



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DEL ESTADO
DE MORELOS

INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA AMBIENTAL

VALIDACIÓN DE LA SIMPLIFICACIÓN DEL
MÉTODO EHLS PARA LA TRANSFERENCIA DE
CALOR A TRAVÉS DE LA ENVOLVENTE DE UNA
EDIFICACIÓN

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN TECNOLOGÍA AMBIENTAL

P R E S E N T A

JOSÉ MARÍA AGUILAR MIER

TUTOR RECEPTOR: DR. GUILLERMO
BARRIOS DEL VALLE

TUTOR INTERNO: M. EN C. VÍCTOR
EDUARDO DOMÍNGUEZ RAMÍREZ



JIUTEPEC, MORELOS JULIO, 2018

*A mis padres y
a mi hermano.*

Agradecimientos

Agradezco a la comunidad del Instituto de Energías Renovables, por el buen recibimiento y el apoyo brindado. Agradezco a la Universidad Politécnica del Estado de Morelos y a todos los profesores que guiaron mi camino a través de la carrera. Agradezco todas las personas que estuvieron presentes a lo largo de mi carrera, a mi familia: A mi mamá por ser un apoyo incondicional, a mi papá por estar siempre presente a pesar de la distancia, a mi hermano que es la persona en la que más confío y a la que más admiro, a mis abuelos que siempre han dado lo mejor de sí, y a mis tíos y primos que siempre han estado cerca; a mis amigos: Abril por acompañarme en las noches en vela y por la amistad brindada desde hace más de 7 años, a David Arancibia que fue mi primer contacto con el IER, a María José, Enrique y Reynaldo por ser mis compañeros de viaje por los tres años que duró la carrera, y a Alejandra, Brandón, Cornelio, Leo, Delmer, Oscar, Cheto, Juan, Roberto y el Físico que hicieron de la sala de termociencias mi segunda casa.

Agradezco a la Dra. Guadalupe Huelsz Lesbros por su tiempo dedicado en la revisión de esta tesis, por las observaciones y sugerencias que ayudaron a mejorar la calidad de este trabajo.

Por último agradezco al Doctor Guillermo Barrios del Valle, por toda la ayuda y confianza brindada desde el inicio de este trabajo, por su paciencia, por cada enseñanza que me brindó cada semana, por apoyarme en los momentos difíciles y compartirme siempre con sensatez y sinceridad un poco de su conocimiento y sabiduría. Gracias.

Contenido

Resumen	xv
1. Introducción	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Planteamiento del problema	4
1.3. Justificación	6
1.4. Objetivos	7
1.4.1. Objetivo general	7
1.4.2. Objetivos particulares	7
1.5. Hipótesis	8
2. Marco teórico	9
2.1. Uso de energía en edificaciones	9
2.2. Transferencia de calor en edificaciones	10
2.3. Parámetros para la evaluación del desempeño térmico de la envolvente	15
2.4. Ener-Habitat	17
2.5. EnergyPlus	18
2.6. Método EHLS	19
3. Método simplificado EHLS (S-EHLS)	23
4. Antecedentes	25

5. Metodología	29
5.1. Ener-Habitat	29
5.2. Método S-EHLS en una simulación tipo Ener-Habitat	30
5.3. Validación del método S-EHLS	33
5.4. Conclusiones	35
6. Resultados y discusión	37
6.1. Características de las simulaciones	38
6.2. Resultados bajo condición de uso sin aire acondicionado	41
6.3. Resultados bajo condición de uso con aire acondicionado	48
6.4. Conclusiones	57
7. Conclusiones	63
Bibliografía	65

Lista de Figuras

1.1. Producción energética mundial por fuente [2].	2
1.2. Consumo energético en México por sector. Balance Nacional de Energía, 2015. [4]	3
2.1. Mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación [13].	13
2.2. Mecanismos de transferencia de calor a través de un sistema constructivo de la envolvente de una edificación [14].	14
2.3. Representación del (a) BHC típico con espesor $L = L_1 + L_2 + L_3$, longitud $d = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5$, (b) esquema de las resistencias térmicas y (c) esquema de capas homogéneas del modelo EHLS [22].	20
3.1. Conductividad térmica de la capa L_2 del BHC a lo largo de un día promedio, en función del tiempo (a), y el ajuste de la Conductividad térmica de la capa L_2 en función de la temperatura promedio de la capa L_2	24
5.1. Módulo realizado en Sketch-Up para su posterior simulación en OpenStudio.	32
5.2. Diagrama de flujo a seguir para validar el método S-EHLS. . .	35

6.1.	Temperatura sol-aire T_{sa} durante el día típico para (a) Torreón, Enero, orientaciones Norte y Oeste y $a = 0.2$ y $a = 0.9$, (b) Torreón, Mayo, orientaciones Norte y Oeste y $a = 0.2$ y $a = 0.9$, y (c) Xalapa, Mayo, orientaciones Norte y Este y $a = 0.2$ y $a = 0.9$	40
6.2.	Esquema del BHC que constituye el sistema constructivo usado en las simulaciones, donde: $e11=0.035$ m, $e21= 0.055$ m, $e12= 0.035$ m, $a11=0.036$ m, $a21= 0.135$ m y $a12= 0.036$ m [20].	41
6.3.	Temperatura sol-aire T_{sa} y temperatura del aire al interior usando EH y el método S-EHLS para Torreón en el mes de Enero y (a) orientación Norte y absortancia solar de 0.2, (b) orientación Norte y absortancia solar de 0.9, (c) orientación Oeste y absortancia solar de 0.2 y (d) orientación Oeste y absortancia solar de 0.9.	42
6.4.	Resultados de las simulaciones con el método S-EHLS comparado con los resultados obtenidos en EH. Se muestra (a) el factor de decremento sol aire FD_{sa} , (b) el tiempo de retraso TR, (c) la energía transmitida en un día por unidad de área ET y (d) la temperatura promedio del aire al interior.	47
6.5.	Resultados de las simulaciones con el método S-EHLS comparado con los resultados obtenidos en EH. Se muestra (a) la carga térmica de calentamiento C_{cal} , (b) la carga térmica de enfriamiento C_{enf} , en (c) carga térmica total C_{tot} y (d) el factor de decremento superficial FD_s	56
6.6.	Comparación de la T_{sa} calculada con EH y el método S-EHLS para las simulaciones que obtuvieron el error máximo en el TR, en (a) Torreón, Enero, orientación este con una absortancia solar de 0.9 y (b) Xalapa, Enero, orientación este con absortancia solar de 0.9	59
6.7.	Comparación de la T_{sa} calculada con EH y la calculada con el método S-EHLS para las simulaciones que obtuvieron el error mínimo en el TR, en (a) Xalapa, Enero, orientación este con una absortancia solar de 0.2 y (b) Xalapa, Enero, orientación norte con absortancia solar de 0.9	60

Lista de Tablas

6.1. Lugar, mes, orientación, valor de la absorptancia solar de la superficie externa del muro y acrónimo asignado a cada simulación realizada.	38
6.2. Propiedades térmicas del concreto utilizado para la construcción del BHC.	39
6.3. Propiedades térmicas del concreto, donde k es la conductividad térmica, ρ la densidad y c el calor específico del concreto [27].	39
6.4. Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición de uso sin aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Torreón, en el mes de Enero, orientación Norte y los dos valores de absorptancia solar.	43
6.5. Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición sin aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Torreón, en el mes de Enero, orientación Oeste y los dos valores de absorptancia solar.	44
6.6. Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición sin aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Torreón, en el mes de Mayo, orientación Norte y los dos valores de absorptancia solar.	44

-
- 6.7. Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición sin aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Torreón, en el mes de Mayo, orientación Oeste y los dos valores de absorptancia solar. 45
- 6.8. Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición sin aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Xalapa, en el mes de Enero, orientación Este y los dos valores de absorptancia solar. 46
- 6.9. Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición sin aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Xalapa, en el mes de Enero, orientación Norte y los dos valores de absorptancia solar. 48
- 6.10. Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición con aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Torreón, en el mes de Enero, orientación Norte y los dos valores de absorptancia solar. Los parámetros son: Carga térmica de enfriamiento (C_{enf}), Carga térmica de calentamiento (C_{cal}), Carga térmica total (C_{tot}) y el Factor de decremento superficial (FD_s). 49
- 6.11. Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición con aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Torreón, en el mes de Enero, orientación Oeste y los dos valores de absorptancia solar. Los parámetros son: Carga térmica de enfriamiento (C_{enf}), Carga térmica de calentamiento (C_{cal}), Carga térmica total (C_{tot}) y el Factor de decremento superficial (FD_s). 50

6.12. Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición con aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Torreón, en el mes de Mayo, orientación Norte y los dos valores de absortancia solar. Los parámetros son: Carga térmica de enfriamiento (C_{enf}), Carga térmica de calentamiento (C_{cal}), Carga térmica total (C_{tot}) y el Factor de decremento superficial (FD_s).	51
6.13. Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición con aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Torreón, en el mes de Mayo, orientación Oeste y los dos valores de absortancia solar. Los parámetros son: Carga térmica de enfriamiento (C_{enf}), Carga térmica de calentamiento (C_{cal}), Carga térmica total (C_{tot}) y el Factor de decremento superficial (FD_s).	52
6.14. Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición con aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Xalapa, en el mes de Enero, orientación Este y los dos valores de absortancia solar. Los parámetros son: Carga térmica de enfriamiento (C_{enf}), Carga térmica de calentamiento (C_{cal}), Carga térmica total (C_{tot}) y el Factor de decremento superficial (FD_s).	53
6.15. Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición con aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Xalapa, en el mes de Enero, orientación Norte y los dos valores de absortancia solar. Los parámetros son: Carga térmica de enfriamiento (C_{enf}), Carga térmica de calentamiento (C_{cal}), Carga térmica total (C_{tot}) y el Factor de decremento superficial (FD_s).	54
6.16. Promedio de las diferencias y errores relativos porcentuales, para cada serie de simulaciones de acuerdo al lugar y temporada, en condición de uso sin aire acondicionado.	61
6.17. Promedio de las diferencias y errores relativos porcentuales, para cada serie de simulaciones de acuerdo a su condición climática, en condición de uso con aire acondicionado.	62

Nomenclatura

$\langle T_i \rangle$	Temperatura promedio del aire al interior
C_{cal}	Carga térmica de calentamiento
C_{enf}	Carga térmica de enfriamiento
C_{tot}	Carga térmica total
E	Potencia emisiva
ET	Energía transferida a través de la envolvente
E_b	Potencia emisiva de un cuerpo negro
E_r	Error relativo porcentual
FC	Factor de corrección debido a las pérdidas radiativas de onda larga
FD_{sa}	Factor de decremento sol-aire
FD_s	Factor de decremento superficial
G	Irradiación
G_{abs}	Irradiación global
L	Espesor total del bloque hueco de concreto
PJ	Petajoule

R	Resistencia térmica
R_{eq}	Resistencia térmica equivalente
TR	Tiempo de retraso
T_s	Temperatura de la superficie
T_∞	Temperatura del fluido
T_{sa}	Temperatura sol-aire
α	Absortividad
ϵ	emisividad
ρ	Densidad del material
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
a	Absortancia solar
c	Calor específico
h	Hora
h_c	Coeficiente convectivo
h_r	Coeficiente radiativo
k	Conductividad térmica
k^*	Conductividad térmica equivalente
q_{env}	Flujo de calor a través de la envolvente por unidad de área
q_{rad}	Velocidad neta de transferencia de calor por radiación
a	Absortancia solar
BHC	Bloque hueco de concreto
E+	EnergyPlus

EH	Ener-Habitat
EHLS	Equivalent-homogeneous-layers-set method
S-EHLS	Simplified-Equivalent-homogeneous-layers-set method

Resumen

En este trabajo de tesis se propone y se hace la validación numérica del método simplificado del conjunto de capas homogéneas equivalente de la envolvente (S-EHLS) para el cálculo de la transferencia de calor a través de un sistema constructivo no homogéneo compuesto por bloques huecos de concreto (BHC).

El método S-EHLS utiliza una serie de conductividades térmicas equivalentes dependientes de la temperatura que se obtienen del método EHLS y se implementan en una simulación diseñada en EnergyPlus, con las condiciones de frontera equivalentes a las que presenta la herramienta numérica Ener-Habitat, en el que sólo existe transferencia de calor a través de una sola componente de la envolvente, mientras que el piso, el techo y las demás paredes se definen como adiabáticas y sin masa térmica, y la temperatura sol-aire T_{sa} es la única forzante exterior en el sistema.

La validación se realiza comparando los resultados de las simulaciones realizadas con el método S-EHLS y la herramienta numérica Ener-Habitat (EH). Las simulaciones constan de un sistema constructivo compuesto por bloques huecos de concreto (BHC), evaluadas en los climas de Torreón, Coahuila para los meses de Enero y Mayo; y Xalapa, Veracruz, para el mes de Enero. Se usaron absortancias solares de la superficie externa del BHC (a) de 0.2 y 0.9 que corresponde a un color claro y un oscuro respectivamente, y las dos condiciones de uso diferentes: sin y con aire acondicionado para cada simulación.

Para realizar la validación se compararan los parámetros de evaluación para el desempeño térmico en edificaciones. En condición de uso sin aire acondicionado se evalúa el tiempo de retraso (TR), el factor de decremento sol-aire (FD_{sa}), la energía transmitida a través de la envolvente (ET) y la temperatura promedio del aire al interior ($\langle T_{in} \rangle$). Para la condición de uso

con aire acondicionado se evalúa la carga térmica de enfriamiento (C_{enf}), la carga térmica de calentamiento (C_{cal}), la carga térmica total (C_{tot}) y el factor de decremento superficial (FD_s).

Se encontró concordancia en los resultados de los parámetros obteniendo diferencias máximas de los parámetros de evaluación pequeños. Para la condición de uso sin aire acondicionado, para el FD_{sa} , se obtiene una diferencia relativa promedio de 2.7 % y 6 % para el periodo frío y cálido de Torreón, respectivamente, y 1.3 % para el periodo frío en Xalapa. Para la ET a través de la envolvente, se obtiene una diferencia relativa promedio de 5.6 % y 3.2 % para el periodo frío y cálido de Torreón, respectivamente, y 2.2 % para el periodo frío en Xalapa. Para el TR , se obtiene una diferencia relativa promedio de 6.1 % y 15.3 % para el periodo frío y cálido de Torreón, respectivamente, y 4.8 % para el periodo frío en Xalapa. Para la $\langle T_{in} \rangle$, se obtiene una diferencia relativa promedio de 0.4 % y 0.5 % para el periodo frío y cálido de Torreón, respectivamente, y 0.2 % para el periodo frío en Xalapa. Cuando se evaluó en condición de uso con aire acondicionado para la C_{enf} , se obtiene una diferencia relativa promedio de 5.4 % y 2.2 % para el periodo frío y cálido de Torreón, respectivamente, y 1.5 % para el periodo frío en Xalapa. Para la C_{cal} , se obtiene una diferencia relativa promedio de 4.7 % y 3.1 % para el periodo frío y cálido de Torreón, respectivamente, y 4.6 % para el periodo frío en Xalapa. Para el FD_{sa} , se obtiene una diferencia relativa promedio de 9.5 % y 4.3 % para el periodo frío y cálido de Torreón, respectivamente, y 8.1 % para el periodo frío en Xalapa.

