2 y 7.5 %. Cabe destacar que los resultados determinados con el código aquí establecido, el coeficiente global de transferencia de calor y el flujo de calor, son menores que los resultados obtenidos por Ait-taleb.

Por otro lado, si se analiza el caso de calentamiento desde arriba (tabla 3.3), el error relativo está entre el 12.2 % y 16.11 %, siendo los valores determinados por Ait-taleb menores.

En el caso del calentamiento por arriba, la transferencia de calor se da únicamente por conducción, mientras que en el caso del calentamiento por abajo, la transferencia de calor sucede de manera convectiva. Lo que podemos decir de los resultados obtenidos es que nuestro código no funciona para techos. Deben aplicarse otros métodos para analizar el comportamiento convectivo en la cavidad, pues al aplicar la condición de mezclado perfecto se asume a toda la cavidad como un nodo, lo que no pasa realmente.

3.4. Resumen del capítulo

En este capítulo se validó el código numérico desarrollado en este trabajo, por medio de la comparación con dos trabajos: Uno de ellos experimental donde se

comparó el flujo de calor por unidad de área en muros, el otro de ellos numérico, donde se comparó el coeficiente global de transferencia de calor en techos.

En la comparación con el trabajo experimental para muros, se encontró un error relativo promedio de 3.1% y considerando que el error experimental es de 3.7% , se considera validado el código, cuando se analizan muros.

En la comparación con el código numérico para techos, se hace la comparación bajo dos condiciones: con calentamiento desde la superficie inferior y calentamiento desde la superficie superior. En el caso de calentamiento desde la superficie inferior (transferencia de calor por convección y conducción en la cavidad) se encuentra un error relativo promedio de 6.1%. En el caso de calentamiento desde la superficie superior (transferencia de calor conductiva en la cavidad) se encuentra un error relativo promedio de 14.7%.

Por lo que se determina que el código numérico aquí desarrollado funciona para analizar la transferencia de calor en muros, pero no funciona para analizar la transferencia de calor en techos.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de la transferencia de calor dependiente del tiempo a través de un muro de bloque hueco de concreto estándar, con una emisividad $e = 0.9$ en las superficies de la cavidad de aire (MBHC). Los resultados de la transferencia de calor y su desempeño térmico se obtienen con el programa desarrollado en este trabajo. Las simulaciones se llevan a cabo en tres ciudades de la República Mexicana (Temixco, Monterrey y Toluca), para las orientaciones este y sur. Cada uno de los casos se analiza bajo condición sin y con aire acondicionado, de calentamiento y enfriamiento. Asimismo se realiza la comparación de los resultados de MBHC con un muro construido por el sistema constructivo de bloque homogéneo de concreto del mismo espesor (MH). Finalmente, se propone una configuración de sistema constructivo de muro de bloque hueco de concreto con emisividad de $e = 0.03$ en las superficies de la cavidad de aire (MBHC-E=0.03).

En la sección 4.1 se describen las características de las simulaciones: ciudades, orientaciones analizadas, parámetros de operación del código y la geometría del MBHC estudiada. Además se presentan los parámetros para evaluar el desempeño térmico bajo condición sin y con aire acondicionado.

En las secciones 4.2 y 4.3 se muestra el estudio de la transferencia de calor bajo condición sin y con aire acondicionado, respectivamente. Se presenta el valor de la temperatura del aire al interior, sólo para el caso bajo condición sin aire acondicionado, la energía que entra, el cálculo de la transferencia de calor de

parámetro	valor [m]
a11	0.024
a12	0.024
a13	0.024
a21	0.164
a22	0.164
e11	0.025
e12	0.025
e21	0.070

Tabla 4.1: Dimensiones del muro de bloque hueco de concreto.

cada uno de los mecanismos de transferencia y el desempeño térmico.

En la sección 4.4 se analiza un caso de estudio de un muro de bloque hueco de concreto con emisividad $e = 0.03$ en las superficies de la cavidad de aire (MBHC-E0.03). El análisis se hace bajo condición sin y con aire acondicionado y se realiza la comparación con un MBHC y un MH. Finalmente, en la sección 4.5 se presenta el resumen del capítulo.

4.1. Características de las simulaciones

Las simulaciones numéricas se llevan a cabo en un muro de bloques huecos de concreto estándar, con una emisividad $e = 0.9$ en las superficies de la cavidad de aire (MBHC) como el mostrado en la figura 4.1. Las dimensiones del MBHC analizado se muestran en la tabla 4.1. La absorptancia del material corresponde a la de un bloque de concreto hueco cubierto con una pintura color blanco con $a = 0.3$, la emisividad $e = 0.9$, la conductividad térmica $k = 1.1 W/mK$, la densidad $\rho = 1000 kg/m^3$ y el calor específico $c = 1.8 \times 10^3 J/kgK$. Las características corresponden al muro de bloque hueco de concreto estudiado experimentalmente por Borbón *et al.* [2].

Ciudades y orientaciones

Las ciudades seleccionadas para realizar el estudio de la transferencia de calor son Temixco, Toluca y Monterrey. En Temixco se analiza un día típico en el mes

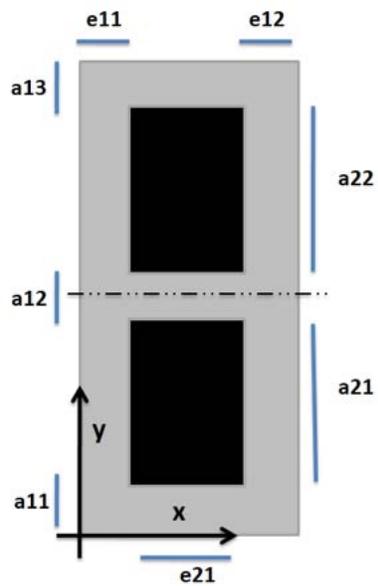


Figura 4.1: Muro formado por el sistema constructivo de bloque hueco de concreto, la línea punteada representa una línea de simetría con respecto al flujo de calor.

de mayo (Te), Toluca en un día típico del mes de enero (To) y para Monterrey se realizan dos simulaciones; una para un día típico en el mes de enero (Mo-Ene) y otra para un día típico en el mes de mayo (Mo-May). Para cada caso se realizan simulaciones en las orientaciones este y sur.

Parámetros del código numérico

Las simulaciones se llevan a cabo en una malla de $n_x = 166$ nodos, $n_y = 100$ nodos, donde $dx = dy$. Los valores para los criterios de convergencia usados son $CC_{TDMA} = 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ y $CC_{PO} = 1 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$, respectivamente y el paso temporal $\Delta t = 1s$.

Parámetros de desempeño térmico bajo condición sin aire acondicionado

Los parámetros usados para evaluar el desempeño térmico bajo condición sin aire acondicionado son:

■ Energía transferida

La energía transferida, $ET[\text{Wh}/\text{m}^2 \text{ día}]$, a través de un componente es la energía que entra o sale a través del muro en un día por unidad de área y está dada por la ecuación

$$ET = \frac{1}{H} \int_0^{86400s} Q' dt / 3600s \quad \text{si } T_{sup_{int}} > T_{int}, \quad (4.1)$$

donde Q' es el la transferencia de calor por unidad de longitud, t es el tiempo en segundos, $T_{sup_{int}}$ es la temperatura superficial interior y T_{int} es la temperatura del aire al interior.

■ Temperatura interior máxima y mínima

La temperatura interior mínima $T_{int_{min}} [^\circ\text{C}]$ y la temperatura interior máxima $T_{int_{max}} [^\circ\text{C}]$ son las temperaturas mínima y máxima respectivamente del aire interior.

■ Factor de decremento sol-aire

El factor de decremento sol-aire $FD_{sa}[-]$ es un parámetro que indica el amortiguamiento de la amplitud de la oscilación de la temperatura del aire

interior con respecto a la amplitud de la oscilación de la temperatura sol-aire. Al comparar dos o más sistemas constructivos, valores menores de FD_{sa} significan un mejor desempeño térmico y se calcula como

$$FD_{sa} = \frac{T_{int_{max}} - T_{int_{min}}}{T_{sa_{max}} - T_{sa_{min}}}, \quad (4.2)$$

donde $T_{sa_{min}}$, $T_{sa_{max}}$ son las temperaturas mínima y máxima de la temperatura sol-aire, respectivamente.

■ Tiempo de retraso

El tiempo de retraso $TR[h]$ es la diferencia del momento al que llega a su máximo la temperatura exterior $t(T_{ext_{max}})[t]$ y el momento al que llega a su máximo la temperatura interior $t(T_{int_{max}})[t]$, es decir,

$$TR = t(T_{ext_{max}}) - t(T_{int_{max}}). \quad (4.3)$$

Un valor mayor del tiempo de retraso representa una inercia térmica mayor.

■ Grado-hora de disconfort térmico

El Grado-hora de disconfort térmico $DDH[Ch]$, por sus siglas en inglés (discomfort degree hours), es la suma del Grado-hora de disconfort térmico cálido DDH_h y el grado-hora de disconfort térmico frío DDH_c . Las fórmulas para DDH_h y DDH_c están dadas por:

$$DDH_h = \sum (T_{int} - T_n) \Delta t / 3600s \quad \text{si } T_{int} > T_n, \quad (4.4)$$

y

$$DDH_c = \sum (T_n - T_{int}) \Delta t / 3600s \quad \text{si } T_{int} < T_n, \quad (4.5)$$

donde T_n es la temperatura de neutralidad dada por

$$T_n = 13.5^\circ C + 0.54 \overline{T}_a, \quad (4.6)$$

con \overline{T}_a la temperatura promedio del aire al exterior [30].

Parámetros para evaluar el desempeño térmico para el caso bajo condición con aire acondicionado

Los parámetros usados para evaluar el desempeño térmico bajo condición con aire acondicionado son:

- **Carga térmica de calentamiento**

Carga térmica de calentamiento $C_{cal}[Wh/m^2 \text{ día}]$ es la energía por metro cuadrado necesaria para calentar el aire al interior a la temperatura establecida por el termostato,

$$C_{cal} = \int_0^{86400s} Q' dt / 3600s \quad \text{si } T_{sup_{int}} < T_{int}, \quad (4.7)$$

donde $T_{sup_{int}}$ es la temperatura superficial interior.

- **Carga térmica de enfriamiento**

Carga térmica de enfriamiento $C_{enf}[Wh/m^2 \text{ día}]$ es la energía por metro cuadrado necesaria para enfriar el aire al interior a la temperatura establecida por el termostato,

$$C_{enf} = \int_0^{86400s} Q' dt / 3600s \quad \text{si } T_{sup_{int}} > T_{int}. \quad (4.8)$$

- **Carga térmica total**

La carga térmica total (CT), es la suma de la carga de enfriamiento y la carga de calentamiento.

- **Factor de decremento superficial**

El factor de decremento superficial $FD_s[-]$ se define de una manera muy similar al FD_{sa} mostrado en la ecuación (4.2) y está dado por

$$FD_s = \frac{T_{sup_{int_{max}}} - T_{sup_{int_{min}}}}{T_{sup_{ext_{max}}} - T_{sup_{ext_{min}}}}, \quad (4.9)$$

donde $T_{sup_{int_{max}}}$, $T_{sup_{int_{min}}}$ son las temperaturas de la superficie interior máxima y mínima respectivamente y $T_{sup_{ext_{max}}}$, $T_{sup_{ext_{min}}}$ son las temperaturas de la superficie exterior máxima y mínima, respectivamente.

4.2. Resultados bajo condición sin aire acondicionado

En esta sección se muestra el análisis de la transferencia de calor de un muro de bloque hueco de concreto estándar, con una emisividad $e = 0.9$ en las superficies de la cavidad de aire (MBHC) y su comparación con un muro de bloque homogéneo de concreto (MH) del mismo espesor. El análisis se hace bajo condición sin aire acondicionado, por lo que la temperatura del aire al interior depende únicamente del flujo de calor a través del muro.

Las figuras 4.2 y 4.3 muestran la temperatura sol-aire T_{sa} y las temperaturas del aire al interior T_{int} para un MBHC y un MH en las orientaciones este y sur, para los cuatro casos: To y Mo-Ene, que representan las temporadas frías (figura 4.2) y Te y Mo-May que representan las temporadas cálidas (figura 4.3). Las figuras a la izquierda, a menos que se especifique lo contrario mostrarán resultados con orientación este y a la derecha orientación sur.

En las figuras 4.2 y 4.3 se puede ver, que la T_{sa} de las temporadas frías (figura 4.2) es menor que en las temporadas cálidas (figura 4.3), como era de esperarse y que en la orientación este (izquierda) hay una discontinuidad aproximadamente a las 6 h, debido a la salida del sol y la incidencia de radiación directa. Ésta discontinuidad es menor en las temporadas frías en la orientación sur e inexistente para las temporadas cálidas en la orientación sur. También puede verse que la T_{sa} tiene valores mayores en la orientación sur, debido a la trayectoria aparente del sol de las ciudades analizadas. Asimismo en la orientación este es observada una ligera discontinuidad de la T_{sa} aproximadamente a las 12 h, debido a que la pared ya no recibe radiación directa.

Por otro lado la T_{int} del MBHC y del MH son muy parecidas entre si, aunque en el MBHC la amplitud de la oscilación es mayor. En todos los casos un comportamiento similar es apreciado; al inicio del día la temperatura comienza a descender, alcanzándose un mínimo aproximadamente a las 7 h y se incrementa hasta alcanzar un máximo aproximadamente a las 18 h. Además se nota un ligero retraso en la T_{int} del MBHC con respecto a la T_{int} del MH de aproximadamente 0.6 h.

Las figuras 4.4 y 4.5 muestran el flujo de calor (Q''), definido como la transferencia de calor por unidad de área, de un MBHC y un MH, en las orientaciones este y sur. Para las temporadas frías: To y Mo-Ene y las cálidas Te y Mo-May. Por convención el calor que entra es considerado positivo, mientras el calor que sale es considerado negativo. En todos los casos se nota un comportamiento

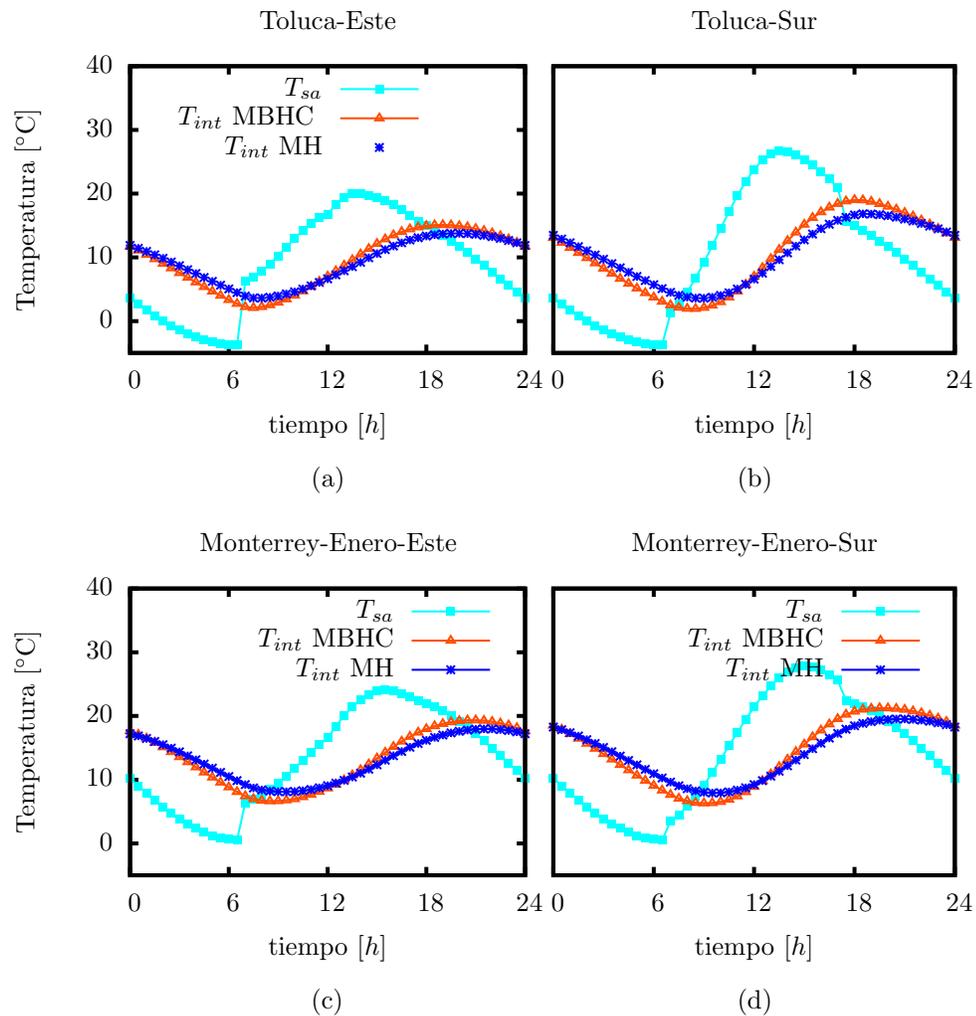


Figura 4.2: Temperatura sol-aire (T_{sa}) y temperaturas del aire al interior de un MBHC (T_{int} MBHC) y un MH (T_{int} MH). Bajo condición sin aire acondicionado, en un día típico para la temporada fría de (a) Toluca, enero, orientación este, (b) Toluca, enero, orientación sur, (c) Monterrey, enero, orientación este y (d) Monterrey, enero, orientación sur.

