



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
EN ENERGÍA – DISEÑO BIOCLIMÁTICO**

**SIMULACIÓN TÉRMICA DE EDIFICACIONES
CON ENERGYPLUS Y ENER-HABITAT:
ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN ENTRE LOS
COMPONENTES DE LA ENVOLVENTE**

T E S I S

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN INGENIERÍA**

P R E S E N T A:

ING. JORGE MIGUEL CASAS ARREDONDO

T U T O R:

**DR. GUILLERMO BARRIOS DEL VALLE
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES**

MÉXICO, D.F., AGOSTO 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



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: Dra. Guadalupe Huelsz Lesbros

Secretario: Dr. Jorge Antonio Rojas Menéndez

Vocal: Dr. Ramón Tovar Olvera

Suplente: Dr. Pablo David Elías López

Instituto de Energías Renovables, Temixco, Morelos, México.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Guillermo Barrios del Valle

FIRMA

Agradecimientos:

Agradezco al CONACyT por la beca otorgada.

Agradezco a mis padres por darme la vida y apoyarme a lo largo de ella.

Agradezco a mi tutor por guiarme y al grupo de diseño bioclimático por respaldarme.

Agradezco a mis maestros, a mis compañeros y a todas las personas que hacen posible la marcha del IER, por brindarme una comunidad y un espacio.

Contenido

Resumen	III
Índice de figuras	VIII
1. Introducción	1
2. Modelo de conducción en capas homogéneas en EnergyPlus y Ener-Habitat	8
2.1. EnergyPlus	8
2.2. Ener-Habitat	10
2.3. Modelo de conducción de calor	11
3. Simulación en EnergyPlus con diferencias finitas y funciones de transferencia	15
3.1. Características de las simulaciones	16
3.2. Análisis del método de diferencias finitas	17
3.3. Análisis del método de funciones de transferencia	22
3.4. Conclusiones	23
4. Interacción entre los componentes de la envolvente	32
4.1. Características de las simulaciones	33
4.2. Parámetros para estudiar la interacción de la envolvente	34
4.3. Condición sin aire acondicionado	37
4.4. Condición con aire acondicionado	43
4.5. Análisis de la interacción entre los componentes de la envolvente	48

<i>Contenido</i>	II
4.6. Conclusiones	56
5. Validación de Ener-Habitat con EnergyPlus	59
5.1. Características de las simulaciones	60
5.2. Parámetros para realizar la validación	62
5.3. Condición sin aire acondicionado	63
5.4. Condición con aire acondicionado	70
5.5. Conclusiones	72
6. Conclusiones finales	75

Resumen

En esta tesis se llevan a cabo tres actividades. Primero se realiza un estudio paramétrico en EnergyPlus con el fin de seleccionar el modelo de transferencia de calor adecuado para este trabajo. En segundo lugar se hace uso de EnergyPlus para demostrar que existe una interacción importante entre los componentes de la envolvente de una edificación cuando se tiene una condición sin aire acondicionado. Por último, se valida la herramienta Ener-Habitat con el programa EnergyPlus.

En el estudio paramétrico con EnergyPlus se puede concluir que el método de funciones de transferencia es buena opción, ya que proporciona resultados consistentes con un tiempo de cómputo menor que el método de diferencias finitas y con la ventaja de manejar un solo parámetro, las iteraciones por hora. Además, el modelo de diferencias finitas presenta un parámetro mal implementado en el código fuente de EnergyPlus, el criterio de convergencia, lo que puede generar resultados erróneos al aumentar el número de nodos. En este trabajo se propuso una nueva forma del criterio de convergencia que permite más flexibilidad y da la posibilidad de aumentar el número de nodos a un mayor nivel.

Para demostrar la interacción entre los componentes de la envolvente, se realizan una serie de análisis en EnergyPlus usando cinco módulos formados por distintos sistemas constructivos, bajo condiciones con y sin aire acondicionado. En este trabajo se vio un ejemplo de interacción en donde la energía que atraviesa al módulo, entra a través del techo y la pared Este, pero en el mismo momento sale por el piso y el resto de las paredes. Se puede concluir que sí hay una interacción importante entre los componentes de la envolvente cuando no se usa aire acondicionado. Esta interacción se debe tomar

en cuenta cuando se busque hacer un análisis térmico de la edificación, es decir, se debe realizar un análisis integral de la edificación que estudie simultáneamente la transferencia de calor a través de todos los componentes de la envolvente, incluyendo al piso.

Para la validación de Ener-Habitat con EnergyPlus se buscó igualar las condiciones de Ener-Habitat en las simulaciones con EnergyPlus, por lo que se considera un módulo en el que sólo existe transferencia de calor a través del techo, mientras que los muros y el piso se definen como adiabáticos, sin masa térmica y sin emitancia. Se simula bajo condiciones con y sin aire acondicionado, para un mes cálido y un mes frío. Se concluye que Ener-Habitat y EnergyPlus evalúan de la misma forma el orden del desempeño térmico de los sistemas constructivos al usar la energía transferida a través de un componente o el factor de decremento sol-aire para el caso sin aire acondicionado y la carga térmica de enfriamiento y calentamiento para el caso con aire acondicionado. Para la condición sin aire acondicionado, para el parámetro de E_{entra} , se obtiene un error relativo promedio de 4.93 % para el mes cálido y de 10.00 % para el mes frío. Para la condición con aire acondicionado, para el parámetro de C_{enf} , la diferencia relativa promedio es de 15.83 % para el mes cálido y de 9.84 % para el mes frío. Para C_{cal} , se obtiene una diferencia relativa promedio de 3.89 % para el mes cálido y de 3.28 % para el mes frío.

Lista de Figuras

1.1. Porcentajes del consumo energético mundial en el 2013 atribuible al transporte, la industria y las edificaciones, de acuerdo a la UNECE.	2
3.1. Temperatura del aire interior variando las iteraciones por hora (τ) para (a) CAe y (b) EPSext, con $C = 3$ y $c_c = 0.002$. Las líneas correspondientes a $\tau = 20$ y $\tau = 30$ se encuentran por debajo de la de $\tau = 60$	24
3.2. Error relativo máximo (e_r) variando las iteraciones por hora (τ) para (a) CAe y (b) EPSext, con $C = 3$ y $c_c = 0.002$	25
3.3. Temperatura del aire interior variando el número de nodos (n) para (a) CAe y (b) EPSext, con $\tau = 60$ y $c_c = 0.002$	26
3.4. Temperatura del sólido en función de la posición, para varios números de nodos (n), utilizando el c_c de E+ ($c_c = 1 \times 10^{-5}$).	27
3.5. Temperatura del sólido en función de la posición, para varios números de nodos (n), utilizando el c_c propuesto ($c_c = 1 \times 10^{-5}$).	27
3.6. Error promedio (<i>error</i>) en función de c_c , usando el c_c de Energy-Plus (\times) y el c_c propuesto (\circ), para (a) $n = 50$, (b) $n = 100$, (c) $n = 200$, (d) $n = 400$, (e) $n = 800$	28
3.7. Temperatura del aire interior variando las iteraciones por hora (τ) para (a) CAe y (b) EPSext, usando el método de funciones de transferencia.	29
3.8. Error relativo máximo (e_r) variando las iteraciones por hora (τ) para (a) CAe y (b) EPSext, usando el método de funciones de transferencia.	30

3.9.	Carga térmica total al usar aire acondicionado, variando las iteraciones por hora (τ) para (a) CAe y (b) EPSext, utilizando el método de funciones de transferencia.	31
4.1.	Factor de decremento sol-aire (FD_{sa}) para las paredes Este, Norte, Oeste, Sur y el techo, para cada sistema constructivo, sin aire acondicionado. Para el piso no se puede calcular el DF_{sa} pues no incide radiación solar sobre éste.	38
4.2.	Energía transferida (E_{entra}, E_{sale}) a través de las paredes Este, Norte, Oeste, Sur, el techo y el piso, para cada sistema constructivo, sin aire acondicionado.	40
4.3.	Factor de decremento (FD) para cada sistema constructivo, sin aire acondicionado.	42
4.4.	Energía transferida a través de toda la envolvente ($E_{env_{entra}}, E_{env_{sale}}$) para cada sistema constructivo, sin aire acondicionado.	43
4.5.	Energía transferida (E_{entra}, E_{sale}) a través de las paredes Este, Norte, Oeste, Sur, el techo y el piso, para cada sistema constructivo, con aire acondicionado.	45
4.6.	Carga térmica de enfriamiento (C_{enf}) y calentamiento (C_{cal}) a través de toda la envolvente para cada sistema constructivo, con aire acondicionado.	47
4.7.	Carga térmica total (C_{total}) transferida a través de toda la envolvente para cada sistema constructivo, con aire acondicionado.	48
4.8.	Flujo de calor para cada componente de la envolvente (q'') y para toda la envolvente (q''_{env}) a lo largo del día, usando CAe. Análisis: (a) simplificado, sin a/a; (b) real, sin a/a; (c) simplificado, con a/a; (d) real, con a/a.	49
4.9.	Flujo de calor para cada componente de la envolvente (q'') y para toda la envolvente (q''_{env}) a lo largo del día, usando EPS. Análisis: (a) simplificado, sin a/a; (b) real, sin a/a; (c) simplificado, con a/a; (d) real, con a/a.	50
4.10.	Flujo de calor para cada componente de la envolvente (q'') y para toda la envolvente (q''_{env}) a lo largo del día, usando CAD. Análisis: (a) simplificado, sin a/a; (b) real, sin a/a; (c) simplificado, con a/a; (d) real, con a/a.	51

4.11. Flujo de calor para cada componente de la envolvente (q'') y para toda la envolvente (q''_{env}) a lo largo del día, usando EPSext. Análisis: (a) simplificado, sin a/a; (b) real, sin a/a; (c) simplificado, con a/a; (d) real, con a/a.	52
4.12. Flujo de calor para cada componente de la envolvente (q'') y para toda la envolvente (q''_{env}) a lo largo del día, usando EPSint. Análisis: (a) simplificado, sin a/a; (b) real, sin a/a; (c) simplificado, con a/a; (d) real, con a/a.	53
4.13. Factor de decremento (FD) para módulos formados por los sistemas constructivos monocapa. El módulo mixto está formado por techo y pared Este de EPS, piso de CAD y el resto de las paredes de CAe.	55
4.14. Energía transferida a través de toda la envolvente ($E_{enventra}/E_{envsale}$) para módulos formados por los sistemas constructivos monocapa. El módulo mixto está formado por techo y pared Este de EPS, piso de CAD y el resto de las paredes de CAe.	56
5.1. Energía transferida a través del techo obtenida con EnergyPlus (E+) y Ener-Habitat (EH), para cada sistema constructivo, para el día típico de mes cálido.	65
5.2. Factor de decremento sol-aire (FD_{sa}), obtenido con EnergyPlus (E+) y Ener-Habitat (EH), para cada sistema constructivo, para el día típico del mes cálido.	65
5.3. Temperatura del aire interior para cada sistema constructivo, obtenida con EnergyPlus (E+) y Ener-Habitat (EH), para el día típico del mes cálido.	66
5.4. Energía transferida a través del techo, obtenida con EnergyPlus (E+) y Ener-Habitat (EH), para cada sistema constructivo, para el día típico del mes frío.	67
5.5. Factor de decremento sol-aire (FD_{sa}), obtenido con EnergyPlus (E+) y Ener-Habitat (EH), para cada sistema constructivo, para el día típico del mes frío.	68
5.6. Temperatura del aire interior para cada sistema constructivo, obtenida con EnergyPlus (E+) y Ener-Habitat (EH), para el día típico del mes frío.	69
5.7. Carga térmica de (a) enfriamiento (E_{enf}) y (b) calentamiento (E_{cal}), obtenidas con EnergyPlus (E+) y Ener-Habitat (EH), para cada sistema constructivo, para el día típico del mes cálido.	71

- 5.8. Carga térmica de (a) enfriamiento (E_{enf}) y (b) calentamiento (E_{cal}), obtenidas con EnergyPlus (E+) y Ener-Habitat (EH), para cada sistema constructivo, para el día típico del mes frío. En la gráfica (a) el EPSext no muestra transferencia de calor. 73

Capítulo 1

Introducción

Las edificaciones representan un alto consumo de energía en la actualidad. Instituciones como la *International Energy Agency* (IEA) [1] y la *United Nations Economic Commission for Europe* (UNECE) [2] coinciden en que las edificaciones consumen alrededor del 40 % del gasto energético mundial. En el caso de México, según el Balance Nacional de Energía 2011, el sector residencial, comercial y público consumen en conjunto el 20 % de gasto energético del país [3].

En la Figura 1.1 se muestra el consumo energético mundial porcentual en el 2013 dividido en los sectores de industria, transporte y edificaciones, de acuerdo a la UNECE. Se puede apreciar que la industria consume el 28 %, el transporte el 31 % y las edificaciones el 41 % del gasto mundial de energía.

Según esta ponderación, las edificaciones son el componente que más energía consume, por encima del transporte y la industria. Es por eso que las edificaciones significan un problema y un reto en cuestión de consumo energético. En este sentido, la envolvente de las edificaciones juega un papel muy importante puesto que a través de ésta se transfiere la energía térmica al interior o hacia el exterior de la edificación. La envolvente está formada por el conjunto de paredes, ventanas y techos que cubren un espacio habitable.

Desde el punto de vista del acondicionamiento ambiental, existen dos condiciones de uso al interior de las edificaciones: con y sin aire acondicionado. Cuando se usa aire acondicionado y se cuenta con una temperatura fija al

interior, el parámetro a evaluar es la carga térmica necesaria para acondicionar el espacio. Cuando no se usa aire acondicionado, los parámetros para evaluar a la envolvente pueden ser la energía que entra o sale a través de ésta o el factor de decremento. Considerando esto, la energía transmitida a través de la envolvente se ve reflejada en el gasto energético cuando se usa aire acondicionado y en el confort térmico de los habitantes cuando éste no se usa. Entre menor sea el gasto energético o mayor el confort térmico, se dice que es mejor el desempeño térmico de una edificación.

Con el fin de diseñar adecuadamente la envolvente, es recomendable realizar un análisis térmico y energético de la edificación a construir. Sin embargo, no siempre es factible realizar este análisis, por lo que deberían haber lineamientos para construir adecuadamente las edificaciones conforme al clima, lugar y condición de uso (con o sin aire acondicionado) y que estos lineamientos se tomen en cuenta en las normativas.

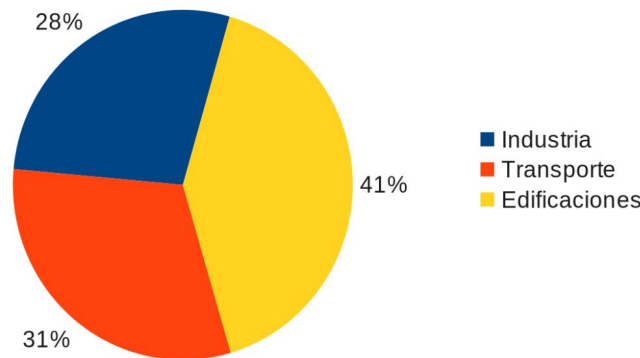


Figura 1.1: Porcentajes del consumo energético mundial en el 2013 atribuible al transporte, la industria y las edificaciones, de acuerdo a la UNECE.

En México existen normativas que buscan aumentar la eficiencia energética de las edificaciones. Se trata de la NOM-020-ENER-2011, eficiencia energética de edificaciones, envolvente de edificios de uso habitacional [4] y la NOM-008-ENER-2001, eficiencia energética de edificaciones, envolvente de edificios no residenciales [5]. Estas normas tienen por objeto limitar la ganancia de calor a través de la envolvente de las edificaciones, con el objeto de racionalizar el uso de la energía de los sistemas de enfriamiento.

Para evaluar el rendimiento energético de una edificio, se comparan las ganancias de calor del edificio proyectado con las ganancias de calor de un

edificio de referencia. El criterio que debe cumplir el edificio proyectado es que su ganancia de calor al interior sea menor o igual que la del edificio de referencia.

Estas normas se basan en un modelo de transferencia de calor independiente del tiempo, por lo que únicamente considera una propiedad física de los materiales que componen la envolvente, la cual es la conductividad térmica (k).

La NOM-020 y la NOM-008 están limitadas en cuanto a su alcance por varias razones:

- Sólo contemplan edificaciones con condición de aire acondicionado para enfriamiento, por lo que no consideran a todos los climas del país, sin embargo es de carácter nacional, aplicable a todo el territorio del país.
- Realizan un análisis de transferencia de calor independiente del tiempo, por lo que sólo consideran la capacidad de la envolvente para aislar y desprecian la capacidad para almacenar la energía.
- Sólo consideran muros o techos constituidos por capas homogéneas.
- Únicamente consideran cuatro orientaciones (Norte, Sur, Este y Oeste) además del techo, lo cual impide evaluar configuraciones reales.
- El único sistema pasivo que propone para el control medio ambiental son las protecciones solares y su metodología de evaluación es poco precisa.
- No permiten evaluar alternativas bioclimáticas como ventilación, enfriamiento evaporativo, etc.

El mal diseño de la envolvente de las edificaciones en México ocasiona severos problemas de vivienda, por ejemplo, a pesar de que las grandes constructoras edifican viviendas masivamente, muchas de estas viviendas se quedan deshabitadas, en parte por su mal diseño bioclimático que ocasiona un bajo confort térmico o una alta demanda de energía debida al uso de aire acondicionado.

Para poder diseñar las edificaciones adecuadamente en ausencia de normativas aptas, es importante realizar análisis más efectivos. Existen programas computacionales que proveen una buena opción para este fin, como lo son EnergyPlus o Ener-Habitat.

EnergyPlus es un programa de código abierto y uso gratuito que permite realizar simulaciones térmicas y energéticas de las edificaciones. Este programa se basa en un modelo de transferencia de calor dependiente del tiempo.

Ener-Habitat es una herramienta en línea de libre acceso que compara el desempeño térmico de sistemas constructivos opacos ubicados en paredes o techos. Un sistema constructivo se define como el conjunto de capas de materiales que forman un componente de la envolvente. Al igual que EnergyPlus, Ener-Habitat también se basa en un análisis dependiente del tiempo.

La ventaja de un análisis dependiente del tiempo es que no sólo considera la conductividad térmica (k), sino otras propiedades térmicas de la envolvente de la edificación como lo son 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 no se usa aire acondicionado o cuando se usa de manera intermitente. A la relación de k , ρ y c se denomina difusividad térmica (α).

La intención original de esta tesis era simular la transferencia de calor a través de ventanas, sin embargo, primero se realizaron una serie de simulaciones con el fin de familiarizarse con EnergyPlus y Ener-Habitat y se buscó llegar a los mismos resultados con ambos programas. El parámetro a comparar era la energía transferida a través del techo. Después de muchos intentos fallidos se dedujo que las diferencias entre ambos programas se debían a que EnergyPlus, al realizar un análisis que considera todos los componentes de la envolvente, toma en cuenta la interacción que existe entre componentes, mientras que Ener-Habitat no toma en cuenta esta interacción y sólo analiza a un componente de la envolvente a la vez. Por ello se decidió estudiar en esta tesis la interacción entre los componentes de la envolvente, que no ha sido reportada en la literatura.

Los objetivos de esta tesis son hacer uso de EnergyPlus para analizar la interacción entre los componentes de la envolvente de una edificación y validar la herramienta de Ener-Habitat, usando también EnergyPlus.

Para contextualizar este trabajo, se presenta una revisión bibliográfica sobre los estudios de transferencia de calor a través de capas homogéneas de la envolvente. Varios autores han analizado la transferencia de calor a través de los componentes de la envolvente por medio de métodos numéricos como elemento finito [6], volumen finito implícito [7, 8] y explícito [9, 10, 11], diferencias finitas por Crank-Nicholson [12] y esquema implícito [13], circuito térmico [14, 15] y funciones de transferencia [16]. Otro autor analiza la trans-

ferencia de calor por medio de experimentación [17] y uno más por medio de simulación con EnergyPlus [18]. A continuación se describen brevemente los trabajos citados anteriormente, por orden cronológico.

Chen y Krokosky [6] presentan un modelo de elemento finito para evaluar la transferencia de calor en estado estacionario y transitorio a través de techos y paredes monocapa y multicapa y lo validan con mediciones in situ.

Asan y Sancaktar [12] evalúan el peso de las propiedades termofísicas de las paredes multicapa bajo una condición sin aire acondicionado (sin a/a), resolviendo un modelo de transferencia de calor por medio del método de Crank-Nicholson. Usan el factor de decremento (FD) y el tiempo de retraso (TR) como parámetros de evaluación y encuentran que las propiedades termofísicas, como la conductividad térmica, la densidad y la capacidad calorífica, tienen un efecto muy profundo sobre el FD y el TR.

Ulgen [17] analiza también el efecto de las propiedades termofísicas de las paredes multicapa bajo una condición sin a/a, por medio de experimentación y utilizando los parámetros de FD y TR. Concluye que en los edificios que se habitan todo el día es recomendable una mayor capacidad de almacenamiento térmico que en los edificios que se usan sólo por ciertos intervalos de tiempo.

Al-Saena [8] desarrolla un modelo numérico para evaluar el desempeño térmico de techos multicapa bajo una condición con aire acondicionado (con a/a) y lo resuelve el método implícito de volumen finito. Valida el modelo por medio de la solución analítica exacta.

Kontoleon y Bikas [14] evalúan el efecto que tiene la absorptancia solar de una pared sur multicapa sobre el FD y el TR, bajo una condición sin a/a y utilizando el método de circuito térmico. Concluyen que la absorptancia solar tiene una influencia muy significativa sobre la respuesta térmica de las paredes; al aumentar la absorptancia solar aumenta el FD y disminuye el TR.

Ozel y Pihtili [13] determinan la ubicación óptima del aislamiento para una condición con a/a, resolviendo un modelo de transferencia de calor con el método implícito de diferencias finitas y usando el FD y el TR como parámetros. Encuentran que la mejor configuración es colocar tres capas de aislante del mismo grosor: una al exterior, una al centro y otra al interior.

Aste et al. [18] analizan el efecto de la inercia térmica en el desempeño de edificios aislados térmicamente, bajo una condición con a/a, por medio de simulaciones en Energy Plus. Concluyen que el mejor desempeño térmico lo proporciona el sistema constructivo que tenga una combinación apropiada entre la transmitancia y la admitancia térmica.

Al-Saena y Zedan [7] evalúan el grosor y posición del aislamiento para

mejorar el desempeño térmico para una condición con a/a, resolviendo un modelo de transferencia de calor con el método implícito de volumen finito. Encuentran algo similar que Ozel y Pihtili [13]; el mejor desempeño térmico lo proporciona el caso de una pared con tres capas de aislamiento posicionadas en el exterior, en medio y en el interior respectivamente.

Barrios et al. [9] evalúan el desempeño térmico de seis sistemas constructivos monocapa y multicapa en un edificio con y sin a/a, resolviendo un modelo de transferencia de calor con el método de volumen finito. Concluyen que en el caso con a/a la propiedad del material más importante es la conductividad térmica, mientras que en el caso sin a/a la propiedad más importante es la difusividad térmica.

Gasparella et al. [16] comparan los métodos de diferencias finitas y funciones de transferencia para una condición con a/a y usando paredes multicapa. Concluyen que ambos métodos concuerdan entre sí.

Barrios et al. [10] evalúan el desempeño térmico de cinco sistemas constructivos monocapa y multicapa en un edificio que utiliza aire acondicionado intermitentemente, resolviendo un modelo de transferencia de calor con el método de volumen finito. Deducen que la evaluación térmica de paredes y techos debe realizarse tomando en cuenta las condiciones de operación del sistema de aire acondicionado.

Asimismo, Barrios et al. [11] proponen parámetros para evaluar el desempeño térmico de envolventes monocapa de edificaciones sin a/a. Determinan qué parámetros son efectivos para este fin y cuales no lo son: la energía transferida a través de la envolvente, el FD y los grados-hora de incomodidad son parámetros adecuados, mientras que la transmitancia y la admitancia térmica en estado estacionario y el FD superficial no son parámetros adecuados.