Se concluye que el método S-EHLS es una buena opción para la evaluación térmica comparativa de sistemas constructivos no-homogéneos, la cual es útil al momento de elegir el mejor sistema constructivo para una edificación en climas extremos, donde la amplitud de la oscilación de temperatura es grande durante el día, y la radiación solar incidente también es grande como es el caso de los climas en México.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Generalidades

Desde el descubrimiento del fuego la energía ha sido un elemento indispensable para satisfacer las necesidades cotidianas del ser humano, que van de los usos más básicos como la cocción de alimentos en la lumbre, a usos industriales y de transporte que impulsan al desarrollo económico mundial. Así, la energía es parte fundamental de la sociedad; permanente y con una constante demanda, determinada y conducida por el crecimiento de la población, el desarrollo económico y el progreso tecnológico [1]. La demanda global de energía continúa en ascenso liderada por los países en desarrollo, debido a una economía global en constante expansión, una rápida industrialización, una rápida urbanización y también en una mejora en la accesibilidad de la energía.

De acuerdo al balance energético global hecho por la Administración de información Energética o EIA por sus siglas en inglés (Energy Information Administration) [2], en el año 2014 la principal fuente de energía ofertada a nivel mundial fueron los hidrocarburos con aproximadamente el 81 % de la energía total consumida a nivel mundial, seguida por las energías renovables con una producción aproximada del 14 % y la energía nuclear con un 5 %. Figura 1.1.

Si bien es cierto que el uso de la energía busca mejorar nuestra calidad

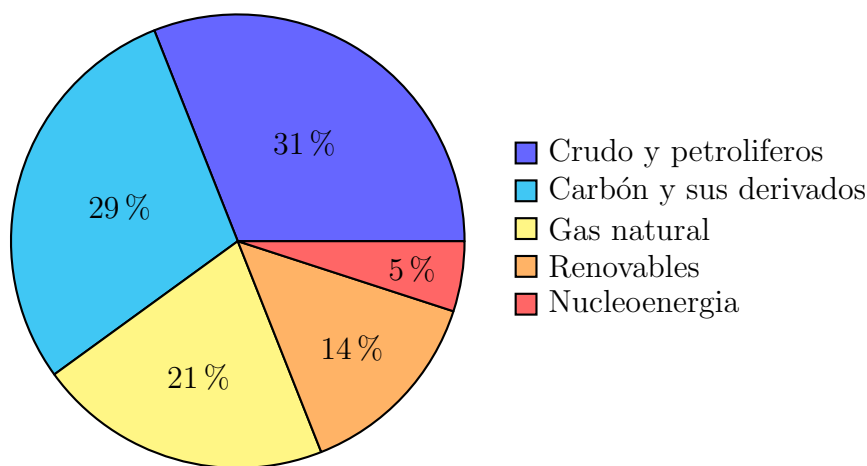


Figura 1.1: Producción energética mundial por fuente [2].

de vida, al mismo tiempo encontramos que la dependencia del uso de combustibles fósiles para su producción trae como consecuencia impactos sociales, económicos y ambientales negativos [3]. Desde años atrás se ha buscado señalar los principales problemas y las soluciones para reducir estos impactos negativos del consumo energético, impulsando la eficiencia energética y la responsabilidad ambiental.

Instituciones y agencias como la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE por sus siglas en inglés) y EIA, antes mencionada, concuerdan en que, después del sector transporte, al sector edificación constituido por los sectores residencial y comercial (en este último se consideran también las edificaciones públicas y de uso recreacional) es responsable de la mayor parte de la energía usada a nivel mundial, con un consumo energético actual del 20 % del total de energía consumida anualmente, el cual tiene un crecimiento estimado de consumo de energía del 1.4 % por año entre el 2014 al 2040 [2].

De acuerdo a datos del Balance Nacional de Energía, en México el consumo de energía final total para el año 2015 fue de 5,094.74 PJ, mostrando un incremento del 4.0 % respecto al año 2014. Este consumo energético se divide en los diferentes tipos de sectores que son: el transporte, representando el 46 %; el industrial, que consumió 31 %, el residencial, comercial y público (sector edificación) con 19 %; y el sector agropecuario, con 4 %, como se puede ver en la figura 1.2. De acuerdo a estos datos el consumo de energía

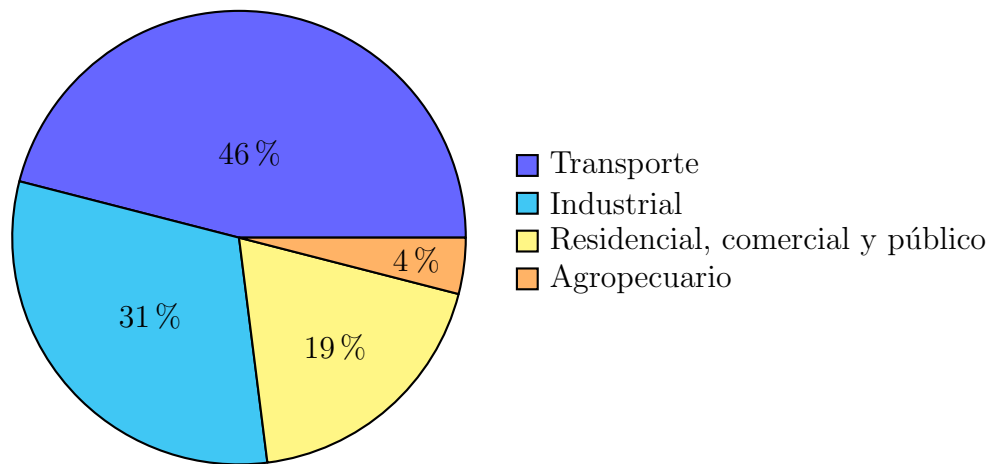


Figura 1.2: Consumo energético en México por sector. Balance Nacional de Energía, 2015. [4]

total en el sector edificación totalizó un consumo de 952.06 PJ. [4]

Hay estudios que afirman que el acondicionamiento del ambiente al interior de las edificaciones llega a utilizar entre el 40-70 % de la energía consumida en una edificación, seguida de la energía para el calentamiento de agua y finalmente la iluminación y otros gastos [5, 6].

Tomando como base lo anterior podemos resaltar la importancia del desempeño térmico de una edificación, el cual juega un papel importante en el consumo energético debido a que una gran cantidad de energía es necesaria para balancear la transferencia de calor entre la envolvente y el aire al interior de la edificación para mantener una temperatura al interior que sea confortable. Además un buen diseño y selección de materiales de la envolvente de la edificación puede contribuir a alcanzar el confort higrotérmico al interior de una edificación sin la necesidad de uso de aire acondicionado. Desde este punto de vista, un buen sistema constructivo es aquel que propicia el confort higrotérmico dentro de la edificación reduciendo o evitando el uso de energía consumida por los sistemas de acondicionamiento.

Actualmente en México existen normas como la NOM-020-ENER-2011, eficiencia energética de edificaciones, envolvente de edificios residenciales y la NOM-008-ENER-2001, eficiencia energética de edificaciones, envolvente de edificios no residenciales. Dichas normas tienen como objetivo, limitar la ganancia de calor a través de la envolvente de las edificaciones, para racio-

nalizar el uso de energía en los sistemas de enfriamiento. Sin embargo estas normas tienen limitaciones, entre las más importantes se encuentran:

- Están basadas en un análisis de transferencia de calor en estado estacionario y ya se ha demostrado que en México se debe realizar el cálculo de la transferencia de calor dependiente del tiempo [7].
- Al estar basadas en un modelo de transferencia de calor en estado estacionario, sólo depende de la resistencia térmica y el orden de las capas no importa.
- Únicamente contemplan edificaciones con condición de aire acondicionado para enfriamiento.
- No consideran la absorción solar de las superficies externas.

1.2. Planteamiento del problema

La selección del tipo de materiales y orden de las capas que forman un sistema constructivo es parte fundamental del diseño de las edificaciones para que estas tengan un buen desempeño térmico acorde a la condición de uso al interior de la edificación, ya sea para evitar el paso de calor del exterior hacia el interior de la envolvente de la edificación o conservar el calor interior de la edificación. La creciente necesidad de construcción de viviendas, de forma rápida y económica, con una evaluación nula o deficiente del desempeño térmico de la edificación, ha llevado a una pobre adaptación al clima donde serán construidas, reflejado en temperaturas dentro de la edificación fuera de las condiciones de confort o en un consumo de energía alto para mantener las condiciones de confort dentro de la edificación haciendo uso de sistemas de aire acondicionado. Se ha demostrado que un diseño adecuado en las edificaciones representa un factor importante para conseguir una buena eficiencia energética dentro de las mismas, reduciendo de un 10 % a un 15 % el consumo energético en comparación con las edificaciones convencionales [8].

Dentro del diseño de la envolvente de una edificación podemos contar con sistemas constructivos compuestos por capas homogéneas y no homogéneas. Una capa homogénea es aquella que está compuesta en su totalidad por un solo material y no cuenta con cavidades de aire o rellenas por otro material, de

manera contraria, un sistema constructivo de capas no homogéneas está compuesto por dos o más materiales y/o presenta huecos de aire en su interior. En cada caso el problema del análisis térmico del sistema constructivo se aborda de forma diferente. En el caso de los sistemas constructivos homogéneos se puede resolver con un modelo de transferencia de calor unidimensional. Cuando se trata de un sistema constructivo no homogéneo con cavidades de aire, como el bloque hueco de concreto (BHC), se debe resolver con un modelo de transferencia de calor dependiente del tiempo bidimensional que tome en cuenta los mecanismos de calor correspondientes a los fenómenos que ocurren por la interacción de los huecos de aire, la superficie del sólido y el sólido en sí: radiación entre las superficies interiores de las cavidades de aire del BHC, conducción a través del marco sólido y convección.

Como se mencionó anteriormente, en México existen normas que pretenden eficientar el uso de energía en la envolvente de las edificaciones, como la norma oficial mexicana NOM-020-ENER-2011, eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios para uso habitacional; y la NOM-008-ENER-2009, eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales que tienen como objeto limitar la ganancia de calor de las edificaciones a través de su envolvente para racionalizar el uso de la energía en los sistemas de enfriamiento.

Los métodos presentados por estas normas están basados un modelo de transferencia de calor en estado estacionario y sólo consideran la resistencia térmica de los materiales, despreciando la capacidad para almacenar energía. Anteriormente se ha señalado que los métodos para evaluar el desempeño térmico de una edificación, presentados por estas normas no son adecuados para los climas mexicanos, donde la radiación solar es significativa y la oscilación de la temperatura durante el día es considerablemente amplia. En estos casos la transferencia de calor a través de la envolvente no se puede resolver con un modelo de transferencia de calor en estado estacionario [9].

El Grupo de Energía en Edificaciones (GEE) del Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México ha demostrado que para los climas de México la transferencia de calor a través de los sistemas constructivos de la envolvente se debe resolver con un modelo de transferencia de calor dependiente del tiempo. Por eso han creado Ener-Habitat, una herramienta numérica, de acceso gratuito la cual utiliza un modelo de transferencia de calor dependiente del tiempo para evaluar el desempeño térmico de sistemas constructivos de la envolvente arquitectónica [10].

Ener-Habitat (EH) es capaz de evaluar el desempeño térmico de sistemas

constructivos de capas homogéneas utilizando un modelo unidimensional de transferencia de calor dependiente del tiempo y también de algunos sistemas constructivos con una capa no homogénea utilizando un modelo bidimensional de transferencia de calor dependiente del tiempo. La versión actual de EH utiliza un modelo bidimensional dependiente del tiempo para evaluar sistema constructivo no homogéneos lo cual provoca que los tiempos de computo se eleven hasta 36 horas por cada simulación.

Una herramienta que es capaz de realizar análisis térmico de edificaciones es EnergyPlus (E+) y utiliza un modelo de transferencia de calor dependiente del tiempo a través de los sistemas constructivos de la edificación. E+ usa un modelo de transferencia de calor unidimensional para el cálculo de la transferencia de calor, lo cual implica que las capas que componen la envolvente deben ser homogéneas.

Huelz *et al.* crearon el método del conjunto de capas homogéneas equivalentes o Equivalent-homogeneous-layers-set (EHLS) para la transferencia de calor dependiente del tiempo a través de capas no homogéneas como las compuestas por bloques huecos de concreto (BHC). Este método es una variación del método de la pared equivalente propuesto por Karambakkam *et al.* [11], y una combinación de los métodos de las propiedades térmicas implementadas en E+ por Mahatanawwe *et al.* [12]; en el cual se sustituye la capa no homogénea del BHC original, por un conjunto equivalente de capas homogéneas que se puede resolver con el modelo unidimensional para la transferencia de calor dependiente del tiempo en E+. La capa no homogénea tiene una conductividad equivalente que depende de la transferencia de calor a través del sistema constructivo. Sin embargo la implementación del método EHLS en E+ se torna complicada para el usuario promedio, debido a que se debe tener conocimientos avanzados de transferencia de calor y programación para poder introducir la programación correspondiente a la actualización de la conductividad equivalente al código de E+. Las herramientas y el método antes mencionados se abordarán con mayor profundidad en los capítulos 2 y 5.