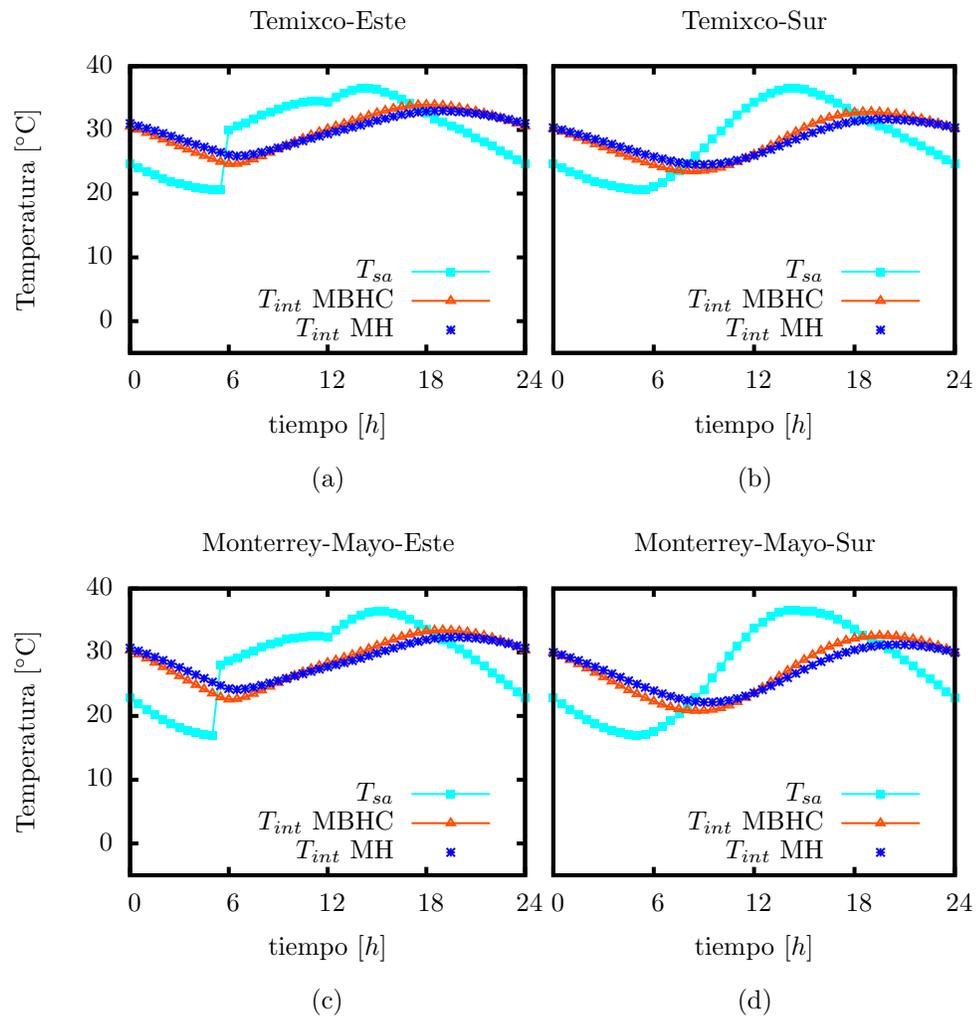


Figura 4.3: Temperatura sol-aire (T_{sa}) y temperaturas del aire al interior de un MBHC (T_{int} MBHC) y un MH (T_{int} MH). Bajo condición sin aire acondicionado, en un día típico para la temporada cálida de (a) Temixco, mayo, orientación este, (b) Temixco, mayo, orientación sur, (c) Monterrey, mayo, orientación este y (d) Monterrey, mayo, orientación sur.

similar, sale calor desde las 0 h hasta las 8 h y desde las 20 a las 24 h aproximadamente, mientras que desde aproximadamente las 8 h hasta las 19 h hay una entrada de calor. Asimismo, hay mayor flujo de calor en el caso del MBHC en comparación con el MH. Además se puede notar que el flujo de calor cambia de dirección primero en el caso del MBHC. Tanto en las temporadas frías como en las cálidas existe una pérdida de transferencia de calor hasta un valor máximo negativo las 6 h. En las temporadas frías (figura 4.4) para ambas orientaciones, existe un máximo aproximadamente a las 14 h. En las temporadas cálidas (figura 4.5) para la orientación este son notados dos máximos locales, uno de ellos (el mayor) ocurre a las 8 h y el otro aproximadamente a las 16 h, mientras que en la orientación sur se observa un máximo aproximadamente a las 14 h.

4.2.1. Cálculo de los mecanismos de transferencia de calor

El presente apartado muestra las contribuciones a la transferencia de calor por unidad de longitud de cada mecanismo: conducción, convección y radiación. Cabe destacar que dichas contribuciones fueron medidas en la línea vertical ubicada en el extremo izquierdo de la cavidad mostrada en la figura 4.6.

■ Conducción

La conducción se mide sólo en las partes sólidas del muro por medio de la ley de Fourier en $x = e11$,

$$Q'_{cond} = - \int_0^{a11} k \frac{dT}{dx} dy - \int_{a11+a21}^H k \frac{dT}{dx} dy, \quad (4.10)$$

donde k es la conductividad térmica del material y H es la longitud en la dirección y del bloque,

$$H = a_{11} + a_{21} + \frac{a_{12}}{2}. \quad (4.11)$$

■ Convección

La transferencia de calor por convección se calcula a partir de la ley de enfriamiento de Newton también en $x = e11$,

$$Q'_{conv} = \int_{a11}^{a11+a21} h_h (T_s - T_h) dy, \quad (4.12)$$

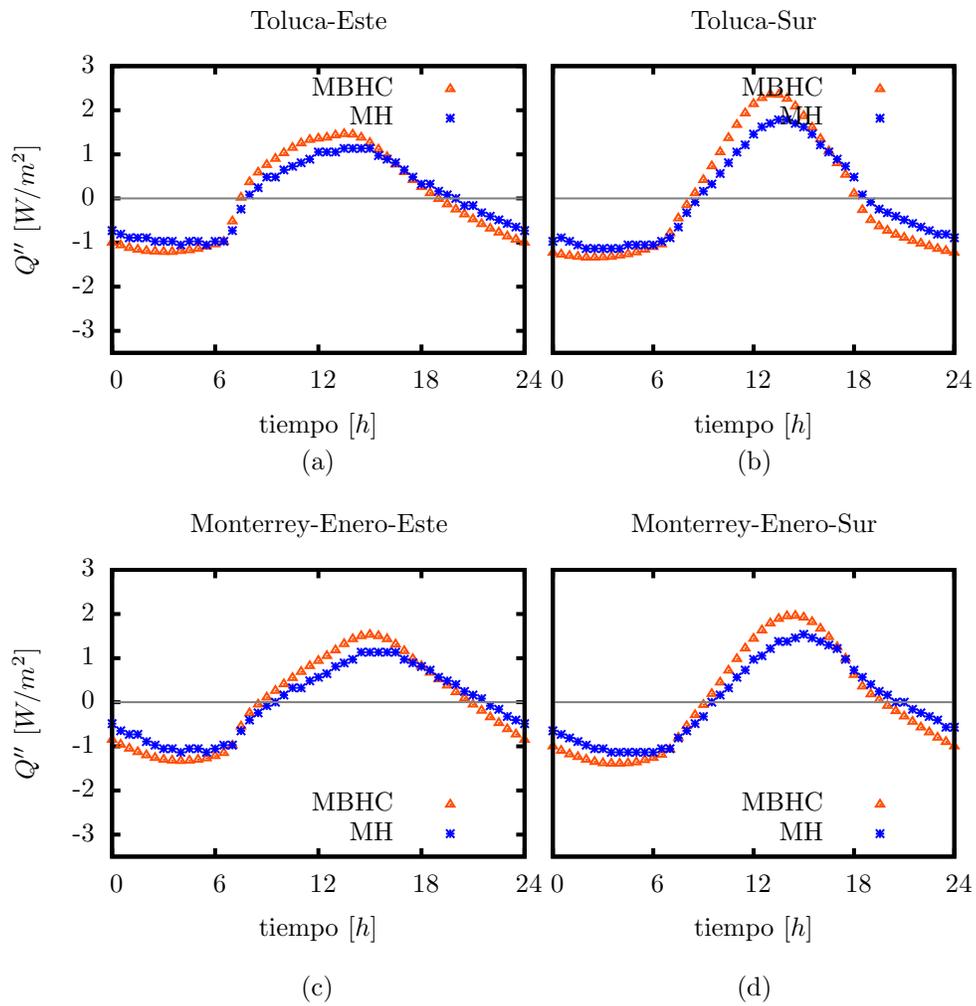


Figura 4.4: Flujo de calor Q'' [W/m^2] en un MBHC y en un MH, bajo condición sin aire acondicionado para la temporada fría de (a) Toluca, enero, orientación este, (b) Toluca, enero, orientación sur, (c) Monterrey, enero, orientación este y (d) Monterrey, enero, orientación sur.

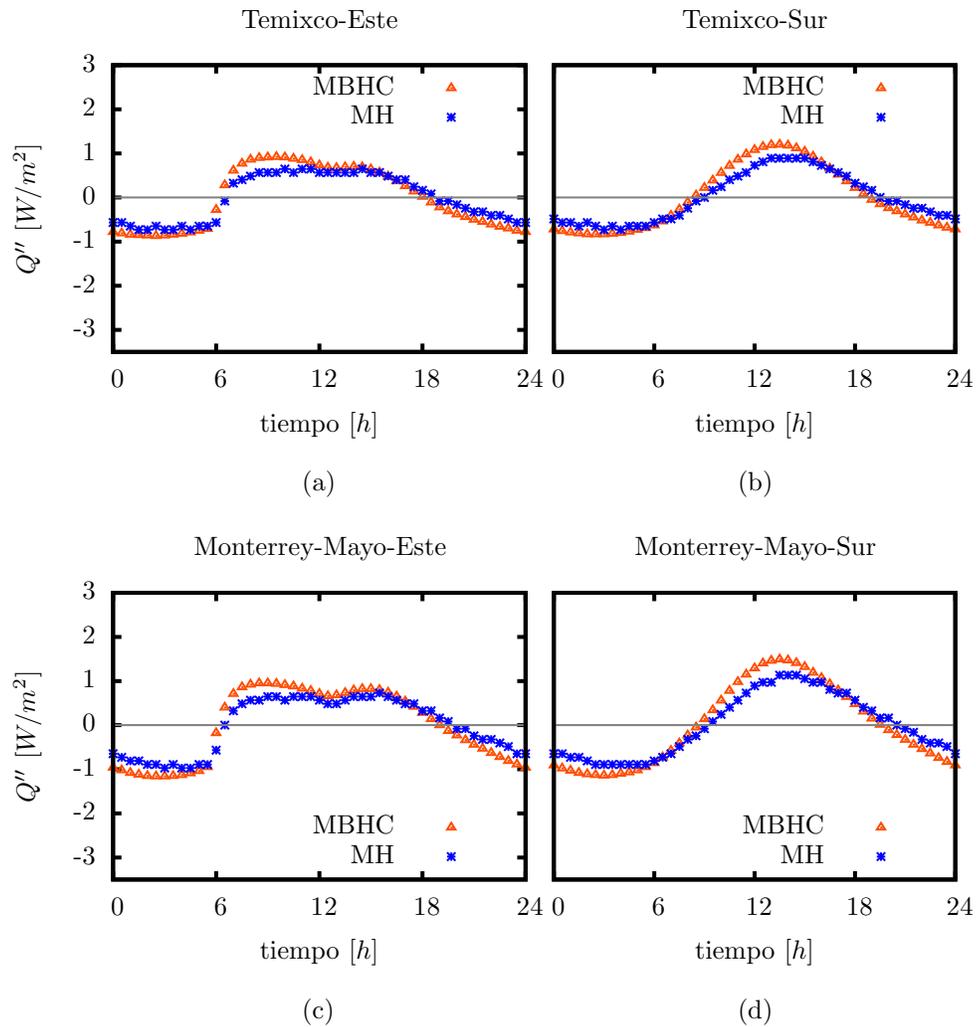


Figura 4.5: Flujo de calor Q'' [W/m^2] en un MBHC y en un MH, bajo condición sin aire acondicionado para la temporada cálida de (a) Temixco, mayo, orientación este, (b) Temixco, mayo, orientación sur, (c) Monterrey, mayo, orientación este y (d) Monterrey, mayo, orientación sur.

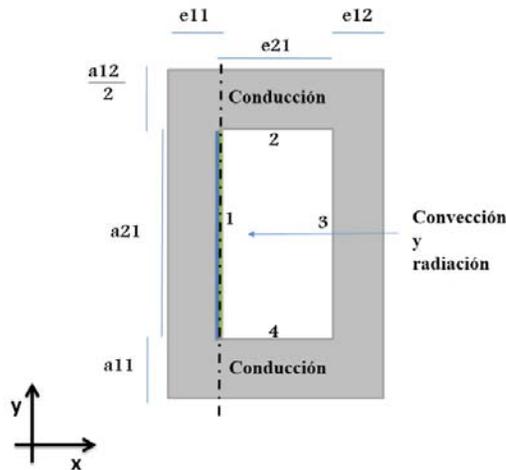


Figura 4.6: Esquema de un bloque hueco de concreto, donde la línea punteada indica la posición donde se miden los mecanismos de transferencia de calor.

donde h_h y T_h son el coeficiente de transferencia de calor por convección y la temperatura del aire dentro de la cavidad, respectivamente y T_s la temperatura superficial de la cavidad.

■ Radiación

La transferencia de calor por radiación, se calcula por medio del modelo de radiosidades [27]. Así, el flujo de calor sobre la línea $x = e_{11}$ es calculado como

$$Q'_{rad} = a_{21} \left(\sum_{j=1}^4 F_{1j} (J_1 - J_j) \right), \quad (4.13)$$

donde a_{21} es la longitud de la cavidad en la dirección y , J_i son las radiosidades de las cuatro superficies de la cavidad y F_{1j} son los factores de vista de la superficie 1 a la superficie j , con $j = 1, 2, 3, 4$ los subíndices para cada una de las cuatro superficies de la cavidad.