Kontoleon et al. [15] analizan el efecto que tiene la conductividad térmica y la densidad del concreto en el desempeño térmico de paredes multicapa bajo una condición sin a/a, usando el método de circuito térmico. Se presentan los resultados del impacto de la variación de la conductividad térmica y la densidad del concreto sobre el FD y el TR, para todos los sistemas constructivos analizados.

De estos estudios, la mayoría realiza un análisis dependiente del tiempo, mientras que uno [7] realiza un análisis estacionario. Algunos de estos trabajos consideran el uso de aire acondicionado [8, 13, 18, 16, 7], otros consideran una condición sin aire acondicionado [12, 17, 14, 11, 15] y otros contemplan ambas condiciones [9, 10]. Asimismo, algunos consideran a la temperatura exterior periódica [12, 8, 7, 9, 10, 11] y otros la consideran como una constante

[13, 18, 15].

Por otro lado, algunos de los estudios se enfocan al techo [8] otros a las paredes [12, 17, 13, 14, 18, 7, 15] y otros a cualquier componente de la envolvente [6, 16, 9, 10, 11]. Del mismo modo, algunos de éstos estudian el desempeño térmico del material de la envolvente [12, 17, 8, 18, 9, 10, 11], otros el aislamiento térmico óptimo que debe de llevar la envolvente [13, 7] y otros contemplan ambos aspectos [14, 15].

No se han encontrado estudios que traten sobre la interacción entre los componentes de la envolvente de una edificación.

En el capítulo 2 se describen las características y los modelos matemáticos de EnergyPlus y Ener-Habitat. En el capítulo 3 se realiza un estudio de las diferencias entre usar el método de diferencias finitas implícito de primer orden y el método de funciones de transferencia en EnergyPlus. En el capítulo 4 se demuestra que existe una interacción importante entre los componentes de la envolvente cuando se tiene una condición sin aire acondicionado. Por lo tanto se resalta la importancia de analizar toda la envolvente de una edificación y no limitarse a sólo una parte de ella. En el capítulo 5 se realizan una serie de simulaciones con el fin de validar la herramienta Ener-Habitat con el programa EnergyPlus. Por último en el capítulo 6 se presentan las conclusiones finales.

Capítulo 2

Modelo de conducción en capas homogéneas en EnergyPlus y Ener-Habitat

2.1. EnergyPlus

EnergyPlus (E+) es un programa de código abierto que sirve para la simulación energética y térmica de edificaciones; considera las características físicas de una edificación, los sistemas mecánicos asociados a ésta y las personas que aloja. E+ está dirigido a ingenieros de diseño o arquitectos que busquen dimensionar adecuadamente su equipo de HVAC¹, realizar análisis de ciclo de vida u optimizar el desempeño energético de las edificaciones.

Este programa tiene sus orígenes tanto en BLAST como en DOE-2. BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) y DOE-2 (desarrollado por el *Department of Energy* de EUA) fueron desarrollados a finales de los 70 como herramientas de simulación de cargas energéticas. Ambos programas emergen debido a las preocupaciones producidas por la crisis energética de principio de los 70 y al entendimiento de que el consumo energético atribuible a edificaciones es un gran componente de las estadísticas

¹Las siglas HVAC se refieren al conjunto de sistemas de calentamiento, enfriamiento y ventilación (Heating, Ventilating and Air-Conditioning).

del uso de energía en EUA.

Mientras que la primera versión de E+ básicamente contenía características que estaban ligadas con los aspectos térmicos de la edificación, las versiones siguientes consideran otros aspectos como el gasto de agua, la energía consumida por los sistemas eléctricos, la iluminación, la ventilación, etc. A continuación se mencionan algunas características de E+:

- Provee soluciones integrales en las que se acoplan la respuesta de la edificación y de los sistemas dentro de ella.
- Utiliza el código ASCII para sus archivos de entrada y salida, como lo son el archivo de clima y los resultados generados.
- Resuelve usando un balance de energía que toma en cuenta los efectos radiativos y convectivos tanto para las superficies interiores y exteriores de la edificación.
- Realiza un análisis de conducción de calor dependiente del tiempo a través de los elementos de la edificación como son las paredes, pisos y techos.
- Usa un modelo que toma en cuenta la transferencia de calor y masa, considerando la humedad.
- Usa un modelo anisotrópico del cielo que mejora el cálculo de radiación difusa sobre superficies inclinadas.
- Realiza cálculos avanzados sobre sistemas de ventanas que incluyen persianas móviles, ventanas electrocrómicas, etc. Además contiene una extensa librería del desempeño de las ventanas comerciales.
- Contempla cuestiones de luz natural incluyendo el cálculo de iluminación interior, la simulación del deslumbramiento y la carga térmica al usar iluminación artificial.
- Permite simular sistemas de HVAC convencionales y modificados, como el radiativo.
- Lleva a cabo cálculos de la contaminación atmosférica de CO₂, CO, entre otros. Asimismo calcula el consumo de hidrocarburos tanto *in situ* como el debido a la producción remota de energía.

- Incluye modelos de confort basados en la actividad del usuario, vestimenta, temperatura del aire al interior, humedad, etc.

Es importante mencionar que E+ no posee una interfaz amigable para el usuario, pues está planeado para ser el motor de cálculo de otro programa que funja como interfaz gráfica. Existen interfaces de paga como Design Builder² e interfaces libres como Open Studio³. Para mayor información visitar la página de EnergyPlus [19].

2.2. Ener-Habitat

Ener-Habitat (EH) es una herramienta de simulación numérica para comparar el desempeño térmico de sistemas constructivos de techos y muros de la envolvente de una edificación en las condiciones climáticas de las principales ciudades de la República Mexicana. Esta herramienta ha sido desarrollada por académicos con el propósito de colaborar en el diseño y uso de sistemas constructivos de muros y techos de la envolvente acordes al clima y a la condición de operación de la edificación. Este proyecto fue financiado por el Fondo SENER-CONACYT de Sustentabilidad Energética. La herramienta es de acceso gratuito, con previo registro y tiene las siguientes características:

- Realiza simulaciones numéricas de transferencia de calor dependiente del tiempo, lo que permite tomar en cuenta el efecto de la masa térmica y no solo de la resistencia térmica de los materiales constructivos. Este hecho es muy importante en lugares con alta insolación solar y grandes variaciones de temperatura a lo largo del día, como ocurre en la mayor parte del territorio mexicano.
- Evalúa el desempeño térmico de sistemas constructivos formados por capas homogéneas y algunos sistemas constructivos formados por capas homogéneas y una capa no homogénea. Ejemplos de capa no homogénea son el bloque hueco de concreto, la vigueta y bovedilla hueca de concreto y la vigueta y bovedilla de poliestireno.
- Evalúa los sistemas constructivos en dos condiciones de uso, con aire acondicionado o sin aire acondicionado. Con aire acondicionado el

²Para mayor información de Design Builder, véase www.designbuilder.co.uk

³Para mayor información de Open Studio, véase www.openstudio.nrel.gov

parámetro principal de comparación es la carga térmica por unidad de área debida a la transferencia de calor por el sistema constructivo. Sin aire acondicionado los parámetros principales son la energía térmica que entra a la edificación por unidad de área del sistema constructivo y el factor de decremento sol-aire. Es de fácil uso y no requiere de una capacitación especial.

- Evalúa sólo la transferencia de calor por unidad de área del sistema constructivo de muro o techo de la envolvente, por lo que únicamente puede ser usado para seleccionar el mejor sistema constructivo de muros o techos para el clima de interés. No toma en cuenta otros factores en la transferencia de calor total de una edificación como son ventanas, ventilación, personas y equipos, por lo que los resultados no deben ser usados para el dimensionamiento de sistemas de aire acondicionado.
- Puede utilizarse para calcular la transferencia de calor por conducción a través de ventanas y puertas, sin considerar la parte de los marcos y la transferencia de calor por radiación solar en la parte transparente.

Los resultados de la herramienta son con fines comparativos. La temperatura del aire al interior, los valores de la energía y otros parámetros reportados, son resultado de la transferencia de calor exclusivamente a través del sistema constructivo en evaluación. No representan los valores que tendrán en situaciones reales en donde existen otros factores a considerar. Para mayor información visitar la página de Ener-Habitat [20].

2.3. Modelo de conducción de calor

Tanto EnergyPlus como Ener-Habitat usan un modelo de conducción de calor unidimensional y dependiente del tiempo para resolver la transferencia de calor a través de capas homogéneas. Este modelo está dado por

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0, \quad (2.1)$$

donde T es la temperatura, t es el tiempo, ρ es la densidad del material, c es el calor específico, k es la conductividad térmica y x indica la coordenada espacial a lo ancho del sistema constructivo.

Aunque ambos programas usan el mismo modelo, la diferencia radica en que Ener-Habitat usa este modelo para calcular la transferencia de calor a través de un sólo componente, por ejemplo el techo, mientras que Energy-Plus es capaz de aplicar simultáneamente este modelo a cada uno de los componentes que conforman la envolvente.

A continuación se describen los métodos de solución usados por ambos programas para resolver el modelo de transferencia de calor.

Métodos de solución del modelo de transferencia de calor de EnergyPlus

E+ puede utilizar dos métodos de solución de la ecuación de conducción de calor: funciones de transferencia de calor y diferencias finitas. Cabe mencionar que en este apartado sólo se describen los modelos de conducción de calor y no se abordan otros aspectos como la radiación y la humedad, entre otros.

Funciones de transferencia de calor

El método de funciones de transferencia de calor calcula la conducción de calor a través de un elemento a partir de sus temperaturas superficiales interior y exterior. Este método presenta una ecuación lineal con coeficientes constantes que sólo necesitan ser calculados una vez para cada sistema constructivo. Estos coeficientes se denominan funciones de transferencia (FT). El flujo de calor al interior está dado por

$$q''_{int}(t) = -Z_0 T_{int}^{t+1} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{int}^t + Y_0 T_{ext}^{t+1} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{ext}^t - \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{int}{}^t, \quad (2.2)$$

y el flujo de calor al exterior está dado por

$$q''_{ext}(t) = -Y_0 T_{int}^{t+1} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{int}^t + X_0 T_{ext}^{t+1} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{ext}^t - \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ext}{}^t, \quad (2.3)$$

donde X_j son los coeficientes exteriores, Y_j son los coeficientes cruzados, Z_j son los coeficientes interiores, Φ_j son los coeficientes de flujo, nz es el número de términos de temperatura, nq es el número de términos de flujo, T_{int} es la temperatura de la superficie interior, T_{ext} es la temperatura de la superficie

exterior, q''_{ext} es la conducción de calor en la superficie exterior por unidad de área, q''_{int} es la conducción de calor en la superficie interior por unidad de área, el subíndice t representa el tiempo actual y $t + 1$ el tiempo siguiente.

Diferencia finitas

E+ incluye el método de diferencias finitas que es necesario para casos donde se necesite simular materiales con cambio de fase o con conductividad térmica variable. Existen dos diferentes esquemas para el método de diferencias finitas en EnergyPlus: el esquema semi-implícito de Crank-Nicholson de segundo orden y el esquema implícito de primer orden.

El esquema semi-implícito de Crank-Nicholson es de segundo orden con respecto al tiempo y está basado en la solución de Adams-Moulton. La formulación para un nodo interno está dada por

$$\rho c \Delta x \frac{(T_i^{t+1} - T_i^t)}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left\{ \left[k_{i-1} \frac{(T_{i+1}^{t+1} - T_i^{t+1})}{\Delta x} + k_{i+1} \frac{(T_{i-1}^{t+1} - T_i^{t+1})}{\Delta x} \right] + \left[k_{i-1} \frac{(T_{i+1}^t - T_i^t)}{\Delta x} + k_{i+1} \frac{(T_{i-1}^t - T_i^t)}{\Delta x} \right] \right\}, \quad (2.4)$$

donde ρ es la densidad del material, c es el calor específico del material, Δt es el incremento temporal, Δx es el espacio entre nodos, T es la temperatura, i es el nodo analizado, $i+1$ es el nodo adyacente hacia el interior, $i-1$ es el nodo adyacente hacia el exterior, t representa el tiempo actual, $t + 1$ representa el tiempo siguiente, k_{i-1} es la conductividad térmica de la interface entre el nodo i y el nodo $i + 1$ y k_{i+1} es la conductividad térmica de la interface entre el nodo i y el nodo $i - 1$.

El esquema implícito también está basado en la solución de Adams-Moulton y es considerado de primer orden con respecto al tiempo. La ecuación que modela este esquema esta dada por

$$\rho c \Delta x \frac{(T_i^{t+1} - T_i^t)}{\Delta t} = \left[k_{i-1} \frac{(T_{i+1}^{t+1} - T_i^{t+1})}{\Delta x} + k_{i+1} \frac{(T_{i-1}^{t+1} - T_i^{t+1})}{\Delta x} \right]. \quad (2.5)$$

Método de solución del modelo de transferencia de calor de Ener-Habitat

La ecuación 2.1 se resuelve por el método de volúmenes de control usando un esquema implícito, por lo que se escribe como

$$\rho c L_a \frac{(T_i^{t+1} - T_i^t)}{\Delta t} = \left[k_{a_{i+1}} \frac{(T_{i+1}^{t+1} - T_i^{t+1})}{\Delta x} - k_{a_{i-1}} \frac{(T_{i-1}^{t+1} - T_i^{t+1})}{\Delta x} \right], \quad (2.6)$$

donde ρ es la densidad del material, c es el calor específico del material, L_a es la altura del cuarto, Δt es el incremento temporal, Δx es el espacio entre nodos, T es la temperatura, i es el nodo modelado, $i + 1$ es el nodo adyacente hacia el interior, $i - 1$ es el nodo adyacente hacia el exterior, t representa el tiempo actual, $t + 1$ representa el tiempo siguiente, $k_{a_{i+1}}$ y $k_{a_{i-1}}$ son los promedios armónicos de la conductividad.

Al resolver un sistema multicapas cada coeficiente contiene los valores de las propiedades térmicas de la capa correspondiente y en las interfaces se debe usar el promedio armónico de la conductividad, el cual está dado por

$$k_{a_{i+1}} = \frac{2 k_i k_{i+1}}{k_i + k_{i+1}}, \quad (2.7)$$

donde k_i y k_{i+1} son las conductividades térmicas correspondientes al volumen de control i y $i + 1$ respectivamente. Lo mismo se aplica para calcular $k_{a_{i-1}}$.

La ecuación anterior se puede escribir como

$$a_C T_i^{t+1} = a_D T_{i+1}^{t+1} + a_I T_{i-1}^{t+1} + b, \quad (2.8)$$

donde los coeficientes para los nodos interiores son

$$\begin{aligned} a_C &= a_D + a_I + a_C^0, \\ a_D &= \frac{k_{a_{i+1}}}{\Delta x}, \\ a_I &= \frac{k_{a_{i-1}}}{\Delta x}, \\ a_C^0 &= \frac{\rho c L_a}{\Delta t} \quad \text{y} \\ b &= a_C^0 T_i^t. \end{aligned} \quad (2.9)$$

La ecuación 2.8 genera un sistema de n ecuaciones, donde n es el número de nodos usados para discretizar el sistema constructivo. El sistema de ecuaciones forma una matriz tridiagonal que se resuelve usando el algoritmo TDMA (*Tri-Diagonal Matrix Algorithm*).

Capítulo 3

Simulación en EnergyPlus con diferencias finitas y funciones de transferencia

EnergyPlus (E+) resuelve la transferencia de calor dependiente del tiempo por conducción a través de sistemas constructivos utilizando funciones de transferencia o diferencias finitas. Para el método de diferencias finitas existen dos esquemas de solución, el esquema implícito de primer orden y el esquema de Crank Nicholson de segundo orden.

En este capítulo se realiza un estudio paramétrico del método de diferencias finitas implícito de primer orden y del método de funciones de transferencia. Para el método de diferencias finitas se selecciona el esquema implícito de primer orden porque es el mismo que usa Ener-Habitat. Los parámetros usados en E+ para el método de diferencias finitas son las iteraciones por hora, la constante de discretización espacial y el criterio de convergencia, mientras que para el método de funciones de transferencia el único parámetro son las iteraciones por hora.

En la sección 3.1 se describen las características de las simulaciones. En la sección 3.2 se analiza el método de diferencias finitas con sus respectivos parámetros. En la sección 3.3 se analiza el método de funciones de transferencia con su respectivo parámetro. Por último, en la sección 3.4 se presentan

las conclusiones relativas al capítulo.

3.1. Características de las simulaciones

Se simulan módulos de base cuadrada de 2.6 m de ancho (desde la superficie exterior de una pared hasta la superficie exterior de la pared opuesta) y 2.7 m de altura (desde la superficie interior del piso hasta la superficie exterior del techo), sin ventanas, sin infiltración y sin carga térmica interna. La orientación de sus paredes es normal a los puntos cardinales y el techo no tiene inclinación.

Se simulan dos módulos; la envolvente (paredes, piso y techo) de cada uno está compuesto por un solo sistema constructivo. Un módulo está hecho de 0.10 m de concreto aereado (CAe) y el otro módulo está hecho de 0.08 m de concreto de alta densidad con una capa de 0.02 m de poliestireno expandido estándar al exterior (EPSext).

Los materiales que componen a los sistemas constructivos se seleccionan así para representar un material aislante (poliestireno expandido estándar), un material masivo (concreto de alta densidad) y un material intermedio (concreto aereado). En la tabla 3.1 se presentan las propiedades térmicas de los materiales. Todas las superficies exteriores de los materiales se definen con una absorptancia solar de 0.4.

Material	k $\left[\frac{W}{mK}\right]$	ρ $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	c $\left[\frac{J}{KgK}\right]$
Concreto aereado	0.12	550	1004
Concreto de alta densidad	2.00	2400	1000
Poliestireno expandido estándar	0.04	15	1400

Tabla 3.1: Conductividad térmica (k), densidad (ρ) y calor específico (c) del concreto aereado, concreto de alta densidad y poliestireno expandido estándar.

Clima

Se utiliza el clima de Torreón, Coahuila. El archivo de clima se obtiene a través del programa *Meteonorm*, el cual interpola información de estaciones meteorológicas cercanas al sitio. Se simula el día 15 de mayo, el cual representa el periodo más cálido del año en la región.

3.2. Análisis del método de diferencias finitas

Para el método de diferencias finitas existen dos esquemas de solución: el esquema implícito de primer orden y el esquema semi-implícito de Crank Nicholson de segundo orden. En este análisis se selecciona el esquema implícito de primer orden. Los parámetros relacionados con este método son las iteraciones por hora (τ), la constante de discretización espacial (C) y el criterio de convergencia (c_c).

Las iteraciones por hora se definen como

$$\tau = \frac{3600}{dt}, \quad (3.1)$$

donde dt es el paso temporal [s] y 3600 representa los segundos en una hora.

Para calcular la constante de discretización espacial, primero se debe establecer el número de nodos deseado por capa o la distancia entre nodos. El número de nodos se define de la siguiente manera

$$n = \frac{L_c}{dx}, \quad (3.2)$$

donde L_c es el grosor de la capa del material [m] y dx es la distancia entre nodos [m]. En el caso de los sistemas constructivos formados por más de una capa de material, se asigna un número de nodos independiente para cada capa.

Una vez definido n o dx , obtenemos C , la cual está dada por

$$C = \frac{(dx)^2}{\alpha dt}, \quad (3.3)$$

donde α es la difusividad térmica de la capa del material [m^2/s]. La variable C es precisamente el parámetro que se puede controlar en E+. Por ende, a cada valor de n o dx , para una capa de material determinada, corresponde un valor de C .

Al resolver por diferencias finitas usando un esquema implícito se genera una matriz, que en E+ se resuelve usando el método iterativo de Gauss-Seidel, por lo que se debe usar un criterio de convergencia y definir su valor. Este criterio está dado por

$$\left| \frac{\sum_{i=1}^n (T_i^m - T_i^{m-1})}{\sum_{i=1}^n T_i^m} \right| < c_c, \quad (3.4)$$

donde T_i^m es el valor de la temperatura [°C] del nodo i en la iteración actual m y T_i^{m-1} es el valor de la temperatura [°C] del nodo i en la iteración anterior $m - 1$. Cabe mencionar que esta ecuación fue obtenida del código fuente de E+, versión 8.0.

Análisis del parámetro de iteraciones por hora

Se realiza un análisis variando el número de iteraciones por hora (τ) y dejando los otros dos parámetros en su valor por omisión: $C = 3$, que corresponde a un número de nodos igual a 16 para el caso de CAe y de 7 para el caso de EPSext y $c_c = 0.002$. El programa E+ sólo permite tres valores del parámetro de τ al utilizar el método de diferencias finitas: $\tau = 20, 30$ y 60 . En la Figura 3.1 se muestra la temperatura del aire interior que se calcula para el CAe y el EPSext para cada valor de τ . Se puede observar que no hay una variación apreciable entre los distintos valores de iteraciones por hora. Asimismo se aprecia que en el caso de CAe la fluctuación de temperatura es mucho mayor que en el caso de EPSext.

En la Figura 3.2 se muestra el error relativo máximo para CAe y EPSext, con referencia en el valor máximo de iteraciones por hora ($\tau = 60$). El error relativo se define como

$$e_r = \left| \frac{T - T_{ref}}{T_{ref}} \right| \times 100, \quad (3.5)$$

donde T es la temperatura a evaluar y T_{ref} es la temperatura de referencia. Se reporta el error relativo máximo durante el día para cada caso.

El error relativo para el caso de CAe es un orden mayor que para el de EPSext, sin embargo ambos son muy bajos. Para el caso de CAe el error relativo de $\tau = 20$ es de 0.24 %, mientras que para $\tau = 30$ es de 0.13 %. Para el caso de EPSext el error relativo de $\tau = 20$ es de 0.03 %, mientras que de $\tau = 30$ es de 0.02 %.

La variación del error relativo entre los diferentes valores de iteraciones por hora no es grande, sin embargo, se selecciona $\tau = 60$.

Análisis del parámetro de constante de discretización espacial

A continuación se hace un análisis de la constante de discretización espacial (C), variando el número de nodos. Para llevar a cabo este análisis se

considera $\tau = 60$ y $c_c = 0.002$ (valor por omisión). En las Tablas 3.2 y 3.3 se presenta el número de nodos equivalente a cada valor utilizado de la constante de discretización espacial, para CAe y EPSext respectivamente. Se busca tener el mismo número de nodos para ambos casos. Para el caso EPSext, el cual es un sistema constructivo de dos capas de material, un mismo valor de C produce distintos números de nodos en cada capa de material. Los valores que se muestran en la tabla representan al número de nodos totales dentro del sistema constructivo.

No. de nodos	C
10	7.680
50	0.307
100	0.077
150	0.033
200	0.019

Tabla 3.2: Número de nodos y valor de C correspondiente para el caso de CAe.

No. de nodos	C
10	1.739
50	0.069
100	0.017
150	0.007
200	0.004

Tabla 3.3: Número de nodos y valor de C correspondiente para el caso de EPSext.

En la Figura 3.3 se presenta la temperatura del aire interior para distintos números de nodos para CAe y EPSext. En el caso de CAe, se puede observar que la amplitud de la oscilación de la temperatura comienza a disminuir al aumentar n . Para el caso de EPSext este efecto es aún mayor e incluso los resultados son casi una línea recta a partir de $n = 150$.

Se encontró que el parámetro del criterio de convergencia (ec. 3.4), que se analiza más adelante, tiene un efecto sobre el comportamiento de estos

resultados. Al disminuir el valor del c_c , establecido por omisión en 0.002, se pueden mejorar los resultados. Sin embargo, si se aumenta el número de nodos aún más, los resultados vuelven a tomar el mismo comportamiento, disminuyendo la amplitud de la oscilación de la temperatura del aire interior.