1.3. Justificación

Uno de los principales sistemas constructivos utilizados en México es el de bloque hueco de concreto, el cual, si nos referimos a transferencia de calor, requiere ser evaluado de manera al menos bidimensional. Como se mencionó

anteriormente existen métodos y herramientas para resolver el problema de la transferencia de calor dependiente del tiempo a través de sistemas constructivos con capas no homogéneas, cada uno de ellos presenta desventajas al momento de hacer una implementación fácil y rápida: E+ no puede resolver sistemas constructivos no homogéneos de manera nativa y el método EHLS es muy complicado de implementar en el código de E+ y Ener-Habitat resuelve únicamente un sistema constructivo a la vez con el modelo bidimensional de transferencia de calor dependiente del tiempo con tiempos de resolución de hasta 36 horas, además de que sólo evalúa al sistema constructivo no homogéneo solo, no una edificación completa. Es por eso que se propone y valida el método S-EHLS en su implementación directa en E+.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Validar el método simplificado del conjunto de capas homogéneas o S-EHLS por sus siglas en inglés (Simplified-Equivalent Homogeneous Layer Set) para el cálculo de la transferencia de calor dependiente del tiempo a través de sistemas constructivos no homogéneos con huecos de aire como el bloque hueco de concreto para ser implementado en E+. El método S-EHLS se validará con resultados obtenidos en Ener-Habitat.

1.4.2. Objetivos particulares

- Implementar el método S-EHLS, simulando la capa no homogénea de un S.C como un conjunto de capas homogéneas equivalentes con una conductividad variable dependiente de la temperatura en E+.
- Validar la simulación en E+ con el método S-EHLS comparando con resultados de Ener-Habitat para diferentes localidades, climas, orientaciones, absorción solar y las dos condiciones de uso: sin y con aire acondicionado.

1.5. Hipótesis

Se puede hacer una simplificación del método EHLS para que pueda ser implementado fácilmente en E+. La simplificación consiste en que la capa no homogénea del sistema constructivo no homogéneo tiene una conductividad térmica equivalente que depende de las temperaturas promedio de la capa no homogénea a lo largo de un día.

Capítulo 2

Marco teórico

En el siguiente capítulo se presenta la teoría usada para la elaboración de este trabajo de tesis. En la sección 2.1 se presenta el uso de energía en edificaciones y se hace una distinción entre los subsectores que componen al sector edificación. En la sección 2.2 se muestra una breve descripción de la transferencia de calor en edificaciones. En la sección 2.3 se muestran los parámetros usados comúnmente para evaluar el desempeño térmico de sistemas constructivos para la edificación y por último se realiza una breve introducción de las herramientas y los métodos utilizados para llevar a cabo la propuesta y validación del método simplificado del conjunto de capas homogéneas (S-EHLS): Ener-Habitat, EnergyPlus y el método EHLS, secciones 2.4, 2.5 y 2.6, respectivamente.

2.1. Uso de energía en edificaciones

Se entiende como consumo energético al gasto total de energía para un proceso determinado, como la que se emplea para satisfacer las necesidades energéticas de la sociedad. El uso de energía en edificaciones se puede dividir en tres sectores: El sector residencial, el sector comercial y el sector público, donde el sector residencial incluye toda la energía consumida por las edificaciones de uso habitacional, el sector comercial incluye toda la energía consumida por edificaciones de uso comercial, como negocios, centros

comerciales y tiendas de autoservicio, sin incluir el consumo de energía por transporte de productos, y el sector público que incluye la energía necesaria para satisfacer el consumo en hospitales, escuelas, centros de recreación, etc.

El uso de energía en el sector residencial es afectado directamente por el nivel socioeconómico, el clima de la localidad, la eficiencia de los equipamientos, el acceso a la energía, el tipo de fuentes de energía, las políticas referentes al uso de energía en la localidad, entre otros factores. Como resultado de esto la energía consumida por los hogares puede variar significativamente de acuerdo a las regiones y países.

En los sectores comercial y público la energía es consumida principalmente por los sistemas de enfriamiento y calentamiento, iluminación, sistemas de refrigeración, computadoras y otros equipos en los edificios donde se encuentran negocios, instituciones y otras organizaciones.

En México de acuerdo a datos del Balance Nacional de Energía 2015 [4] el sector residencial tuvo un aumento en el consumo de energía en un 0.2 % respecto al año anterior, totalizando 755.27 PJ, el sector comercial aumentó en un 8.2 %, mientras que el sector público no tuvo cambios significativos.

Uno de los usos de energía más comunes en el sector edificación es el de los equipos electromecánicos de climatización (ventiladores, humidificadores, aire acondicionado, etc.) que buscan condiciones de confort térmico en el interior, a expensas de un gran consumo de energía. Hay estudios que afirman que el acondicionamiento del ambiente al interior de las edificaciones en el sector llega a utilizar entre el 40–70 % de la energía consumida, seguida de la energía para el calentamiento de agua con un gasto de 17–26 %. y la iluminación y otros gastos representan del 16 al 32 % [5, 6].

2.2. Transferencia de calor en edificaciones

Siempre que exista una diferencia de temperaturas existirá transferencia de calor, la cual es energía térmica en tránsito en un cuerpo o entre cuerpos, ocurriendo siempre del cuerpo con mayor temperatura al cuerpo de menor temperatura [13].

Como se muestra en la figura 2.2, la energía térmica puede ser transmitida por diferentes mecanismos de transferencia de calor:

- **Conducción:** Ocurre a nivel microscópico (átomos y moléculas), puede ser visto como la transferencia de energía en un medio estacionario, en el

cual la transferencia de energía ocurre de las partículas más energéticas a las menos energéticas debido a la interacción entre las mismas. Este mecanismo puede ser cuantificado a partir de *la ley de Fourier*. Cuando la distribución de temperatura es lineal, se puede expresar cómo:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx}. \quad (2.1)$$

donde q_x'' [W/m^2] es el flujo o transferencia de calor por unidad de área en la dirección perpendicular de transferencia x , dT/dx es el gradiente de temperatura en la dirección x y k [W/mK] es una constante de proporcionalidad conocida como conductividad térmica la cual expresa el transporte de energía por unidad de tiempo, a través una unidad de área de la superficie y es característica del material. El signo negativo expresa el hecho de que el calor se transfiere en la dirección de la temperatura decreciente, es decir de la mayor a la menor temperatura.

- Convección: Generalmente la transferencia de calor por convección se describe como la interacción entre un fluido en movimiento y una superficie limitante cuando ambas se encuentran a diferentes temperaturas. La convección puede ser clasificada de acuerdo a la naturaleza del flujo: se dice que hay convección forzada cuando el flujo del fluido es causado por agentes externos, como un ventilador, una bomba o vientos atmosféricos, en contraste, se dice que hay convección natural cuando el flujo se debe a fuerzas de flotación, que surgen debido a diferencias en la densidad del fluido causadas por variaciones de temperatura dentro del mismo. Independientemente del tipo de convección del proceso, la ecuación utilizada para cuantificar el flujo de calor por convección es conocida como *la ley de enfriamiento de Newton*, expresada por:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

donde q'' [W/m^2] es el flujo de calor por convección, T_s es la temperatura de la superficie, T_∞ la temperatura del fluido y h es una constante de proporcionalidad denominada coeficiente de transferencia de calor por convección, el cual depende de las condiciones en la capa límite, en las que influyen la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas del fluido y de transporte [13].

- Radiación: La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita. Sin importar la forma de la materia, la radiación se puede atribuir a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas que componen el material. La energía del campo de radiación es transportada por ondas electromagnéticas o fotones. Mientras la transferencia de energía por conducción o por convección requiere la presencia de un medio material, la radiación no lo precisa. Para poder cuantificar la velocidad a la que una superficie libera energía o potencia emisiva (E), es necesario conocer la ley de Stefan-Boltzmann la cual establece que hay un límite superior para la potencia emisiva, supuesto por un radiador ideal o cuerpo negro. La radiación que este cuerpo emite puede ser expresada como:

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (2.3)$$

donde E_b es la potencia emisiva emitida por un cuerpo negro, σ es la constante de *Stefan-Boltzmann* ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [W/m^2 K^4]$) y T_s es la temperatura superficial del cuerpo negro a la cuarta potencia.

La potencia emisiva de una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura y está dada por:

$$E_b = \sigma \epsilon T_s^4 \quad (2.4)$$

Donde ϵ es una propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad. Con valores en el rango $0 \leq \epsilon \leq 1$, esta propiedad es la relación entre la radiación emitida por una superficie real y la emitida por el cuerpo negro a la misma temperatura. Esto depende del material de la superficie y del acabado [13].

La radiación también puede incidir sobre una superficie desde sus alrededores. Sin tener en cuenta la fuente, se designa a la velocidad a la que toda esa radiación incide sobre un área unitaria de la superficie como la irradiación $G [W/m^2]$. Al ser absorbida una parte de la irradiación, o toda, se incrementa la energía térmica del material. La velocidad a la que la energía radiante es absorbida por unidad de área de la superficie se evalúa a partir del conocimiento de una propiedad radiativa de la superficie denominada absorptividad α . Es decir:

$$G_{abs} = \alpha G \quad (2.5)$$

donde $0 \leq \alpha \leq 1$, y determina la fracción de irradiación absorbida por una superficie.

Para fines prácticos es conveniente expresar el intercambio neto de calor por radiación como:

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{alr}) \quad (2.6)$$

donde: q_{rad} es la velocidad neta de transferencia de calor por radiación, A el área de la superficie radiante y T_s y T_{alr} , la temperatura de la superficie radiante y los alrededores, respectivamente, h_r es el coeficiente de transferencia de calor por radiación, el cual es obtenido por la siguiente ecuación:

$$h_r = \epsilon \sigma (T_s + T_{alr})(T_s^2 + T_{alr}^2) \quad (2.7)$$

Es importante observar, para referencia futura, que h_r depende de la temperatura del cuerpo o cuerpos radiantes, y los alrededores.

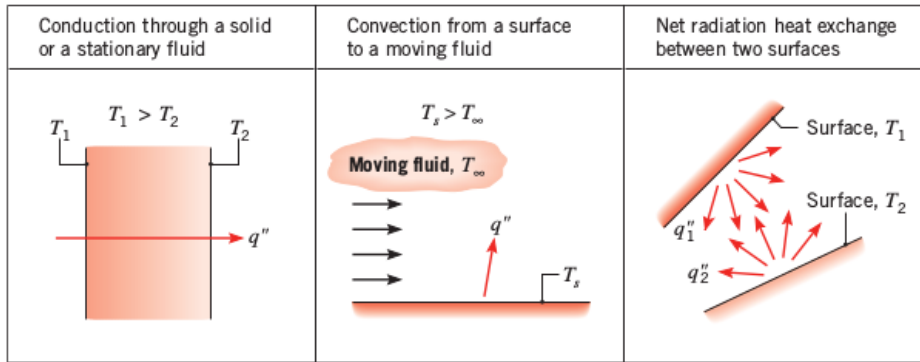


Figura 2.1: Mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación [13].

La transferencia de calor en edificaciones ocurre por los tres mecanismos, antes mencionados, en los muros y techos de la envolvente, y en algunos casos se presenta el cambio de fase, el cual no se considera en este trabajo de tesis. En el exterior ocurre convección forzada por acción de la velocidad del viento y convección natural por la diferencia de temperaturas entre la superficie del material y el ambiente, radiación solar absorbida por la superficie exterior del material y radiación de onda larga, por la diferencia de temperaturas entre

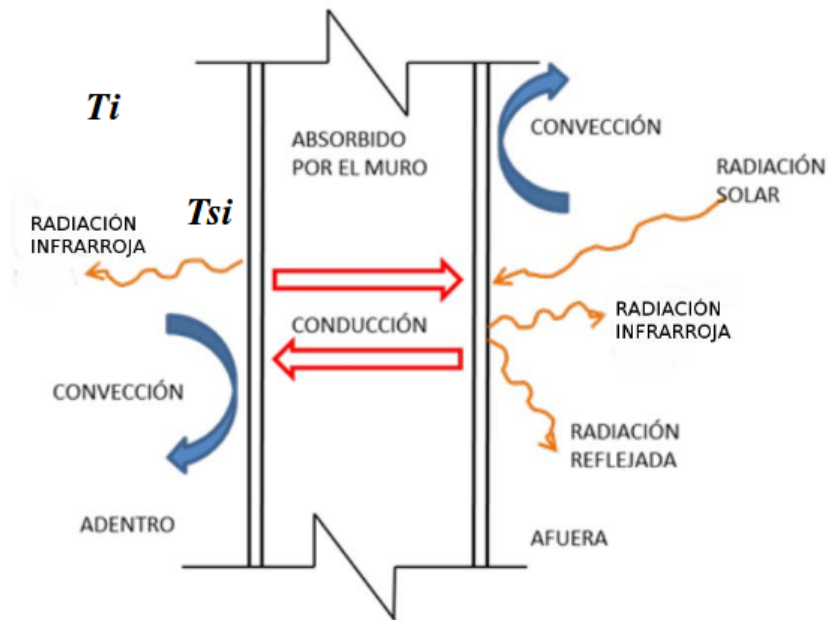


Figura 2.2: Mecanismos de transferencia de calor a través de un sistema constructivo de la envolvente de una edificación [14].

la superficie del material y otras superficies aledañas a él, como se ilustra en la figura 2.2.

La transferencia de calor a través de un sistema constructivo de las características y propiedades físicas del material, cómo:

- El espesor y geometría.
- La textura de la superficie.
- La absorptancia solar, que depende fundamentalmente del color de la superficie.
- La capacitancia térmica.
- El calor específico.
- La densidad.
- La conductividad térmica.

Y de factores ambientales como:

- La radiación incidente sobre la edificación.
- Los vientos circundantes.

entre otros.

En el cálculo de la transferencia de calor en edificaciones es común utilizar la temperatura sol-aire $[T_{sa}]$, la cual es una temperatura equivalente del aire al exterior que incluye la radiación solar absorbida sobre una superficie, el intercambio de calor por radiación de onda larga y el flujo de calor convectivo. La T_{sa} está expresada por:

$$T_{sa} = T_{ext} + \frac{I_s a}{h_c} + FC, \quad (2.8)$$

donde T_{ext} $[^{\circ}C]$ es la temperatura del aire exterior, I_s $[W/m^2]$ es la irradiancia solar por unidad de área sobre la superficie, a es la absorptancia solar de la superficie exterior, h_c $[W/m^2K]$ es el coeficiente convectivo entre la superficie de la envolvente y el flujo de aire circundante, y FC es el factor de corrección debido a las pérdidas radiativas de onda larga, el cual es -3.9 $[^{\circ}C]$ para techos y cero para paredes verticales [15].