Las figuras 4.7 y 4.8 muestran la transferencia de calor por unidad de longitud de cada mecanismo a través del MBHC en un día típico para los cuatro casos: To y Mo-Ene, que representan las temporadas frías (figura 4.7) y las temporadas cálidas Te y Mo-May (figura 4.8). Como se puede observar todos presentan el mismo comportamiento. De las 0 a las 7 h aproximadamente la transferencia de calor por unidad de longitud es negativa, es decir, hay salida de calor. De las 7 a las 19 h aproximadamente hay una entrada de calor, alcanzando un máximo a las 15 h aproximadamente. Finalmente, desde las 19 h hasta el final del día hay salida de calor. También, puede notarse la inversión de la dirección de la transferencia de calor por radiación sucede antes que la transferencia de calor por convección, que a su vez sucede antes que la transferencia de calor conductiva. Asimismo, se puede notar que la radiación aporta la mayor transferencia de calor, seguida de la conducción, finalmente la menor transferencia de calor es aportada de manera convectiva.

Cálculo de los porcentajes de los mecanismos de transferencia de calor

La contribución a la transferencia de calor de cada mecanismo se calcula por medio de:

$$Cont_{cond} = \frac{Q'_{cond}}{Q'_{total}}, \quad (4.14)$$

$$Cont_{conv} = \frac{Q'_{conv}}{Q'_{total}}, \quad (4.15)$$

y

$$Cont_{rad} = \frac{Q'_{rad}}{Q'_{total}}, \quad (4.16)$$

y el flujo de calor total es

$$Q'_{total} = Q'_{cond} + Q'_{conv} + Q'_{rad}. \quad (4.17)$$

En la figura 4.9 se muestra el porcentaje de cada mecanismo de transferencia de calor (conduccion, conveccion y radiativo) para el caso de Toluca, día típico de enero, orientación este (figura 4.9 (a)), Toluca día típico de enero, orientación sur (figura 4.9 (b)), Temixco, día típico de mayo, orientación este (figura 4.9 (c)), Temixco, día típico de mayo, orientación sur (figura 4.9 (d)).

Para cada uno de los porcentajes mostrados en las ecuaciones 4.14-4.16 fue calculado un promedio.

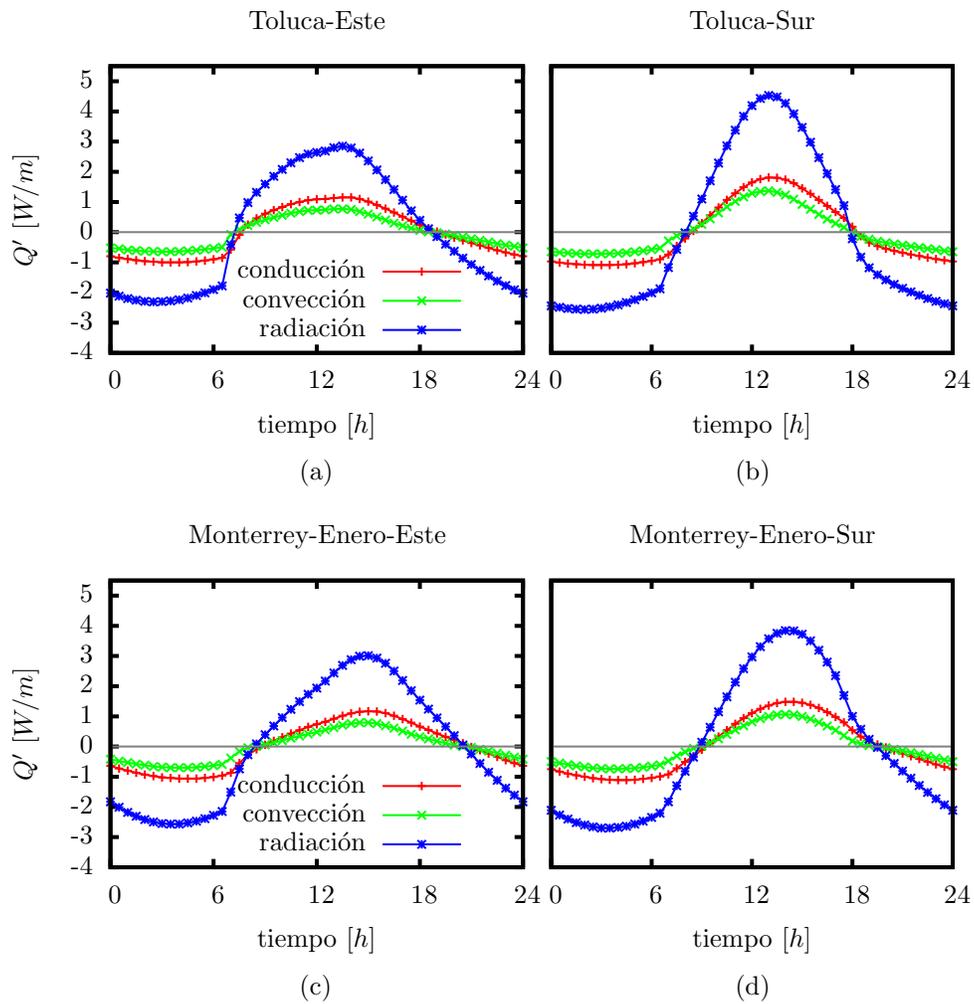


Figura 4.7: Transferencia de calor por unidad de longitud Q' [W/m] por cada mecanismo de transferencia de calor para un MBHC. Bajo condición sin aire acondicionado para la temporada fría de (a) Toluca, enero, orientación este, (b) Toluca, enero, orientación sur, (c) Monterrey, enero, orientación este y (d) Monterrey, enero, orientación sur.

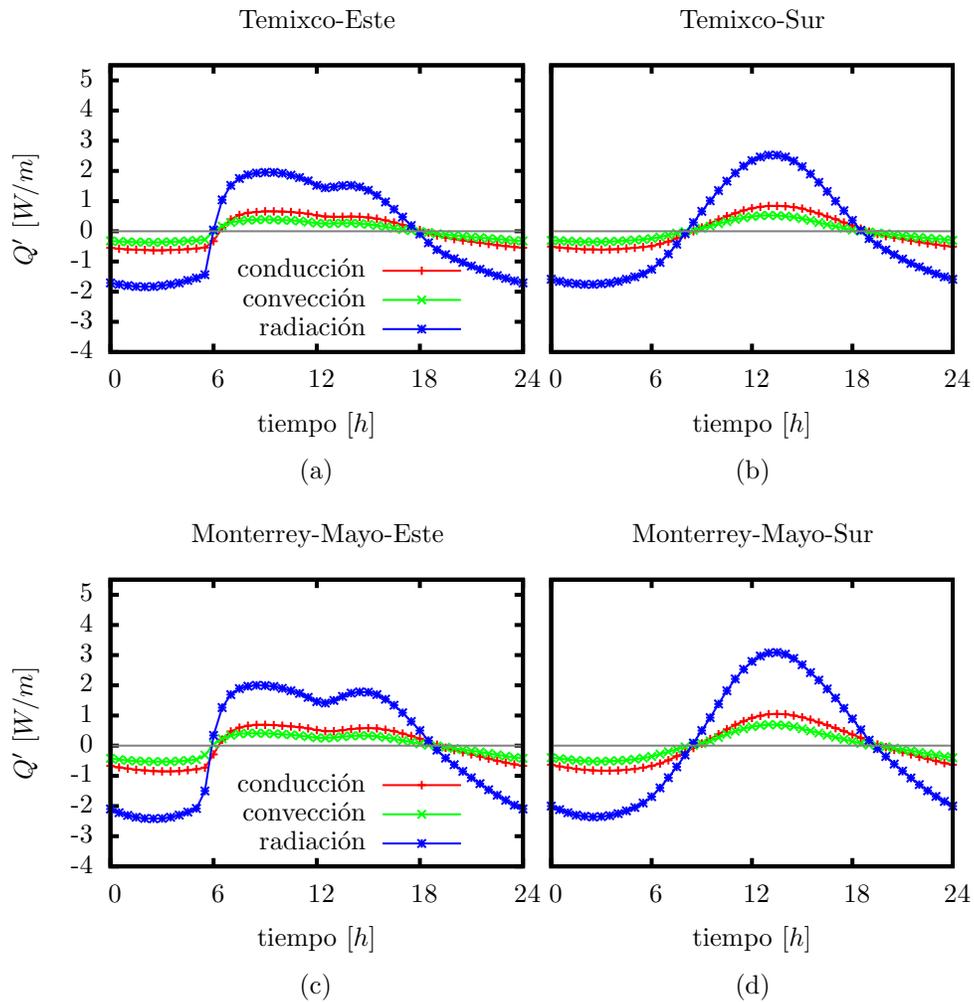


Figura 4.8: Transferencia de calor por unidad de longitud Q' [W/m] por cada mecanismo de transferencia de calor para un muro de bloque hueco de concreto. Bajo condición sin aire acondicionado para la temporada cálida de (a) Temixco, mayo, orientación este, (b) Temixco, mayo, orientación sur, (c) Monterrey, mayo, orientación este y (d) Monterrey, mayo, orientación sur.

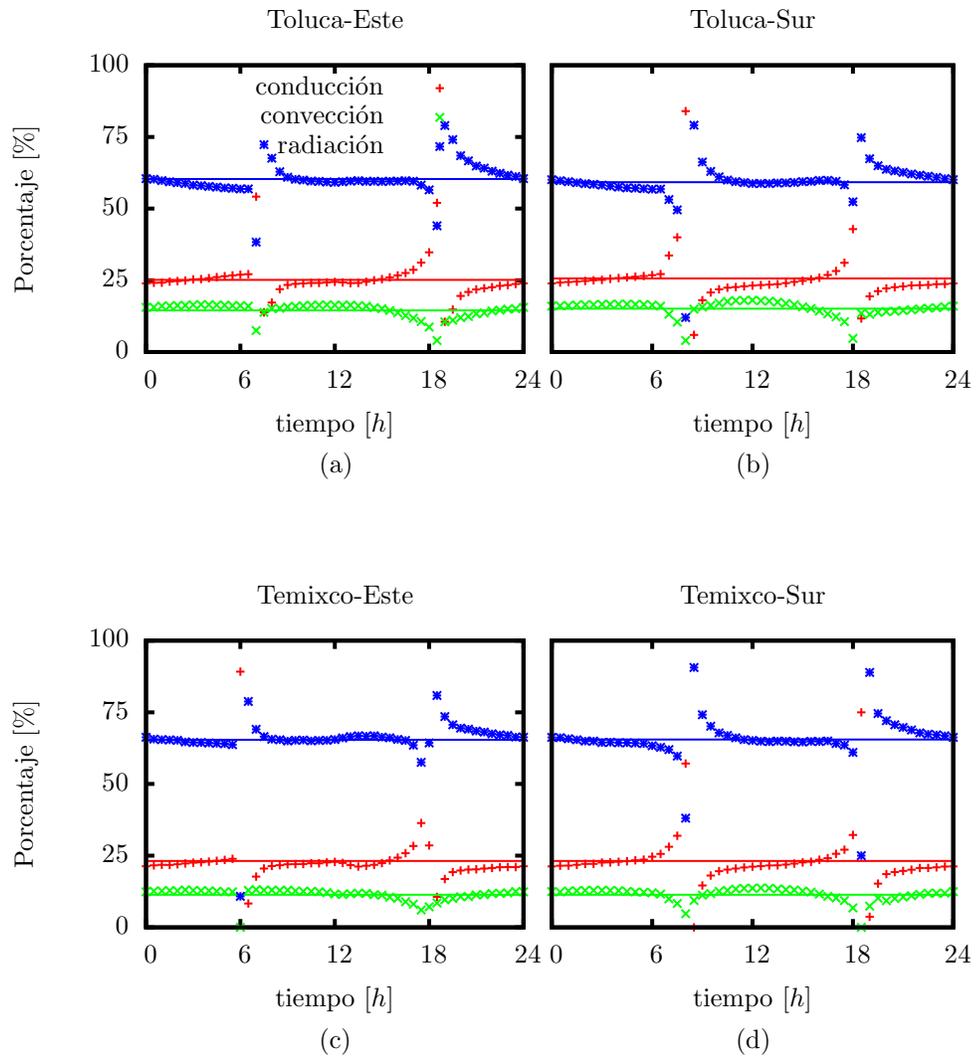


Figura 4.9: Porcentajes promedio e instantáneos de los mecanismos de transferencia de calor por unidad de longitud. Bajo condición sin aire acondicionado para (a) Toluca, enero, orientación este, (b) Toluca, enero, orientación sur, (c) Temixco, mayo, orientación este y (d) Temixco, mayo, orientación sur.

Porcentajes promedio de los mecanismos de transferencia de calor por unidad de longitud.								
Mecanismo	Este				Sur			
	To [%]	Te [%]	Mo-Ene [%]	Mo-May [%]	To [%]	Te [%]	Mo-Ene [%]	Mo-May [%]
Conducción	25	23	25	23	26	23	26	23
Convección	15	11	14	12	15	11	14	12
Radiación	59	66	61	65	59	66	60	65

Tabla 4.2: Porcentajes promedio de los mecanismos de transferencia de calor por unidad de longitud para un MBHC, para las orientaciones este y sur. Bajo condición sin aire acondicionado, para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May).

En la tabla 4.2 se muestran las contribuciones de la transferencia de calor por unidad de longitud de cada mecanismo de transferencia de calor para los cuatro casos de estudio, en las orientaciones este y sur. Notándose en general, que el mecanismo radiativo tiene la mayor contribución, seguida de la contribución conductiva y finalmente la contribución convectiva. La contribución convectiva varía entre un 11 y 15 % obteniéndose los porcentajes máximos en las temporadas frías, To y Mo-Ene y los mínimos en las temporadas cálidas, Te y Mo-May. La contribución conductiva está entre el 22 y 26 % obteniéndose los mínimos en las temporadas cálidas Te y Mo-May y los máximos en las temporadas frías To y Mo-Ene. Finalmente la contribución radiativa varía entre el 59 y 66 %, los valores mínimos son obtenidos en las temporadas frías y los valores máximos en las temporadas cálidas.

Mecanismos de transferencia de calor: comparación de los cuatro casos

La figura 4.10 muestra la transferencia de calor por unidad de longitud para la transferencia de calor por conducción (figuras 4.10 a) y b)), por convección (figuras 4.10 c) y d)) y radiación (figuras 4.10 e) y f)) de los cuatro casos analizados: Toluca (To), Temixco (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en Mayo (Mo-May), en las orientaciones este y sur. En todos los casos se puede notar que la transferencia de calor por radiación es mayor, seguido de la conducción y finalmente la convección. En los tres mecanismos de transferencia de calor se

puede notar que en las temporadas frías se da una mayor transferencia de calor, que en el caso de las temporadas cálidas. En las orientaciones este, para los tres mecanismos de transferencia de calor, se puede ver un mínimo alrededor de las 13 horas, debido a la radiación solar directa incidente, el efecto es más visible en las temporadas cálidas. Asimismo se puede apreciar que hay mayor transferencia de calor incidente en la orientación sur para todos los casos.

4.2.2. Desempeño térmico

En esta sección es evaluado el desempeño térmico, para el MBHC, calculado bajo condición sin aire acondicionado y evaluado con los siguientes parámetros: Energía transferida ET , Factor de decremento sol-aire FD_{sa} , Tiempo de retraso TR , Temperatura interior máxima $T_{int_{max}}$, Temperatura interior mínima $T_{int_{min}}$, Grado Hora de desconfort térmico cálido DDH_{cal} y el Grado Hora de desconfort térmico frío $DDH_{frío}$. Los resultados son comparados con los correspondientes a un MH del mismo espesor.