Análisis del parámetro de criterio de convergencia

El criterio de convergencia que usa E+ está dado por la ecuación 3.4. Esta ecuación fue obtenida del código fuente de E+, versión 8.0. Se considera que este criterio de convergencia se podría mejorar y se proponen dos cambios. El c_c propuesto está dado por

$$\frac{\sum_{i=1}^n |T_i^m - T_i^{m-1}|}{n} < c_c, \quad (3.6)$$

donde n es el número de nodos.

El primer cambio es que en el c_c propuesto se realiza la sumatoria del valor absoluto de la diferencia de las temperaturas, en lugar de tomar el valor absoluto de la sumatoria, como está establecido en el c_c de E+. La forma de E+ puede conducir a un error puesto que si, por ejemplo, el resultado de la diferencia de temperaturas en un nodo es positivo y en el nodo siguiente es negativo, éstos se contrarrestarán, puesto que no se está tomando el valor absoluto.

El segundo cambio es el denominador; en lugar de usar la sumatoria de la temperatura de los nodos se recomienda usar el número de nodos (n). Este último cambio otorga mayor estabilidad al código, permitiendo aumentar el número de nodos con mayor libertad, pues al aumentar el valor de n , automáticamente disminuye c_c .

Con el fin de comparar el c_c propuesto con el c_c de E+, se resuelve numéricamente un problema de conducción de calor usando el método iterativo de Gauss-Seidel, que es el que utiliza E+.

El análisis comparativo se hace resolviendo la conducción de calor unidimensional en estado permanente para un sólido de longitud L usando los siguientes datos de entrada:

Condición inicial:

- $T(x) = 0^\circ \text{ C}$.

Condiciones de frontera:

- $T_1 (x = 0) = 20 \text{ }^\circ\text{C}$,
- $T_2 (x = L) = 40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Características del sistema:

- $k = 0.12 \text{ W/mK}$,
- $L = 0.1 \text{ m}$.

Parámetros del método numérico:

- $n = 100, 200, 400, 800$,
- $c_c = 1 \times 10^{-1}, 1 \times 10^{-2}, 1 \times 10^{-3}, 1 \times 10^{-4}, 1 \times 10^{-5}$.

En la Figura 3.4 se muestra la temperatura del sólido en función de la posición, para los diferentes números de nodos (n), utilizando el c_c de E+. En la Figura 3.5 se grafica lo mismo pero utilizando el c_c propuesto. Para ambos casos se usa un valor de c_c de 1×10^{-5} .

En la Figura 3.6 se muestra el error promedio al variar el valor de c_c , usando el c_c de E+ y el propuesto, para los casos de $n = 50, n = 100, n = 200, n = 400, n = 800$. El error promedio está dado por

$$error = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{T_i - T_{ref_i}}{T_{ref_i}} \right| \times 100 \quad (3.7)$$

donde N es el número de datos, i es el dato actual, T es la temperatura a evaluar y T_{ref} es la temperatura de referencia. Para calcular el error se toma como referencia la solución analítica exacta, dada por

$$T(x) = \frac{(T_2 - T_1)}{L} x + T_1, \quad (3.8)$$

donde x es la posición dentro del sistema constructivo.

Se puede apreciar que el c_c propuesto permite alcanzar mayor exactitud al aumentar el número de nodos. Por otro lado, con el c_c de E+, los resultados se alejan de la solución analítica al aumentar el número de nodos, lo cual no es lo esperado de un método numérico al realizar un refinamiento espacial. El c_c en E+ se usa en ambos esquemas de diferencias finitas (el implícito de primer orden y el semi-implícito de Crank-Nicholson de segundo orden). Debido a una incorrecta implementación del criterio de convergencia en E+, se considera que el método de diferencias finitas no es una opción adecuada.

3.3. Análisis del método de funciones de transferencia

Análisis del parámetro de iteraciones por hora sin aire acondicionado

En el método de funciones de transferencia sólo existe la opción de variar el parámetro de iteraciones por hora y permite los valores de $\tau = 1, 2, 4, 6, 12, 20, 30, 60$. En la Figura 3.7 se muestra la temperatura del aire interior con los distintos valores de iteraciones por hora para CAe y EPSext.

En la Figura 3.8 se presenta el error relativo máximo, definido en la ecuación 5.7, para CAe y EPSext. Para calcular el error se toma como referencia el valor de $\tau = 60$. El error relativo máximo para el caso de CAe es de 1.86 %, mientras que para EPSext es de 0.37 %. El caso de CAe muestra un error de alrededor de cinco veces mayor que el caso de EPSext. Cabe mencionar que para ambos casos el error relativo máximo se considera bajo, por lo que se puede decir que no hay una diferencia significativa al usar distintos valores de τ .

Análisis del parámetro de iteraciones por hora con aire acondicionado

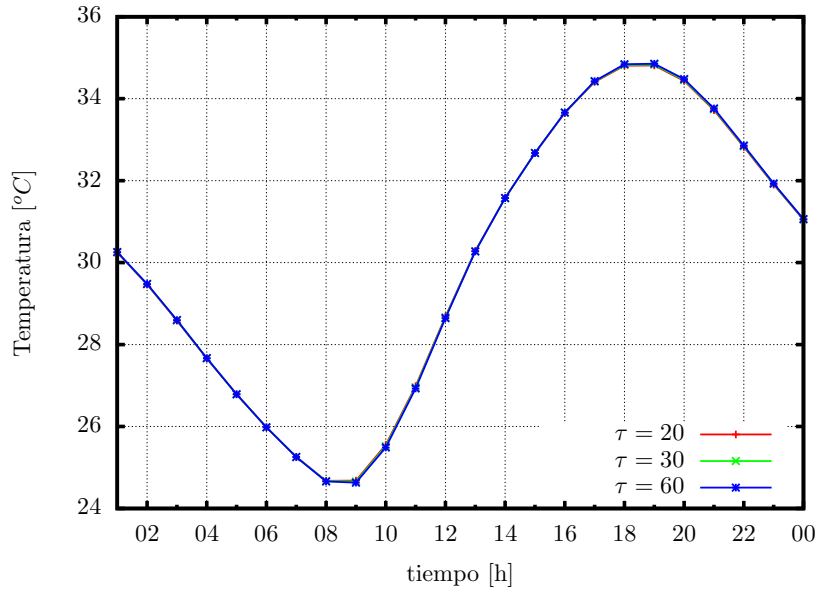
Para analizar el parámetro de iteraciones por hora con aire acondicionado se realiza una serie de simulaciones variando el valor de τ . Para estas simulaciones se fija la temperatura del termostato a 24 °C. Se registra la carga total térmica durante un día, la cual se obtiene al sumar la cargas térmicas de calentamiento y enfriamiento.

En la Figura 3.9 se muestra la carga térmica total durante un día para CAe y EPSext. Se puede observar que la carga térmica total es mayor en el caso de EPSext. El error relativo máximo, con referencia a $\tau = 60$, para el caso de CAe es de 1.22 %, mientras que para el caso de EPSext es de 0.58 %.

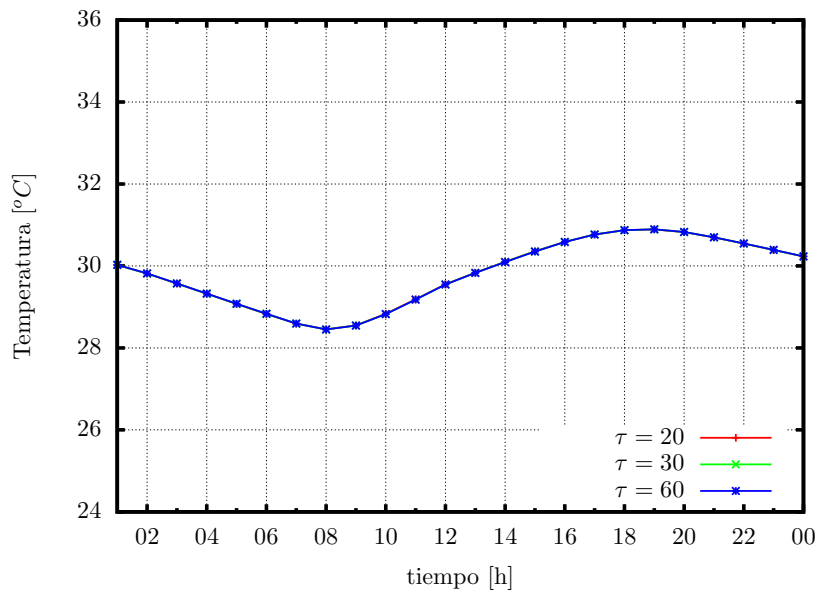
3.4. Conclusiones

En este capítulo se realizó un estudio paramétrico del método de diferencias finitas implícito de primer orden y del método de funciones de transferencia. Los parámetros usados en E+ para el método de diferencias finitas fueron las iteraciones por hora, la constante de discretización espacial y el criterio de convergencia, mientras que para el método de funciones de transferencia el único parámetro fue las iteraciones por hora.

Se puede concluir que el método de funciones de transferencia es buena opción, ya que proporciona resultados consistentes con un tiempo de cómputo menor que el método de diferencias finitas y con la ventaja de manejar un solo parámetro, las iteraciones por hora (τ). Además, el modelo de diferencias finitas presenta un parámetro erróneo: el criterio de convergencia (c_c). Este parámetro está mal implementado en el código fuente de E+, lo que puede generar resultados erróneos al aumentar el número de nodos. El c_c propuesto en este análisis permite más flexibilidad y da la posibilidad de aumentar el número de nodos a un mayor nivel. Dado que el método de diferencias finitas de E+ no se considera adecuado, para las simulaciones de este trabajo se utilizará el modelo de funciones de transferencia con 60 iteraciones por hora.

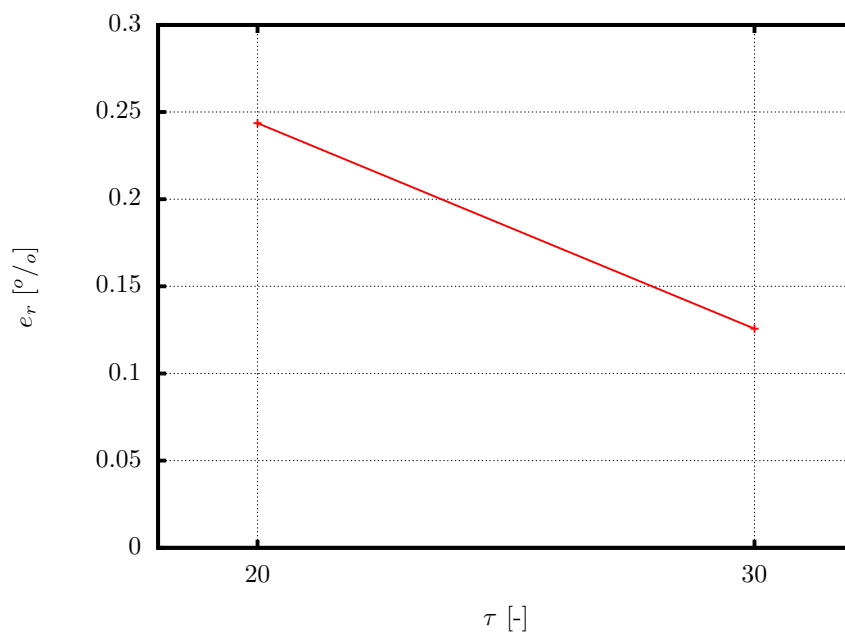


(a)

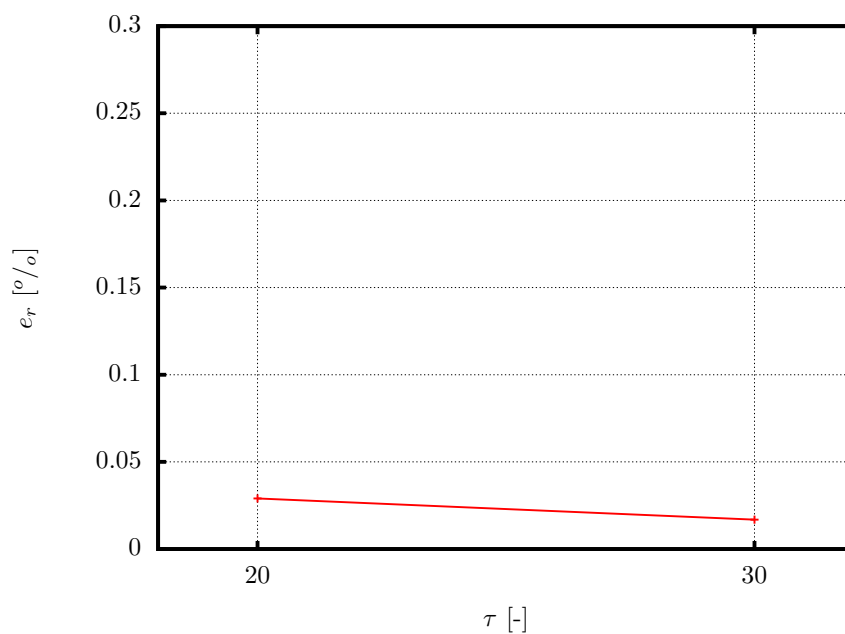


(b)

Figura 3.1: Temperatura del aire interior variando las iteraciones por hora (τ) para (a) CAe y (b) EPSext, con $C = 3$ y $c_c = 0.002$. Las líneas correspondientes a $\tau = 20$ y $\tau = 30$ se encuentran por debajo de la de $\tau = 60$.

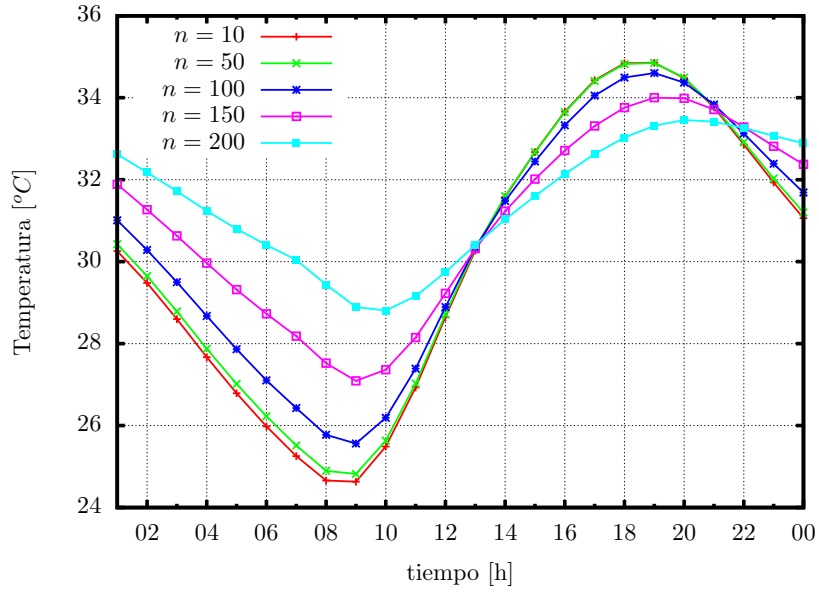


(a)

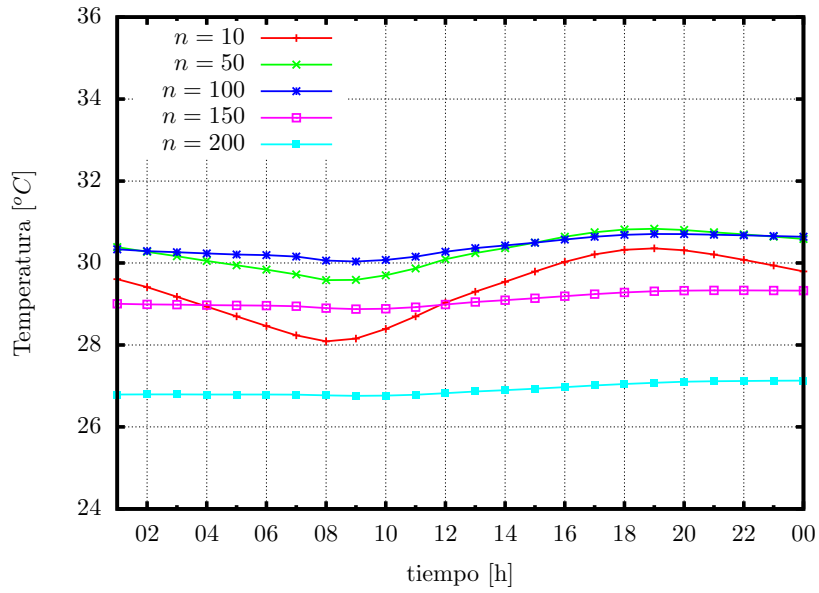


(b)

Figura 3.2: Error relativo máximo (e_r) variando las iteraciones por hora (τ) para (a) CAe y (b) EPSext, con $C = 3$ y $c_c = 0.002$.



(a)



(b)

Figura 3.3: Temperatura del aire interior variando el número de nodos (n) para (a) CAe y (b) EPSext, con $\tau = 60$ y $c_c = 0.002$.

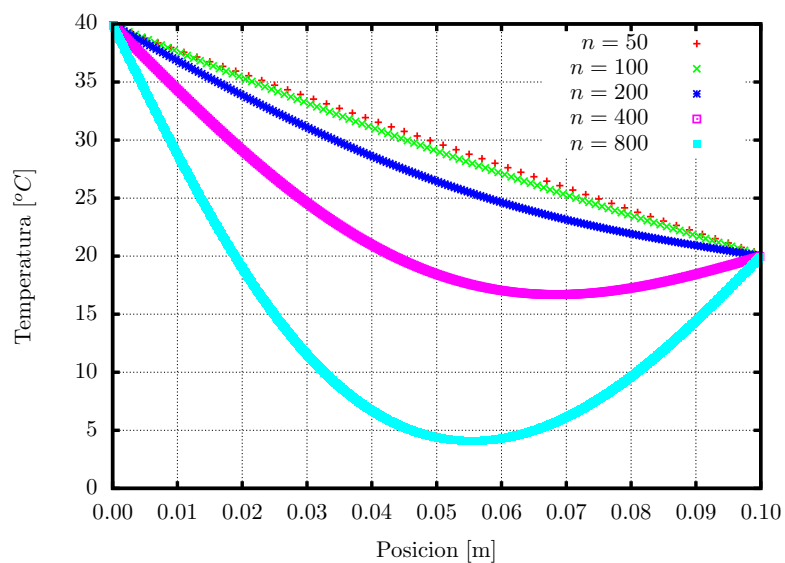


Figura 3.4: Temperatura del sólido en función de la posición, para varios números de nodos (n), utilizando el c_c de E+ ($c_c = 1 \times 10^{-5}$).

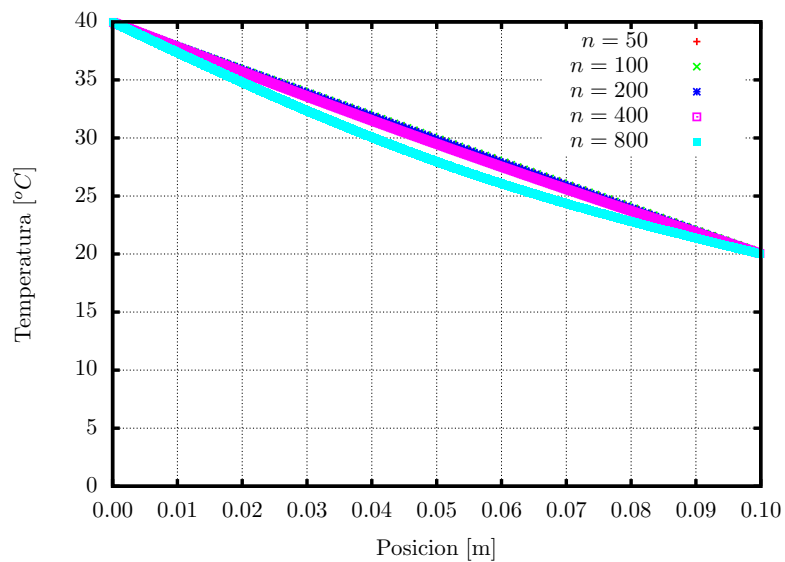


Figura 3.5: Temperatura del sólido en función de la posición, para varios números de nodos (n), utilizando el c_c propuesto ($c_c = 1 \times 10^{-5}$).

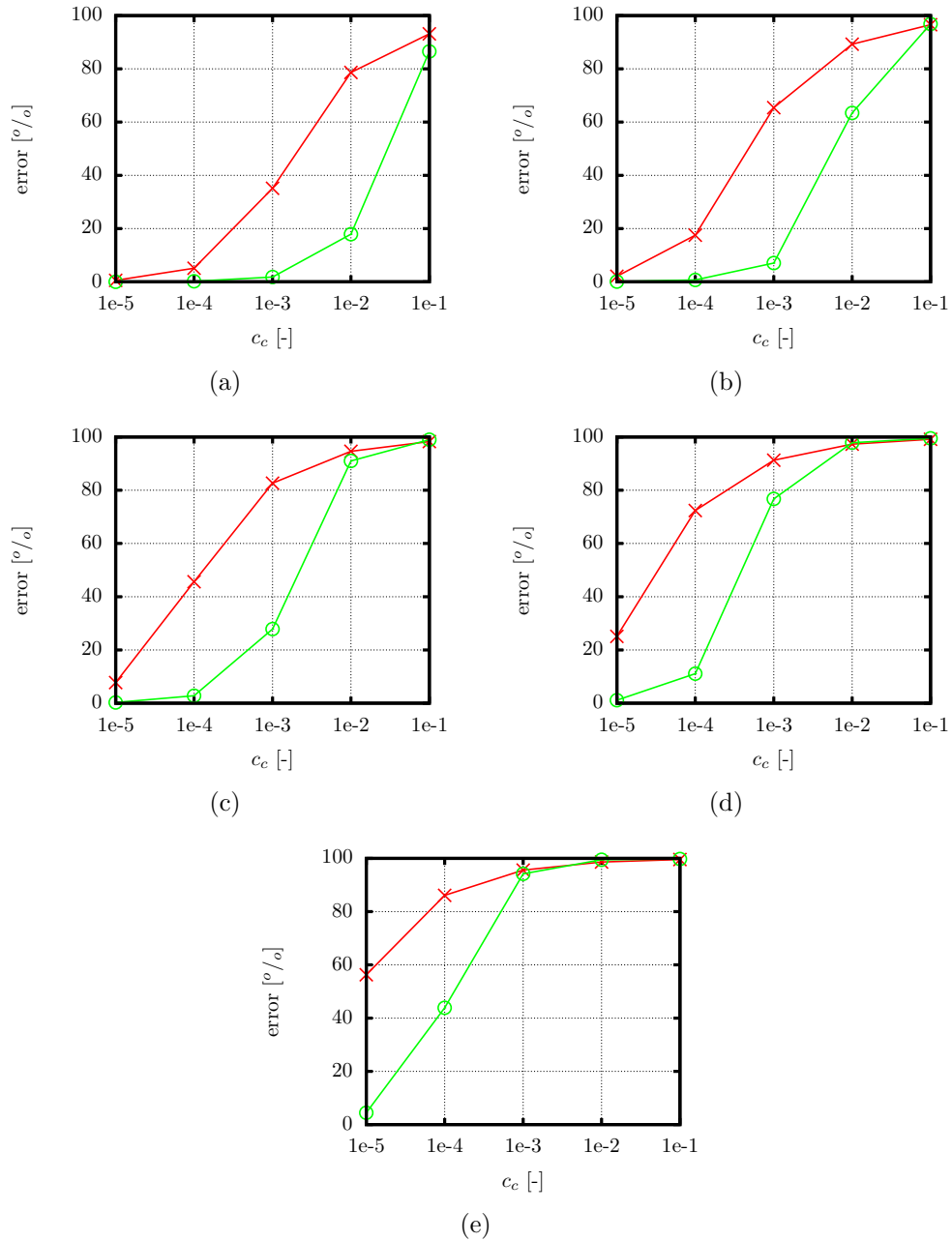
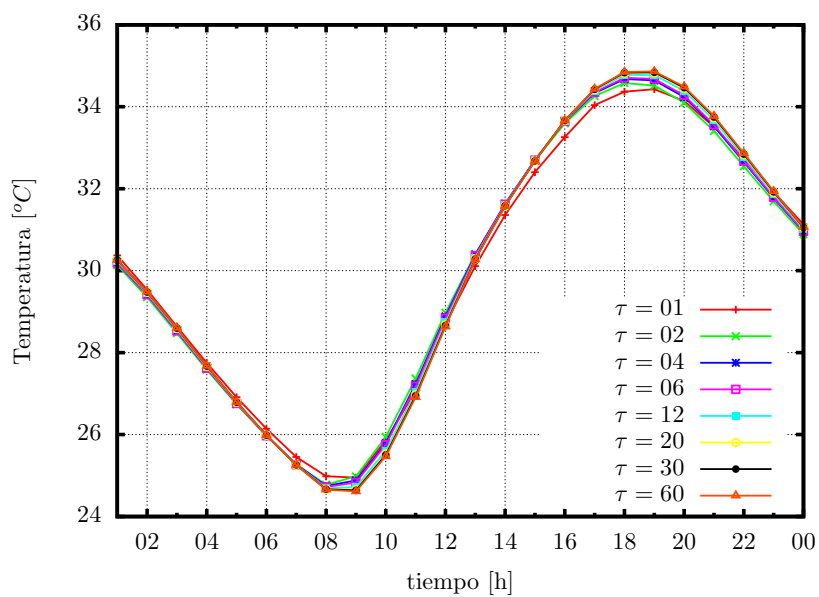
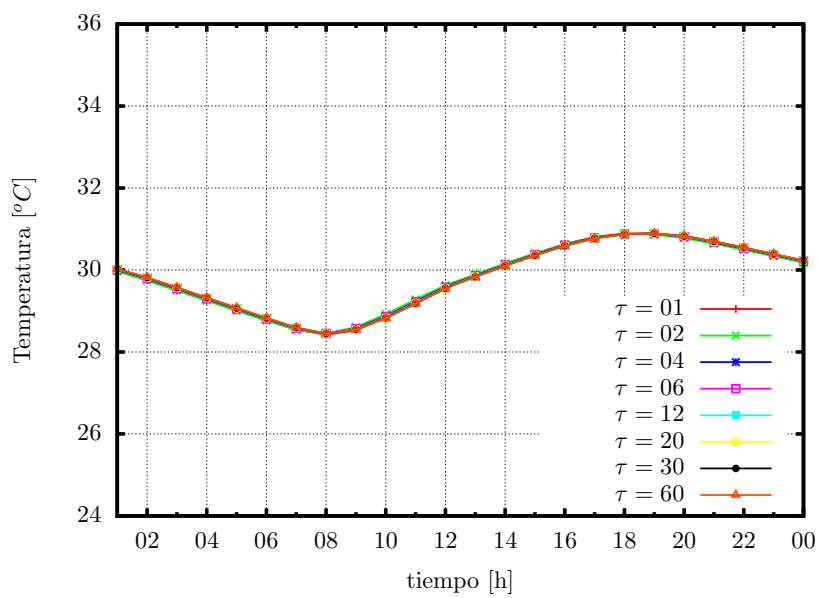


Figura 3.6: Error promedio ($error$) en función de c_c , usando el c_c de EnergyPlus (\times) y el c_c propuesto (\circ), para (a) $n = 50$, (b) $n = 100$, (c) $n = 200$, (d) $n = 400$, (e) $n = 800$.