2.3. Parámetros para la evaluación del desempeño térmico de la envolvente

El parámetro más usado para la evaluación térmica de la envolvente arquitectónica es la resistencia térmica (R). Se considera que entre más grande sea el valor R , mejor será el desempeño térmico [15]. Sin embargo, esta conclusión sobre el valor de la resistencia térmica está basada en un modelo de transferencia de calor en estado estacionario o independiente del tiempo. Lo cual puede ser una aproximación aceptable cuando se trata de la evaluación de edificaciones que se encuentran en condición de uso con aire acondicionado o cuando la amplitud de la oscilación de la temperatura exterior es pequeña y presentan una ganancia calor por radiación solar pequeña, condiciones que no suelen ocurrir en la mayoría de los climas de México. Es por eso que diversos autores ([16],[17],[18]) han propuesto que para climas donde la radiación solar es significativa y la amplitud de la oscilación de la temperatura al exterior es grande, se debe resolver la transferencia de calor usando un modelo

dependiente del tiempo y además se deben usar parámetros diferentes para la evaluación del desempeño térmico de la envolvente tanto en condición de uso con aire acondicionado como sin aire acondicionado. A continuación se presentan los parámetros seleccionados para realizar la evaluación del desempeño térmico de la envolvente que serán usados posteriormente poder realizar la validación método S-EHLS.

Parámetros en condición de uso sin aire acondicionado

- Factor de decremento sol-aire [FD_{sa}]: Es un parámetro que indica la proporción de amortiguamiento de la amplitud de la oscilación de la temperatura del aire interior con respecto a la amplitud de la oscilación de la temperatura sol-aire. Mientras menor sea el FD_{sa} de un sistema constructivo mejor será su desempeño térmico [19]. El FD_{sa} se calcula por:

$$FD_{sa} = \frac{T_{int_{max}} - T_{int_{min}}}{T_{sa_{max}} - T_{sa_{min}}}, \quad (2.9)$$

donde $T_{int_{max}}$ es la temperatura máxima del aire al interior, $T_{int_{min}}$ es la temperatura mínima del aire al interior, $T_{sa_{max}}$ es la temperatura máxima sol-aire y $T_{sa_{min}}$ es la temperatura mínima sol-aire.

- Tiempo de retraso [TR]: Es la diferencia entre la hora del día donde se obtuvo la mayor temperatura interior $t(T_{int_{max}})$, menos la hora del día donde se obtuvo la mayor temperatura del aire al exterior $t(T_{ext_{max}})$. Se calcula como:

$$TR = t(T_{int_{max}}) - t(T_{ext_{max}}), \quad (2.10)$$

donde t se refiere al tiempo y $T_{int_{max}}$ y $T_{ext_{max}}$, es la temperatura interior máxima y la temperatura exterior máxima respectivamente.

- Temperatura promedio del aire al interior [$\langle T_{in} \rangle$]: Es la temperatura promedio del aire al interior en el periodo especificado.
- Energía transmitida [ET]: Es la energía que entra o sale a través de una componente de la envolvente en un día por unidad de área en la

superficie interior expresada en $Wh/m^2 día$. Se calcula por:

$$ET = \int_{t_0}^{t_f} q''_{env} dt \quad \text{si} \quad T_{sup} > T_{int}, \quad (2.11)$$

donde q''_{env} es el flujo de calor a través de la envolvente por unidad de área, t_0 y t_f representan el intervalo de tiempo del inicio al final del día y dt es el incremento temporal, cuando la temperatura superficial $[T_{sup}]$ es mayor a la temperatura interior $[T_{int}]$

Parámetros en condición de uso con aire acondicionado

- Carga térmica de enfriamiento $[C_{enf}]$: Es la energía en $Wh/m^2 día$ necesaria para enfriar el aire al interior a la temperatura establecida por el termostato.
- Carga térmica de calentamiento $[C_{cal}]$: Es la energía en $Wh/m^2 día$ necesaria para calentar el aire al interior a la temperatura establecida por el termostato.
- Carga térmica total $[C_{tot}]$: Es la suma de la C_{enf} y la C_{cal} .
- Factor de decremento superficial FD_s : De manera similar al FD_{sa} el FD_s indica el amortiguamiento de la amplitud de la oscilación de la temperatura pero esta vez de la superficie interior del muro con respecto a la del exterior . Se define por:

$$FD_s = \frac{T_{sup_{intmax}} - T_{sup_{intmin}}}{T_{sup_{extmax}} - T_{sup_{extmin}}}, \quad (2.12)$$

donde $T_{sup_{intmax}}$ y $T_{sup_{intmin}}$ son las temperaturas de la superficie interior máxima y mínima respectivamente y $T_{sup_{extmax}}$ y $T_{sup_{extmin}}$ son las temperaturas de la superficie exterior máxima y mínima, respectivamente.

2.4. Ener-Habitat

Ener-Habitat (EH) es una herramienta de simulación numérica en línea de acceso gratuito, para comparar el desempeño térmico de sistemas constructivos de la envolvente de una edificación en las condiciones climáticas de

las principales ciudades de la República Mexicana. EH realiza simulaciones numéricas de transferencia de calor dependiente del tiempo. 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 la edificación, con aire acondicionado o sin aire acondicionado. Con aire acondicionado el parámetro principal de comparación es la carga térmica total por unidad de área. Sin aire acondicionado el parámetro principal es la energía transmitida y el factor de decremento sol-aire. Es de fácil uso y no requiere de una capacitación especial. Solo evalúa la transferencia de calor por unidad de área a través del sistema constructivo de muro o techo de la envolvente, por lo que solo 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. [20]

2.5. EnergyPlus

EnergyPlus (E+) es un programa gratuito y de código abierto para la simulación energética de edificaciones completas, que tiene sus raíces en BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) y DOE-2, desarrollados y lanzados al mercado a finales de los años 70's, como herramientas de simulación energética y cargas térmicas en edificaciones. Ambos programas estaban orientados a ingenieros y arquitectos que buscaban dimensionar correctamente sus sistemas de aire acondicionado, desarrollar estudios sobre análisis de costo durante el ciclo de vida y optimizar el desempeño energético. Ambos programas surgieron de la preocupación por la crisis energética de principios de los 70's y la conciencia de que el consumo energético en el sector edificación representa uno de los mayores componentes en el uso de energía total. [21]

Como sus antecesores E+ es un programa de simulación de cargas térmicas y análisis energético basado en la descripción del usuario de una edifi-

cación, desde el punto de vista de las características físicas del edificio, los sistemas mecánicos asociados, etc. Así, E+ calcula las cargas térmicas de enfriamiento y calentamiento necesarias para mantener la temperatura establecida por los termostatos, la cantidad de emisiones por uso de energía, la energía consumida por equipamiento, entre otros. Dentro de las características que posee E+ podemos encontrar:

- Permite realizar simulaciones con pasos de tiempo menores a una hora.
- No posee una interfaz amigable para el usuario. Estas interfaces pueden ser de paga como Design Builder o gratuitas como OpenStudio.
- Utiliza como datos meteorológicos archivos de datos de Energy Plus o .epw, por sus siglas en inglés, los cuales incluyen datos horarios de la localidad.
- Realiza el cálculo simultáneo de los efectos tanto convectivos como radiativos en el interior y al exterior de la edificación para cada paso temporal.
- Resuelve la transferencia de calor dependiente del tiempo utilizando funciones de transferencias o diferencias finitas.

2.6. Método EHLS

El método del conjunto de capas homogéneas equivalente o EHLS por sus siglas en inglés (Equivalent-Homogeneous-Layer-Set), propuesto por el grupo de energía en edificaciones de la UNAM (GEE), presenta una solución para la transferencia de calor dependiente del tiempo a través de una pared no homogénea, como la compuesta por el bloque hueco de concreto. En el método EHLS la estructura del sistema constructivo no homogéneo es sustituida por un conjunto de capas equivalentes homogéneas que poseen, en total, el mismo espesor, la misma resistencia térmica y la misma capacitancia térmica que el sistema constructivo real. [22]

Para el caso específico del BHC el espesor total es $L = L_1 + L_2 + L_3$, donde L_1 y L_3 son el espesor de la parte sólida anterior y posterior y L_2 que es el espesor donde se encuentra la cavidad de aire. La longitud total del BHC se representa por $d = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5$. El área correspondiente al marco sólido es $a_f = (d_1 + d_3 + d_5)/d$, y el área correspondiente a las cavidades de

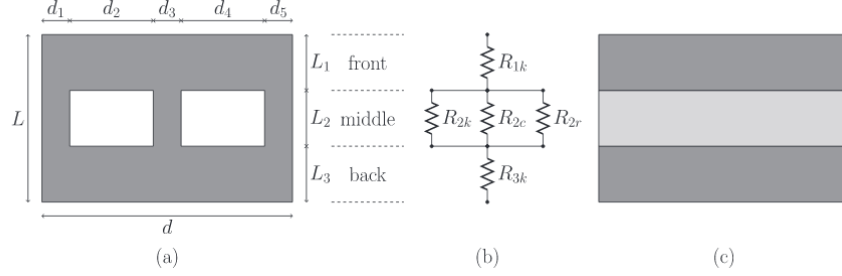


Figura 2.3: Representación del (a) BHC típico con espesor $L = L_1 + L_2 + L_3$, longitud $d = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5$, (b) esquema de las resistencias térmicas y (c) esquema de capas homogéneas del modelo EHLS [22].

aire está dado por $a_{in} = (d_2 + d_4)/d$, figura 2.3 (a). La resistencia térmica total del BHC se obtiene usando el método de la resistencia equivalente en serie paralelo, como se muestra en la figura 2.3 (b), y el BHC se reemplaza por un conjunto de tres capas homogéneas, su esquema se presenta en la figura 2.3 (c).

La resistencia equivalente total del BHC se calcula por:

$$R_{eq} = R_{1k} + \left[\frac{1}{R_{2k}} + \frac{1}{R_{2c}} + \frac{1}{R_{2r}} \right]^{-1} + R_{3k}, \quad (2.13)$$

donde R_{1k} , R_{2k} y R_{3k} son las resistencias conductivas a través de la parte sólida posterior, central y anterior del BHC, respectivamente. A su vez cada una de las resistencias está dada por:

$$R_{1k} = \frac{L_1}{k_f}, \quad R_{2k} = \frac{L_2}{k_f a_f}, \quad R_{3k} = \frac{L_3}{k_f}, \quad (2.14)$$

donde k_f es la conductividad térmica del sólido y $L_1 + L_2 + L_3$ los espesores de cada capa equivalente.

Las resistencias convectiva y radiativa de las cavidades de aire R_{2r} y R_{2c} en L_2 , se expresan como:

$$R_{2c} = \frac{1}{h_c a_{in}}, \quad \text{y} \quad R_{2r} = \frac{1}{h_r a_{in}}, \quad (2.15)$$

donde h_c es el coeficiente convectivo en la cavidad de aire y h_r es el coeficiente radiativo de las superficies de la cavidad de aire.

La capacitancia térmica total del BHC está dada por:

$$C = L_1 c_f + L_2(a_{in} c_a + a_f c_f) + L_3 c_f, \quad (2.16)$$

donde: c_f es el producto de la densidad y el calor específico del material sólido del bloque y c_a es el producto de la densidad y el calor específico del aire.

Como se mencionó anteriormente, el método EHLS reemplaza la capa no homogénea formada por el BHC por una serie de tres capas equivalentes homogéneas. La primer y última capa (L_1 y L_3) están hechas del mismo material que la parte sólida del bloque real y poseen la misma anchura, haciendo que su resistencia térmica equivalente sea igual a R_{1k} y R_{3k} , respectivamente, y su capacitancia térmica sea iguales a $L_1 C_f$ y $L_3 C_f$, respectivamente. Sin embargo la capa central (L_2) del modelo EHLS debe tener la misma resistencia térmica que la parte central del BHC real, para esto se crea un material virtual con una conductividad térmica equivalente $[k_2^*]$. Su capacitancia térmica es la misma que la de la parte central del BHC, $L_2(a_{in} C_a + a_f c_f)$. Dado que la resistencia térmica de la capa homogénea central debe de ser igual a la resistencia térmica de la parte central del BHC la k_2^* está dado por:

$$k_2^* = \frac{L_2}{\left[\frac{1}{R_{2k}} + \frac{1}{R_{2c}} + \frac{1}{R_{2r}} \right]^{-1}}. \quad (2.17)$$

El coeficiente convectivo h_c en la ecuación 2.8 es calculado usando correlaciones empíricas determinadas experimentalmente por Elsherbiny et al. Estas correlaciones son usadas para una cavidad bidimensional con una relación de aspecto, $A_r = d_2 - L - 2$, y una diferencia de temperaturas entre las paredes verticales de las cavidades de aire $\Delta T = T_{12} - T_{23}$. El coeficiente radiativo h_r también en la ecuación 2.8 es calculado asumiendo dos superficies grises paralelas de espesor d_2 , separadas por una distancia equivalente a $L - 2$ y ambas superficies poseen la misma emisividad térmica, ϵ . Por lo que se puede expresar como:

$$h_r = F_c \frac{\sigma(T_{12}^2 + T_{23}^2)(T_{12} + T_{23})}{2\left(\frac{1-\epsilon}{\epsilon}\right) + \frac{1}{F_{12}}} \quad (2.18)$$

donde: h_r es el coeficiente radiativo de la cavidad de aire, F_c es un factor de corrección radiativo, σ es la constante de Stefan-Boltzmann y F_{12} es el factor de vista de las superficies normales al flujo de calor de la cavidad de

aire, en función de d_2 y L_2 . En el método EHLS la temperatura T_{12} y T_{23} , corresponden a la temperatura de la interfase entre la capa L_1 y la capa L_2 , y la interfase entre la capa L_2 y la capa L_3 , respectivamente por lo que la conductividad térmica en la capa $L2$ (k_2^*), está en función de las resistencias conductivas, convectivas y radiativas, donde las últimas dos son a su vez funciones de las temperaturas de interfaz T_{12} y T_{23} , por lo que la conductividad k_2^* se actualiza en cada paso temporal variando con la temperatura.

Capítulo 3

Método simplificado EHLS (S-EHLS)

El método S-EHLS propone una simplificación del método EHLS para su fácil implementación en E+. La simplificación se propone basada en objetos que existen en E+ de tal manera que puedan ser implementados por cualquier usuario familiarizado con E+, a diferencia del método EHLS que requiere ser programado en el código de E+, lo cual requiere tener conocimientos avanzados en programación.

La simplificación consiste en proponer un sistema constructivo de capas equivalentes homogéneas, como las presentadas en el método EHLS, las cuales se crearán dentro de E+, teniendo así, las mismas capas equivalentes homogéneas, con el mismo espesor L compuesto por las capas L_1 , L_2 y L_3 , y las mismas propiedades térmicas que el sistema constructivo real, insertadas como objetos, pero ahora la capa L_2 , es una capa homogénea virtual con las mismas características que la del método EHLS, que posee una conductividad variable dependiente de la temperatura promedio de la capa L_2 del bloque hueco de concreto. Para obtener dicha conductividad variable se modificó el programa EHLS con que cuenta el GEE para que reporte en un archivo la conductividad equivalente de la capa no homogénea L_2 como función de promedio entre las temperaturas T_{12} y T_{23} a cada instante de un día típico en el clima seleccionado.