La figura 4.11 muestra la energía transferida a través del MBHC y del MH durante un día típico para los cuatro casos: To y Mo-Ene, que representan las temporadas frías y las temporadas cálidas Te y Mo-May, en las orientaciones este (figura 4.11 (a)) y sur (figura 4.11 (b)). Se puede ver que hay mayor transferencia de energía, entre un 27 y 31%, en el MBHC en comparación con el MH, esto puede deberse a que el MH tiene casi el doble de masa que el MBHC, en consecuencia tiene mayor inercia térmica. Además de que en el MH no hay presencia de transferencia de calor convectiva y radiativa. Existe una diferencia entre la energía transferida para el caso de Temixco en las orientaciones este y sur, pero no es notable debido a que dicha diferencia es en el segundo decimal, siendo mayores los resultados para la orientación sur.

La figura 4.12 muestra el FD_{sa} y el TR para todos los casos analizados en las dos orientaciones propuestas. En todos los casos el FD_{sa} es mayor en el caso del MBHC, entre un 0.11 y 0.14, que el MH. Cabe destacar que la diferencia es mayor en las temporadas cálidas. En conclusión el factor de decremento indica que el MH tiene mejor desempeño térmico que el MBHC bajo condición sin aire acondicionado. La gráfica también muestra que los tiempos de retraso son menores en el caso del MBHC con respecto al MH entre un 11 y 19%, indicando también que el mejor desempeño térmico lo tiene el MH.

En la tabla 4.3 son mostradas las temperaturas máximas y mínimas del aire al interior correspondientes al MBHC y el MH. Estos resultados reafirman lo observado en las figuras 4.2 y 4.3. Los mínimos de la T_{int} para el MBHC son

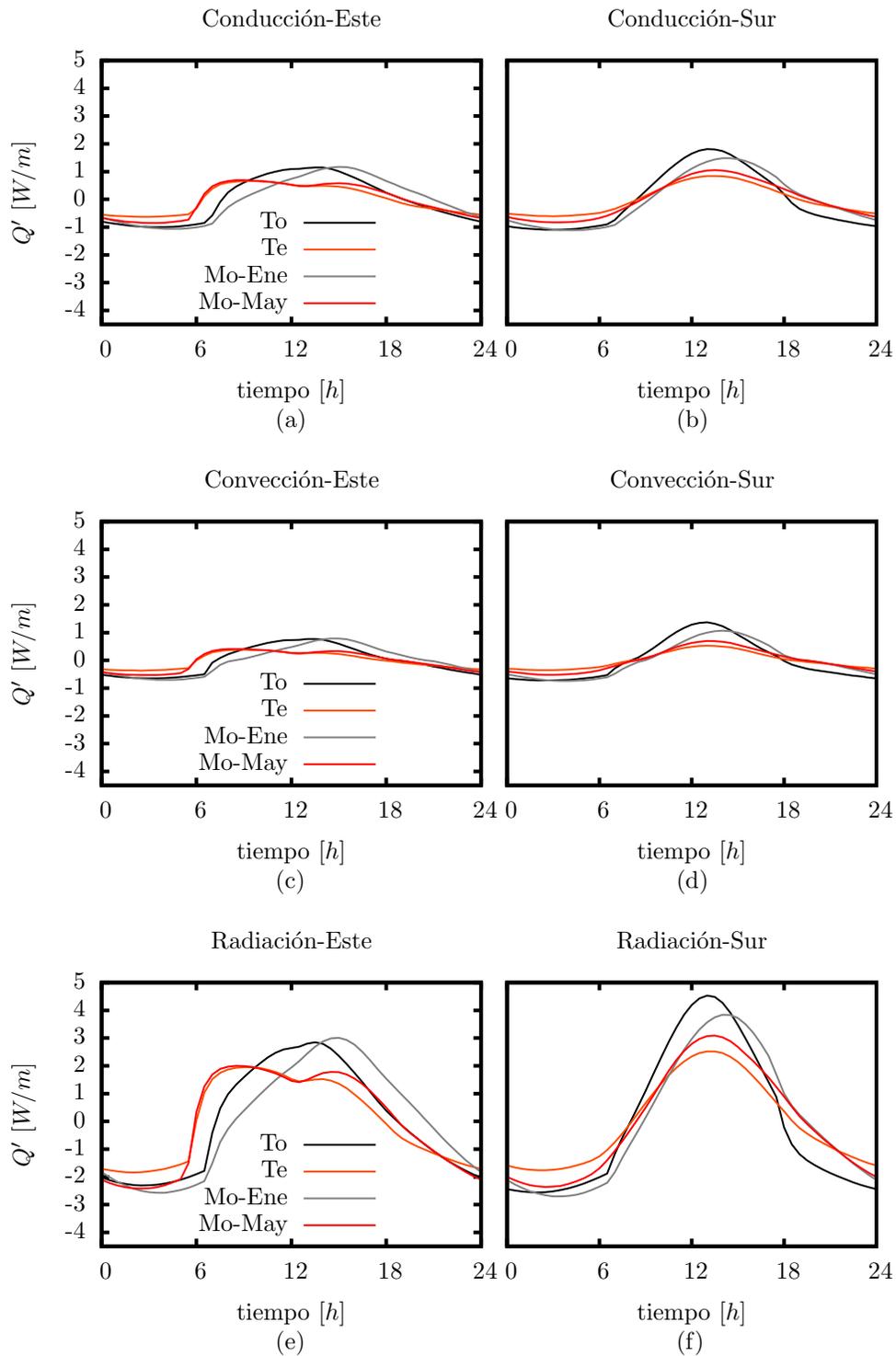


Figura 4.10: Transferencia de calor por unidad de longitud de los mecanismos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación para un día típico de Toluca en Enero (To), Temixco en Mayo (Te), Monterrey en Enero (Mo-Ene) y Monterrey en Mayo (Mo-May).

Temperatura del aire al interior máxima y mínima				
	Este		Sur	
MBHC				
Caso	$T_{int_{min}}$ [°C]	$T_{int_{max}}$ [°C]	$T_{int_{min}}$ [°C]	$T_{int_{max}}$ [°C]
To	2.0	15.0	1.9	19.0
Te	24.6	33.9	23.5	32.8
Mo-Ene	6.6	19.3	6.2	21.2
Mo-May	22.5	33.4	20.8	32.5
MH				
To	3.6	13.8	3.6	16.8
Te	25.9	33.0	24.6	31.7
Mo-Ene	8.1	18.0	7.9	19.5
Mo-May	24.1	32.4	22.2	31.2

Tabla 4.3: Temperatura máxima $T_{int_{max}}$ y mínima $T_{int_{min}}$ en las orientaciones este y sur de MBHC y un MH. Bajo condición sin aire acondicionado para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May).

Grado-hora de desconfort térmico				
	Este		Sur	
MBHC				
Clima	DDH_{cal} [°Ch]	DDH_{frio} [°Ch]	DDH_{cal} [°Ch]	DDH_{frio} [°Ch]
To	0.0	194.9	4.7	166
Te	58.4	15	38.5	32.1
Mo-Ene	0.0	158.8	5.3	139.8
Mo-May	58.3	22.1	42.1	47.9
MH				
To	0.0	195.8	0.0	163.5
Te	51.6	8.5	30.0	24.2
Mo-Ene	0.0	159.4	0.0	136
Mo-May	49.8	13.9	31.2	37.8

Tabla 4.4: Grado Hora de desconfort térmico cálido (DDH_{cal}) y frío (DDH_{frio}) en las orientaciones este y sur de MBHC y un MH. Bajo condición sin aire acondicionado para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May).

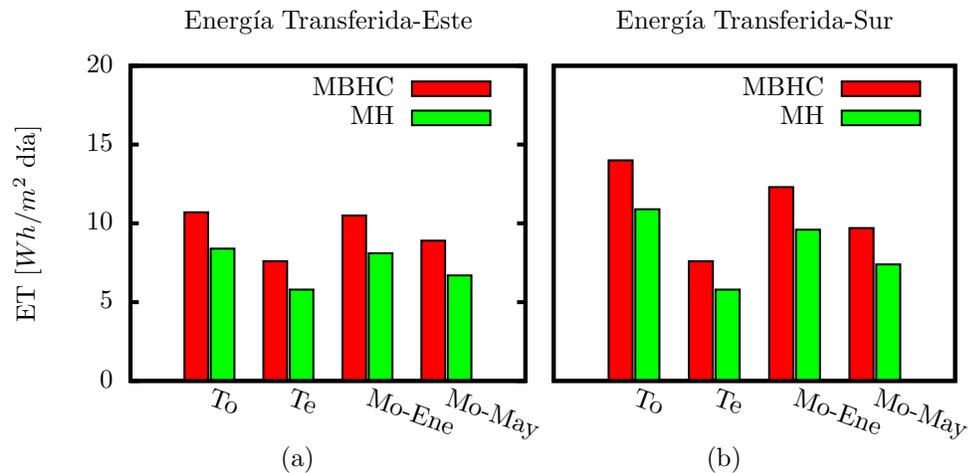


Figura 4.11: Energía transferida por unidad de área ET en un MBHC y un MH para las orientaciones (a) este y (b) sur. Bajo condición sin aire acondicionado, en un día típico para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May).

menores que para el MH y los máximos en la T_{int} para el MBHC son mayores que para el MH. De la tabla 4.4 se puede ver que el grado hora de desconfort tanto frío como cálido son mayores en el caso del MBHC, a excepción del caso de Monterrey en enero orientación este y Toluca en enero para la orientación este (aunque en éstos casos la diferencia es muy pequeña). Lo que sucede en este caso es que debido a que el clima es frío la T_{int} tanto del MBHC como del MH son siempre menores que la temperatura de neutralidad por lo que el desconfort térmico cálido es cero como se puede apreciar de la figura 4.13. Aunque el DDH_c para el MH es mayor que para el MBHC, la amplitud de la oscilación en el caso del MH es menor que la amplitud de la oscilación del MBHC. Lo que indica que el DDH no es un buen parámetro de desempeño térmico en este caso.

De los resultados expuestos en esta sección se concluye que el sistema constructivo con mejor desempeño térmico es el MH, bajo condición sin aire acondicionado, para los cuatro casos de análisis en las dos orientaciones.

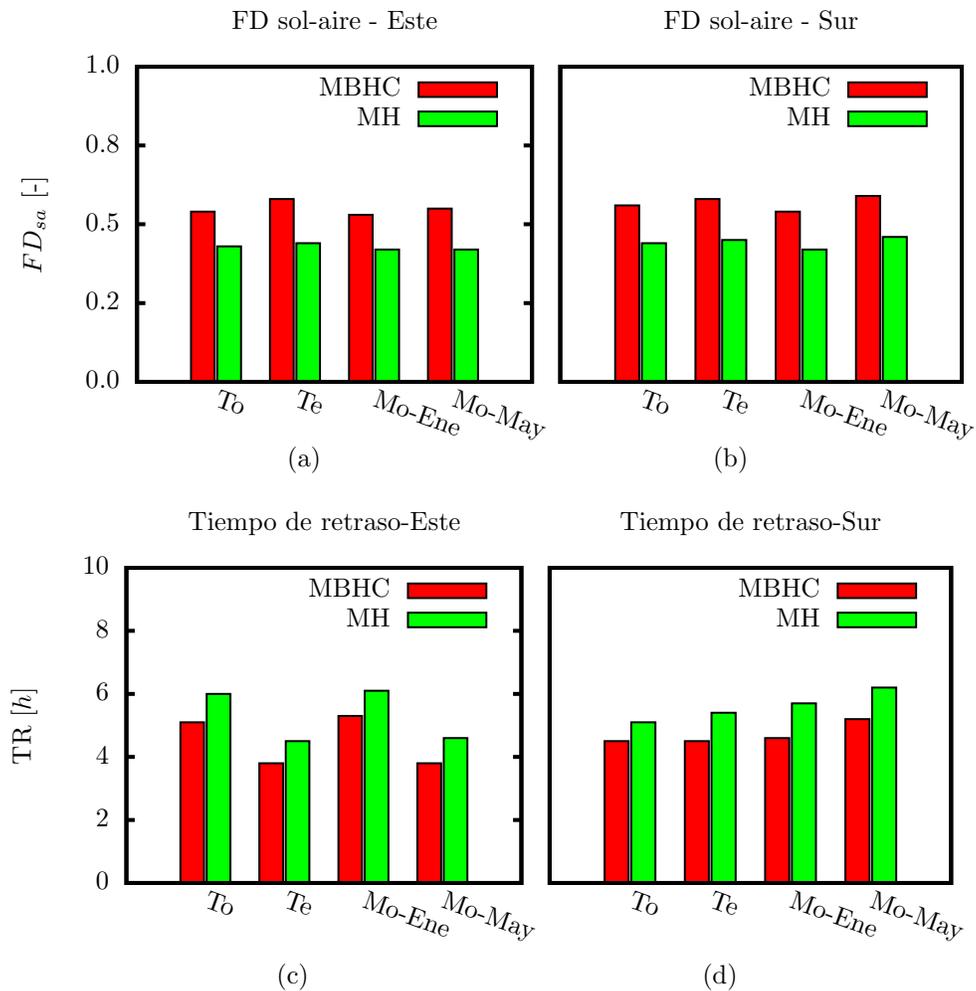


Figura 4.12: Factor de decremento sol-aire (FD_{sa}) (a)(b) y tiempo de retraso (TR) (c)(d) de un MBHC y su comparación con un MH. Bajo condición sin aire acondicionado, para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May).

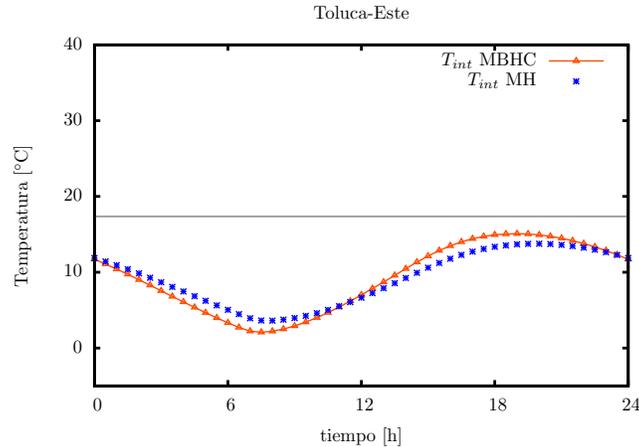


Figura 4.13: T_{int} del MBHC, T_{int} del MH y temperatura de neutralidad T_n (línea negra) para un día típico en Toluca, enero, orientación este.

4.3. Resultados bajo condición con aire acondicionado

En esta sección se analiza la transferencia de calor y el desempeño térmico del MBHC y el MH bajo condición con aire acondicionado, para las orientaciones y ciudades establecidas en la sección 4.1.

4.3.1. Cálculo de los mecanismos de transferencia de calor

Las figuras 4.14 y 4.15 muestran la transferencia de calor por unidad de longitud, bajo condición con aire acondicionado, de cada mecanismo de transferencia de calor a través del MBHC en un día típico para los cuatro casos: To y Mo-Ene, que representan las temporadas frías (figura 4.14) y las temporadas cálidas Te y Mo-May (figura 4.15).