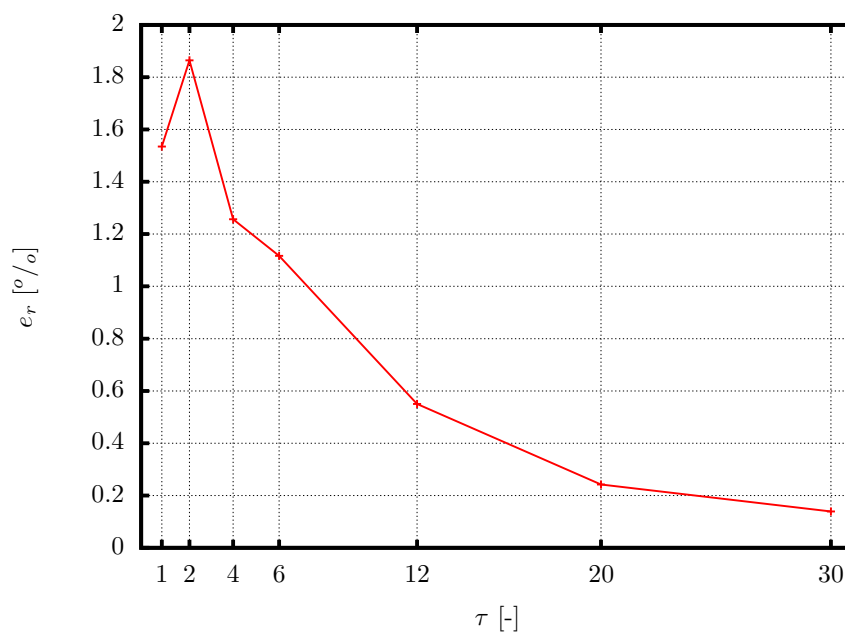


(a)

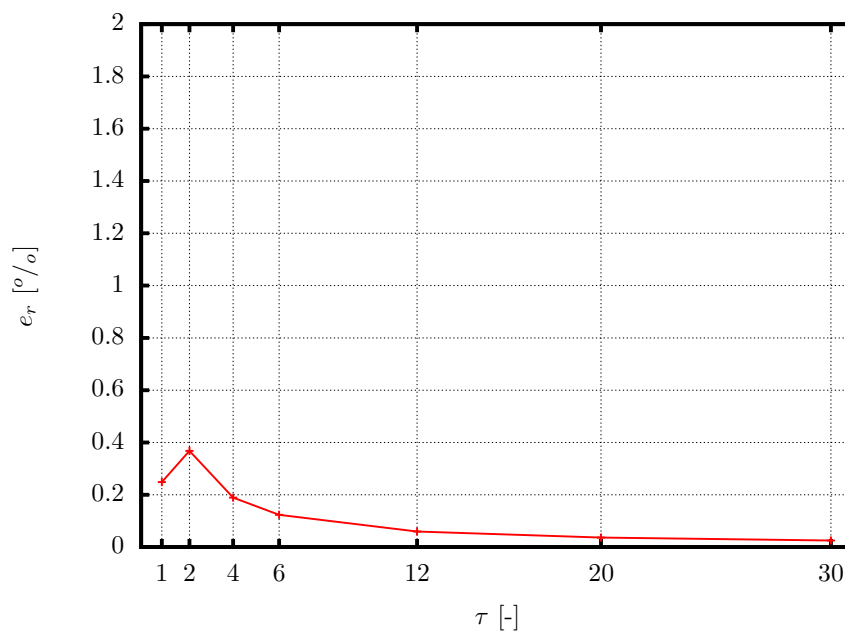


(b)

Figura 3.7: Temperatura del aire interior variando las iteraciones por hora (τ) para (a) CAe y (b) EPSext, usando el método de funciones de transferencia.

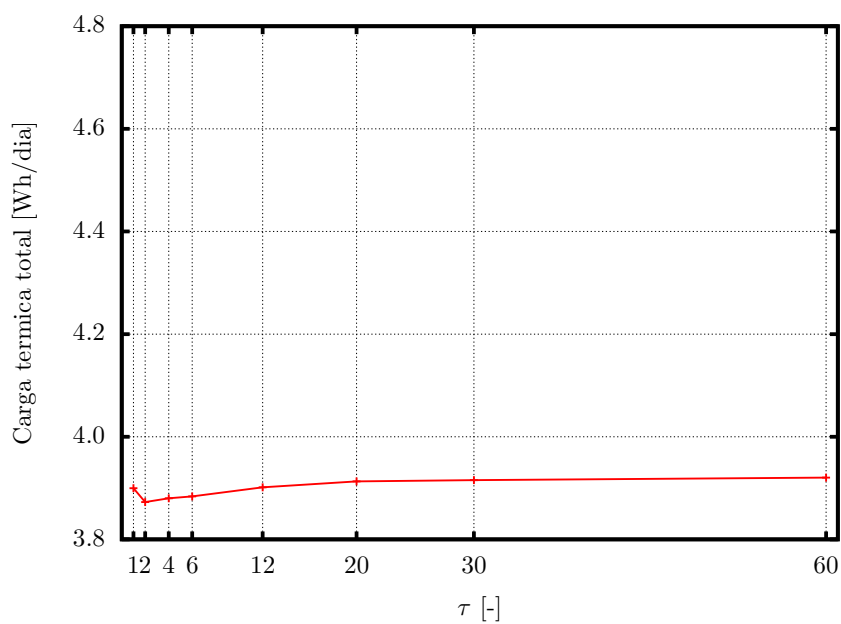


(a)

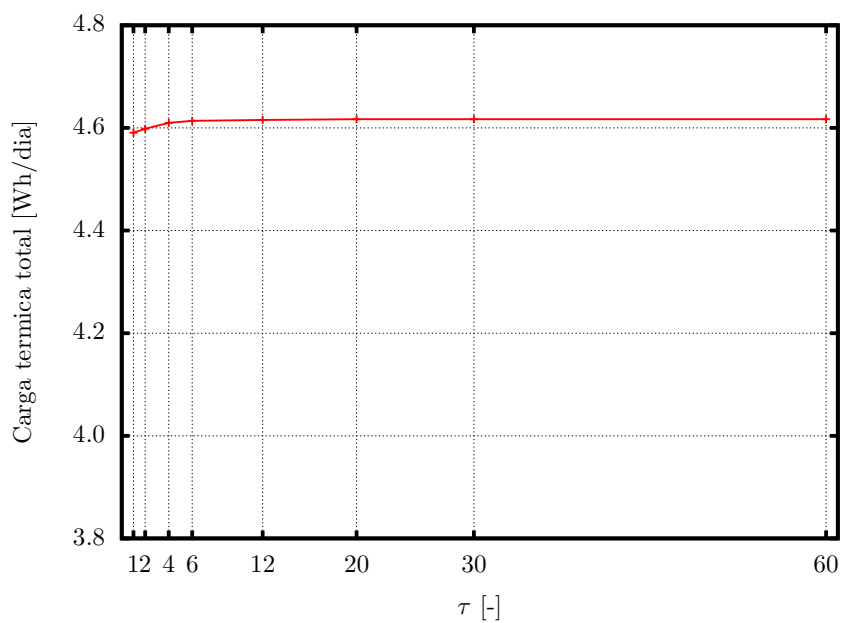


(b)

Figura 3.8: Error relativo máximo (e_r) variando las iteraciones por hora (τ) para (a) CAe y (b) EPSext, usando el método de funciones de transferencia.



(a)



(b)

Figura 3.9: Carga térmica total al usar aire acondicionado, variando las iteraciones por hora (τ) para (a) CAe y (b) EPSext, utilizando el método de funciones de transferencia.

Capítulo 4

Interacción entre los componentes de la envolvente

En este capítulo se demuestra que existe una interacción importante entre los componentes de la envolvente cuando se tiene una condición sin aire acondicionado al interior del módulo. Por lo cual al analizar una edificación es importante tomar en cuenta la transferencia de calor a través de todos los componentes de la envolvente.

En la sección 4.1 se describen las características de las simulaciones realizadas. En la sección 4.2 se definen los parámetros usados para estudiar la interacción de la envolvente. En las secciones 4.3 y 4.4 se realizan análisis sin y con aire acondicionado, respectivamente; para ambos casos se incluye un análisis por componente y otro para toda la envolvente. En el análisis por componente se analiza cada uno de los componentes (paredes, piso y techo) por separado, mientras que en el análisis para toda la envolvente se analiza toda la envolvente al mismo tiempo. En la sección 4.5 se realiza un análisis de la interacción de la envolvente. Por último, en la sección 4.6 se presentan las conclusiones referentes al capítulo.

4.1. Características de las simulaciones

Módulo de prueba

Para las simulaciones de este apartado se usa el método de funciones de transferencia con 60 iteraciones por hora¹. Se simulan módulos de base cuadrada de 2.6 m de ancho (desde la superficie exterior de una pared hasta la superficie exterior de la pared opuesta) y 2.7 m de altura (desde la superficie interior del piso hasta la superficie exterior del techo), sin ventanas, sin infiltración y sin cargas térmicas internas. Se usa un módulo de estas dimensiones porque representa el tamaño de un cuarto estándar. La orientación de sus paredes es normal a los puntos cardinales y el techo no tiene inclinación. La temperatura del suelo (por debajo del piso del módulo) se fija al promedio de la temperatura exterior durante el día, que es de 24 °C.

Se simulan cinco módulos; la envolvente (paredes, piso y techo) de cada uno está compuesta por un solo sistema constructivo. Los sistemas constructivos son los siguientes: 0.10 m de concreto aereado (CAe), 0.10 m de poliestireno expandido estándar (EPS), 0.10 m de concreto de alta densidad (CAD), 0.08 m de concreto de alta densidad con una capa de 0.02 m de poliestireno expandido estándar al exterior (EPSext) y 0.08 m de concreto de alta densidad con una capa de 0.02 m de poliestireno expandido estándar al interior (EPSint). Todos los sistemas constructivos tienen un grosor total de 0.10 m que representa un grosor estándar.

Los materiales que componen a los sistemas constructivos se seleccionan así para representar un material aislante (poliestireno expandido estándar), un material masivo (concreto de alta densidad) y un material intermedio (concreto aereado). En la tabla 4.1 se presentan las propiedades térmicas de los materiales. Todas las superficies exteriores de los materiales se definen con una absorptancia solar de 0.4 y una emitancia al igual de 0.4, por lo que sí se considera la transferencia de calor radiativa entre los componentes de la envolvente y con el exterior.

¹La metodología de selección del método y los parámetros correspondientes para las simulaciones se presenta en el capítulo 3.

Material	k [$\frac{W}{mK}$]	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	c [$\frac{J}{KgK}$]
Concreto aereado	0.12	550	1004
Concreto de alta densidad	2.00	2400	1000
Poliestireno expandido estándar	0.04	15	1400

Tabla 4.1: Conductividad térmica (k), densidad (ρ) y calor específico (c) del concreto aereado, concreto de alta densidad y poliestireno expandido estándar.

Clima

Se utiliza el clima de Torreón, Coahuila. Se simula el día 15 de mayo, el cual representa el periodo más cálido del año en la región. El archivo de clima se obtiene a través del programa *Meteonorm*, el cual interpola información de estaciones meteorológicas cercanas al sitio.

4.2. Parámetros para estudiar la interacción de la envolvente

A continuación se describen los parámetros utilizados para analizar el desempeño térmico de la envolvente y la interacción entre sus componentes.

Parámetros ligados a un solo componente:

- 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 temperatura sol-aire de la superficie exterior de un componente de la envolvente determinado. Al comparar dos o más sistemas constructivos, valores menores de FD_{sa} significan un mejor desempeño térmico. Este parámetro está dado por

$$FD_{sa} = \frac{T_{int_{max}} - T_{int_{min}}}{T_{sa_{max}} - T_{sa_{min}}}, \quad (4.1)$$

donde $T_{int_{max}}$ y $T_{int_{min}}$ son las temperaturas del aire interior máxima y mínima respectivamente, $T_{sa_{max}}$ y $T_{sa_{min}}$ son las temperaturas sol-aire máxima y mínima respectivamente durante el día. A su vez, T_{sa}

está dada por

$$T_{sa} = T_{ext} + \frac{I a}{h_p} + CF, \quad (4.2)$$

donde T_{ext} es la temperatura exterior, I es la irradiancia solar [W/m^2] que incide sobre la superficie, a es la absorptancia solar de la superficie, h_p es el coeficiente de película [$W/m^2 K$] y CF es el factor de corrección debido a las pérdidas radiativas de onda corta y es 3.9 °C para techo y cero para paredes verticales.

- Flujo de calor a través de la superficie interior (q''): Es el flujo de calor transferido por metro cuadrado [W/m^2] a través del sistema constructivo evaluado en la superficie interior. EnergyPlus obtiene q'' mediante la variable *Surface Inside Face Convection Heat Gain Rate per Area*. El parámetro q'' está dado por

$$q'' = h_{int} (T_{sup_{int}} - T_{int}), \quad (4.3)$$

donde h_{int} es el coeficiente convectivo interior de la superficie, $T_{sup_{int}}$ es la temperatura superficial interior y T_{int} es la temperatura del aire interior. Las superficies analizadas son los muros, techo y piso.

- Energía transferida a través de un componente (E_{entra} , E_{sale}): Es la energía transferida durante un día por metro cuadrado [$J/m^2 dia$] a través de un componente de la envolvente. Este parámetro se calcula al realizar la integral durante un día del flujo de calor a través de la superficie interior (q'') que entra o que sale respectivamente, como lo muestra la siguiente ecuación

$$\begin{aligned} E_{entra} &= \int_{t_0}^{t_f} q'' dt \quad \text{si } T_{sup_{int}} > T_{int}, \\ E_{sale} &= \int_{t_0}^{t_f} q'' dt \quad \text{si } T_{sup_{int}} < T_{int}, \end{aligned} \quad (4.4)$$

donde t_0 y t_f representan el inicio y el final del día y dt es el incremento temporal [s].

Parámetros ligados a toda la envolvente:

- Factor de decremento (FD): es un parámetro que indica el amortiguamiento de la amplitud de la oscilación de la temperatura del aire

interior con respecto a la temperatura exterior. A diferencia del FD_{sa} que evalúa una sola superficie, el FD evalúa el desempeño térmico de toda la envolvente. Este parámetro está dado por

$$FD = \frac{T_{int_{max}} - T_{int_{min}}}{T_{ext_{max}} - T_{ext_{min}}}, \quad (4.5)$$

donde $T_{int_{max}}$ y $T_{int_{min}}$ son las temperaturas del aire interior [$^{\circ}C$] máxima y mínima respectivamente durante un día, mientras $T_{ext_{max}}$ y $T_{ext_{min}}$ son las temperaturas exteriores máxima y mínima respectivamente durante un día.

- Flujo de calor a través de toda la envolvente (q''_{env}): Es el flujo de calor por metro cuadrado [W/m^2] a través de toda la envolvente y está dado por

$$q''_{env} = q''_{techo} + q''_{piso} + q''_{este} + q''_{norte} + q''_{oeste} + q''_{sur}, \quad (4.6)$$

donde cada término representa el flujo de calor a través de cada componente de la envolvente.

- Energía transferida a través de toda la envolvente ($E_{env_{entra}}$, $E_{env_{sale}}$): Es la energía transferida durante un día por metro cuadrado [$J/m^2 dia$] tomando en cuenta todos los componentes de la envolvente. Este parámetro se obtiene al realizar la integral durante un día del flujo de calor por área a través de toda la envolvente (q''_{env}) que entra o que sale respectivamente, como lo muestra la siguiente ecuación

$$\begin{aligned} E_{env_{entra}} &= \int_{t_0}^{t_f} q''_{env} dt \quad \text{si } q''_{env} > 0, \\ E_{env_{sale}} &= \int_{t_0}^{t_f} q''_{env} dt \quad \text{si } q''_{env} < 0. \end{aligned} \quad (4.7)$$

- Carga térmica de enfriamiento o calentamiento (C_{enf} , C_{cal}): Se usa bajo la condición con aire acondicionado y es la energía por metro cuadrado [$J/m^2 dia$] necesaria para enfriar o calentar el aire al interior a la temperatura establecida por el termostato durante un día. Energy-Plus obtiene estos parámetros mediante la variable *Zone Air System Sensible Cooling Energy* y *Zone Air System Sensible Heating Energy*

respectivamente. Dado que en el módulo en cuestión no existen otras fuentes de calor como lo es la infiltración o las cargas internas, estos parámetros también se puede obtener de la misma forma que $E_{env_{entra}}$, $E_{env_{sale}}$, al realizar la integral durante un día del flujo de calor a través de toda la envolvente (q''_{env}) que entra o sale.

$$\begin{aligned} C_{enf} &= \int_{t_0}^{t_f} q''_{env} dt \quad \text{si } q''_{env} > 0, \\ C_{cal} &= \int_{t_0}^{t_f} q''_{env} dt \quad \text{si } q''_{env} < 0. \end{aligned} \quad (4.8)$$

- Carga térmica total (C_{total}): Se usa bajo la condición con aire acondicionado y es la energía por metro cuadrado [$J/m^2 dia$] necesaria para enfriar y calentar el aire al interior a la temperatura establecida por el termostato. Este parámetro es la suma de la carga térmica de enfriamiento y calentamiento.

$$C_{total} = C_{enf} + C_{cal}. \quad (4.9)$$

Las unidades de los parámetros que representan energía, se convierten de $J/m^2 dia$ a $Wh/m^2 dia$.

4.3. Condición sin aire acondicionado

Se realiza un análisis bajo una condición sin aire acondicionado. Primero se presenta el análisis por componente de la envolvente y luego se presenta el análisis de toda la envolvente.

Análisis por componente de la envolvente

A continuación se presentan los resultados del análisis por componente de la envolvente, sin aire acondicionado para los cinco módulos descritos anteriormente. Se presentan gráficas para el factor de decremento sol-aire (FD_{sa}), la energía transferida por componente (E_{entra} , E_{sale}) y el flujo de calor para cada componente (q'').

En la Figura 4.1 se presenta el factor de decremento sol-aire (FD_{sa}) para cada componente de la envolvente y los cinco sistemas constructivos.

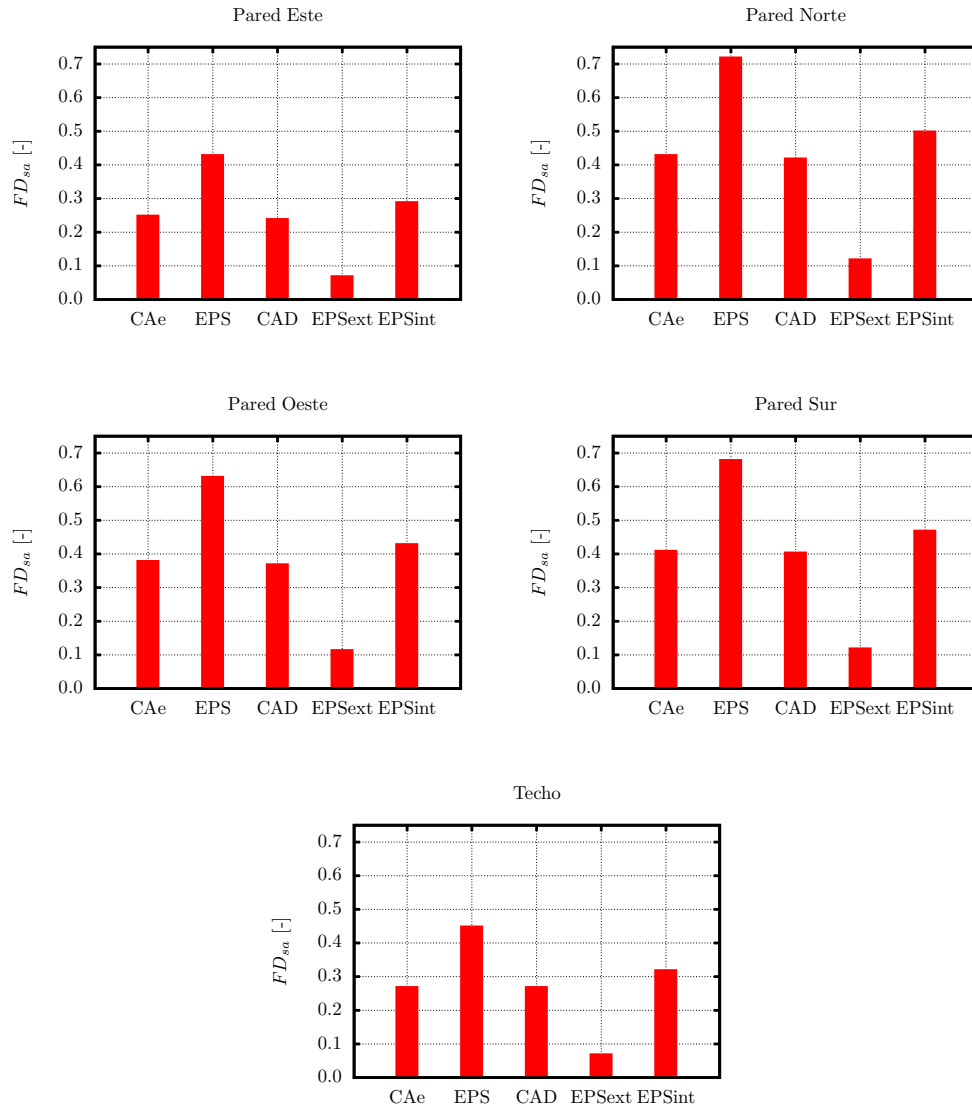


Figura 4.1: Factor de decremento sol-aire (FD_{sa}) para las paredes Este, Norte, Oeste, Sur y el techo, para cada sistema constructivo, sin aire acondicionado. Para el piso no se puede calcular el DF_{sa} pues no incide radiación solar sobre éste.