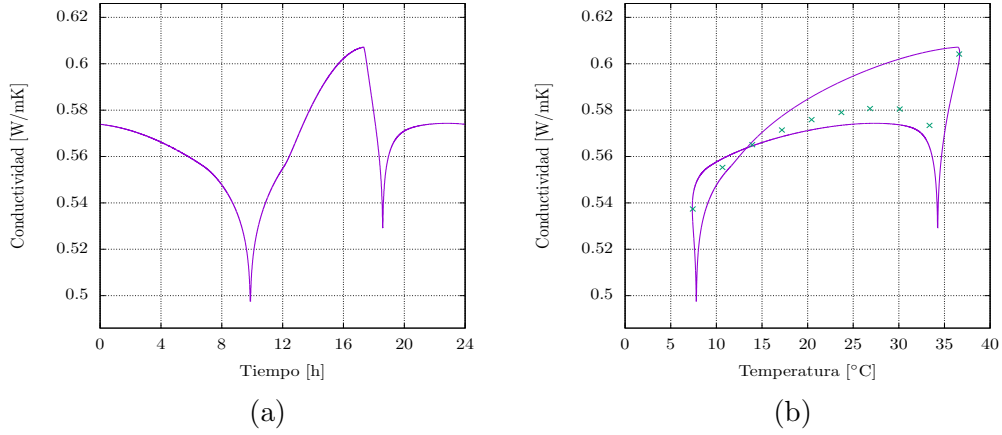


Figura 3.1: Conductividad térmica de la capa L_2 del BHC a lo largo de un día promedio, en función del tiempo (a), y el ajuste de la Conductividad térmica de la capa L_2 en función de la temperatura promedio de la capa L_2 .

Como se mencionó anteriormente el método EHLS utiliza una conductividad variable equivalente k_2^* , para evaluar los sistemas constructivos no homogéneos, esto debido a que el coeficiente convectivo y el coeficiente radiativo utilizados en la ecuación de la k_2^* , dependen del diferencial de temperaturas entre las superficies de la interfaz T_{12} y T_{23} , por lo que esta conductividad equivalente k_2^* se actualiza con cada paso temporal. Al evaluarse de esta forma la k_2^* , el programa EHLS crea una serie de conductividades equivalentes a lo largo del día como se muestra en la figura 3.1 (a), esta serie de datos se ajusta, para poder ser utilizado dentro del objeto *VariableThermalConductivity* de E+, el cual, a partir de variables crea un material ficticio al cual se le puede asignar una serie de diez conductividades dependientes de la temperatura. Así, se asigna un valor de conductividad a cada temperatura alcanzada a lo largo del día típico a evaluar, después se divide en 10 secciones el intervalo de las temperaturas alcanzadas, de la menor a la mayor temperatura, y de cada sección se obtiene el promedio de la conductividad dependiente de la temperatura, como se muestra en la figura 3.1 (b).

Es de esperarse que esta simplificación, la tabla de conductividad equivalente-temperatura, sea válida especialmente para un sistema constructivo específico, incluyendo el color, orientación y clima donde sea simulado, además de la condición de uso al interior.

Capítulo 4

Antecedentes

En la siguiente sección se presenta la revisión bibliográfica consultada para la realización de este trabajo:

Borbón, *et al.* presentan un estudio de la transferencia de calor en un muro de bloques de concreto con cavidades para conocer su resistencia térmica. Plantearon un modelo teórico unidimensional en estado estacionario considerando conducción, radiación y convección, con una temperatura al interior constante de 25 °C. La simulación se efectuó en forma horaria para dos días en condiciones extremas de temperatura ambiente donde la temperatura máxima fue de hasta 40°C y la temperatura mínima de 23°C, mientras que la temperatura sol-aire llegó a los 70°C como resultado de una radiación solar superior a los 900W. Encontrando así que la radiación es el mecanismo de transferencia de calor más importante con una aportación del 56 % al flujo total, seguido por la conducción con 25 % y la convección con un 19 %. De igual forma se encontró que el muro presenta valores de resistencia térmica que tienden a disminuir con el aumento de los diferenciales de temperatura [\[23\]](#).

Pérez, *et al.* presentan un estudio numérico de la resistencia térmica en dos tipos de muros de bloques de concreto hueco para diferentes temperaturas en la superficie exterior evaluando el efecto de colocar aislamiento térmico por la cara exterior y en sus cavidades. Usaron un modelo matemático que considera la conducción bidimensional en estado permanente en el bloque de concreto.

El modelo teórico para estado permanente, fue resuelto numéricamente con diferencias finitas y validado con resultados experimentales de la literatura. Se obtuvieron resistencias térmicas promedio para los bloques de 0.12 [m] y 0.15 [m] de 0.159 [m^2K/W] y 0.171 [m^2K/W] respectivamente. Cuando se rellenan las cavidades con aislamiento térmico son de 0.407 [m^2K/W] y de 0.530 [m^2K/W], respectivamente y al aplicar el mismo volumen de aislante de la cavidad rellena, sobre la cara exterior, se obtienen valores de 1.555 [m^2K/W] y 2.147 [m^2K/W], para los bloques de 0.12 [m] y 0.15 [m] respectivamente [24].

Huelsz *et al.* presentan los resultados de simulaciones numéricas usando diferencias finitas de transferencia de calor dependiente del tiempo a través de la envolvente de una edificación. Las simulaciones demostraron que utilizar como único parámetro para evaluar el comportamiento térmico el valor de su resistencia térmica es inadecuado y que seleccionar los materiales de la envolvente de una edificación con este parámetro puede producir un comportamiento térmico al interior de la edificación contrario al deseado. [7].

Kontoleon y Bikas investigan y evalúan las propiedades térmicas de una pared orientada al sur. Evalúan los parámetros del FD y TR utilizando el método de las resistencias equivalentes en serie-paralelo, demostrando que la absorptancia solar se relaciona directamente con los parámetros estudiados, ya que al aumentar la absorptancia solar aumenta el FD y disminuye el TR [17].

Barrios, *et al.* describen la importancia de la disposición de capas en un sistema constructivo en condiciones con aire acondicionado y sin aire acondicionado, evaluando tres materiales distintos: Concreto de alta densidad, Concreto aereado y un aislante de poliestireno. La evaluación se llevo a cabo con una simulación por el método de diferencias finitas considerando una transferencia de calor unidimensional dependiente del tiempo [25].

Barrios, *et al.* analizan cinco parámetros para medir el desempeño térmico de muros o techos de la envolvente de una edificación que no usa aire acondicionado: la energía transmitida a través de un techo/muro durante el día ET , el factor de decremento superficial FD_s , el factor de decremento sol-aire FD_{sa} , el discomfort térmico D y la temperatura promedio del aire al interior T_{in} . Para analizar los parámetros mencionados, se realizaron simulaciones numéricas del transporte de calor unidimensional dependiente del tiempo, encontrando como los parámetros más confiables para la selección de un sistema constructivo a la energía transmitida ET , FD_{sa} y D [26].

Huelsz, *et al.* proponen y validan el método EHLS para la solución de la

transferencia de calor dependiente del tiempo a través de un muro compuesto por bloques huecos. El método brinda un muro equivalente compuesto por un conjunto de capas homogéneas con un comportamiento térmico similar al muro de bloque hueco original: considerando la transferencia de calor por conducción a través del marco sólido del bloque, por convección natural dentro de las cavidades de aire del bloque, y la transferencia de calor por radiación entre las superficies de las cavidades. Para considerar la radiación y convección que ocurren dentro de las cavidades de aire el método usa coeficientes de calor dependientes del tiempo y un factor de corrección radiativo, el último es calculado usando diferentes valores del área fraccional de las cavidades de aire y las diferentes relaciones de aspecto de las mismas, comparándolas con resultados numéricos de un modelo bidimensional, en estado estacionario, ya validado. Se encontraron diferencias de hasta el 3.4 % para la energía transferida a través de la pared y de 7 % tanto para el FD_{sa} como para el TR . En el caso de cuartos evaluados en condición de uso con aire acondicionado la diferencia máxima fue de 7 % para la C_{tot} [22].

Barrios, *et al.* implementan el método EHLS en el programa de simulación EnergyPlus (E+) y lo validaron de forma experimental. Para realizar la validación del método implementado en E+ se realizaron experimentos durante un año completo en cabañas con muros contruidos por bloques huecos de concreto y techos de vigueta y bovedilla ubicados en Torreón, Coahuila, el desempeño térmico se evaluó usando termopares adheridos a las superficies de la envolvente. Para realizar la validación se compararon los resultados experimentales con los obtenidos en E+, usando los parámetros para la evaluación del desempeño térmico de sistemas constructivos T_i , TR y el FD_s [26], dichos resultados concordaron obteniendo diferencias por debajo del 7 %, por lo que la implementación del método EHLS en un programa de simulación para la edificación fue validado.

Capítulo 5

Metodología

En este capítulo se describen los procedimientos llevados a cabo para realizar la validación del método S-EHLS.

La simplificación consiste en la creación de un sistema constructivo compuesto por un conjunto de capas homogéneas equivalentes con la misma masa térmica que el sistema constructivo no homogéneo real, en el cual la capa no homogénea posee una conductividad variable equivalente que depende de la temperatura. Dicho método está pensado para ser implementado fácilmente en *EnergyPlus* (*E+*). En este capítulo se describe como calcular y obtener los datos de las capas equivalentes del sistema constructivo no homogéneo y como realizar una simulación en *E+* donde la transferencia de calor ocurra únicamente por un muro o componente del sistema constructivo a evaluar.

En la sección 5.1 se presentan los pasos a seguir para realizar una simulación en Ener-Habitat (*EH*), en la sección 5.2 se presentan los pasos para realizar una simulación con el método S-EHLS. En la sección 5.3 se describe el proceso de validación del S-EHLS. Por último en la sección 5.4 se presentan las conclusiones referentes al capítulo.

5.1. Ener-Habitat

Para realizar la simulación de un sistema constructivo en la herramienta numérica Ener-Habitat se deben seguir los siguientes pasos:

1. Ingresar a <http://www.enerhabitat.unam.mx/>
2. Definir el tipo de sistema constructivo como un sistema con una capa no homogénea.
3. Definir los parámetros de simulación: Lugar, periodo de simulación, condición de uso, y si es un muro o un techo.
4. Definir el número de capas del sistema constructivo.
5. Definir las características de la capa no homogénea como: Tipo de muro, sus dimensiones y el material de construcción.
6. Seleccionar la orientación del muro.
7. Finalmente se define la absorción solar y se corre el programa.
8. Una vez terminada la simulación es necesario descargar el archivo en el cual se encontrarán los resultados obtenidos en la simulación: factor de decremento sol-aire (FD_{sa}), temperatura promedio del aire al interior ($\langle T_{in} \rangle$), tiempo de retraso (TR) y energía transmitida a través del sistema constructivo (ET).

5.2. Método S-EHLS en una simulación tipo Ener-Habitat

Para validar el método S-EHLS en EnergyPlus (E+) con Ener-Habitat (EH) se tiene que realizar una simulación tipo EH. Una simulación tipo EH tiene las siguientes características:

1. Las cargas térmicas en la superficie exterior se simulan a través de la temperatura sol-aire (T_{sa}) que incluye la radiación de onda corta, radiación de onda larga y convección en la superficie del sistema constructivo a evaluar.
2. Usa como periodo de evaluación el día típico de cada mes.
3. Resuelve la transferencia de calor sólo a través de un sistema constructivo de la envolvente arquitectónica, mientras las demás componentes permanecen adiabáticas.

4. La simulación es unidimensional, por lo que la transferencia de calor a través del sistema constructivo es por unidad de área.
5. Los espacios que usa EH para las simulaciones en condición tienen una profundidad de 2.5 *m*.
6. No existe intercambio radiativo de onda corta y larga al interior del supuesto cuarto.

Para realizar una simulación tipo EH en E+ se deben seguir los siguientes pasos:

1. Diseñar un modulo, con ayuda de la interfaz gráfica SketchUp y las herramientas de OpenStudio, con una base de 2.8 *m* de largo por 2.5 *m* de profundidad y 2.7 *m* de altura. Como se muestra en la figura 5.1.
2. Asignar una zona térmica al módulo.
3. Guardar el modelo con formato .osm y abrirlo con OpenStudio.
4. Eliminar las cargas térmicas internas.
5. Para el caso de condición con aire acondicionado crear un termostato con la temperatura de neutralidad deseada y activar las cargas térmicas ideales para la zona térmica.
6. Generar con la herramienta *Weather Converter* de E+ un archivo de clima .epw que contenga la temperatura T_{sa} obtenida de los resultados de EH y la radiación global sea cero.
7. Exportar desde OpenStudio el archivo .idf para terminar de editar la simulación en el programa IDFEditor.
8. Modificar el archivo .idf de la simulación para que no exista flujo de calor en las superficies internas del módulo excepto en la superficie donde se encuentra el sistema constructivo a evaluar y que los coeficientes convectivos de la superficie exterior e interior sean los mismos que utiliza EH.