Puede notarse que en las temporadas frías (figura 4.14) hay una mayor transferencia de calor hacia el exterior (transferencia de calor negativa) que en las temporadas frías bajo condición sin aire acondicionado (figura 4.7), pues al tener una temperatura de confort al interior mayor que la temperatura del aire al exterior, intercambian calor hacia el exterior en la mayor parte del tiempo. Mientras que en las temporadas cálidas (figura 4.15) hay una mayor transferencia de calor

hacia el interior (transferencia de calor positiva) y ocurre por más tiempo que en el caso bajo condición sin aire acondicionado (figura 4.8), pues la temperatura del aire al exterior es mayor que la temperatura de confort al interior, provocando un flujo de calor hacia el interior por más tiempo.

La orientación juega un papel muy importante; en las temporadas frías se aprecia una mayor pérdida de calor en la orientación este que en la orientación sur, mientras que en las temporadas cálidas hay mayor ganancia de calor en la orientación este que en la sur. Puede notarse también, que al igual que para el caso bajo condición sin aire acondicionado la contribución convectiva es la más pequeña, seguida de la conductiva y finalmente la contribución radiativa es la que representa la mayor contribución.

En la figura 4.16 se muestra la contribución de cada mecanismo de transferencia de calor (conductivo, convectivo y radiativo). Debido a que el comportamiento es similar en todos los casos se muestran los resultados para Toluca, día típico de enero, orientación este (figura 4.16(a)), Toluca, día típico de enero, orientación sur, (figura 4.16 (b)) y para Temixco, día típico de Mayo, orientación este (figura 4.16 (c)) Temixco ,día típico de Mayo, orientación sur (figura 4.16 (d)).

En la tabla 4.5 se muestran las contribuciones promedio de la transferencia de calor de cada mecanismo, para los cuatro casos de estudio: To, Te, Mo-Ene, Mo-May. Que son calculados de la misma manera que en el caso bajo condición sin aire acondicionado. Puede notarse que, de la misma forma que el caso bajo condición sin aire acondicionado, el mecanismo con menor contribución es el convectivo, que varía entre un 11 y 14 %, seguido del conductivo entre un 31 y 34 % y finalmente el mecanismo radiativo con mayor contribución, del 53 % al 58 %. Cabe resaltar, que en este caso la contribución radiativa es menor que en el caso bajo condición sin aire acondicionado, mientras que la contribución conductiva es mayor.

Mecanismos de transferencia de calor: comparación de los cuatro casos

La figura 4.17 muestra la transferencia de calor por unidad de longitud para la transferencia de calor por conducción (figuras 4.17 a) y b)), por convección (figuras 4.17 c) y d)) y radiación (figuras 4.17 e) y f)) de los cuatro casos analizados: Toluca (To), Temixco (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en Mayo (Mo-May), en las orientaciones este y sur. En todos los casos se puede notar que la transferencia de calor por radiación es mayor, seguido de la conducción y finalmente la convección. En los tres mecanismos de transferencia de calor se puede notar que en las temporadas frías se da una mayor transferencia

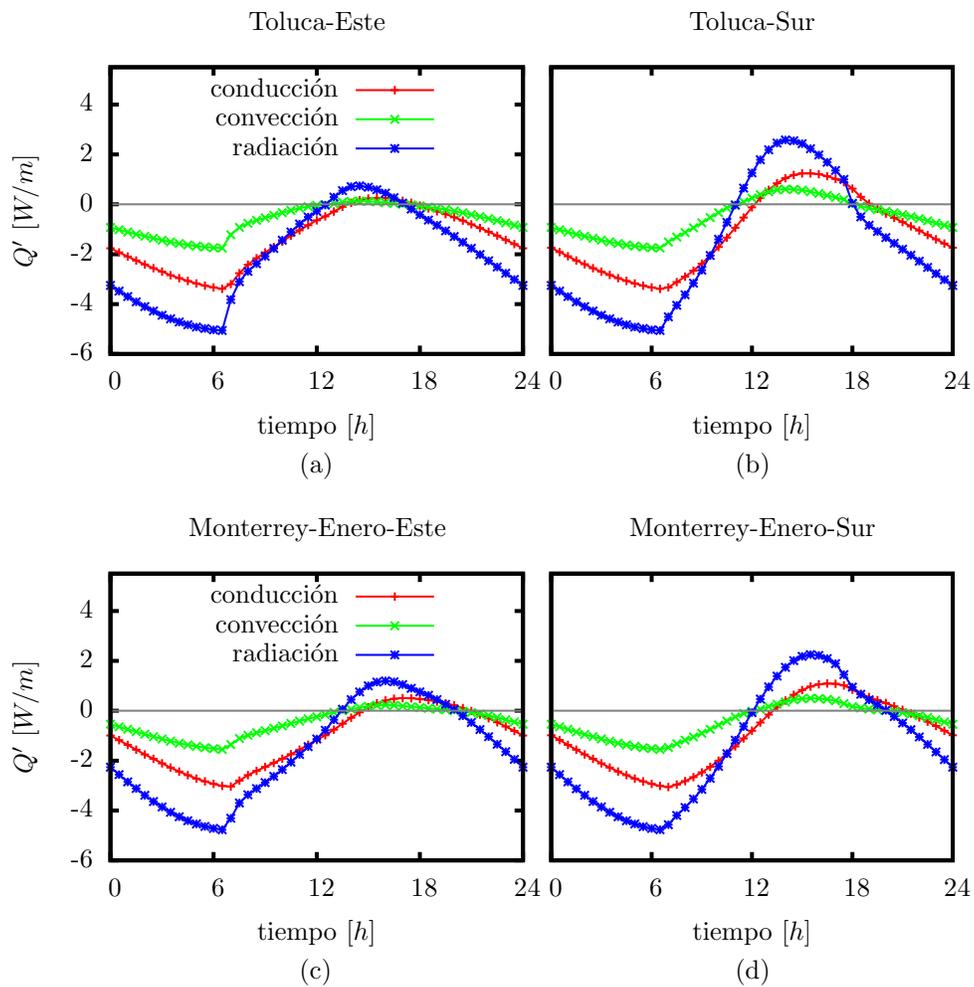


Figura 4.14: Transferencia de calor por unidad de longitud Q' [W/m] por mecanismo de transferencia de calor para un MBHC bajo condición con aire acondicionado para la temporada fría de (a) Toluca, enero, orientación este, (b) Toluca, enero, orientación sur, (c) Monterrey, enero, orientación este, (d) Monterrey, enero, orientación sur.

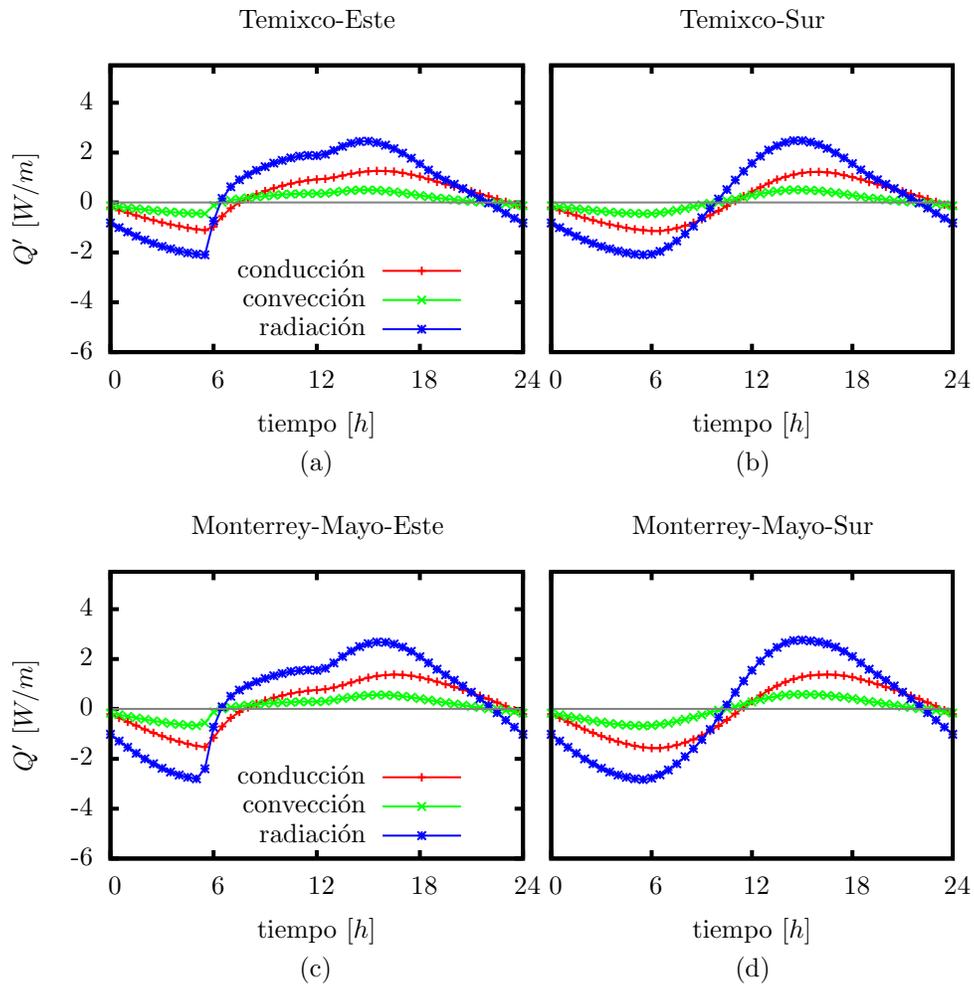


Figura 4.15: Flujo de calor total Q' [W/m] por mecanismo de transferencia de calor para un MBHC bajo condición con aire acondicionado para la temporada cálida de (a) Temixco, mayo, orientación este, (b) Temixco, mayo, orientación sur, (c) Monterrey, mayo, orientación este, (d) Monterrey, mayo, orientación sur.

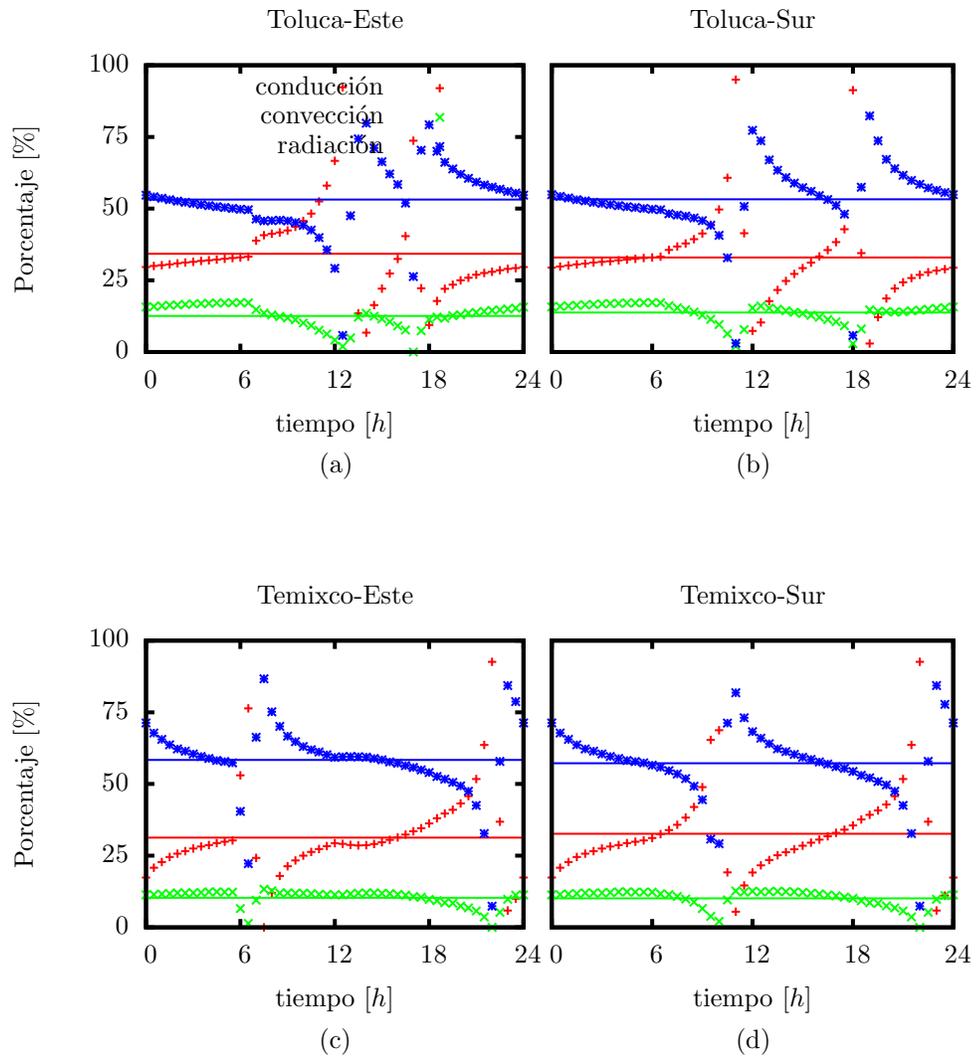


Figura 4.16: Porcentajes promedio e instantáneos de los mecanismos de transferencia de calor bajo condición con aire acondicionado para (a) Toluca, enero, orientación este, (b) Toluca, enero, orientación sur, (c) Temixco, mayo, orientación este y (d) Temixco, mayo, orientación sur.

Porcentaje de la transferencia de calor por mecanismo								
Mecanismo	Este				Sur			
	To [%]	Te [%]	Mo-Ene [%]	Mo-May [%]	To [%]	Te [%]	Mo-Ene [%]	Mo-May [%]
Conducción	34	33	34	31	33	33	34	32
Convección	13	14	12	11	14	14	13	11
Radiación	53	53	54	58	53	53	53	57

Tabla 4.5: Porcentaje de la transferencia de calor promedio en un día típico de cada uno de los mecanismos de transferencia de calor para un MBHC, para las orientaciones este y sur. Bajo condición con aire acondicionado, para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May).

de calor hacia el interior (positiva) por parte de las temporadas cálidas que en las temporadas frías, como era de esperarse.

La mayor transferencia de calor por unidad de área se da principalmente hacia adentro en las temporadas cálidas en la orientación este, para los tres mecanismos de transferencia de calor, en las temporadas cálidas se puede ver un mínimo alrededor de las 13 horas, debido a la radiación solar directa incidente, el efecto es más visible en las temporadas cálidas.

En los tres mecanismos de transferencia de calor se puede notar que en las temporadas frías se da una mayor transferencia de calor, que en el caso de las temporadas cálidas. En las orientación este, para los tres mecanismos de transferencia de calor, se puede ver un mínimo alrededor de las 13 horas, debido a la radiación solar directa incidente, el efecto es más visible en las temporadas cálidas. Asimismo se puede apreciar que hay mayor transferencia de calor incidente en la orientación sur para todos los casos.

4.3.2. Desempeño térmico

Los parámetros para evaluar el desempeño térmico calculados en condiciones de aire acondicionado son: Carga de calentamiento C_{cal} , la carga de enfriamiento C_{enf} y el factor de decremento superficial FD_s .