Se puede observar que los valores de FD_{sa} son distintos para los diferentes componentes, pues a pesar de que comparten los mismos valores de $T_{int,max}$

y $T_{int_{min}}$, cada uno de ellos recibe una cantidad distinta de radiación y por ende tiene un valor distinto de T_{sa} . Sin embargo, los diferentes sistemas constructivos sí reflejan el mismo orden de desempeño térmico sin importar su posición en la envolvente. Así, el orden para todos los casos, del mejor al peor es: EPSext, CAD, CAe, EPSint, EPS. Cabe recordar que un menor valor de FD_{sa} representa un mejor desempeño térmico.

En la Figura 4.2 se muestra la energía transferida a través de cada componente de la envolvente (E_{entra} , E_{sale}). Se puede observar que para todos los sistemas constructivos, la pared Este es el componente por el que entra más energía, pero casi no presenta salida de energía. Esto se debe a que en la pared Este incide la mayor radiación solar por la mañana, cuando el interior del módulo está a una menor temperatura que el exterior. Por otro lado, la pared Norte, Oeste y Sur tienen un comportamiento parecido, en donde la entrada y salida de energía está más o menos equilibrada. El techo es el segundo componente por el que entra más energía, después de la pared Este, sin embargo por el techo sí sale energía. Por último, en el piso se observa la mayor salida de energía y nada de entrada; cabe mencionar que el piso tiene un comportamiento diferente a los demás componentes puesto que no está en contacto con el exterior y tiene una condición de frontera de temperatura constante.

A diferencia del FD_{sa} , en este caso el orden del desempeño térmico de cada sistema constructivo sí cambia dependiendo del componente de la envolvente. Además, la energía transferida que entra es distinta a la que sale, así que se debe analizar la energía que entra (E_{entra}) y la energía que sale (E_{sale}) por componente, respectivamente. Barrios et al. [11] mencionan que, bajo una condición sin aire acondicionado y con un clima con condiciones periódicas, la transferencia de calor a través de una superficie es un buen parámetro de evaluación y entre menor sea la energía transferida mejor es el desempeño térmico. Para evaluar los siguientes resultados se usa este criterio, sin embargo es preciso mencionar que en climas cálidos, bajo una condición sin aire acondicionado, se deberían de buscar valores altos de transferencia de calor para (E_{sale}). En las siguientes tablas se presenta el orden del mejor al peor de los valores de la energía que entra (Tabla 4.2) y sale (Tabla 4.3) respectivamente a través de cada componente de la envolvente.

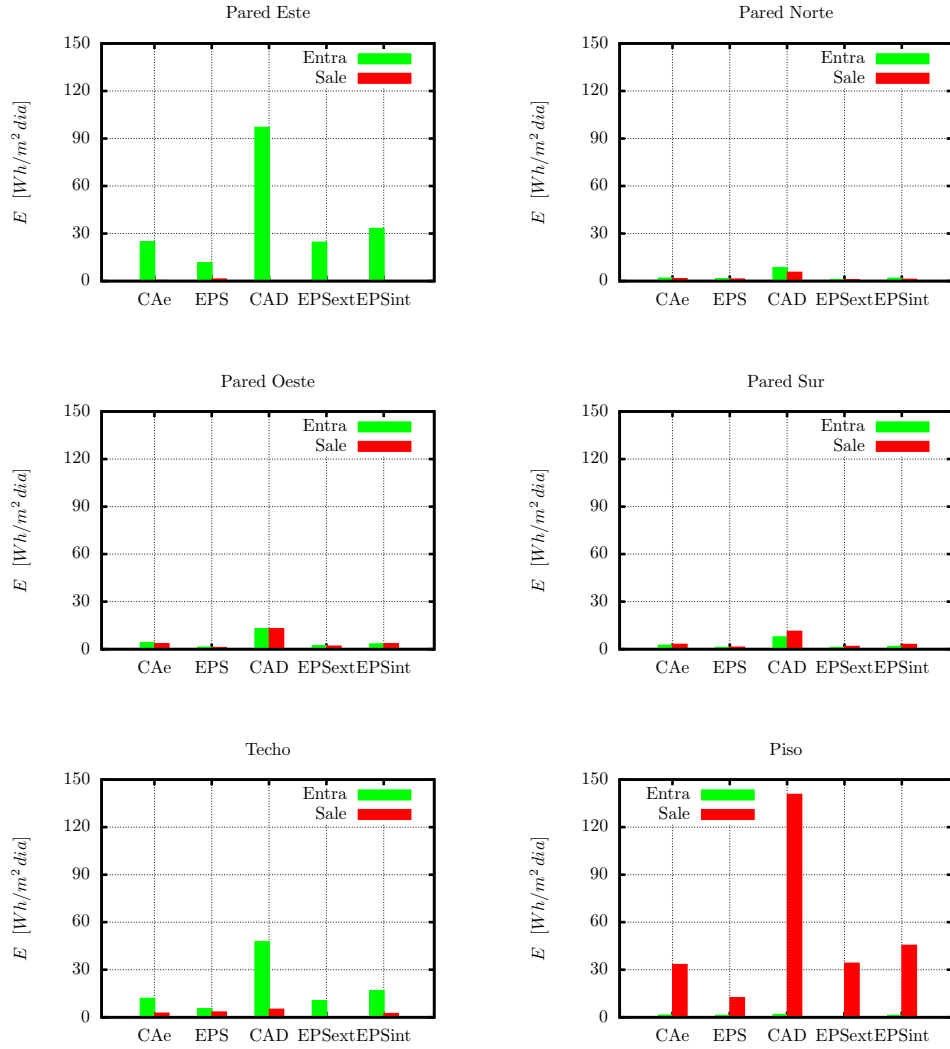


Figura 4.2: Energía transferida (E_{entra} , E_{sale}) a través de las paredes Este, Norte, Oeste, Sur, el techo y el piso, para cada sistema constructivo, sin aire acondicionado.

P. Este	P. Norte	P. Oeste	P. Sur	Techo	Piso
CAD	EPSext	EPS	EPSext	EPS	EPSext
EPS	EPS	EPSext	EPS	EPSext	EPSint
EPSext	EPSint	EPSint	EPSint	CAe	EPS
CAe	CAe	CAe	CAe	EPSint	CAe
EPSint	CAD	CAD	CAD	CAD	CAD

Tabla 4.2: Energía que entra (E_{entra}) a través de cada componente de la envolvente sin aire acondicionado: orden del mejor al peor entre sistemas constructivos.

P. Este	P. Norte	P. Oeste	P. Sur	Techo	Piso
CAD	CAD	CAD	CAD	EPSext	EPS
EPSext	EPSext	EPS	EPS	EPSint	CAe
EPSint	EPSint	EPSext	EPSext	CAe	EPSext
CAe	EPS	EPSint	EPSint	EPS	EPSint
EPS	CAe	CAe	CAe	CAD	CAD

Tabla 4.3: Energía que sale (E_{sale}) a través de cada componente de la envolvente sin aire acondicionado: orden del mejor al peor entre sistemas constructivos.

Análisis de toda la envolvente

A continuación se presentan los resultados del análisis de toda la envolvente, sin aire acondicionado. Se presentan gráficas para el factor de decremento (FD) y la energía transferida a través de toda la envolvente (E_{env}).

En la Figura 4.3 se muestra el factor de decremento (FD), el cual califica a toda la envolvente. Se puede apreciar que el orden del desempeño térmico de los sistemas constructivos es el mismo que el que se refleja en el FD_{sa} por componente, del mejor al peor: EPSext, CAD, CAe, EPSint, EPS. Por otro lado, se puede notar que para el EPS el FD es mayor que 1, lo que significa que la oscilación de la temperatura del aire al interior del módulo es mayor que la oscilación de la temperatura exterior.

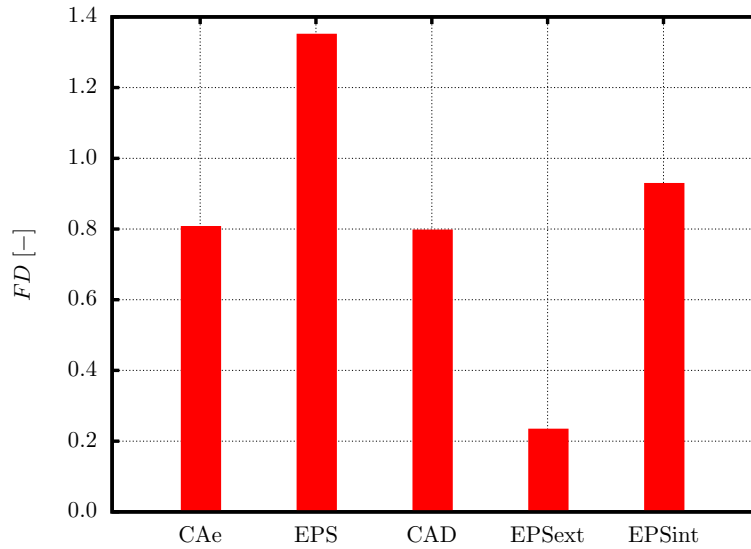


Figura 4.3: Factor de decremento (FD) para cada sistema constructivo, sin aire acondicionado.

En la Figura 4.4 se muestra la energía transferida a través de toda la envolvente ($E_{env_{entra}}$, $E_{env_{sale}}$) para cada sistema constructivo, sin aire acondicionado. Se puede observar que el orden del desempeño térmico de los sistemas constructivos, tanto para $E_{env_{entra}}$ como para $E_{env_{sale}}$, es igual que para el FD , del mejor al peor: EPSext, CAD, CAe, EPSint, EPS. Es preciso resaltar que la magnitud de los valores de esta gráfica es mucho menor que en el análisis por componente (Figura 4.2); esto se debe a que en un análisis de toda la envolvente los flujos de calor que entran se contrarestan con los que salen.

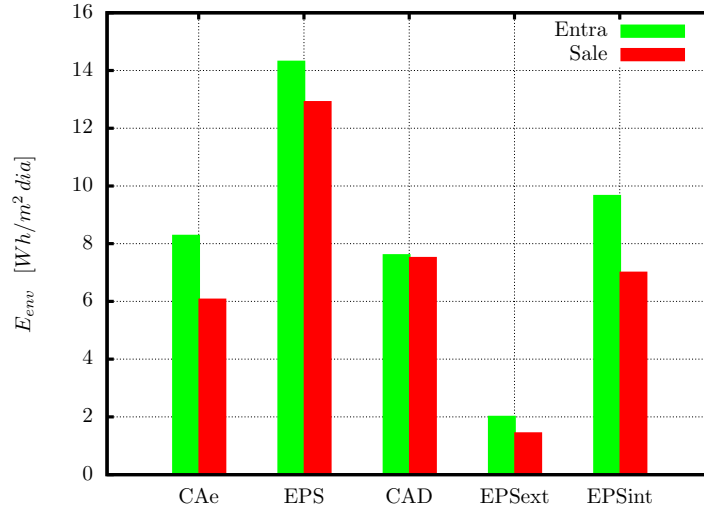


Figura 4.4: Energía transferida a través de toda la envolvente ($E_{env_{entra}}$, $E_{env_{sale}}$) para cada sistema constructivo, sin aire acondicionado.

4.4. Condición con aire acondicionado

Se realiza un análisis bajo una condición con aire acondicionado. Primero se presenta el análisis por componente de la envolvente y luego se presenta el análisis de toda la envolvente. El termostato se ajusta en $30.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, la cual es la temperatura superior de confort (T_{c+}) y está dada por

$$T_{c+} = 13.5\text{ }^{\circ}\text{C} + (0.54 T_{prom}) + \Delta T_c, \quad (4.10)$$

donde T_{prom} es el promedio de la temperatura exterior durante el día y ΔT_c es la amplitud de la zona de confort [21] y es de $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se usa T_{c+} porque es la referencia que usa Ener-Habitat, sin embargo para este caso de estudio T_{c+} es superior al promedio de la temperatura del aire exterior. Por esta razón las cargas de calentamiento son mayores a las cargas de enfriamiento, que no es lo que se esperaría para un mes cálido.

Análisis por componente

A continuación se presentan los resultados del análisis por componente de la envolvente, con aire acondicionado. Se presentan gráficas para la energía

transferida a través de cada componente de la envolvente (E_{entra} , E_{sale}). Puesto que no existen cargas térmicas internas ni infiltración o ventilación, la suma de la energía que entra a través de cada componente es igual a la carga térmica de enfriamiento y la suma de la energía que sale a través de cada componente es igual a la carga térmica de calentamiento.

En la Figura 4.5 se muestra la energía transferida a través de cada componente de la envolvente (E_{entra} , E_{sale}), con aire acondicionado. Se puede observar que la pared Este es el componente por el que hay una mayor entrada de energía y el único por el que entra más energía de la que sale. Esto se debe a que en la pared Este incide la mayor radiación solar por la mañana, cuando el interior del módulo está a una menor temperatura que el exterior. Por otro lado, la pared Norte, Oeste y Sur tienen un comportamiento muy similar, en donde los distintos sistemas constructivos muestran resultados parecidos para las tres paredes y en el caso del EPSext no hay entrada de energía. El techo es el segundo componente por el que entra más energía, después de la pared Este, sin embargo por el techo sale más energía que la que entra. Por último, en el piso se observa la mayor salida de energía y nada de entrada (excepto para el EPS); cabe mencionar que el piso tiene un comportamiento diferente a los demás componentes puesto que no está en contacto con el exterior y tiene una condición de frontera de temperatura constante.

En las siguientes tablas se presenta el orden del mejor al peor de los valores de la energía que entra (Tabla 4.4) y sale (Tabla 4.5) respectivamente a través de cada componente de la envolvente. Se puede observar que el orden entre sistemas constructivos para E_{entra} es igual para todos los componentes, excepto para la pared Oeste. Asimismo, se aprecia que el mejor sistema constructivo para todos los componentes es el EPSext y el peor es el CAD. Para E_{sale} , cada componente muestra un orden diferente, pero para todos los casos el mejor sistema constructivo es el EPS y el peor es el CAD.

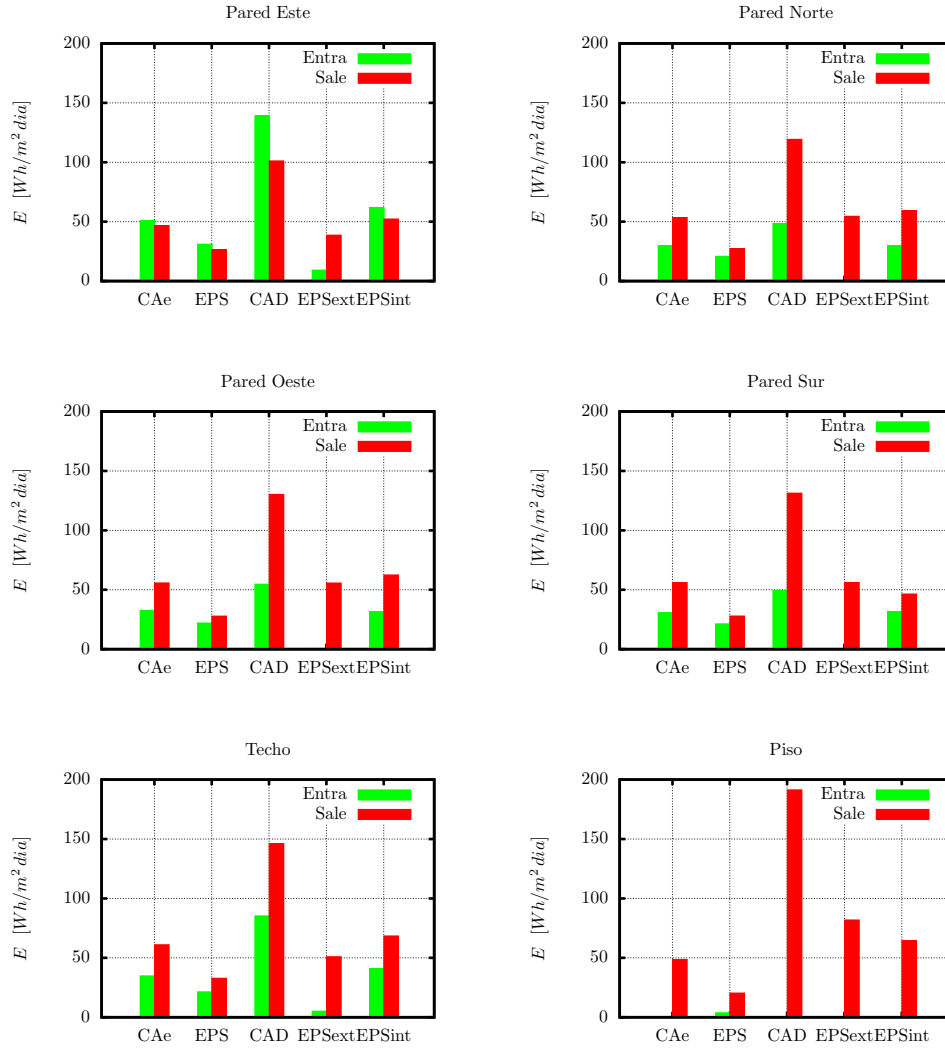


Figura 4.5: Energía transferida (E_{entra} , E_{sale}) a través de las paredes Este, Norte, Oeste, Sur, el techo y el piso, para cada sistema constructivo, con aire acondicionado.

P. Este	P. Norte	P. Oeste	P. Sur	Techo	Piso
EPSext	EPSext	EPSext	EPSext	EPSext	-
EPS	EPS	EPS	EPS	EPS	-
CAe	CAe	EPSint	CAe	CAe	-
EPSint	EPSint	CAe	EPSint	EPSint	-
CAD	CAD	CAD	CAD	CAD	EPS

Tabla 4.4: Energía que entra (E_{entra}) a través de cada componente de la envolvente con aire acondicionado: orden del mejor al peor entre sistemas constructivos. Para el piso sólo se incluye el EPS puesto que es el único sistema constructivo que presenta entrada de calor.

P. Este	P. Norte	P. Oeste	P. Sur	Techo	Piso
EPS	EPS	EPS	EPS	EPS	EPS
EPSext	CAe	EPSext	EPSint	EPSext	CAe
CAe	EPSext	CAe	CAe	CAe	EPSint
EPSint	EPSint	EPSint	EPSext	EPSint	EPSext
CAD	CAD	CAD	CAD	CAD	CAD

Tabla 4.5: Energía que sale (E_{sale}) a través de cada componente de la envolvente con aire acondicionado: orden del mejor al peor entre sistemas constructivos.

Análisis de toda la envolvente

A continuación se presentan los resultados del análisis de toda la envolvente, con aire acondicionado. Se presentan gráficas para la carga térmica de enfriamiento y calentamiento (C_{enf} , C_{cal}) y para la carga térmica total (C_{total}).

En la Figura 4.6 se muestra la carga térmica de enfriamiento y calentamiento (C_{enf} , C_{cal}) transferida a través de toda la envolvente para cada sistema constructivo, con aire acondicionado. El orden, del mejor al peor, del desempeño térmico de los sistemas constructivos es el siguiente. Para C_{enf} : EPSext, EPS, CAe, EPSint, CAD. Para C_{cal} : EPS, CAe, EPSext, EPSint, CAD.

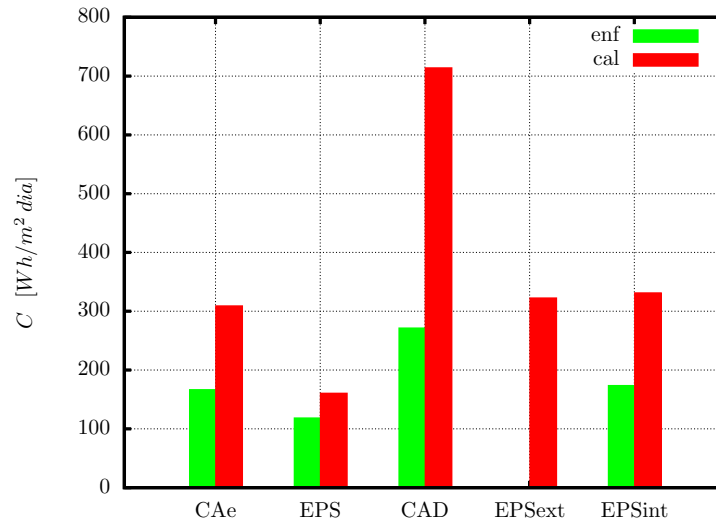


Figura 4.6: Carga térmica de enfriamiento (C_{enf}) y calentamiento (C_{cal}) a través de toda la envolvente para cada sistema constructivo, con aire acondicionado.

En la Figura 4.7 se presenta la carga térmica total (C_{total}) requerida para cada sistema constructivo, con aire acondicionado. El orden del desempeño térmico de los sistemas constructivos, del mejor al peor, es: EPS, EP-Sext, CAe, EPSint, CAD. Este orden resulta el mismo que se muestra en el análisis por componente, para todos los componentes con excepción de la pared Este, si se considera la carga térmica total, es decir si se suma la carga térmica de enfriamiento y calentamiento.

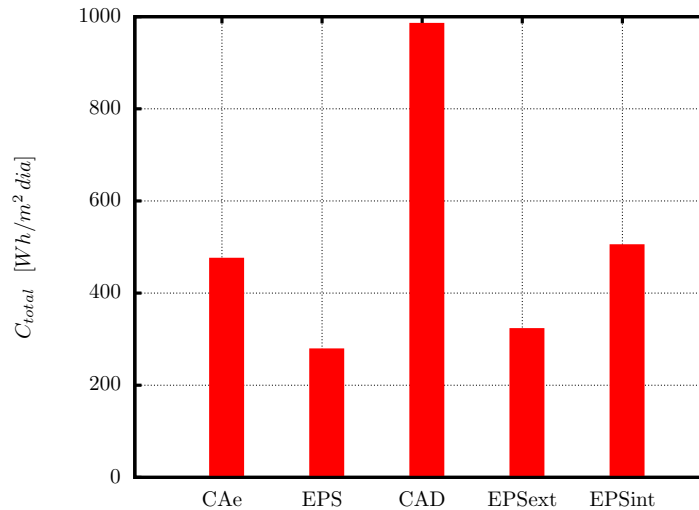


Figura 4.7: Carga térmica total (C_{total}) transferida a través de toda la envolvente para cada sistema constructivo, con aire acondicionado.

4.5. Análisis de la interacción entre los componentes de la envolvente

Para demostrar la importancia de la interacción entre los componentes de la envolvente bajo una condición sin a/a (aire acondicionado), se hizo una serie de simulaciones con y sin a/a, para los cinco sistemas constructivos, usando dos tipos de análisis:

- Análisis simplificado: en este análisis se simula cada uno de los componentes de la envolvente por separado. Es decir, primero se simula la pared Este y todos los demás componentes se definen como adiabáticos, sin masa térmica y sin emitancia; del mismo modo se simulan los demás componentes.
- Análisis real: en este análisis se simulan todos los componentes de la envolvente al mismo tiempo. Es decir, se hace un análisis de toda la envolvente como unidad (como se ha hecho previamente).