Como cada módulo es un símil a las condiciones de EH, solo existe transferencia de calor a través una sola superficie y en el resto de las superficies el

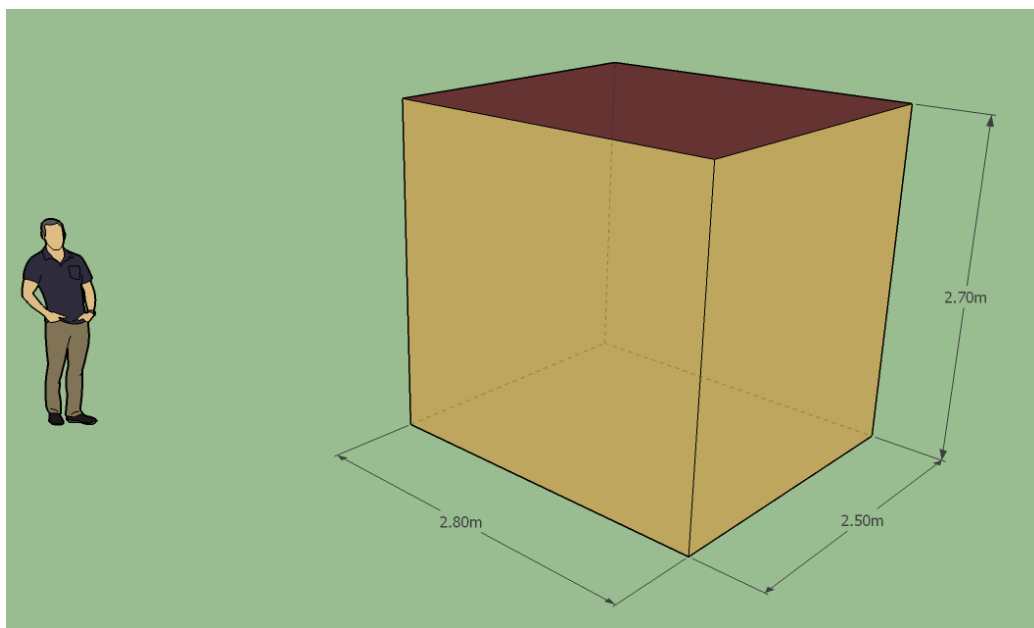


Figura 5.1: Módulo realizado en Sketch-Up para su posterior simulación en OpenStudio.

flujo de calor debe ser cero. También se asignan los valores de los coeficientes convectivos del exterior e interior. Para lograr esto se deben realizar las siguientes modificaciones en el archivo .idf:

- **Material:** En esta clase se deberán agregar los materiales que compondrán al sistema constructivo a evaluar con la densidad, calor específico y conductividad térmica correspondiente de cada material. Además, la absorptancia térmica debe ser cero para evitar el intercambio de calor de onda larga.
- **Material:NoMass;** se deberá crear un material sin masa térmica con una resistencia térmica muy grande y una absorptancia térmica cercana a cero; este material se utilizará en los sistemas constructivos donde no se desea transferencia de calor.
- **SurfaceProperty:ConvectionCoefficients;** Se asignan los coeficientes convectivos exterior e interior de acuerdo a los valores de las NOM-008 y NOM-020.

Además para poder aplicar la simplificación del modelo EHLS la conductividad de la capa no homogénea del sistema constructivo a evaluar debe depender de la temperatura, por lo que se debe escoger el método de diferencias finitas:

- `HeatBalanceAlgorithm` con `HeatBalanceSettings` ajustadas a conducción por diferencias finitas con el método implícito de primer orden.
- `MaterialProperty:VariableThermalConductivity`; Dentro de esta clase se inserta la conductividad como función de la temperatura, generadas con el método EHLS.

Los datos de conductividad como función de la temperatura para cada sistema constructivo, clima y orientación se obtienen de evaluar el sistema constructivo usando el método EHLS. El programa numérico EHLS fue proporcionado por el Grupo de Energía en Edificaciones (GEE) del Instituto de Energías Renovables (IER) de la UNAM. El programa requiere como datos de entrada los mismos que EH. Para realizar la simulación se deben seguir los siguientes pasos:

1. Iniciar el programa EHLS desde la terminal Linux.
2. Asignar los mismos datos de entrada que la simulación hecha en EH y realizar la simulación, estos incluyen los datos del sistema constructivo y los datos de clima del día típico.
3. Insertar la tabla de conductividad térmica dependiente de la temperatura que genera el programa EHLS. Cada tabla es válida solamente para la orientación, mes, sistema constructivo y absortancia solar exterior del sistema constructivo. Esta tabla se asigna a la capa no homogénea del sistema constructivo no homogéneo.

5.3. Validación del método S-EHLS

La validación del método S-EHLS se lleva a cabo evaluando el desempeño térmico de un sistema constructivo no homogéneo con Ener-Habitat y con el método propuesto. En la siguiente lista se presenta de manera general el proceso para llevar a cabo dicha validación:

1. Realizar la simulación en EH de un sistema constructivo no homogéneo. Los resultados del desempeño térmico y del aire al interior se utilizarán como parámetros de comparación con los resultados del método S-EHLS. Además, la temperatura sol-aire (T_{sa}) se utilizará como condición de frontera en la superficie exterior en las simulaciones en EnergyPlus (E+).
2. Realizar una simulación usando el programa del método EHLS para obtener la tabla de conductividad dependiente de la temperatura utilizando los mismos parámetros de entrada que EH.
3. Realizar una simulación tipo EH en EnergyPlus implementando la simplificación del método S-EHLS, la cual consiste en suponer que la conductividad de la capa no homogénea del sistema constructivo no homogéneo depende de la temperatura. La tabla de conductividad equivalente como función de la temperatura se obtuvo del método EHLS y se implementa a partir del objeto de E+ *MaterialProperty:VariableThermalConductivity*.
4. Evaluar el desempeño térmico del sistema constructivo no homogéneo en la simulación tipo EH en EnergyPlus utilizando el método S-EHLS.
5. Comparar los resultados obtenidos de la simulación tipo EH en E+ usando el método S-EHLS.

El proceso general para la validación del método S-EHLS se muestra en la figura 5.2

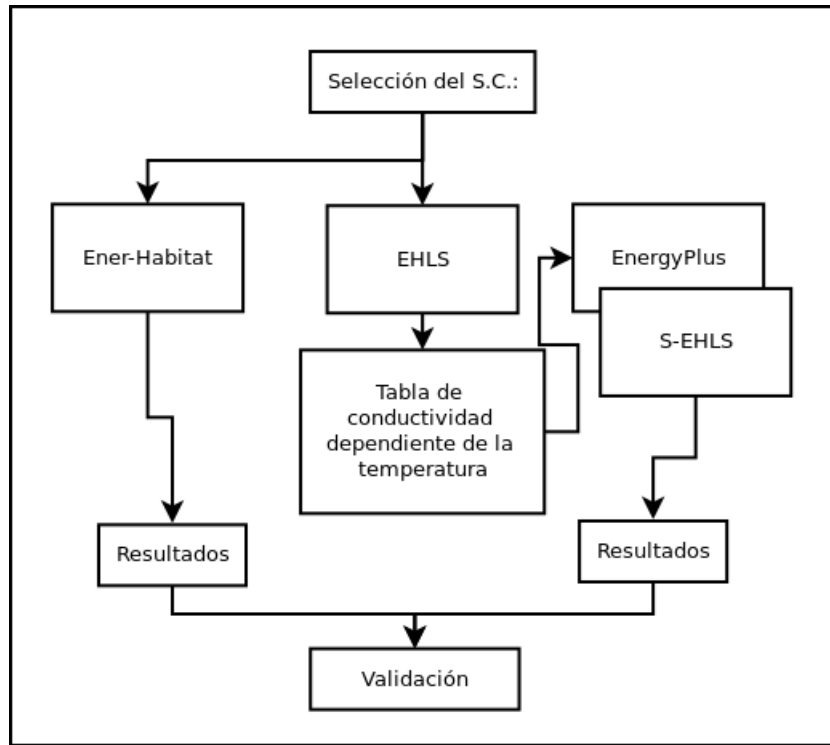


Figura 5.2: Diagrama de flujo a seguir para validar el método S-EHLS.

5.4. Conclusiones

En este capítulo se describieron los pasos que se deben seguir para llevar a cabo la validación del método S-EHLS con el programa Ener-Habitat. Destaca la importancia de la definición de los parámetros de entrada para llevar a cabo las simulaciones, los cuales son los mismos tanto en *EH* como en el método EHLS.

Capítulo 6

Resultados y discusión

En el presente capítulo se presentan los resultados de las simulaciones de la transferencia de calor dependiente del tiempo a través de un muro formado por un bloque hueco de concreto (BHC). Los resultados de la transferencia de calor y su desempeño térmico se obtienen usando el método simplificado del conjunto de capas homogéneas equivalentes (S-EHLS) y se comparan con los resultados obtenidos con la herramienta numérica Ener-Habitat (EH) con el objetivo de validar el método S-EHLS. Las simulaciones se llevan a cabo en dos ciudades diferentes de la República Mexicana, dos meses para cada ciudad, dos orientaciones y dos valores de absortancia solar. Además todas las simulaciones se realizan bajo condición de uso sin y con aire acondicionado.

En la sección 6.1 se describen las características de las simulaciones: Lugar, orientación del muro, mes de simulación, absortancia solar de la superficie externa del muro, temperatura sol-aire y la características del BHC. En las secciones 6.2 y 6.3 se muestran los resultados de la transferencia de calor, en condición de uso sin aire acondicionado y con aire acondicionado, correspondientes al modelo S-EHLS y su comparación con EH. Finalmente en la sección 6.4 se presentan las conclusiones referentes al capítulo.

6.1. Características de las simulaciones

Para realizar la validación del método S-EHLS se llevaron a cabo simulaciones numéricas para evaluar el desempeño térmico de un muro con un sistema constructivo formado por bloques huecos de concreto ubicado en las ciudades de Torreón y Xalapa. Para Torreón se hicieron las simulaciones en Enero y Mayo y para Xalapa únicamente en Enero. Cada muro tuvo dos orientaciones, norte y oeste en Torreón, y norte y este en Xalapa. Para todas las simulaciones se consideraron dos valores de la absorptancia solar de la superficie externa del muro $a = 0.2$ y $a = 0.9$. Además, para todos los casos se realizaron simulaciones bajo condición de uso sin y con aire acondicionado. En la tabla 6.1 se muestran las especificaciones de cada simulación y el acrónimo asignado al hacer referencias a ellas.

Tabla 6.1: Lugar, mes, orientación, valor de la absorptancia solar de la superficie externa del muro y acrónimo asignado a cada simulación realizada.

Lugar	Mes	Orientación	Absortancia solar [-]	Acrónimo
Torreón	Mayo	Norte	0.2	TMN-a=0.2
		Oeste	0.2	TMO-a=0.2
		Norte	0.9	TMN-a=0.9
		Oeste	0.9	TMO-a=0.9
	Enero	Norte	0.2	TEN-a=0.2
		Oeste	0.2	TEO-a=0.2
		Norte	0.9	TEN-a=0.9
		Oeste	0.9	TEO-a=0.9
Xalapa	Enero	Norte	0.2	XEN-a=0.2
		Este	0.2	XEE-a=0.2
		Norte	0.9	XEN-a=0.9
		Este	0.9	XEE-a=0.9

Al seleccionar las condiciones para cada simulación se consideraron casos donde hay grandes variaciones en los valores de la temperatura sol-aire (T_{sa}) mínima (en el caso del clima en Xalapa) y máxima (En Torreón), siendo el último caso, donde se espera que el método S-EHLS presente problemas.

En la figura 6.1 se muestra la T_{sa} de cada una de las simulaciones mostradas en la tabla 6.1. En la figura 6.1 (a) se presenta la T_{sa} correspondiente

Tabla 6.2: Propiedades térmicas del concreto utilizado para la construcción del BHC.

Propiedades térmicas del concreto	
k	1.3 W/mK
ρ	2120 kg/m^3
c	866 J/kgK

Tabla 6.3: Propiedades térmicas del concreto, donde k es la conductividad térmica, ρ la densidad y c el calor específico del concreto [27].

al sistema constructivo de BHC ubicado en Torreón, temporada fría (Enero) para las dos orientaciones y los dos valores de la absorptancia solar. Como se puede ver el mínimo de la T_{sa} se encuentra por debajo de los 0°C y el valor máximo casi alcanza los 60°C .

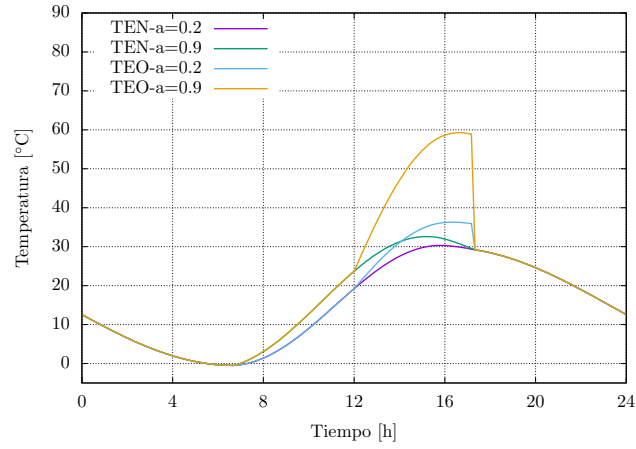
En la figura 6.1 (b) se muestran los valores de la T_{sa} durante el día típico del mes de Mayo para las orientaciones norte y oeste y los dos valores de absorptancia solar para el BHC ubicado en Torreón. El valor mínimo de la T_{sa} en dicha simulación ronda los 15°C y el máximo casi llega a los 80°C . En este mes el movimiento aparente del sol y por lo tanto la radiación directa incidente sobre la superficie evaluada genera un cambio abrupto en la T_{sa} al amanecer y alrededor de las 14 horas del día.

En la figura 6.1 (c) se muestran los valores de la T_{sa} durante el día típico del mes de Enero para las orientaciones Norte y Este y los dos valores de absorptancia solar para el BHC ubicado en Xalapa. Se puede observar que el valor de la T_{sa} mínima y máxima son alrededor de 9°C y 28°C , respectivamente. Para Xalapa no se observa una gran diferencia entre el mínimo y el máximo de la T_{sa} como en los dos casos anteriores.

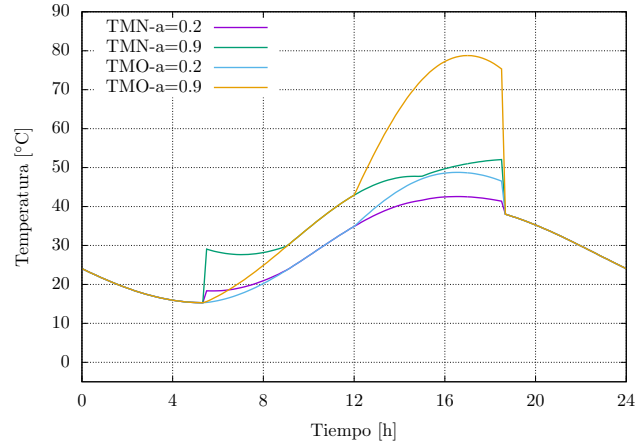
Se puede observar que para la orientación oeste y este con $a = 0.9$ en Torreón, hay un cambio en la pendiente de la T_{sa} después del medio día, como es de esperarse, debido a la incidencia de radiación solar directa sobre ese muro y la absorptancia solar elevada, lo que produce una temperatura alta.

El sistema constructivo evaluado en esta tesis está formado únicamente por el BHC y es el mismo que el presentado en [27]. En la figura 6.2 se presenta un esquema del BHC y en la tabla 6.2 las propiedades térmicas del concreto, que es el material del cual está construido el BHC.