La figura 4.18 muestra la carga total CT , compuesta por la carga de calen-

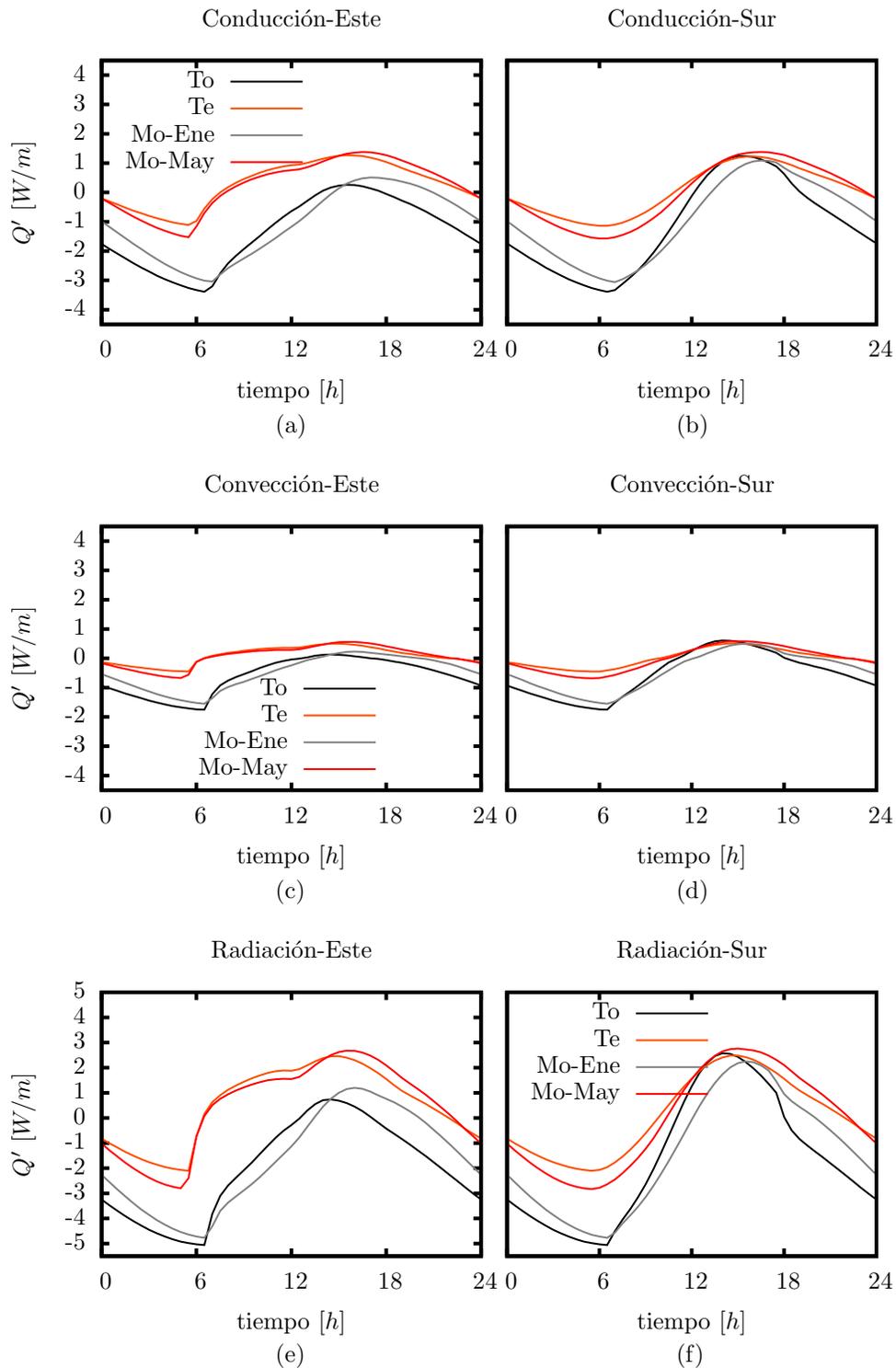


Figura 4.17: Transferencia de calor por unidad de longitud de los mecanismos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación para un día típico de los cuatro casos de estudio. Para un estudio bajo condición con aire acondicionado

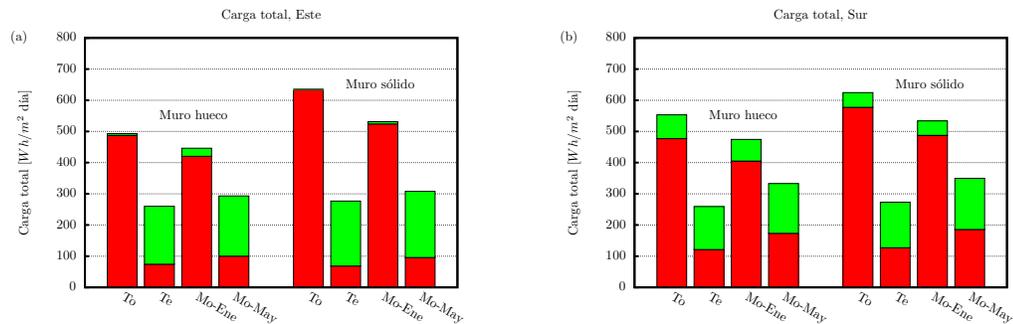


Figura 4.18: Carga total CT , compuesta por la carga de calentamiento C_{cal} y enfriamiento C_{enf} de un MBHC y un MH, orientaciones este y sur. Bajo condición con aire acondicionado, para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May).

tamiento y enfriamiento de un MBHC y un MH, orientaciones este y sur, bajo condición con aire acondicionado, para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May). Se puede ver que la carga de calentamiento es mayor en las temporadas frías (To y Mo-Ene) y menor en las temporadas cálidas (Te y Mo-May). Asimismo, la carga de enfriamiento es menor en casos fríos y mayor en casos cálidos. La carga total en el MH es mayor que la carga total en el MBHC, entre 4 y 6% para las temporadas cálidas y entre 11 y 22% en temporadas frías. En ambas orientaciones son mantenidas estas proporciones, por lo que al evaluar con este parámetro el MBHC es el sistema constructivo con mejor desempeño térmico, en todos los casos estudiados.

La figura 4.19 muestra el factor de decremento superficial para los cuatro casos de estudio: To, Mo-Ene que representan las temporadas frías y Te, Mo-May que representan las temporadas cálidas. Se puede ver que el factor de decremento superficial es mayor en el caso del MH en comparación con el MBHC, entre el 0.11 y 0.12. Por lo que evaluando con este parámetro se reafirma también que el mejor desempeño térmico es obtenido con el MBHC.

Los resultados de esta sección muestran, que en general, el MBHC tiene un mejor desempeño térmico que el MH, bajo condición con aire acondicionado.

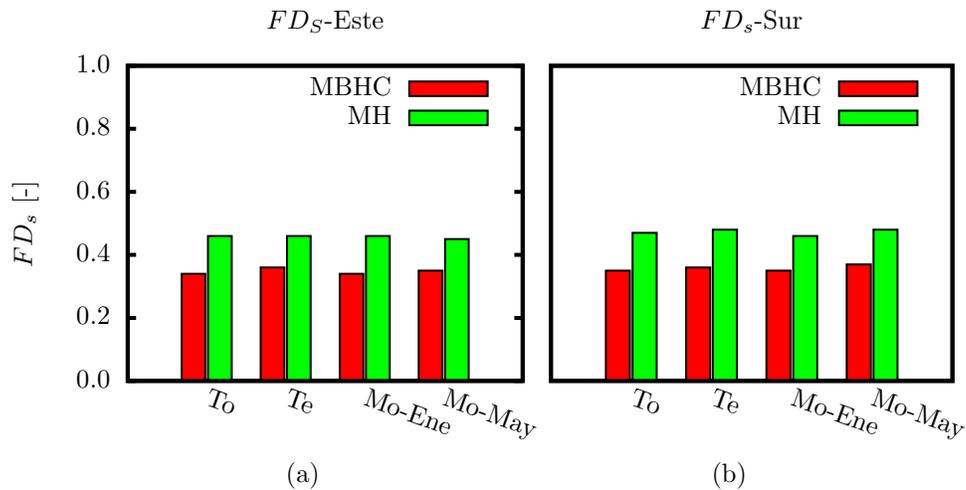


Figura 4.19: Factor de decremento superficial (FD_s) de un MBHC y un MH, orientaciones este (a) y sur (b). Con condición de aire acondicionado, para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May).

4.4. Caso de estudio donde se disminuye la radiación

Debido a que el mecanismo de radiación es el que presenta mayor porcentaje de transferencia de calor por unidad de longitud, en esta sección se propone disminuirlo, bajando la emisividad a $e = 0.03$ en las superficies de la cavidad. En esta subvención se analiza un muro de bloque hueco de concreto con emisividad $e = 0.03$ en las superficies de la cavidad de aire (MBHC-E0.03). Lo anterior podría lograrse poniendo una barrera radiativa (por ejemplo adhiriendo una placa de aluminio pulido a las superficies de la cavidad) en las paredes internas del hueco. Los resultados correspondientes a un MBHC-E0.03 son comparados con un MBHC y un MH.

4.4.1. Resultados bajo condición sin aire acondicionado

Las figuras 4.20 y 4.21 muestran la temperatura sol-aire y las temperaturas del aire al interior de un MBHC-E0.03, un MBHC y un MH. En las orientaciones este y sur, para los cuatro casos: To, Mo-Ene, que representan las temporadas

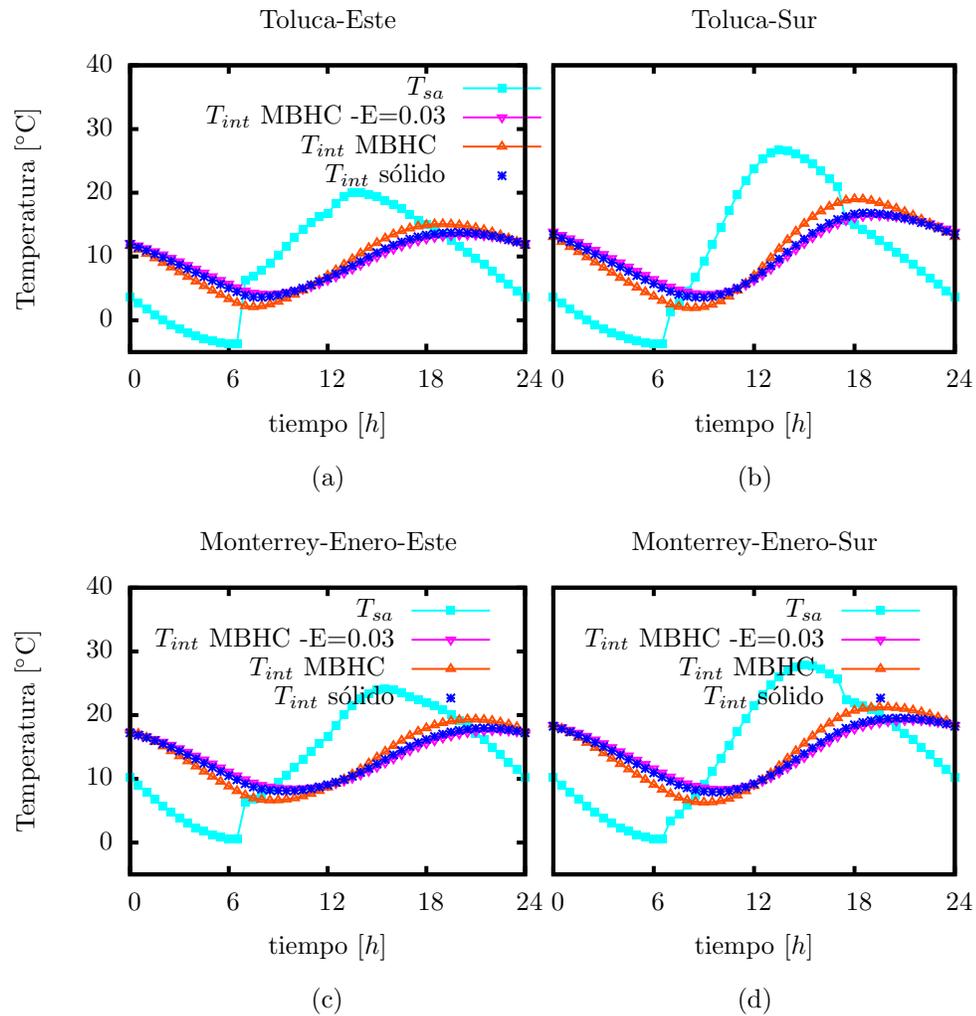


Figura 4.20: Temperatura sol-aire (T_{sa}) y temperaturas del aire al interior de un MBHC0.03 (T_{int} MBHC0.03), un MBHC (T_{int} MBHC) y un MH (T_{int} MH), bajo condición sin aire acondicionado, en un día típico para la temporada fría de (a) Toluca, enero, orientación este, (b) Toluca, enero, orientación sur, (c) Monterrey, enero, orientación este y (d) Monterrey, enero, orientación sur.

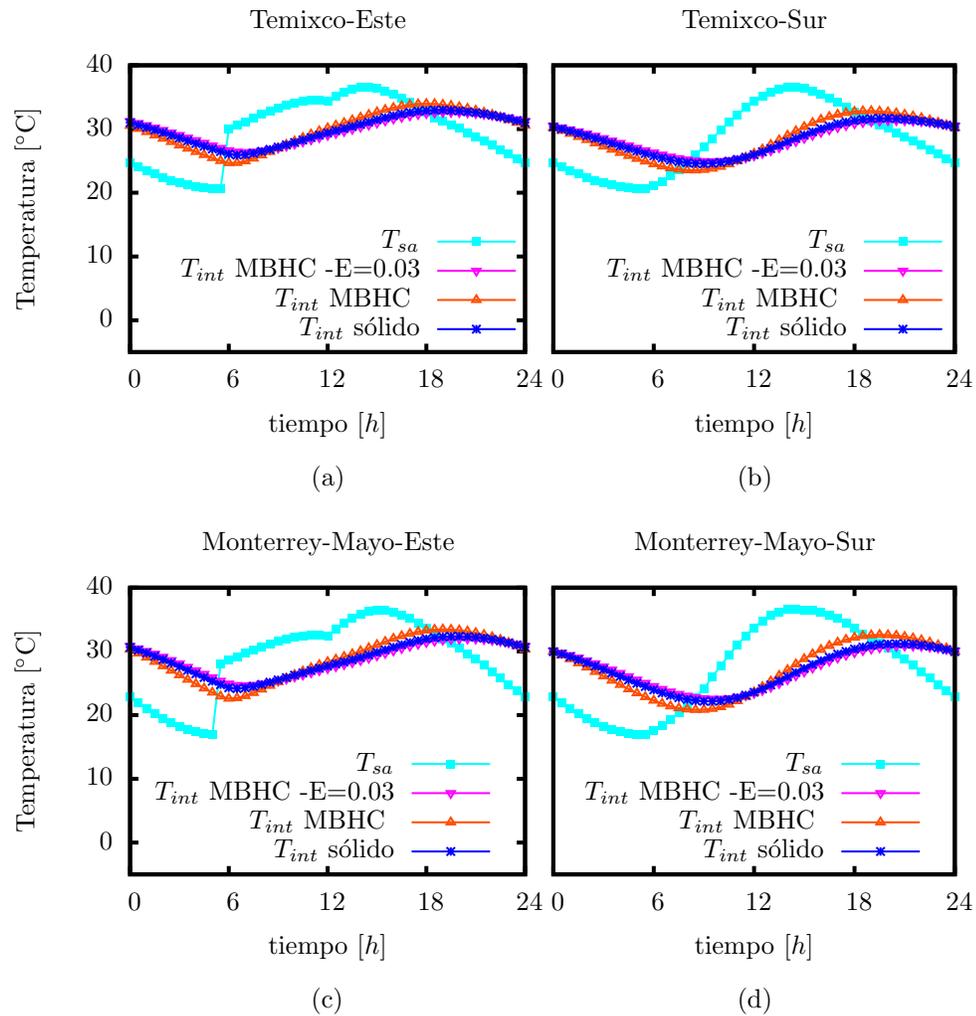


Figura 4.21: Temperatura sol-aire (T_{sa}) y temperaturas del aire al interior de un MBHC-E0.03 (T_{int} MBHC-E0.03), un MBHC (T_{int} MBHC) y un MH (T_{int} MH), bajo condición sin aire acondicionado, en un día típico para la temporada cálida de (a) Toluca, enero, orientación este, (b) Toluca, enero, orientación sur, (c) Monterrey, enero, orientación este y (d) Monterrey, enero, orientación sur.

frías (figura 4.20) y Te, Mo-May que representan las temporadas cálidas (figura 4.21). Puede notarse que la menor oscilación es la obtenida con el MBHC-E0.03, seguida del MH, finalmente la mayor oscilación es observada en el MBHC. Cualitativamente el MBHC-E0.03 tiene un mejor comportamiento térmico.