De la Figura 4.8 a la Figura 4.12, se muestra el flujo de calor para cada componente de la envolvente (q''), usando los cinco sistemas constructivos

respectivamente y realizando un análisis: (a) simplificado, sin a/a; (b) real, sin a/a; (c) simplificado, con a/a; (d) real, con a/a. La línea negra representa el flujo de calor a través de toda la envolvente (q''_{env}). En las dos gráficas de arriba (condición sin a/a) se puede observar que el comportamiento de los resultados es muy diferente. En las dos gráficas de abajo (condición con a/a) se observa que el comportamiento es similar a pesar de que en una se hace un análisis simplificado y en la otra un análisis real.

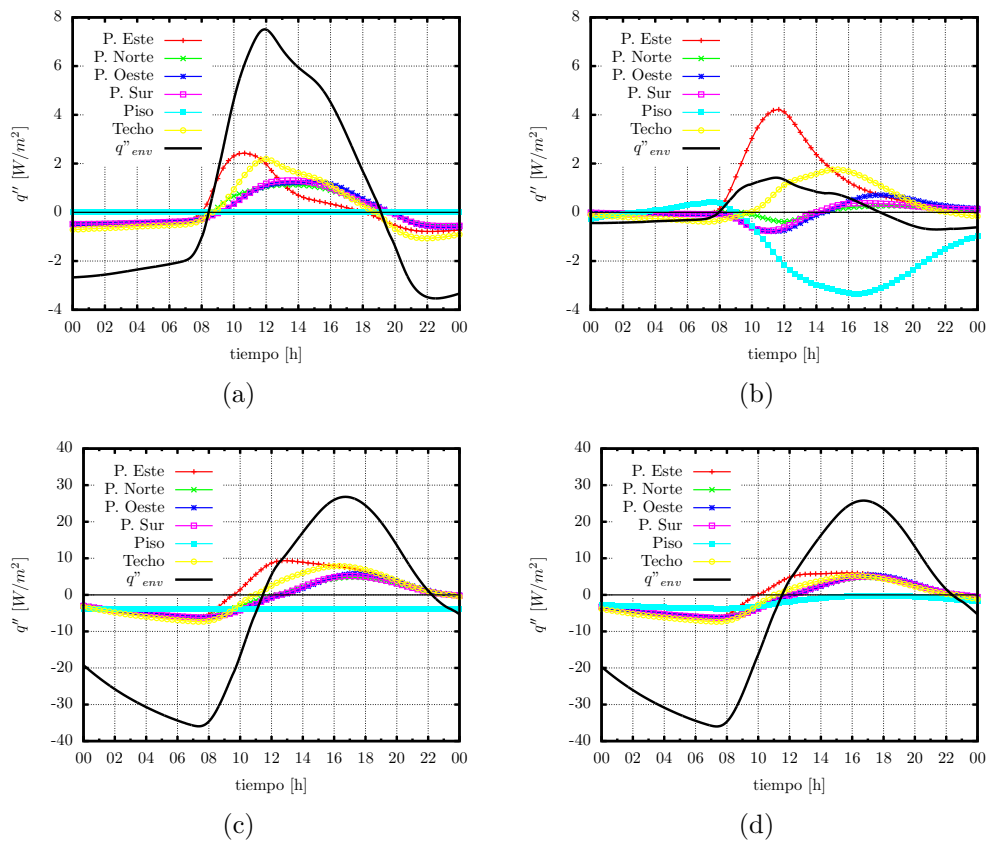


Figura 4.8: Flujo de calor para cada componente de la envolvente (q'') y para toda la envolvente (q''_{env}) a lo largo del día, usando CAe. Análisis: (a) simplificado, sin a/a; (b) real, sin a/a; (c) simplificado, con a/a; (d) real, con a/a.

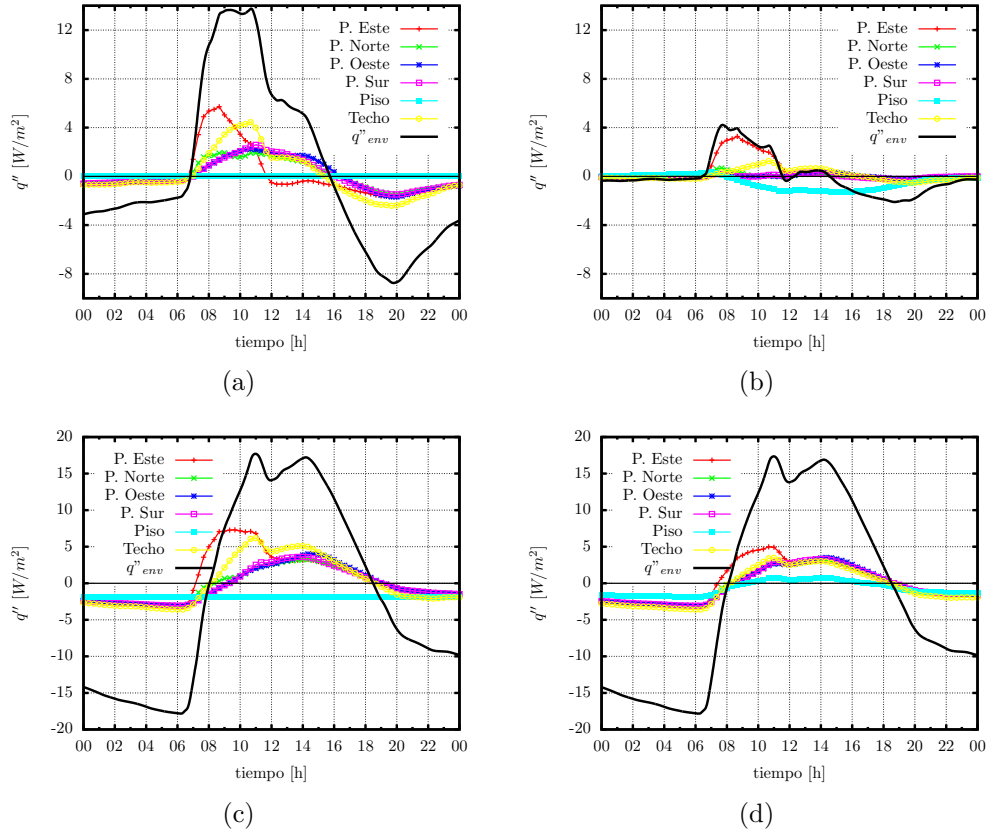


Figura 4.9: Flujo de calor para cada componente de la envolvente (q'') y para toda la envolvente (q''_{env}) a lo largo del día, usando EPS. Análisis: (a) simplificado, sin a/a; (b) real, sin a/a; (c) simplificado, con a/a; (d) real, con a/a.

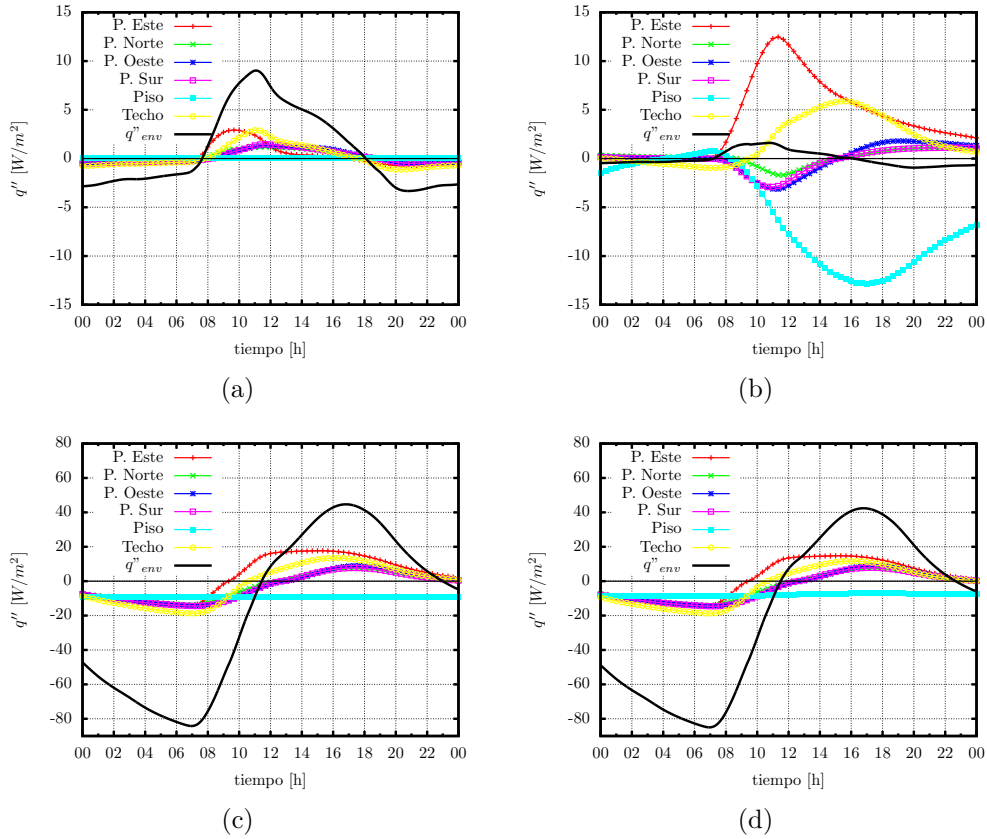


Figura 4.10: Flujo de calor para cada componente de la envolvente (q'') y para toda la envolvente (q''_{env}) a lo largo del día, usando CAD. Análisis: (a) simplificado, sin a/a; (b) real, sin a/a; (c) simplificado, con a/a; (d) real, con a/a.

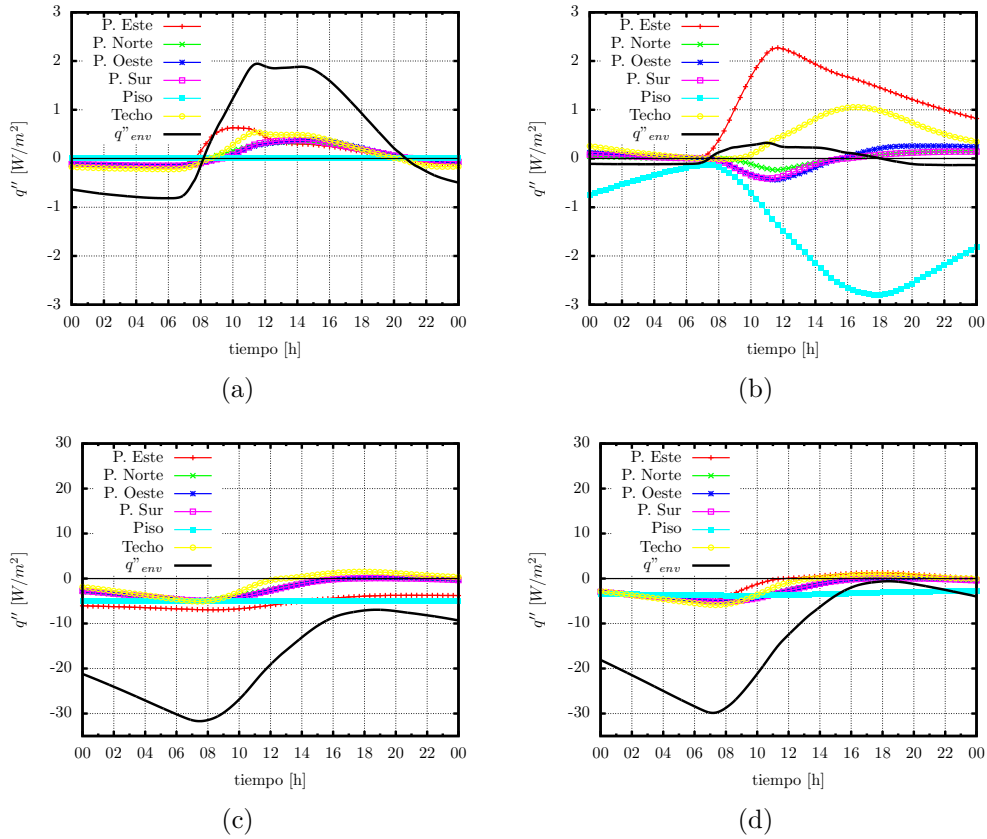


Figura 4.11: Flujo de calor para cada componente de la envolvente (q'') y para toda la envolvente (q''_{env}) a lo largo del día, usando EPSext. Análisis: (a) simplificado, sin a/a; (b) real, sin a/a; (c) simplificado, con a/a; (d) real, con a/a.

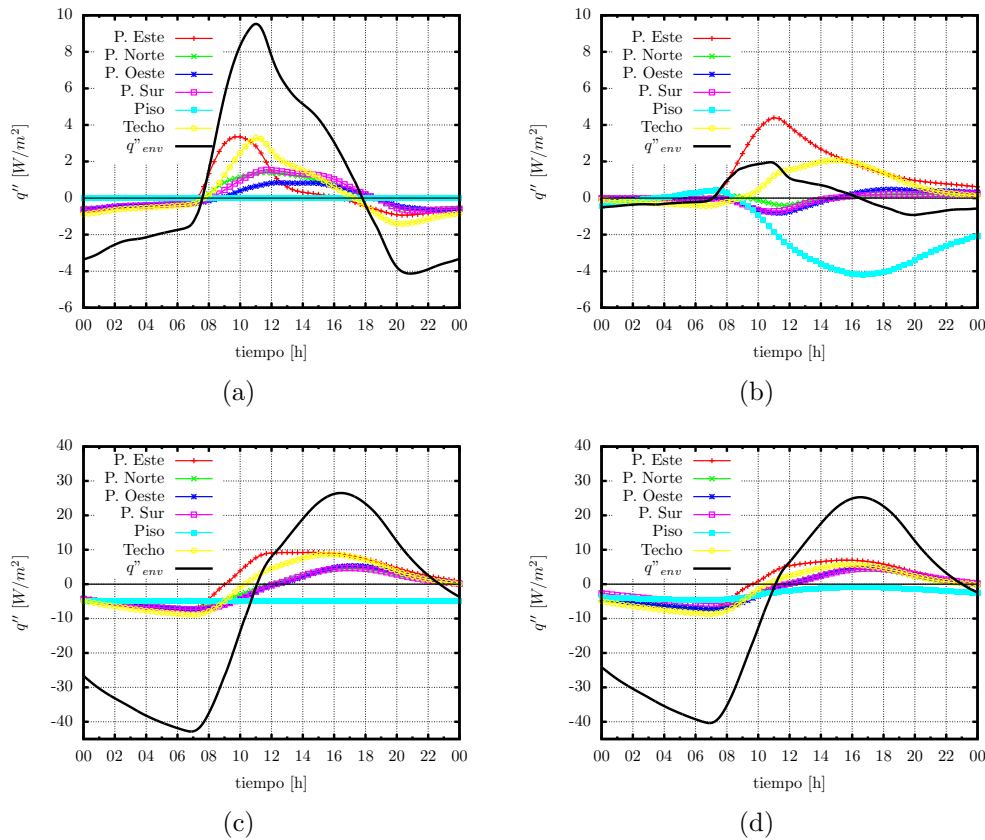


Figura 4.12: Flujo de calor para cada componente de la envolvente (q'') y para toda la envolvente (q''_{env}) a lo largo del día, usando EPSint. Análisis: (a) simplificado, sin a/a; (b) real, sin a/a; (c) simplificado, con a/a; (d) real, con a/a.

En las cinco figuras anteriores (4.8-4.12), correspondientes a los cinco sistemas constructivos, se puede observar que cuando se tiene una condición sin a/a, los resultados son muy diferentes entre el análisis simplificado (por componente) y el análisis real (de toda la envolvente). Sin embargo, cuando se tiene una condición con a/a, los resultados son muy parecidos entre ambos tipos de análisis. Esto se debe a que bajo una condición sin a/a, existe una interacción importante entre los componentes de la envolvente. Esta interacción se ve reflejada en la gráfica (b) de las cinco figuras, la cual representa un análisis real, sin a/a. En este caso se observa que la energía entra principalmente por la pared Este y el techo y tiende a salir por las paredes Norte,

Oeste, Sur y por el piso. A este fenómeno es lo que se le denomina en esta tesis interacción entre los componentes de la envolvente y es la razón por la cual los resultados varían entre un análisis simplificado y un análisis real, bajo una condición sin a/a.

Análisis de un módulo mixto

En un análisis sin aire acondicionado que considere a toda la envolvente como unidad, el desempeño térmico de los diferentes sistemas constructivos depende de la posición en la envolvente de la edificación. Por ejemplo, el mejor sistema constructivo para una cierta pared no necesariamente será el mejor para el techo o viceversa. Con el fin de demostrar esto, se lleva a cabo una simulación de un módulo mixto compuesto por los diferentes sistemas constructivos monocapa. Para este análisis sólo se seleccionan los monocapa pues se busca enfatizar la importancia de la posición de los materiales conforme a la orientación y no conforme a la posición de las capas en el sistema constructivo.

El módulo mixto está formado por techo y pared Este de EPS, piso de CAD y el resto de las paredes de CAe. La configuración para este módulo se encontró al simular diferentes configuraciones y la descrita anteriormente fue la que mostró un mejor desempeño térmico. No se ha definido una metodología precisa para encontrar la mejor configuración, sin embargo esta configuración sí obedece a cierto criterio: se recomienda un material aislante para el techo y la pared Este que son los componentes con mayor incidencia solar, un material masivo para el piso que proporcione mayor inercia térmica y que no obstruya las pérdidas favorables de calor a lo largo del día y un material intermedio que combine ambas características para el resto de las paredes, que permita un balance adecuado entre la entrada y salida de calor.

En la Figura 4.13 se presenta el factor de decremento (FD) del módulo mixto, junto con el FD de los módulos monocapa CAe, EPS y CAD. Se puede apreciar que el módulo mixto muestra un menor valor de FD y por lo tanto un mejor desempeño térmico. Este módulo presenta un FD 60 % mejor que el EPS, 33 % mejor que el CAe y 32 % mejor que el CAD.

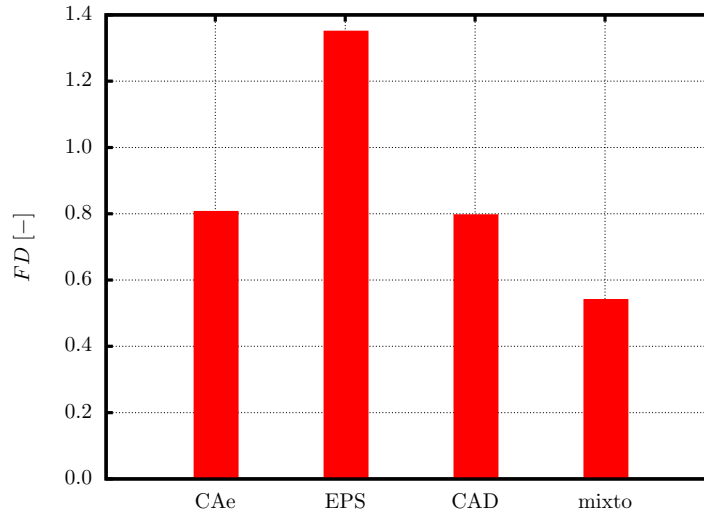


Figura 4.13: Factor de decremento (FD) para módulos formados por los sistemas constructivos monocapa. El módulo mixto está formado por techo y pared Este de EPS, piso de CAD y el resto de las paredes de CAe.

En la Figura 4.14 se muestra la energía transferida a través de toda la envolvente ($E_{env_{entra}}/E_{env_{sale}}$) del módulo mixto junto con los valores para los módulos monocapa. Se puede observar que el módulo mixto presenta una menor entrada y salida de energía a través de la envolvente que el resto de los módulos y además es el único en el cual sale más energía de la que entra. Esto se debe a la configuración del módulo mixto, la cual disminuye la entrada de energía en el techo y la pared, usando al EPS y aumenta la salida de energía a través del piso, usando el CAD.

Tomando en cuenta estos resultados se puede ver que una combinación adecuada de los sistemas constructivos conforme a la orientación, puede proporcionar un mejor desempeño térmico que al utilizar un sólo sistema constructivo para toda la envolvente.

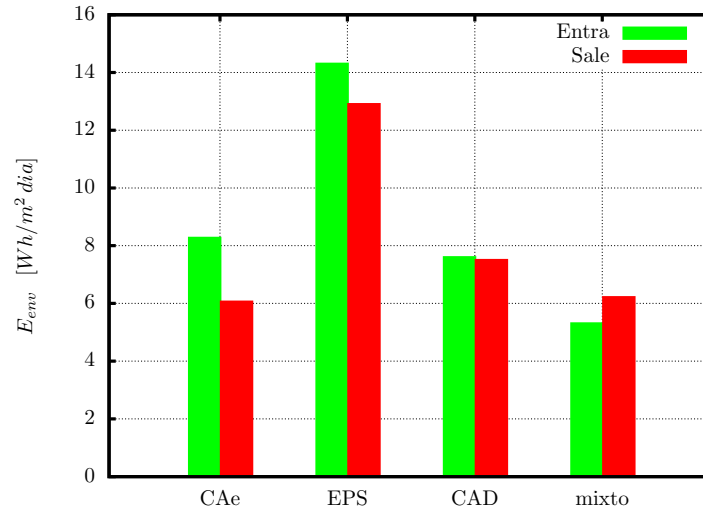


Figura 4.14: Energía transferida a través de toda la envolvente ($E_{env_{entra}}/E_{env_{sale}}$) para módulos formados por los sistemas constructivos monocapa. El módulo mixto está formado por techo y pared Este de EPS, piso de CAD y el resto de las paredes de CAe.

4.6. Conclusiones

En este capítulo se realizó una serie de simulaciones usando cinco módulos; cada uno de ellos compuesto por un sistema constructivo diferente. Se llevaron a cabo las simulaciones para un mes cálido bajo condiciones con y sin aire acondicionado. Para ambas condiciones se realizó un análisis por componente y otro análisis para toda la envolvente.

En el caso con aire acondicionado se observó concordancia entre los resultados de un análisis por componente y un análisis de toda la envolvente. Al usar el parámetro de la carga térmica total, la tendencia de los resultados fue la misma entre ambos tipos de análisis y además estos resultados coinciden con lo reportado por Barrios et al. [9], en donde se realiza un análisis por componente. Asimismo, el analizar la interacción entre los componentes de la envolvente se pudo apreciar que cuando se tiene una condición con aire acondicionado, los resultados son similares al realizar un análisis simplificado o un análisis real. Esto se debe a que el uso de aire acondicionado equilibra

los flujos de calor que entran por los distintos componentes, es decir, si entra energía por el techo, por ejemplo, la energía se disipa debido al aire acondicionado y no afecta a los otros componentes. Es por ello que para el caso con aire acondicionado no existe una interacción importante entre los componentes de la envolvente.

Sin embargo, en el caso sin aire acondicionado, se obtienen resultados diferentes dependiendo de si se hace un análisis por componente o de toda la envolvente, puesto que en este caso sí existe una interacción entre los componentes de la envolvente. En este capítulo se vio un ejemplo de interacción en donde la energía que se transfiere a través de la envolvente del módulo, entra por el techo y la pared. Este, pero sale por el piso y el resto de las paredes.

Debido a esta interacción, el sistema constructivo que presente la menor transferencia de calor a través de cada componente no es necesariamente el que tendrá el mejor desempeño térmico. Por ejemplo, el EPS es el sistema constructivo que tiene la menor entrada y salida de calor por componente (E_{entra} , E_{sale}), sin embargo propicia la mayor oscilación de temperatura al interior del módulo y por lo tanto el peor desempeño térmico, el cual se ve reflejado en los parámetros de ($E_{env_{entra}}$, $E_{env_{sale}}$) y DF . Este fenómeno se debe a que un módulo construido con un sistema constructivo aislante tiene una entrada de energía relativamente baja pero al mismo tiempo impide que la energía dentro del módulo se disipe ocasionando que ésta se acumule.