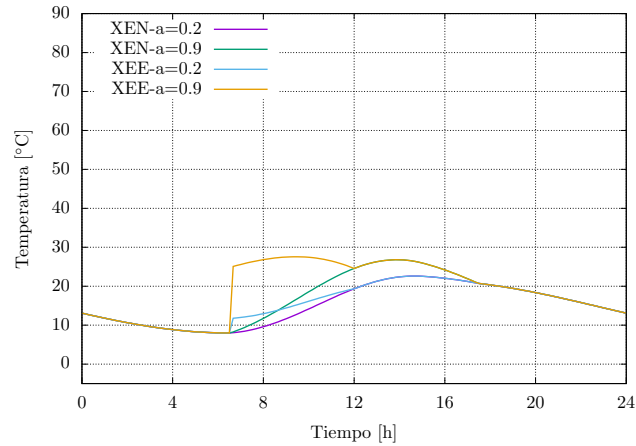
Los resultados mostrados son obtenidos usando el método S-EHLS y la



(a)



(b)



(c)

Figura 6.1: Temperatura sol-aire T_{sa} durante el día típico para (a) Torreón, Enero, orientaciones Norte y Oeste y $a = 0.2$ y $a = 0.9$, (b) Torreón, Mayo, orientaciones Norte y Oeste y $a = 0.2$ y $a = 0.9$, y (c) Xalapa, Mayo, orientaciones Norte y Este y $a = 0.2$ y $a = 0.9$.

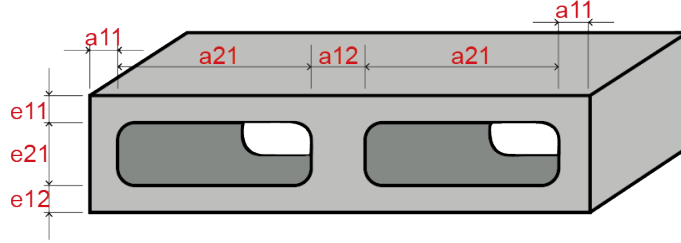


Figura 6.2: Esquema del BHC que constituye el sistema constructivo usado en las simulaciones, donde: $e11=0.035\text{ m}$, $e21=0.055\text{ m}$, $e12=0.035\text{ m}$, $a11=0.036\text{ m}$, $a21=0.135\text{ m}$ y $a12=0.036\text{ m}$ [20].

herramienta numérica Ener-Habitat (EH) y se comparan entre ellos usando la diferencia y el error relativo porcentual de los valores obtenidos. Tanto la diferencia (EH–S-EHLS) como el error relativo (E_r) se calculan con respecto a los valores obtenidos con EH. El error relativo se define como:

$$E_r = \left| \frac{x - x_{ref}}{x_{ref}} \right| \times 100, \quad (6.1)$$

respectivamente, donde x corresponde al dato a evaluar y x_{ref} es el dato de referencia que corresponde al valor obtenido en EH.

6.2. Resultados bajo condición de uso sin aire acondicionado

En esta sección se presentan los resultados del desempeño térmico de los sistemas constructivos, obtenidos de las simulaciones hechas tanto en EH como en E+ bajo condición de uso sin aire acondicionado para un muro formado por bloques huecos de concreto (BHC) y los lugares, meses, orientaciones y valores de absorción solar especificados en la tabla 6.1.

En la figura 6.3 se presenta la T_{sa} junto con la temperatura del aire al interior usando EH y el método S-EHLS para Torreón, Enero, orientación Norte con (a) $a = 0.2$ y (b) $a = 0.9$, y Torreón, Enero, orientación Oeste con (c) $a = 0.2$ y (d) $a = 0.9$.

Como se puede ver en la figura 6.3 (a) la diferencia entre la temperatura del aire al interior al utilizar EH y la temperatura del aire al interior obtenida por el método S-EHLS es apenas apreciable. En la figura 6.3 (b) para el valor

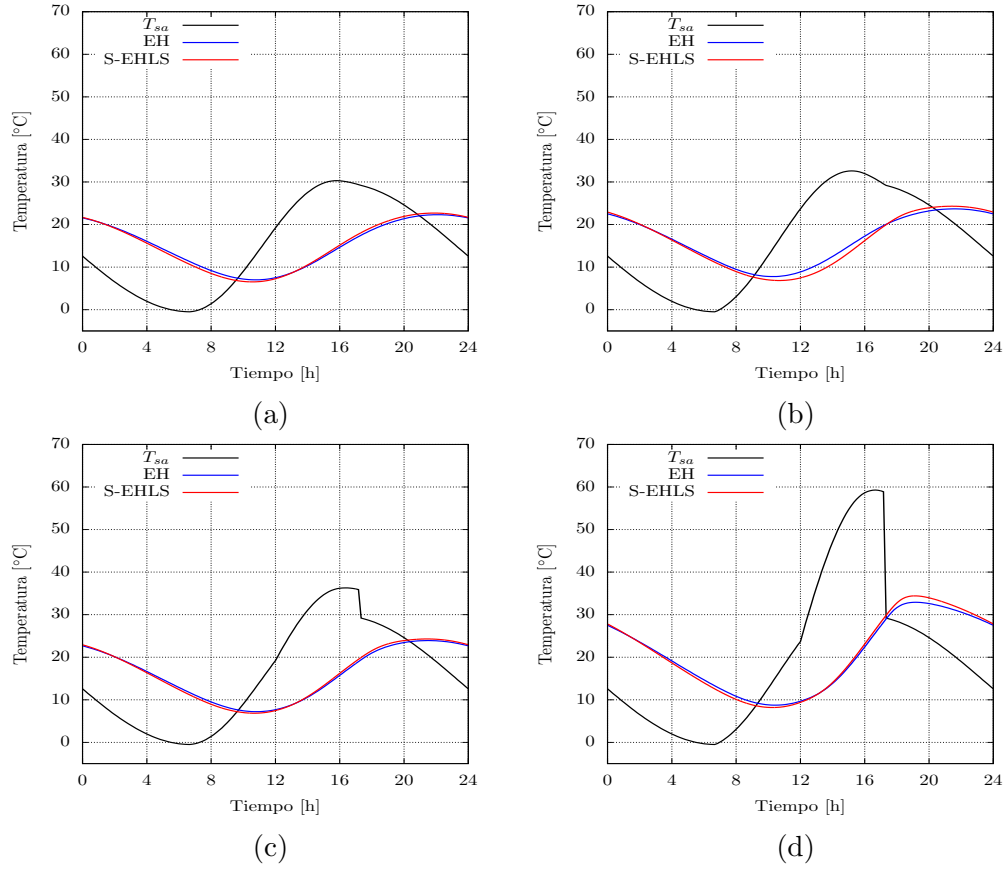


Figura 6.3: Temperatura sol-aire T_{sa} y temperatura del aire al interior usando EH y el método S-EHLS para Torreón en el mes de Enero y (a) orientación Norte y absortancia solar de 0.2, (b) orientación Norte y absortancia solar de 0.9, (c) orientación Oeste y absortancia solar de 0.2 y (d) orientación Oeste y absortancia solar de 0.9.

alto de la absortancia solar hay una ligera diferencia entre EH y el método S-EHLS alrededor de las 12 y las 20 horas. De igual forma se puede ver que para la figura 6.3 (c), correspondiente a Torreón en el mes de Enero, orientación Oeste y $a = 0.2$ a pesar de la cambio abrupto de la T_{sa} apenas se distinguen diferencias en la temperatura del aire al interior obtenidas en EH y por el método S-EHLS. Para la orientación Oeste con $a = 0.9$, figura 6.3 (d), que es donde se alcanza la mayor diferencia entre el valor mínimo y máximo de la T_{sa} hay una ligera diferencia en la temperatura del aire al interior

Tabla 6.4: Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición de uso sin aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Torreón, en el mes de Enero, orientación Norte y los dos valores de absorptancia solar.

Torreón, Enero, Norte				
$a = 0.2$				
Parámetro	EH	S-EHLS	EH–S-EHLS	E_r
FD_{sa} [–]	0.50	0.52	-0.02	3.7 %
TR [h]	6.30	6.08	0.22	3.5 %
ET [Wh/m ² día]	13.62	14.21	-0.59	4.3 %
$\langle T_{in} \rangle$ [°C]	15.1	15.0	0.1	0.5 %
$a = 0.9$				
FD_{sa} [–]	0.48	0.50	-0.02	4.7 %
TR [h]	6.40	6.50	-0.10	1.6 %
ET [Wh/m ² día]	14.09	13.30	0.79	5.6 %
$\langle T_{in} \rangle$ [°C]	16.3	16.3	0.0	0.0 %

entre EH y el método S-EHLS alrededor de las 18 horas, probablemente por el cambio repentino en la T_{sa} . En las tablas 6.4 a la 6.7 se muestran los resultados de la evaluación térmica hecha al muro de BHC para Torreón en los meses de Enero y Mayo al usar EH y el método S-EHLS, en las que se presenta la diferencia entre ambos (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) de los parámetros de evaluación del desempeño térmico en condición de uso sin aire acondicionado: factor de decremento sol-aire (FD_{sa}), tiempo de retraso (TR), energía transmitida (ET) y temperatura promedio del aire al interior ($\langle T_{in} \rangle$).

Como se puede ver de las tablas 6.4 a la 6.7, para el BHC en Torreón, para los meses Mayo y Enero, para las orientaciones Norte y Oeste, y valores de la absorptancia solar de $a = 0.2$ y $a = 0.9$, la diferencia en los resultados de los parámetros de evaluación del desempeño térmico para las simulaciones en condición de uso sin aire acondicionado usando EH y el método S-EHLS son pequeñas y en algunos casos no existen. Se obtuvo que para el FD_{sa} la diferencia máxima es de -0.04 (9.2 %) en el caso de Torreón, Enero, orientación Oeste con una $a = 0.9$ y la mínima es de 0.01 y -0.01 para tres simulaciones en las cuales, el error relativo porcentual fue distinto y se encontró que la simulación con menor error relativo porcentual fue de 1.5 % para el caso de

Tabla 6.5: Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición sin aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Torreón, en el mes de Enero, orientación Oeste y los dos valores de absorptancia solar.

Torreón, Enero, Oeste				
$a = 0.2$				
Parámetro	EH	S-EHLS	EH–S-EHLS	E_r
FD_{sa} [–]	0.45	0.48	-0.03	6.6 %
TR [h]	5.10	5.40	-0.30	5.9 %
ET [Wh/m ² día]	14.80	14.08	0.72	4.9 %
$\langle T_{in} \rangle$ [°C]	16.0	16.0	0.0	0.0 %
$a = 0.9$				
FD_{sa} [–]	0.40	0.44	-0.04	9.2 %
TR [h]	2.50	2.17	0.33	13.3 %
ET [Wh/m ² día]	21.07	22.63	-1.56	7.4 %
$\langle T_{in} \rangle$ [°C]	20.4	20.6	-0.2	1.1 %

Tabla 6.6: Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición sin aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Torreón, en el mes de Mayo, orientación Norte y los dos valores de absorptancia solar.

Torreón, Mayo, Norte				
$a = 0.2$				
Parámetro	EH	S-EHLS	EH–S-EHLS	E_r
FD_{sa} [–]	0.49	0.50	0.01	1.6 %
TR [h]	4.50	4.58	-0.08	1.8 %
ET [Wh/m ² día]	11.33	10.47	-0.86	7.6 %
$\langle T_{in} \rangle$ [°C]	29.1	29.1	0.0	0.0 %
$a = 0.9$				
Parámetro	EH	S-EHLS	EH–S-EHLS	E_r
FD_{sa} [–]	0.44	0.46	-0.02	5.2 %
TR [h]	1.30	1.78	-0.48	36.9 %
ET [Wh/m ² día]	13.91	14.19	-0.28	2.0 %
$\langle T_{in} \rangle$ [°C]	33.5	33.3	0.2	0.7 %

Tabla 6.7: Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición sin aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Torreón, en el mes de Mayo, orientación Oeste y los dos valores de absorptancia solar.

Torreón, Mayo, Oeste				
$a = 0.2$				
Parámetro	EH	S-EHLS	EH–S-EHLS	E_r
$FD_{sa} [-]$	0.49	0.50	-0.01	1.8 %
$TR [h]$	3.80	3.03	0.77	20.3 %
$ET [Wh/m^2 día]$	13.85	12.79	1.06	7.6 %
$\langle T_{in} \rangle [^{\circ}C]$	30.2	30.1	0.1	0.2 %
$a = 0.9$				
Parámetro	EH	S-EHLS	EH–S-EHLS	E_r
$FD_{sa} [-]$	0.48	0.49	-0.01	2.4 %
$TR [h]$	2.60	2.50	0.10	3.8 %
$ET [Wh/m^2 día]$	25.81	25.61	0.20	0.8 %
$\langle T_{in} \rangle [^{\circ}C]$	38.3	38.0	0.3	0.9 %

Torreón, Mayo, orientación norte con una $a = 0.2$. La diferencia absoluta promedio para el FD_{sa} para Torreón es 0.02. Para el TR la diferencia máxima es 0.77 h (20.3 %) para Torreón, Mayo, orientación Oeste y $a = 0.2$ y la diferencia mínima es de 0.08 h (1.8 %) para Torreón, Mayo, orientación Norte con $a = 0.2$. La diferencia absoluta promedio para el TR para Torreón es 0.29 h. Para la ET la diferencia máxima es $-1.56 Wh/m^2 día$ (7.4 %) para Torreón, Enero, orientación Oeste y $a = 0.9$ y la mínima es $0.20 Wh/m^2 día$ (0.8 %) para Torreón, Mayo, Oeste y $a = 0.9$. La diferencia absoluta promedio de la ET para la totalidad de simulaciones realizadas en Torreón es $0.68 Wh/m^2 día$. Para la $\langle T_{in} \rangle$ la diferencia máxima es $0.3 ^{\circ}C$ para Torreón, Mayo, orientación Oeste y $a = 0.9$ y la mínima es cero para varios casos. La diferencia absoluta promedio para la $\langle T_{in} \rangle$ es $0.06^{\circ}C$.

Como se puede ver en las tablas 6.8 a la 6.9, para el BHC en Xalapa, para el mes de Enero, para las orientaciones Norte y Oeste, y valores de la absorptancia solar de $a = 0.2$ y $a = 0.9$, la diferencia en los resultados de los parámetros de evaluación del desempeño térmico para sin aire acondicionado usando EH y el método S-EHLS son pequeñas y en algunos casos no existen. Para el FD_{sa} la diferencia máxima es de -0.01 (2.4 %) en Xalapa, Enero,

Tabla 6.8: Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición sin aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Xalapa, en el mes de Enero, orientación Este y los dos valores de absorptancia solar.