Las figuras 4.22 y 4.23 muestran el flujo de calor (Q'') de un MBHC-E0.03, MBHC y un MH, en las orientaciones este y sur. Para las temporadas frías: To y Mo-Ene y las cálidas Te y Mo-May. Se puede notar que la inversión en el flujo de calor se presenta primero en el caso del MBHC-E0.03. Asimismo, hay mayor flujo de calor en el MBHC, seguido del MH y finalmente el menor flujo de calor se observa en el MBHC-E0.03. Aunque entre los dos últimos sistemas constructivos la diferencia es muy pequeña.

Calculo de los mecanismos de transferencia de calor

De la misma forma que se analizó en las secciones anteriores, se calculó la contribución de cada mecanismo a la transferencia de calor. En la tabla 4.6 se representan los porcentajes del flujo de calor para un MBHC-E0.03 y un MBHC, para los cuatro casos de estudio: To, Te, Mo-Ene y Mo-May, en las orientaciones este y sur. Como era de esperarse, el mecanismo de radiación disminuyó considerablemente, de 59-65 % hasta 4-5 %, el mecanismo de conducción pasó de 22- 26 % hasta 75-77 %, siendo el mecanismo predominante y finalmente la convección aumentó de 12- 16 % a 18 - 21 %.

Desempeño térmico

En esta sección se presentan los parámetros de desempeño térmico para un MBHC-E0.03, comparándolo con un MBHC y un MH. Los parámetros analizados son la energía transferida ET , el factor de decremento sol-aire FD_{sa} y el tiempo de retraso TR .

La figura 4.24 muestra la ET a través de un MBHC-E0.03, un MBHC y un MH, durante un día típico para los cuatro casos: To y Mo-Ene, que representan las temporadas frías y las temporadas cálidas Te y Mo-May, en las orientaciones este (figura 4.24 (a)) y sur (figura 4.24 (b)). Se puede ver que la energía transferida a través del MBHC es mayor que la energía transmitida a través del MH, que a su vez es mayor que la energía transmitida a través del MBHC-E0.03. Siendo esta última entre 27 y 33 % menor que la energía transferida a través del MBHC y entre 6 y 12 % menor para la energía transferida a través del MH, en ambas

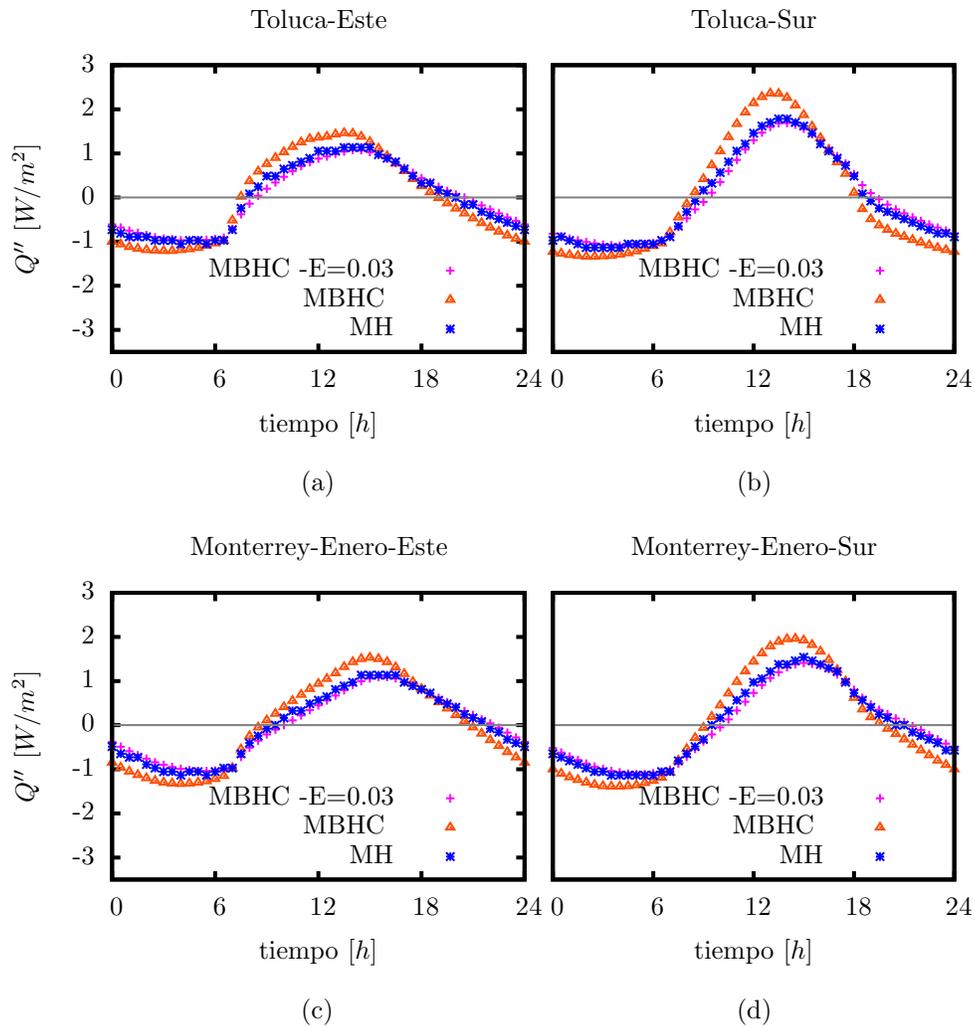


Figura 4.22: Flujo de calor Q'' [W/m^2] en un MBHC-E0.03, un MBHC y un MH, bajo condición sin aire acondicionado, en un día típico para la temporada fría de (a) Toluca, enero, orientación este, (b) Toluca, enero, orientación sur, (c) Monterrey, enero, orientación este y (d) Monterrey, enero, orientación sur.

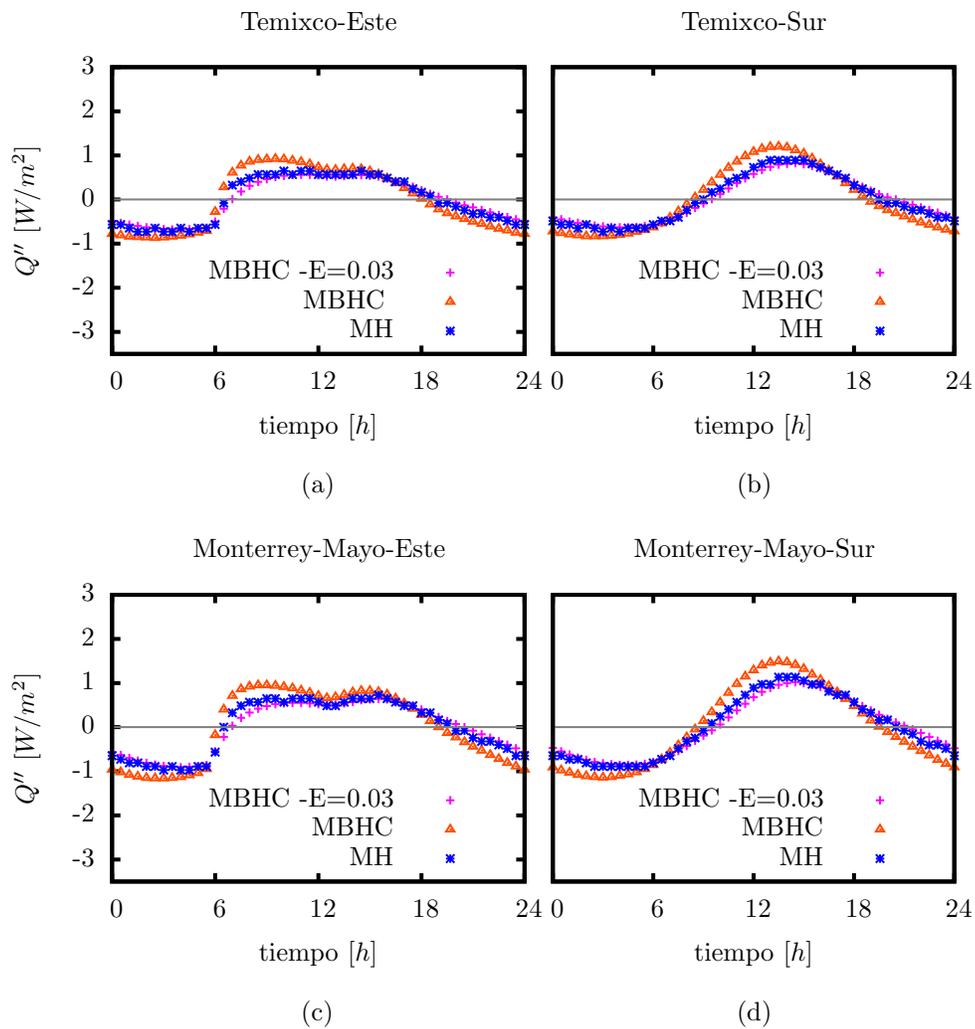


Figura 4.23: Flujo de calor Q'' [W/m^2] en un MBHC-E0.03 , un MBHC y un MH, bajo condición sin aire acondicionado, en un día típico para la temporada cálida de (a) Temixco, mayo, orientación este, (b) Temixco, mayo, orientación sur, (c) Monterrey, mayo, orientación este y (d) Monterrey, mayo, orientación sur.

Porcentaje de la transferencia de calor por mecanismo								
MBHC-E0.03								
Mecanismo	Este				Sur			
	To [%]	Te [%]	Mo-Ene [%]	Mo-May [%]	To [%]	Te [%]	Mo-Ene [%]	Mo-May [%]
Conducción	77	76	77	77	75	75	77	76
Convección	19	20	18	18	21	21	18	19
Radiación	4	4	5	4	4	4	5	5
MBHC								
Conducción	26	25	23	22	25	26	23	23
Convección	15	15	13	13	16	15	12	13
Radiación	59	60	64	65	59	59	65	64

Tabla 4.6: Porcentaje de la transferencia de calor promedio sobre un día típico de cada uno de los mecanismos de transferencia de calor para un MBHC-E0.03 y MBHC, para las orientaciones este y sur, bajo condición sin aire acondicionado, para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May).

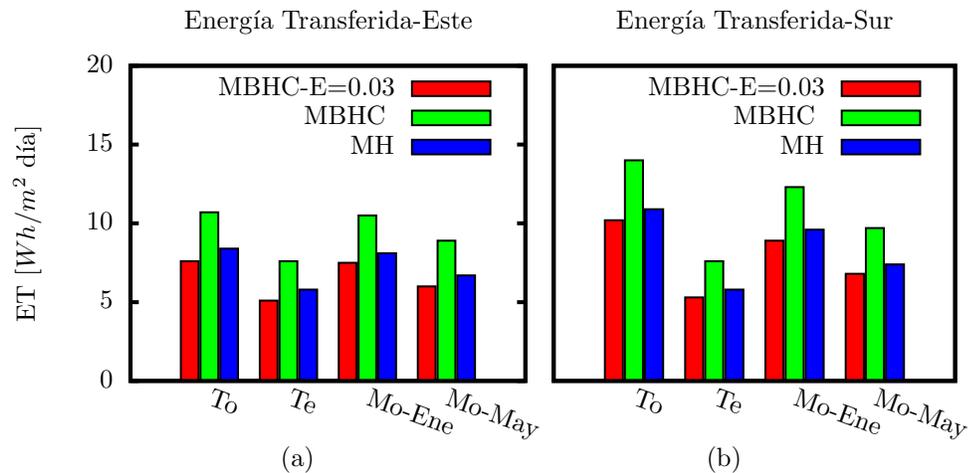


Figura 4.24: Energía transferida por unidad de área ET , en un MBHC-E0.03, un MBHC y un MH (sólido) para las orientaciones este (a) y sur (b). Bajo condición sin aire acondicionado, en un día típico para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May).

orientaciones. Por lo que evaluando con este parámetro, el sistema constructivo con mejor desempeño térmico es el MBHC-E0.03.

La figura 4.25 muestra el factor de decremento sol-aire y el tiempo de retraso para un MBHC, un MBHC-E0.03 y un MH, durante un día típico para los cuatro casos: To y Mo-Ene, que representan las temporadas frías y las temporadas cálidas Te y Mo-May, en las orientaciones este y sur. El FD_{sa} (figura 4.25 (a) y (b) orientaciones este y sur, respectivamente) es menor para el MBHC-E0.03, entre un 0.07 y 0.11 con respecto al MH y entre 0.15 y 0.19 para el MBHC. Lo cual indica que con respecto a este parámetro, el MBHC-E0.03 tiene el mejor desempeño térmico. El TR es mayor para el MBHC-E0.03, entre 9 y 15% con respecto al MH y entre 26 y 39% aproximadamente con respecto al MBHC. Reafirmando que el MBHC-E0.03 tiene el mejor desempeño térmico.

4.4.2. Resultados bajo condición con aire acondicionado

Calculo de los mecanismos de transferencia de calor

En este apartado se presentan los porcentajes promedio de cada uno de los mecanismos de transferencia de calor tal como se calcularon en la sección 4.3.

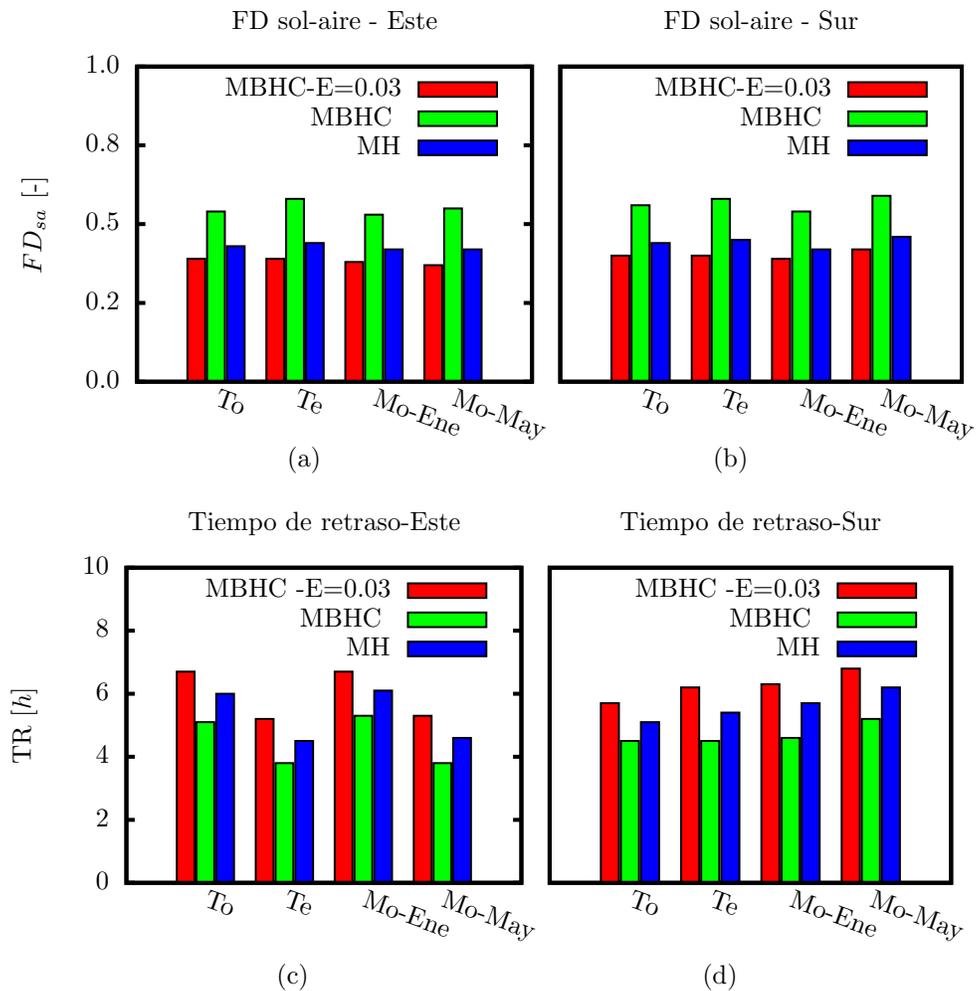


Figura 4.25: Factor de decremento sol-aire (FD_{sa}) y tiempo de retraso (TR) de un MBHC-E0.03, un MBHC y un MH para las orientaciones este (a) y sur (b). Bajo condición sin aire acondicionado, en un día típico para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May). (a) FD este, (b) FD sur, (c) TR este y (d) TR sur

Porcentaje de la transferencia de calor por mecanismo								
Mecanismo	Este				Sur			
	To [%]	Te [%]	Mo-Ene [%]	Mo-May [%]	To [%]	Te [%]	Mo-Ene [%]	Mo-May [%]
Conducción	64	65	64	64	62	66	63	64
Convección	32	31	32	32	35	30	33	32
Radiación	2	3	2	3	2	3	2	3

Tabla 4.7: Porcentaje de la transferencia de calor promedio sobre un día típico de cada uno de los mecanismos de transferencia de calor para un MBHC-E0.03, para las orientaciones este y sur. Bajo condición con aire acondicionado, para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May).