Se puede concluir por lo tanto que sí existe una interacción importante entre los componentes de la envolvente cuando no se usa aire acondicionado. Esta interacción se debe tomar en cuenta cuando se haga un análisis térmico de la edificación, es decir, se debe realizar un análisis integral de la edificación que estudie simultáneamente la transferencia de calor a través de todos los componentes de la envolvente, incluyendo al piso.

Considerando lo anterior, al evaluar una edificación cuando no se usa aire acondicionado, FD_{sa} , q'' y E_{entra} , E_{sale} no son parámetros adecuados, ya que no toman en cuenta la interacción. Por otro lado, FD , q''_{env} y $E_{env_{entra}}$, $E_{env_{sale}}$ sí son parámetros adecuados puesto que se aplican en un análisis integral de toda la envolvente. Al usar aire acondicionado no hay una interacción importante entre los componentes de la envolvente, por lo que se puede evaluar por componente o toda la envolvente.

Asimismo, teniendo en cuenta la interacción que existe entre los componentes de la envolvente cuando no se usa aire acondicionado, se comprobó que es importante considerar la posición de los materiales conforme a la orientación, es decir, si se encuentran en el techo, piso o una pared determinada.

Para esto se simuló un módulo mixto compuesto por techo y pared Este de EPS, piso de CAD y el resto de las paredes de CAe. Este módulo mixto mostró una mejoría en el desempeño térmico con respecto a los módulos compuestos por un sólo sistema constructivo monocapa.

Capítulo 5

Validación de Ener-Habitat con EnergyPlus

Se realizan una serie de simulaciones con el fin validar la herramienta Ener-Habitat con el programa EnergyPlus. Para igualar las condiciones de Ener-Habitat, se considera un módulo en el que sólo existe transferencia de calor a través del techo, mientras que las paredes y el piso se definen como adiabáticos, sin masa térmica y sin emitancia.

En la sección 5.1 se describen las características de las simulaciones realizadas. En la sección 5.2 se definen los parámetros usados para llevar a cabo la validación. En la sección 5.3 y 5.4 se presentan los resultados de las simulaciones bajo condiciones sin y con aire acondicionado, para un día típico del mes cálido y del mes frío. Por último, en la sección 5.5 se presentan las conclusiones relativas al capítulo.

5.1. Características de las simulaciones

Módulo de prueba

Para las simulaciones de este apartado con EnergyPlus se utiliza el método de funciones de transferencia con 60 iteraciones por hora¹. Para las simulaciones con Ener-Habitat se usa la versión 2.0. Se usan módulos de base cuadrada de 2.6 m de ancho (desde la superficie exterior de una pared hasta la superficie exterior de la pared opuesta) y 2.5 m de altura (desde la superficie interior del piso hasta la superficie exterior del techo), sin ventanas, sin infiltración y sin carga térmica interna. La orientación de sus paredes es normal a los puntos cardinales y el techo no tiene inclinación.

Los módulos deben de estar acordes a las condiciones de Ener-Habitat, que considera un solo elemento de la envolvente, por lo que en este caso sólo se considera el techo. De este modo, los módulos simulados están compuestos por paredes y pisos adiabáticos, sin masa térmica y con emitancia de cero. En EnergyPlus, los materiales sin masa térmica se definen dentro del campo *Material:NoMass*, donde la única propiedad a modificar es la resistencia térmica. En el caso de estudio no importa el valor asignado a ésta pues las paredes y piso se definieron como adiabáticas.

Para el techo se simulan cinco sistemas constructivos. Los sistemas constructivos son los siguientes: 0.10 m de concreto aereado (CAe), 0.10 m de poliestireno expandido estándar (EPS), 0.10 m de concreto de alta densidad (CAD), 0.08 m de concreto de alta densidad con una capa de 0.02 m de poliestireno expandido estándar al exterior (EPSext) y 0.08 m de concreto de alta densidad con una capa de 0.02 m de poliestireno expandido estándar al interior (EPSint).

Los materiales que componen a los sistemas constructivos se seleccionan así para representar un material aislante (poliestireno expandido estándar), un material masivo (concreto de alta densidad) y un material intermedio (concreto aereado). En la tabla 5.1 se presentan las propiedades térmicas de los materiales. Todas las superficies de los materiales se definen con una absorptancia solar de 0.4.

¹La metodología de selección del método y los parámetros correspondientes para las simulaciones se presenta en el capítulo 3.

Material	k [$\frac{W}{mK}$]	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	c [$\frac{J}{KgK}$]
Concreto aereado	0.12	550	1004
Concreto de alta densidad	2.00	2400	1000
Poliestireno expandido estándar	0.04	15	1400

Tabla 5.1: Conductividad térmica (k), densidad (ρ) y calor específico (c) del concreto aereado, concreto de alta densidad y poliestireno expandido estándar.

Clima

Se utiliza el clima de Torreón, Coahuila. Para el más cálido se toma el día 15 de mayo, mientras que para el mes frío se toma el 15 de diciembre. El archivo de clima se crea a partir de datos climáticos obtenidos directamente de Ener-Habitat, que considera el día típico del mes con condiciones periódicas, es decir, los datos de la primera y última hora del día son los mismos. Los datos climáticos se convierten a formato de EnergyPlus (.epw) con el programa auxiliar *Weather Converter* que viene incluido con EnergyPlus. Se toman datos de Ener-Habitat de temperatura ambiente y temperatura sol-aire y con estos datos se calcula la irradiancia global por área para superficie horizontal, considerando una absortancia solar de 0.4 y un coeficiente de película exterior para el techo de $13 W/m^2 K$. El archivo climático resultante (.epw) contiene datos de temperatura ambiente, de irradiancia difusa en Wh/m^2 y se asignan valores de cero para irradiancia directa, humedad relativa y velocidad del viento.

Cabe mencionar que la irradiancia global por área para superficie horizontal obtenida de Ener-Habitat se asignó como irradiancia difusa en EnergyPlus, mientras que la irradiancia directa se estableció como cero. Por lo que para el archivo de clima, la irradiancia difusa es igual a la irradiancia global. También se intentó descomponer a la irradiancia proporcionada por Ener-Habitat en difusa y directa, pero al hacer esto el programa *Weather Converter* modifica el valor de la irradiancia global.

5.2. Parámetros para realizar la validación

A continuación se describen los parámetros utilizados para realizar la validación.

- 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 temperatura sol-aire del techo. Al comparar dos o más sistemas constructivos, valores menores de FD_{sa} significan un mejor desempeño térmico. Este parámetro está dado por

$$FD_{sa} = \frac{T_{int_{max}} - T_{int_{min}}}{T_{sa_{max}} - T_{sa_{min}}}, \quad (5.1)$$

donde $T_{int_{max}}$ y $T_{int_{min}}$ son las temperaturas del aire interior máxima y mínima respectivamente, $T_{sa_{max}}$ y $T_{sa_{min}}$ son las temperaturas sol-aire máxima y mínima respectivamente durante el día. A su vez, T_{sa} está dada por

$$T_{sa} = T_{ext} + \frac{I a}{h_p} + CF, \quad (5.2)$$

donde T_{ext} es la temperatura exterior, I es la irradiancia solar [W/m^2] que incide sobre el techo, a es la absorptancia solar del techo, h_p es el coeficiente de película [$W/m^2 K$] y CF es el factor de corrección debido a las pérdidas radiativas de onda larga y es -3.9 °C para el techo.

- Energía transferida a través del techo (E_{entra}): Se usa bajo la condición sin aire acondicionado y es la cantidad de energía transferida durante un día por metro cuadrado [$J/m^2 dia$] a través del techo. Este parámetro se obtiene al realizar la integral durante un día del flujo de calor que entra al módulo, como lo muestra la siguiente ecuación

$$E_{entra} = \int_{t_0}^{t_f} q'' dt \quad \text{si } T_{sup_{int}} > T_{int}, \quad (5.3)$$

donde t_0 y t_f representan el inicio y el final del día, dt es el incremento temporal, $T_{sup_{int}}$ es la temperatura superficial interior del techo, T_{int} es la temperatura interior del aire y q'' es el flujo de calor, que a su vez está dado por

$$q'' = h_{int} (T_{sup_{int}} - T_{int}), \quad (5.4)$$

donde h_{int} es el coeficiente convectivo interior del techo y es de $6.6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Cabe mencionar que en el caso de las simulaciones de este apartado, la energía que entra al módulo (E_{entra}) es igual a energía que sale, puesto que se utilizan datos climáticos con un comportamiento periódico. Por esta razón sólo se toma en cuenta la energía que entra al módulo.

- Carga térmica de enfriamiento (C_{enf}): Se usa bajo la condición con aire acondicionado y es la energía por metro cuadrado [$J/m^2 \text{ dia}$] necesaria para enfriar el aire al interior a la temperatura establecida por el termostato. EnergyPlus obtiene C_{enf} mediante la variable *Zone Air System Sensible Cooling Energy*. Dado que en el módulo en cuestión no existen otras fuentes de calor como lo es la infiltración o las cargas internas, este parámetro también se puede obtener de la misma forma que E_{entra} , al realizar la integral durante un día del flujo de calor (q'') que entra,

$$C_{enf} = \int_{t_0}^{t_f} q'' dt \quad \text{si } T_{sup_{int}} > T_{int}. \quad (5.5)$$

- Carga térmica de calentamiento (C_{cal}): Se usa bajo la condición con aire acondicionado y es la energía por metro cuadrado [$J/m^2 \text{ dia}$] necesaria para calentar el aire al interior a la temperatura establecida por el termostato. EnergyPlus obtiene C_{cal} mediante la variable *Zone Air System Sensible Heating Energy*. Dado que en el módulo en cuestión no existen otras fuentes de calor como lo es la infiltración o las cargas internas, este parámetro también se puede obtener de la misma forma que se obtendría E_{sale} , realizando la integral durante un día del flujo de calor (q'') que sale,

$$C_{cal} = \int_{t_0}^{t_f} q'' dt \quad \text{si } T_{sup_{int}} < T_{int}. \quad (5.6)$$

Las unidades de los parámetros que representan energía, se convierten de $J/m^2 \text{ dia}$ a $Wh/m^2 \text{ dia}$.

5.3. Condición sin aire acondicionado

Se realiza un análisis para la condición sin aire acondicionado en el cual se comparan los resultados de Ener-Habitat con los de EnergyPlus. Los paráme-

tros a considerar son la energía que entra a través del techo (E_{entra}) y el factor de decremento sol-aire (FD_{sa}). Además se muestran gráficas de temperatura del aire interior para los diferentes sistemas constructivos. Se presentan resultados para un día típico del mes cálido y del mes frío.

Mes cálido

A continuación se presentan los resultados para un día típico del mes cálido, sin aire acondicionado. En la Figura 5.1 se muestra la energía transferida a través del techo (E_{entra}) obtenida con EnergyPlus y Ener-Habitat, para los diferentes sistemas constructivos. El orden del desempeño térmico de los sistemas constructivos es el mismo con ambos programas; del mejor al peor es: EPSext, CAe, CAD, EPSint, EPS. La diferencia relativa entre los valores obtenidos con Ener-Habitat y EnergyPlus se calcula con respecto a los valores obtenidos con EnergyPlus, y está dada por

$$d_r = \left| \frac{x - x_{ref}}{x_{ref}} \right| \times 100, \quad (5.7)$$

donde x es el dato a evaluar y x_{ref} es el dato de referencia.

Se obtiene una diferencia relativa promedio de 4.93 %, con un valor mínimo para el EPSint de 3.64 % y un valor máximo para el EPS de 6.41 %.

En la Figura 5.2 se presenta el factor de decremento sol-aire (FD_{sa}), obtenido con EnergyPlus (E+) y Ener-Habitat (EH), para cada sistema constructivo, para el día típico del mes cálido. El orden del desempeño térmico de los sistemas constructivos es el mismo que en el caso de E_{entra} , el cual del mejor al peor es: EPSext, CAe, CAD, EPSint, EPS. La diferencia relativa promedio es de 7.14 %, con un valor mínimo para el CAD de 0 % y un valor máximo para el EPS de 12.68 %.

En la Figura 5.3 se muestra la temperatura del aire interior para (a) CAe, (b) EPS, (c) CAD, (d) EPSext, (e) EPSint, obtenida con EnergyPlus y Ener-Habitat. Se puede observar cualitativamente que los valores de temperatura obtenidos con ambos programas coinciden satisfactoriamente, siendo el EPS el sistema constructivo que menos coincide. Por otro lado, se puede ver que el comportamiento de la temperatura es diferente dependiendo del sistema constructivo: el EPSext muestra la menor amplitud de oscilación, mientras que el EPS presenta la mayor amplitud.

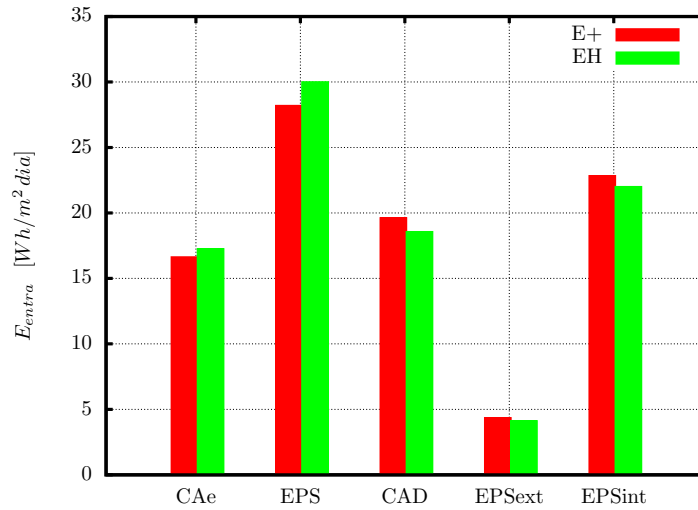


Figura 5.1: Energía transferida a través del techo obtenida con EnergyPlus (E+) y Ener-Habitat (EH), para cada sistema constructivo, para el día típico de mes cálido.

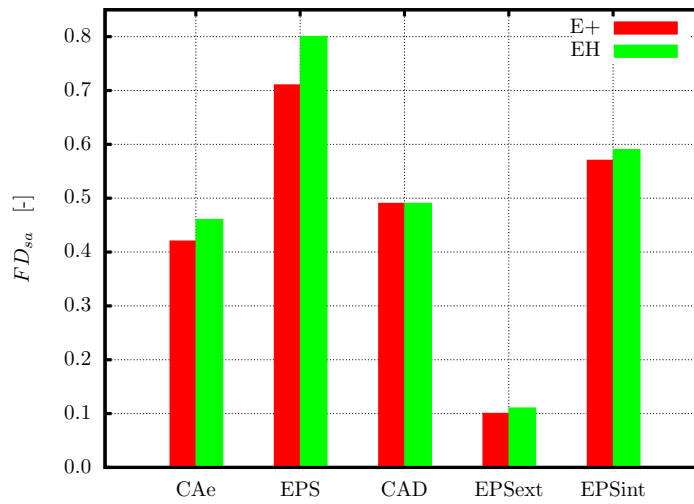


Figura 5.2: Factor de decremento sol-aire (FD_{sa}), obtenido con EnergyPlus (E+) y Ener-Habitat (EH), para cada sistema constructivo, para el día típico del mes cálido.

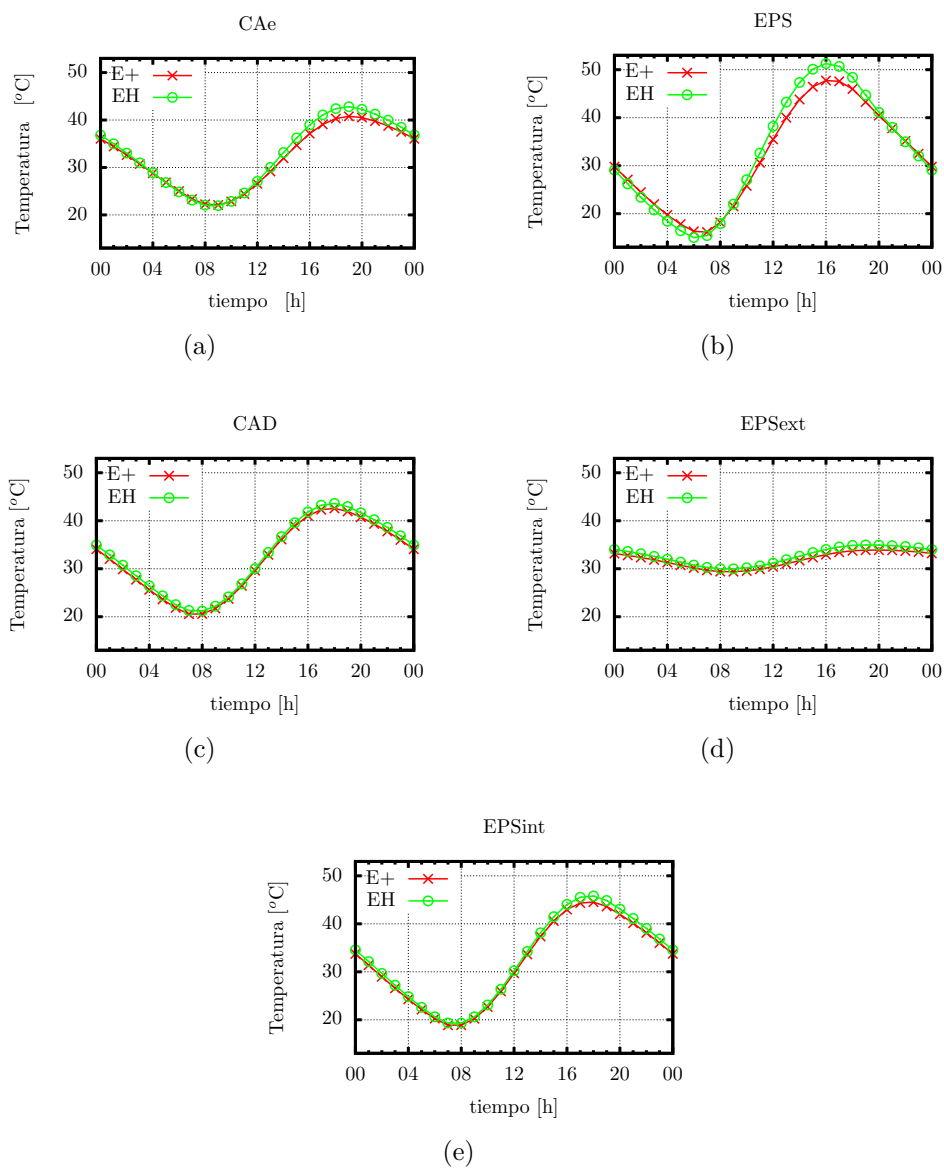


Figura 5.3: Temperatura del aire interior para cada sistema constructivo, obtenida con EnergyPlus (E+) y Ener-Habitat (EH), para el día típico del mes cálido.

Mes frío

A continuación se presentan los resultados para el día típico del mes frío, sin aire acondicionado. En la Figura 5.4 se muestra la energía transferida a través del techo (E_{entra}) obtenida con EnergyPlus y Ener-Habitat, para los diferentes sistemas constructivos. El orden del desempeño térmico de los sistemas constructivos es el mismo que en el caso del mes cálido, el cual del mejor al peor es: EPSext, CAe, CAD, EPSint, EPS. La diferencia relativa promedio es de 10.00 %, con un valor mínimo para el EPS de 1.51 % y un valor máximo para el EPSext de 15.54 %. Se puede apreciar que el caso del mes frío presenta una diferencia relativa mayor que el caso del mes cálido.

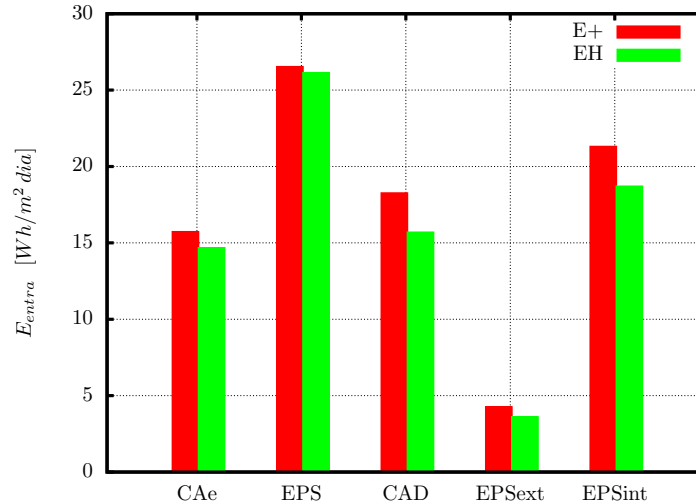


Figura 5.4: Energía transferida a través del techo, obtenida con EnergyPlus (E+) y Ener-Habitat (EH), para cada sistema constructivo, para el día típico del mes frío.

En la Figura 5.5 se presenta el factor de decremento sol-aire (FD_{sa}), obtenido con EnergyPlus (E+) y Ener-Habitat (EH), para cada sistema constructivo, para el día típico del mes frío. El orden del desempeño térmico de los sistemas constructivos es el mismo que en el caso del mes cálido, el cual del mejor al peor es: EPSext, CAe, CAD, EPSint, EPS. La diferencia relativa promedio es de 6.17 %, con un valor mínimo para el EPSint de 1.79 % y un valor máximo para el EPS de 10.00 %.

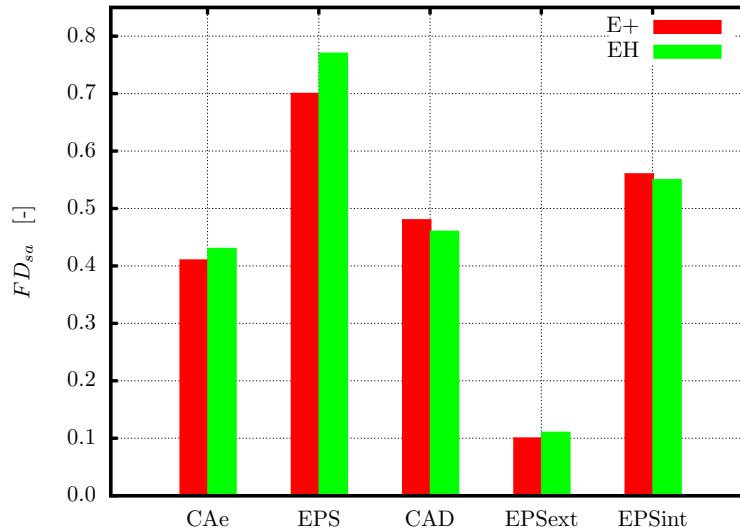


Figura 5.5: Factor de decremento sol-aire (FD_{sa}), obtenido con EnergyPlus (E+) y Ener-Habitat (EH), para cada sistema constructivo, para el día típico del mes frío.

En la Figura 5.6 se muestra la temperatura del aire interior para (a) CAe, (b) EPS, (c) CAD, (d) EPSext, (e) EPSint, obtenida con EnergyPlus y EnerHabitat. Se puede observar que los valores de temperatura obtenidos con ambos programas coinciden satisfactoriamente, siendo el EPS es sistema constructivo que menos coincide. Por otro lado, se puede ver que el comportamiento de la temperatura es diferente dependiendo del sistema constructivo: el EPSext muestra la menor amplitud de oscilación, mientras que el EPS presenta la mayor amplitud.