La tabla 4.7 muestra los porcentajes promedio de cada uno de los porcentajes de transferencia de calor para los cuatro casos de estudio, en las orientaciones este y sur. Se puede ver que la contribución conductiva representa la mayor contribución, entre 62 y 66 %, seguida de la contribución convectiva, entre 30 y 35 %, finalmente la contribución radiativa, entre 2 y 3 %.

Desempeño térmico

En esta sección se analizan los parámetros de desempeño térmico para una condición con aire acondicionado. Los parámetros que se analizan son la carga de calentamiento Q_{cal} , la carga de enfriamiento Q_{enf} y el factor de decremento superficial FD_s .

La figura 4.26 muestra la carga total, compuesta por la C_{cal} y C_{enf} de un MBHC-E0.03, un MBHC y un MH, orientaciones este (figura 4.26 (a)) y sur (figura 4.26 (b)), bajo condición con aire acondicionado, para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May). Se puede ver que la carga total en un MBHC-E0.03 es entre 29 y 35 % menor que en el MBHC, en ambas orientaciones. Mientras que es entre un 39 y 45 % menor que en el caso del MH. Por lo que evaluando con este parámetro, el sistema constructivo con mejor desempeño térmico es el MBHC-E0.03.

La figura 4.27 muestra el FD_s para todos los casos: To, Te, Mo-Ene y

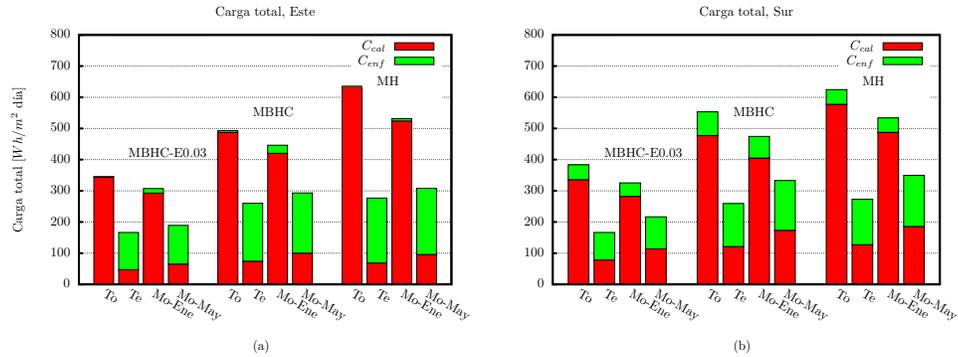


Figura 4.26: Carga total CT , compuesta por la carga de calentamiento (C_{cal}) y enfriamiento (C_{enf}) de MBHC-E0.03, un MBHC y un MH, en las orientaciones este (a) y sur (b). Bajo condición con aire acondicionado, para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May).

Mo-May en las orientaciones este y sur. El factor de decremento superficial es menor para el caso del MBHC-E0.03. Aproximadamente entre 0.10-0.15 menor que MBHC y entre 0.24 y 0.27 menor que el MH. Lo que reafirma que el sistema constructivo con mejor desempeño térmico es el MBHC-E0.03, seguido del MBHC, finalmente el sistema constructivo con peor desempeño térmico es el MH.

Por lo que el sistema constructivo propuesto, MBHC-E0.03, tiene un desempeño térmico considerablemente mejor que el MBHC y el MH, bajo condición con aire acondicionado.

4.5. Resumen de los resultados

En este capítulo se analizó la transferencia de calor dependiente del tiempo y el desempeño térmico en un muro de bloque hueco de concreto estándar, con una emisividad $e = 0.9$ en las superficies de la cavidad de aire (MBHC). y un muro de bloque homogéneo de concreto (MH), en las orientaciones este y sur para los casos: Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May). El estudio se hizo bajo condición sin y con aire acondicionado. Asimismo se propuso un caso de estudio, reduciendo la emisividad del MBHC a $e = 0.03$ (MBHC-E0.03).

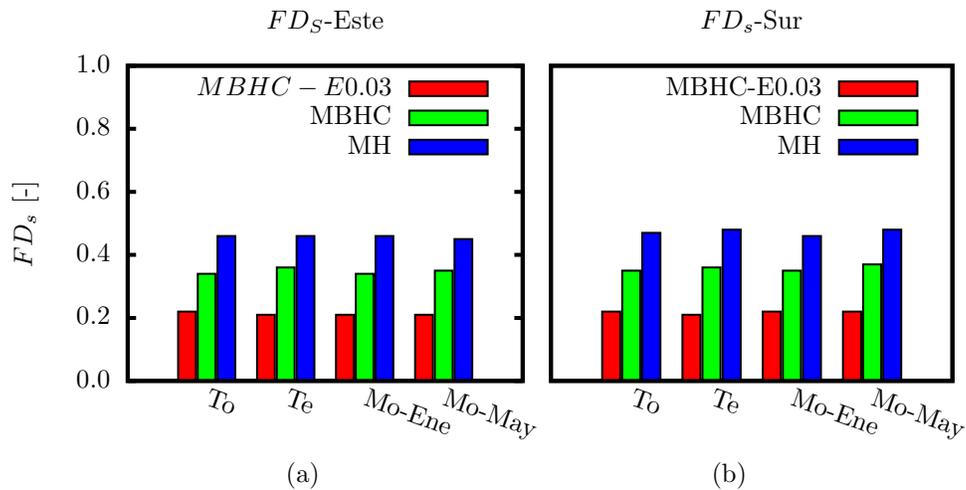


Figura 4.27: Factor de decremento superficial (FD_s) de un MBHC-E0.03, un MBHC y un MH, bajo condición con aire acondicionado. Bajo condición con aire acondicionado, para Toluca en enero (To), Temixco en mayo (Te), Monterrey en enero (Mo-Ene) y Monterrey en mayo (Mo-May).

Bajo condición sin aire acondicionado el MH tuvo un mejor desempeño térmico que el MBHC: La energía transferida fue 27-31 % mayor en el MBHC que en el MH, el FD_{sa} para el MBHC fue entre 0.07 y 0.14 mayor que el MH, el TR para el MH fue entre 11 – 19 % mayor que el MBHC, en el MBHC los máximos fueron mayores que en caso del MH y los mínimos menores, finalmente los valores del grado-hora de discomfort fueron mayores en el MBHC que en el MH en casi todos los casos.

Bajo condición con aire acondicionado el MBHC tuvo mejor desempeño térmico que el MH: la carga total del MBHC fue entre 10 y 27 % menor que el MH, el factor de decremento superficial fue entre 0.11 y 0.14 menor en el MBHC comparado con el MH.

En las dos condiciones sin y con aire acondicionado, el mecanismo de transferencia de calor predominante fue el radiativo: entre 59 y 66 % bajo condición sin aire acondicionado y entre 53 y 58 % bajo condición con aire acondicionado. Seguido del mecanismo conductivo: entre 22 y 26 % bajo condición sin aire acondicionado y entre 31 y 34 % bajo condición con aire acondicionado. Finalmente el mecanismo convectivo fue el de menor contribución: entre 12 – 15 % para ambas condiciones.

Debido a que la contribución radiativa tiene la mayor contribución, se propuso reducir la radiación, reduciendo la emisividad en los bloques huecos de $e = 0.9$ a $e = 0.03$ a esta modificación del MBHC se le llamó MBHC-E0.03. La condición $e = 0.03$ podría obtenerse poniendo un recubrimiento de aluminio pulido en las superficies interiores de la cavidad. Los resultados fueron comparados con MBHC y con un MH. Se obtuvo una contribución radiativa entre 4 y 5 %, conductiva de 75 y 77 % y convectiva entre 18 y 21 %.

Se determinó que en condición sin aire acondicionado el MBHC-E0.03 tuvo un mejor desempeño térmico que el MH que a su vez tuvo mejor desempeño que el MBHC. La energía transferida a través del MBHC-E0.03 fue entre 27 y 33 % menor que la energía transferida a través del MBHC y entre 6 y 12 % menor para la energía transmitida a través del MH, en ambas orientaciones. El factor de decremento sol-aire fue menor para el MBHC-E0.03, entre un 0.07 y 0.11 con respecto al MH y 0.15 y 0.19 para el MBHC. Finalmente, el tiempo de retraso fue mayor para el MBHC-E0.03, entre 9 y 15 % con respecto al MH y entre 26 y 39 % aproximadamente con respecto al MBHC.

En condición con aire acondicionado el MBHC-E0.03 tuvo mejor desempeño que el MBHC, que a su vez tuvo mejor desempeño térmico que el MH. La carga total en el MBHC-E0.03 fue entre 29 y 35 % menor que en el MBHC, mientras que entre un 39 y 45 % menor que en el caso del MH. El factor de decremento superficial fue menor para el caso de MBHC-E0.03: entre 0.10 y 0.15 menor que el MBHC y entre 0.24 y 0.27 menor que el MH.

Bibliografía

- [1] Key World Energy Statistics. *International Energy Agency*, 2014.
- [2] Cabanillas E., Borbón A., and Pérez B. Determinación experimental y contraste numérico de la resistencia térmica de un muro de bloques de concreto hueco. *Información Tecnológica*, 21, 2010.
- [3] Sitio web de la comisión nacional para el uso eficiente de la energía. www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/; consultado el 1 de octubre de 2015.
- [4] Huelsz G., Tovar R., and Catalán R. Sistemas constructivos de muros y techos de la envolvente utilizados en la zona de Temixco. *Proyecto 118665: Desarrollo y validación de una metodología para estimar los impactos en el ahorro de energía por el uso de sistemas pasivo-constructivos en la edificación para diferentes climas de México*, 2012.
- [5] Rosas A. and Gonzáles L. Sistemas constructivos de muros y techos de la envolvente utilizados en la zona de Tampico, Tamaulipas. *Proyecto 118665: Desarrollo y validación de una metodología para estimar los impactos en el ahorro de energía por el uso de sistemas pasivo-constructivos en la edificación para diferentes climas de México*, 2012.
- [6] Sitio web de International Energy Agency (IEA). www.iea.org/topics/sustainablebuildings/; consultado el 1 de octubre de 2015.
- [7] Pérez L., Ortiz J., and Pout C. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40:394–398, 2008.

- [8] Balance Nacional de Energía 2013. *Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico*, México, 2014.
- [9] Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001, eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales. 2001.
- [10] Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011, eficiencia energética en edificaciones.- envolvente de edificios para uso habitacional. 2011.
- [11] Ait taleb T., Abdelbaki A., and Zrikem Z. Numerical simulation of coupled heat transfers by conduction, natural convection and radiation in hollow structures heated from below or above. *International Journal of Thermal Sciences*, 47:378–387, 2008.
- [12] Al-Khameis M., Mahmoud M., Ben-Nakhi A., and Mahmoud A. Coupled heat transfer modes for calculation of cooling load through hollow concrete building walls. *Journal of Building Performance Simulation*, pages 1940–1507, 2010.
- [13] Antar M. and Ben-Nakhi A. Conjugate conduction convection and radiation heat transfer through hollow autoclaved aerated concrete blocks. *Journal of Building Performance Simulation*, 5:248–262, 2012.
- [14] Antar M. Thermal Radiation role in conjugate heat transfer across a multiple cavity building block. *Mechanical Engineering Department*, 35:3508–3516, 2010.
- [15] Shu C. and Wee K.H. Numerical simulation of natural convection in a square cavity by SIMPLE-generalized differential quadrature method . *Computers and Fluids*, 31:209–226, 2001.
- [16] Borbón A., Cabanillas E., and Pérez B. Modelación y simulación de la transferencia de calor en un muros de bloques de concreto hueco. *Información Tecnológica*, 21:27–38, 2009.
- [17] A. Borbón, Cabanillas E., and Pérez B. Determinación experimental de la resistencia térmica de un muro de bloques de concreto hueco. *Semana Nacional de la Energía Solar XXXIII*, pages 163–176, 2010.
- [18] B. Pérez, Cabanillas R., and Hinojosa J. Estudio Numérico de la resistencia térmica en muros de bloques de concreto hueco con aislamiento. *Información Tecnológica*, 22:27–38, 2010.

- [19] Oluwole O., Joshua J., and Nwagwo H. Finite Element Modeling of Low Heat Conducting Building Bricks. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 11:800–806, 2012.
- [20] Abdelbaki A., Zrikem Z., and Haghigat F. Identification of empirical transfer function coefficients for a hollow tile based on detailed models of coupled heat transfer. *Building and Environment*, 36:139–148, 1999.
- [21] Al-Jabri K.S., Hago A.W., Al-Nuaimi A.S., and Al-Saidy A.H. Concrete blocks for thermal insulation in hot climate. *Cement and Concrete Research*, 35:1472 – 1479, 2005.
- [22] Antar M. Conjugate conduction natural convection heat transfer in a hollow building block. *Applied Thermal Engineering*, 29:3716–3720, 2009.
- [23] Reflective Insulation, Radiant Barriers And Radiation Control Coatings. *Reflective Insulation Manufacturers Association*, 2002.
- [24] Sitio web del Oak Ridge National Laboratory. <http://web.ornl.gov/sci/ees/etsd/btrc/RadiantBarrier/RBFactSheet2010.pdf>; consultado el 15 de Octubre de 2015.
- [25] Sitio web de la empresa Energy Attic. www.energyattic.com/tx/testimonials/; consultado el 15 de Octubre de 2015.
- [26] Duffie J. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley, 2013.
- [27] Bejan A. *Heat Transfer*. Jhon Wiley & Sons, Inc, 1993.
- [28] Patankar S. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere publishing corporation, 1980.
- [29] Wright J. L. A correlation to quantify convective heat transfer Between Vertical Window Glazings . *ASHRAE Transactions*, 102:940–946, 1996.
- [30] Barrios G., Huelz G., Rojas J., Ochoa J.M., and Marincic I. Envelope wall/roof thermal performance for non air-conditioned buildings. *Energy and Buildings*, 50:120–127, 2012.