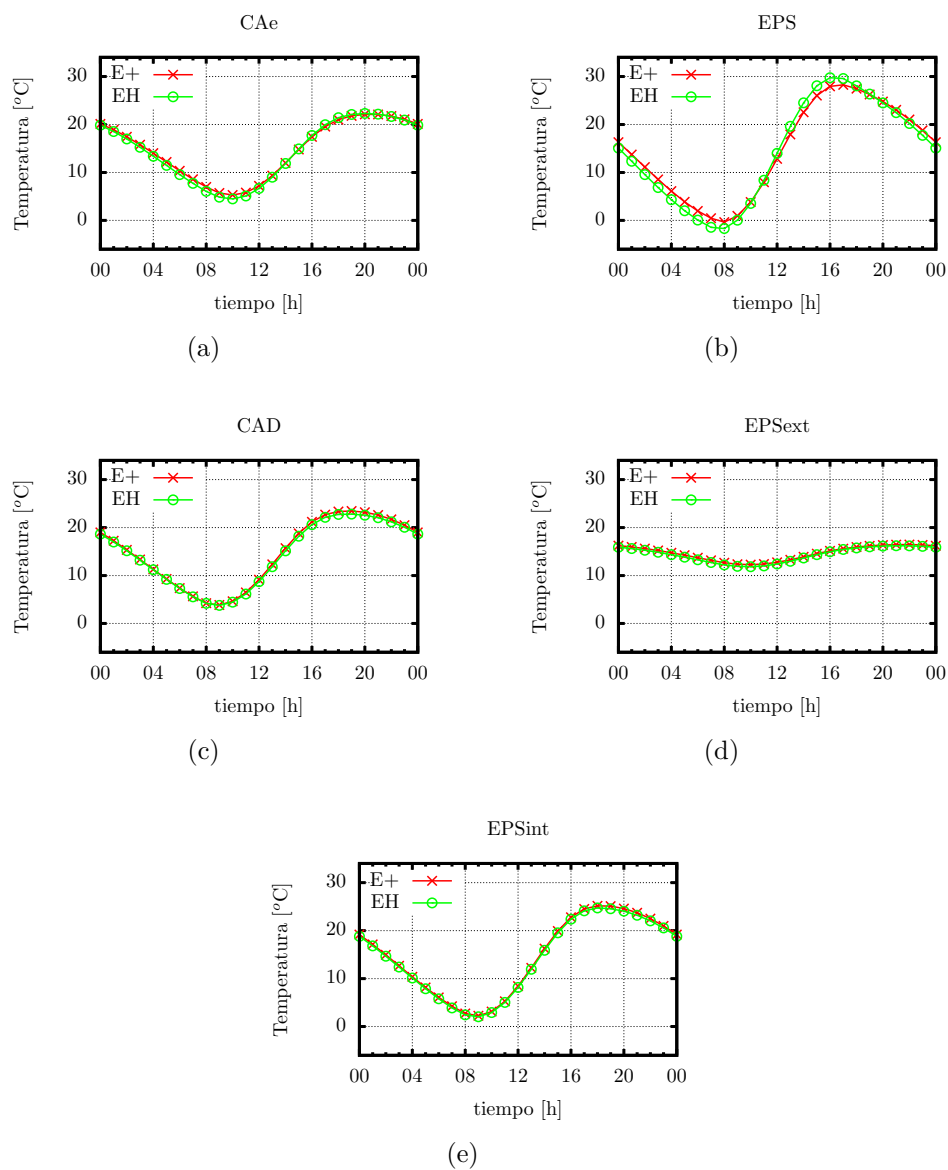


Figura 5.6: Temperatura del aire interior para cada sistema constructivo, obtenida con EnergyPlus (E+) y Ener-Habitat (EH), para el día típico del mes frío.

5.4. Condición con aire acondicionado

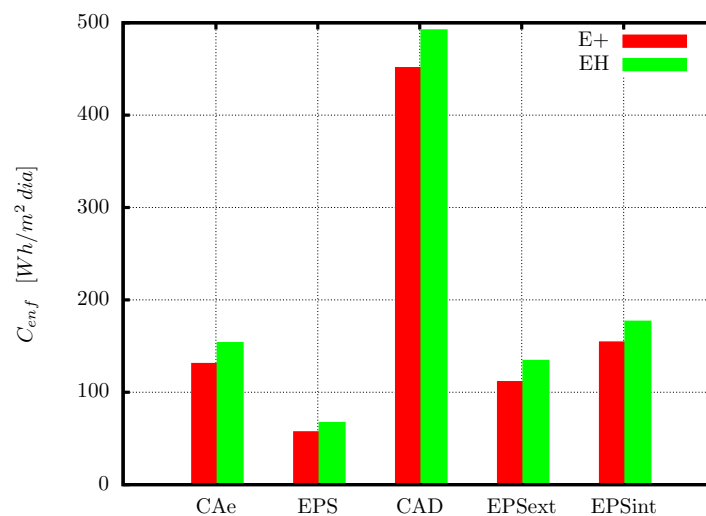
Para la condición con aire acondicionado se consideran los parámetros de carga térmica de enfriamiento (E_{enf}) y carga térmica de calentamiento (E_{cal}). Se presentan resultados para el día típico del mes cálido y del mes frío. Para el mes cálido el termostato se ajusta en 30.8 °C, mientras que para el mes frío se ajusta en 23.7 °C, la cual es la temperatura superior de confort (T_{c+}) respectivamente, y está dada por

$$T_{c+} = 13.5 \text{ } ^\circ\text{C} + (0.54 T_{prom}) + \Delta T_c, \quad (5.8)$$

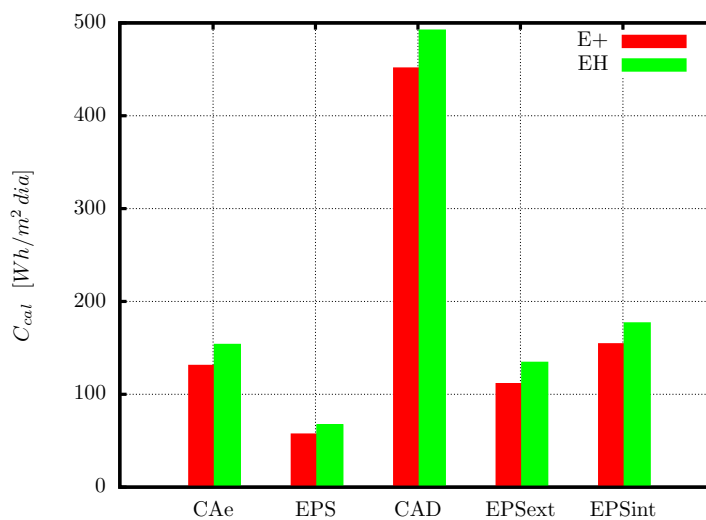
donde T_{prom} es el promedio de la temperatura exterior durante el día y ΔT_c es la amplitud de la zona de confort [21] y es de 2.5 °C.

Mes cálido

A continuación se presentan los resultados para el día típico del mes cálido con aire acondicionado. En la Figura 5.7 se muestra la carga térmica de enfriamiento (E_{enf}) y calentamiento (E_{cal}) obtenida con EnergyPlus y Ener-Habitat, para los diferentes sistemas constructivos. El orden del desempeño térmico de los sistemas constructivos, tanto para E_{enf} como E_{cal} , del mejor al peor es: EPS, EPSext, CAe, EPSint, CAD. Para el enfriamiento se obtiene una diferencia relativa promedio de 15.83%, con un valor mínimo para el CAD de 9.05% y un valor máximo para el EPSext de 20.62%. Para el calentamiento la diferencia relativa promedio es de 3.89%, con un valor mínimo para el EPSint de 2.19% y un valor máximo para el EPS de 5.48%. Se puede apreciar que la diferencia relativa es mayor para el enfriamiento.



(a)



(b)

Figura 5.7: Carga térmica de (a) enfriamiento (E_{enf}) y (b) calentamiento (E_{cal}), obtenidas con EnergyPlus (E+) y Ener-Habitat (EH), para cada sistema constructivo, para el día típico del mes cálido.

Mes frío

A continuación se presentan los resultados para el día típico del mes frío con aire acondicionado. En la Figura 5.8 se muestra la carga térmica de enfriamiento (E_{enf}) y calentamiento (E_{cal}) obtenida con EnergyPlus y Ener-Habitat, para los diferentes sistemas constructivos. El orden del desempeño térmico de los sistemas constructivos, del mejor al peor, para E_{enf} es: EPSext, EPSint, EPS, CAe, CAD; mientras que para E_{cal} es: EPS, CAe, EPSext, EPSint, CAD. Para el enfriamiento se obtiene una diferencia relativa promedio de 9.84 %, con un valor mínimo para el EPSext de 0.00 % y un valor máximo para el CAe de 16.38 %. Para el calentamiento la diferencia relativa promedio es de 3.28 %, con un valor mínimo para el CAD de 0.66 % y un valor máximo para el EPS de 5.37 %. Se puede apreciar que, al igual que para el caso del mes cálido, la diferencia relativa es mayor para el enfriamiento.

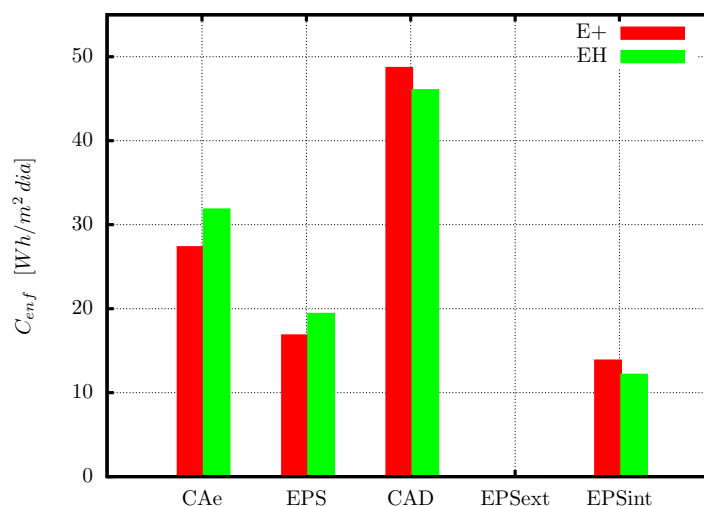
5.5. Conclusiones

En este capítulo se realizó una serie de simulaciones con el fin validar la herramienta Ener-Habitat con el programa EnergyPlus. Para igualar las condiciones de Ener-Habitat, se consideró un módulo en el que sólo existe transferencia de calor a través del techo, mientras que las paredes y el piso se definen como adiabáticos, sin masa térmica y sin emitancia. Se simuló bajo condiciones con y sin aire acondicionado, para el día típico del mes cálido y del mes frío, con datos climáticos para Torreón, Coahuila.

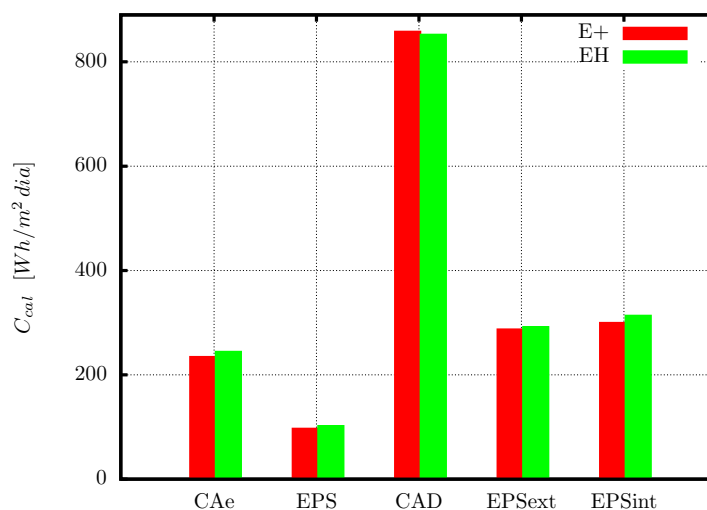
Se concluye que Ener-Habitat y EnergyPlus evalúan de la misma forma el orden del desempeño térmico de los sistemas constructivos al usar E_{entra} o DF_{sa} para el caso sin aire acondicionado y C_{enf} , C_{cal} para el caso con aire acondicionado.

Para la condición sin aire acondicionado, para el parámetro de E_{entra} , se obtiene una diferencia relativa promedio de 4.93 % para el mes cálido y de 10.00 % para el mes frío. Para el parámetro de FD_{sa} se obtiene una diferencia relativa promedio de 7.14 % para el mes cálido y de 6.17 % para el mes frío. Para la condición con aire acondicionado, para el parámetro de C_{enf} , la diferencia relativa promedio es de 15.83 % para el mes cálido y de 9.84 % para el mes frío. Para C_{cal} , se obtiene una diferencia relativa promedio de 3.89 % para el mes cálido y de 3.28 % para el mes frío.

Se puede apreciar cualitativamente que bajo una condición sin aire acondi-



(a)



(b)

Figura 5.8: Carga térmica de (a) enfriamiento (E_{enf}) y (b) calentamiento (E_{cal}), obtenidas con EnergyPlus (E+) y Ener-Habitat (EH), para cada sistema constructivo, para el día típico del mes frío. En la gráfica (a) el EPSext no muestra transferencia de calor.

dicionado, el EPS es el sistema constructivo que presenta mayor diferencia

en los resultados al usar EnergyPlus y Ener-Habitat. Esto se puede apreciar cuantitativamente en las gráficas del decremento sol-aire (5.5, 5.2) y cualitativamente en las gráficas de temperatura al interior (5.3, 5.6). Se piensa que esto se debe a que Ener-Habitat usa 3600 iteraciones por hora, mientras en EnergyPlus permite un máximo de 60 iteraciones por hora. Esta diferencia se ve reflejada mayormente en el EPS puesto que es el material con menor masa térmica, el cual puede variar su temperatura incluso en lapsos de tiempo tan pequeños como un minuto. Como EnergyPlus realiza iteraciones cada minuto, es posible que esté perdiendo información que puede afectar los resultados. Para comprobar esto se realizaron unas simulaciones con EnergyPlus usando los cinco sistemas constructivos y variando las iteraciones por hora. Efectivamente, el EPS era el único sistema constructivo susceptible a la variación de iteraciones por hora.

Capítulo 6

Conclusiones finales

En esta tesis se llevaron a cabo tres actividades. Primero se realizó un estudio paramétrico en EnergyPlus con el fin de seleccionar el método de solución de la conducción de calor más adecuado para este trabajo. En segundo lugar se utilizó EnergyPlus para demostrar que existe una interacción importante entre los componentes de la envolvente de una edificación cuando se tiene una condición sin aire acondicionado. Por último, se validó la herramienta Ener-Habitat con el programa EnergyPlus.

Para el estudio paramétrico con EnergyPlus se usaron los parámetros correspondientes a cada método de solución: en el método de diferencias finitas implícito de primer orden, existen los parámetros de iteraciones por hora, la constante de discretización espacial y el criterio de convergencia, mientras que para el método de funciones de transferencia el único parámetro es el de iteraciones por hora.

Se puede concluir que el método de funciones de transferencia es buena opción, ya que proporciona resultados consistentes con un tiempo de cómputo menor que el método de diferencias finitas y con la ventaja de manejar un solo parámetro, las iteraciones por hora. Además, el modelo de diferencias finitas presenta un parámetro mal implementado en el código fuente de EnergyPlus, el criterio de convergencia, lo que puede generar resultados erróneos al aumentar el número de nodos. En este trabajo se propuso una nueva forma del criterio de convergencia que permite más flexibilidad y da

la posibilidad de aumentar más el número de nodos. Dado que el método de diferencias finitas de EnergyPlus no está bien implementado, para las simulaciones de este trabajo se utilizó el modelo de funciones de transferencia con 60 iteraciones por hora.

Para demostrar la interacción entre los componentes de la envolvente, se realizó una serie de análisis en EnergyPlus usando cinco módulos formados por distintos sistemas constructivos, bajo condiciones con y sin aire acondicionado.

En el caso con aire acondicionado, la tendencia de los resultados fue similar sin importar si se trataba de un análisis por componente o un análisis de toda la envolvente como unidad. Sin embargo, en el caso sin aire acondicionado, se obtienen resultados diferentes dependiendo del tipo de análisis. Esto se debe a que cuando se hace un análisis considerando un solo componente de la envolvente, bajo una condición sin aire acondicionado, no se considera la interacción que existe con el resto de los componentes. En este trabajo se vio un ejemplo de interacción en donde la energía que se transfiere a través de la envolvente del módulo, entra por el techo y la pared Este, pero sale por el piso y el resto de las paredes.

Se puede concluir por lo tanto que sí hay una interacción importante entre los componentes de la envolvente cuando no se usa aire acondicionado. Esta interacción se debe tomar en cuenta cuando se busque hacer un análisis térmico de la edificación, es decir, se debe realizar un análisis integral de la edificación que estudie simultáneamente la transferencia de calor a través de todos los componentes de la envolvente, incluyendo al piso.

Considerando lo anterior, cuando no se usa aire acondicionado, el factor de decremento sol-aire, el flujo de calor por área a través de un componente y la energía transferida a través de un componente no son parámetros adecuados para evaluar a una edificación, ya que están ligados a un análisis por componente. Por otro lado, el factor de decremento, el flujo de calor por área a través de toda la envolvente y la energía transferida a través de toda la envolvente sí son parámetros adecuados puesto que se aplican en un análisis integral de toda la envolvente. Al usar aire acondicionado no hay una interacción importante entre los componentes de la envolvente, por lo que se puede evaluar por componente o toda la envolvente.

Para la validación de Ener-Habitat con EnergyPlus se buscó igualar en EnergyPlus las condiciones de Ener-Habitat, por lo que se considera un módulo en el que sólo existe transferencia de calor a través del techo, mientras que los muros y el piso se definen como adiabáticos, sin masa térmica y sin emi-

tancia. Este módulo se simuló bajo condiciones con y sin aire acondicionado, para el día típico del mes cálido y del mes frío.

Se concluye que Ener-Habitat y EnergyPlus, al realizar un análisis térmica de un componente, evalúan de la misma forma el orden del desempeño térmico de los sistemas constructivos al usar la energía transferida a través de un componente o el factor de decremento sol-aire para el caso sin aire acondicionado y la carga térmica de enfriamiento y calentamiento para el caso con aire acondicionado.

Para la condición sin aire acondicionado, para el parámetro de la energía transferida a través de un componente, se obtiene una diferencia relativa promedio de 4.93 % para el mes cálido y de 10.00 % para el mes frío. Para el parámetro del factor de decremento sol-aire se obtiene una diferencia relativa promedio de 7.14 % para el mes cálido y de 6.17 % para el mes frío. Para la condición con aire acondicionado, para el parámetro de la carga térmica de enfriamiento, la diferencia relativa promedio es de 15.83 % para el mes cálido y de 9.84 % para el mes frío. Para la carga térmica de calentamiento, se obtiene una diferencia relativa promedio de 3.89 % para el mes cálido y de 3.28 % para el mes frío. Asimismo, cabe mencionar que el orden en que Ener-Habitat evaluó los sistemas constructivos utilizados en el techo en el capítulo 5, fue el mismo orden en que EnergyPlus evaluó estos sistemas constructivos en un módulo completo en el capítulo 4.

Por otra parte, como ya se ha demostrado en trabajos anteriores incluidos en la revisión bibliográfica, los sistemas constructivos de una edificación se comportan de una manera diferente dependiendo de si se usa aire acondicionado o no. En este trabajo se vio que construir toda la edificación de poliestireno expandido es la mejor opción cuando se usa aire acondicionado pero representa la peor opción cuando no se usa aire acondicionado. De igual modo estaba documentado que la posición de las capas de los materiales con respecto al interior-exterior de la edificación es importante. Igualmente, en este trabajo se observó que es mejor utilizar la capa aislante en el exterior.

Además, se comprobó que cuando no se usa aire acondicionado también es importante considerar la posición de los materiales conforme a la orientación, es decir, si se encuentran en el techo, piso o una pared determinada. Además se demostró que existe una interacción importante entre las componentes de la envolvente que se debe de tomar en cuenta a la hora de simular térmicamente a la edificación. Esto no se encontró documentado en la revisión bibliográfica.

Para concretar esta idea se simuló un módulo mixto compuesto por el

techo y la pared Este de poliestireno expandido (que son los componentes con mayor incidencia solar), el piso de concreto de alta densidad y el resto de las paredes de concreto aereado. Este módulo mixto mostró un mejor desempeño térmico con respecto a los módulos compuestos por un sólo sistema constructivo monocapa.

Como trabajo a futuro se sugiere incorporar en Ener-Habitat la simulación de módulos sencillos que consideren la interacción entre los componentes de la envolvente. Por otro lado, sería oportuno realizar un análisis de los mecanismos de transferencia de calor involucrados en la interacción, con el fin de cuantificar la contribución que tienen la conducción, la convección y la radiación en dicho fenómeno. Por último, sería útil definir una metodología que ayude a encontrar la mejor configuración para módulos mixtos, como el que se presenta en esta tesis.

Bibliografía

- [1] Sitio web de International Energy Agency (IEA). *Sustainable buildings*, www.iea.org/topics/sustainablebuildings/; consultado el 14 de enero de 2014.
- [2] Sitio web de United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). *Presentation for the United Nations Economic Commission for Europe*, www.unece.org/fileadmin/DAM/hlm/sessions/docs2013/Committee-session/Presentations/03.Spencer.pdf; consultado el 14 de enero de 2014.
- [3] Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico. Balance Nacional de Energía 2011. México, 2011.
- [4] Secretaría de Energía. Norma Oficial Mexicana, NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios de uso habitacional. *Diario Oficial de la Federación*, México, 2011.
- [5] Secretaría de Energía. Norma Oficial Mexicana, NOM-008-ENER-2001, Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales. *Diario Oficial de la Federación*, México, 2001.
- [6] C. Chen y E. Krokosky. Steady and non steady solar heat transmission through roofs. *Matériaux et Constructions*, 9(1):19–32, January 1976.
- [7] S. Al-Sanea y M. Zedan. Improving thermal performance of building walls by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal mass. *Applied Energy*, 88(9):3113–3124, September 2011.

- [8] S. Al-Sanea. Finite-volume thermal analysis of building roofs under two-dimensional periodic conditions. *Building and Environment*, 38(8):1039–1049, August 2003.
- [9] G. Barrios, G. Huelsz, R. Rechtman y J. Rojas. Wall/roof thermal performance differences between air-conditioned and non air-conditioned rooms. *Energy and Buildings*, 43(1):219–223, January 2011.
- [10] G. Barrios, G. Huelsz y J. Rojas. Thermal performance of envelope wall/roofs of intermittent air-conditioned rooms. *Applied Thermal Engineering*, 40:1–7, July 2012.
- [11] G. Barrios, G. Huelsz, J. Rojas, M. Ochoa y I. Marincic. Envelope wall/roof thermal performance parameters for non air-conditioned buildings. *Energy and Buildings*, 50:120–127, July 2012.
- [12] H. Asan y Y. Sancaktar. Effects of Wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. 28(9):159–166, June 1997.
- [13] M. Ozel y K. Pihtili. Optimum location and distribution of insulation layers on building walls with various orientations. *Building and Environment*, 42(8):3051–3059, August 2007.
- [14] K. Kontoleon y D. Bikas. The effect of south wall's outdoor absorption coefficient on time lag, decrement factor and temperature variations. *Energy and Buildings*, 39(9):1011–1018, September 2007.
- [15] K. Kontoleon, G. Theodosiou y K. Tsikaloudaki. The influence of concrete density and conductivity on walls' thermal inertia parameters under a variety of masonry and insulation placements. *Applied Energy*, 112:325–337, December 2013.
- [16] A. Gasparella, G. Pernigotto, M. Baratieri y P. Baggio. Thermal dynamic transfer properties of the opaque envelope: Analytical and numerical tools for the assessment of the response to summer outdoor conditions. *Energy and Buildings*, 43(9):2509–2517, September 2011.
- [17] K. Ulgen. Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, 34(3):273–278, March 2002.

- [18] N. Aste, A. Angelotti y M. Buzzetti. The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings. *Energy and Buildings*, 41(11):1181–1187, November 2009.
- [19] Sitio web de EnergyPlus. www.eere.energy.gov/buildings/energyplus; consultado el 31 de octubre de 2013.
- [20] Sitio web de Ener-Habitat. www.enerhabitat.unam.mx; consultado el 31 de octubre de 2013.
- [21] D. Morillón, R. Saldaña y A. Tejeda. Human bioclimatic Atlas for Mexico. *Solar Energy*, 2004.