Xalapa, Enero, Este				
$a = 0.2$				
Parámetro	EH	S-EHLS	EH–S-EHLS	E_r
FD_{sa} [–]	0.45	0.45	0.00	0.0 %
TR [h]	6.10	6.15	-0.05	0.8 %
ET [Wh/m ² día]	5.87	5.96	0.09	1.5 %
$\langle T_{in} \rangle$ [°C]	15.8	15.7	0.1	0.4 %
$a = 0.9$				
FD_{sa} [–]	0.49	0.50	-0.01	1.7 %
TR [h]	8.20	8.88	-0.68	8.3 %
ET [Wh/m ² día]	8.52	8.68	-0.16	1.9 %
$\langle T_{in} \rangle$ [°C]	19.2	19.2	0.0	0.0 %

Este $a = 0.9$ y la mínima es de 0.002 (0.5 %) para Xalapa, Enero, orientación Este y $a = 0.2$. La diferencia absoluta promedio para el FD_{sa} para Xalapa es 0.006. Para el TR la diferencia máxima es de $-0.68h$ (8.3 %) para Xalapa, Enero orientación Este con una $a = 0.9$ y la mínima de $-0.05h$ (0.8 %) en el caso de Xalapa, Enero orientación Este con una $a = 0.2$. La diferencia promedio para el TR para Xalapa es $0.34h$. Para la ET la diferencia máxima es $-0.23 Wh/m^2día$ (3.1 %) en el caso de Xalapa, Enero, orientación Norte y $a = 0.9$ y la mínima es $-0.10 Wh/m^2día$ (1.7 %) para Xalapa, Enero, orientación Este y $a = 0.9$. La diferencia promedio para Xalapa en la ET es $0.16Wh/m^2día$. Para la $\langle T_{in} \rangle$ la diferencia máxima es $0.1^\circ C$ para Xalapa, Enero, orientación Este y $a = 0.2$ y la mínima es 0 los dos casos donde la $a = 0.9$. La diferencia promedio para Xalapa en la $\langle T_{in} \rangle$ es $0.04^\circ C$.

En la figura 6.4 se muestran los resultados de todas las simulaciones realizadas en condición de uso sin aire acondicionado de manera gráfica. Se puede observar cualitativamente que los valores de los parámetros de evaluación para el desempeño térmico obtenidos con ambos programas coinciden satisfactoriamente, siendo el TR el que presenta la mayor diferencia y la $\langle T_{in} \rangle$ la que presenta la mayor coincidencia. Por otro lado se puede ver que el FD_{sa} es casi el mismo para todas las simulaciones, estando entre 0.4 y 0.5, ya que

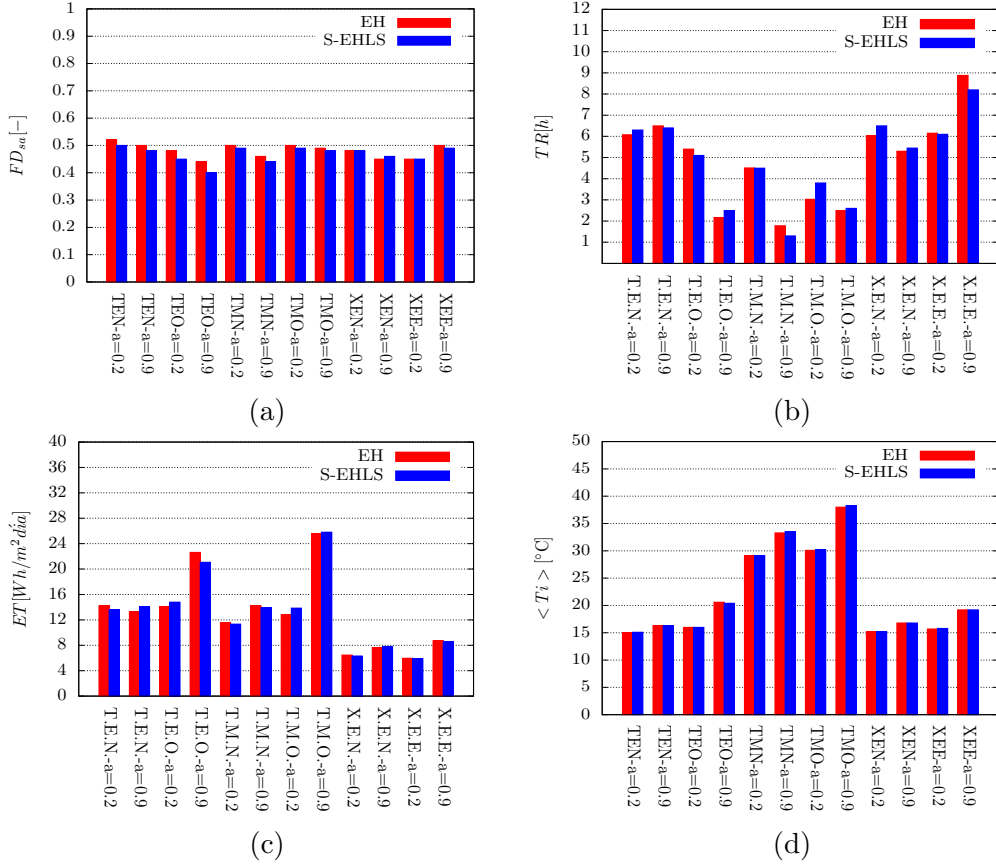


Figura 6.4: Resultados de las simulaciones con el método S-EHLS comparado con los resultados obtenidos en EH. Se muestra (a) el factor de decremento sol aire FD_{sa} , (b) el tiempo de retraso TR , (c) la energía transmitida en un día por unidad de área ET y (d) la temperatura promedio del aire al interior.

Tabla 6.9: Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición sin aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Xalapa, en el mes de Enero, orientación Norte y los dos valores de absorptancia solar.

Xalapa, Enero, Norte				
$a = 0.2$				
Parámetro	EH	S-EHLS	EH–S-EHLS	E_r
FD_{sa} [–]	0.48	0.48	0.00	0.0 %
TR [h]	6.50	6.40	0.10	1.5 %
ET [Wh/m ² día]	6.32	6.46	-0.13	2.1 %
$\langle T_{in} \rangle$ [°C]	15.2	15.2	0.0	0.0 %
$a = 0.9$				
Parámetro	EH	S-EHLS	EH–S-EHLS	E_r
FD_{sa} [–]	0.45	0.46	-0.01	2.4 %
TR [h]	5.30	5.45	-0.15	2.8 %
ET [Wh/m ² día]	7.59	7.82	-0.23	3.1 %
$\langle T_{in} \rangle$ [°C]	16.8	16.8	0.0	0.0 %

es un parámetro que depende del sistema constructivo, el cual fue el mismo en todas las simulaciones.

6.3. Resultados bajo condición de uso con aire acondicionado

En esta sección se presentan los resultados del desempeño térmico de las simulaciones bajo condición de uso con aire acondicionado para un muro formado por el BHC y los lugares, meses, orientaciones y valores de absorptancia solar especificados en la tabla 6.1. Los parámetros para evaluar el desempeño térmico son la carga térmica de enfriamiento (C_{enf}), carga térmica de calentamiento (C_{cal}), la carga térmica total (C_{tot}) y el factor de decremento superficial (FD_s).

Los resultados mostrados son obtenidos usando el método S-EHLS y la herramienta numérica EH, los cuales se presentan de las tablas 6.10 a 6.13, para las simulaciones realizadas en Torreón, en la temporada del año fría y cálida, respectivamente. Y en las tablas 6.14 y 6.15 para el Xalapa en la

temporada fría, así como la diferencia y el error relativo porcentual. Posteriormente en la figura 6.5 se muestran los histogramas de los resultados para cada parámetro de evaluación para cada una de las simulaciones realizadas en condición de uso con aire acondicionado.

Tabla 6.10: Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición con aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Torreón, en el mes de Enero, orientación Norte y los dos valores de absorptancia solar. Los parámetros son: Carga térmica de enfriamiento (C_{enf}), Carga térmica de calentamiento (C_{cal}), Carga térmica total (C_{tot}) y el Factor de decremento superficial (FD_s).

Torreón Enero, Norte				
$a = 0.2$				
Parámetro	EH	S-EHLS	EH–S-EHLS	E_r
C_{enf} [$Wh/m^2 día$]	81.57	80.95	0.62	0.8 %
C_{cal} [$Wh/m^2 día$]	482.41	512.91	-30.50	6.3 %
C_{tot} [$Wh/m^2 día$]	563.97	593.85	-29.88	5.3 %
FD_s [–]	0.37	0.41	-0.04	10.7 %
$a = 0.9$				
C_{enf} [$Wh/m^2 día$]	117.70	121.36	-3.66	3.1 %
C_{cal} [$Wh/m^2 día$]	438.76	441.38	-2.63	0.6 %
C_{tot} [$Wh/m^2 día$]	556.46	562.74	-6.29	1.1 %
FD_s [–]	0.37	0.37	0.00	0.0 %

Como se muestra en las tablas 6.10 a la 6.13, las diferencias entre los resultados de los parámetros de evaluación del desempeño térmico en condición con aire acondicionado obtenidos por EH y el método S-EHLS son pequeñas. Para la C_{enf} la diferencia máxima es de $-36.05 Wh/m^2 día$ (9.9 %) en Torreón, Enero, orientación Oeste con $a = 0.9$ y la mínima es de $0.62 Wh/m^2 día$ (0.8 %) para Torreón, Enero, orientación Norte y $a = 0.2$. La diferencia absoluta promedio para la C_{enf} para las simulaciones en Torreón es $7.85 Wh/m^2 día$. Para la C_{cal} la diferencia máxima es $-30.50 Wh/m^2 día$ (6.3 %) para Torreón, Enero orientación Norte y $a = 0.2$, la diferencia mínima es de $-1.93 Wh/m^2 día$ (1.2 %) en Torreón, Mayo, orientación Oeste y $a = 0.9$. La diferencia absoluta promedio para la C_{cal} para Torreón es $14.08 Wh/m^2 día$. Para la C_{tot} la diferencia máxima es $60.31 Wh/m^2 día$ (7.7 %)

Tabla 6.11: Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición con aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Torreón, en el mes de Enero, orientación Oeste y los dos valores de absortancia solar. Los parámetros son: Carga térmica de enfriamiento (C_{enf}), Carga térmica de calentamiento (C_{cal}), Carga térmica total (C_{tot}) y el Factor de decremento superficial (FD_s).

Torreón, Enero, Oeste				
$a = 0.2$				
Parámetro	EH	S-EHLS	EH–S-EHLS	E_r
C_{enf} [$Wh/m^2 día$]	130.43	140.43	-9.99	7.7 %
C_{cal} [$Wh/m^2 día$]	473.74	502.54	-28.80	6.1 %
C_{tot} [$Wh/m^2 día$]	604.17	642.97	-38.80	6.4 %
FD_s [–]	0.35	0.40	-0.05	12.9 %
$a = 0.9$				
C_{enf} [$Wh/m^2 día$]	362.66	398.72	-36.05	9.9 %
C_{cal} [$Wh/m^2 día$]	420.44	444.69	-24.25	5.8 %
C_{tot} [$Wh/m^2 día$]	783.10	843.41	-60.31	7.7 %
FD_s [–]	0.34	0.39	-0.05	14.2 %

Tabla 6.12: Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición con aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Torreón, en el mes de Mayo, orientación Norte y los dos valores de absorptancia solar. Los parámetros son: Carga térmica de enfriamiento (C_{enf}), Carga térmica de calentamiento (C_{cal}), Carga térmica total (C_{tot}) y el Factor de decremento superficial (FD_s).

Torreón, Mayo, Norte				
$a = 0.2$				
Parámetro	EH	S-EHLS	EH–S-EHLS	E_r
C_{enf} [$Wh/m^2 día$]	239.92	246.33	-6.41	2.7 %
C_{cal} [$Wh/m^2 día$]	200.41	206.94	-6.53	3.3 %
C_{tot} [$Wh/m^2 día$]	440.33	453.27	-12.94	2.9 %
FD_s [–]	0.37	0.40	-0.03	8.1 %
$a = 0.9$				
C_{enf} [$Wh/m^2 día$]	440.44	441.10	-0.66	0.2 %
C_{cal} [$Wh/m^2 día$]	117.45	123.99	-6.55	5.6 %
C_{tot} [$Wh/m^2 día$]	557.88	565.09	-7.21	1.3 %
FD_s [–]	0.36	0.38	-0.02	6.4 %

Tabla 6.13: Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición con aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Torreón, en el mes de Mayo, orientación Oeste y los dos valores de absortancia solar. Los parámetros son: Carga térmica de enfriamiento (C_{enf}), Carga térmica de calentamiento (C_{cal}), Carga térmica total (C_{tot}) y el Factor de decremento superficial (FD_s).

Torreón, Mayo, Oeste				
$a = 0.2$				
Parámetro	EH	S-EHLS	EH–S-EHLS	E_r
C_{enf} [$Wh/m^2 día$]	318.04	328.25	-10.21	3.2 %
C_{cal} [$Wh/m^2 día$]	210.01	205.29	4.72	2.2 %
C_{tot} [$Wh/m^2 día$]	528.05	533.54	-5.49	1.0 %
FD_s [–]	0.38	0.39	-0.01	2.5 %
$a = 0.9$				
C_{enf} [$Wh/m^2 día$]	796.09	818.17	-22.08	2.8 %
C_{cal} [$Wh/m^2 día$]	155.59	157.53	-1.93	1.2 %
C_{tot} [$Wh/m^2 día$]	951.68	975.70	-24.02	2.5 %
FD_s [–]	0.39	0.39	0.00	0 %

para Torreón, Enero orientación Oeste y $a = 0.9$, la diferencia mínima es de $-5.49 \text{ Wh/m}^2\text{día}$ (1.0 %) en Torreón, Mayo, orientación Oeste y $a = 0.2$. La diferencia absoluta promedio para la C_{tot} para Torreón es $23.12 \text{ Wh/m}^2\text{día}$. Para el FD_s la diferencia máxima es de -0.05 (12.9 %) para Torreón, Enero, orientación Oeste con $a = 0.2$ y -0.05 (14.2 %) para Torreón, Enero, orientación Oeste con $a = 0.9$ y la mínima es de 0 para Torreón, Mayo, orientación Oeste con $a = 0.9$. La diferencia absoluta promedio para Torreón para el FD_s es de 0.02. Siendo el parámetro que presentó mayor error para la simulaciones hechas en Torreón

Tabla 6.14: Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición con aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Xalapa, en el mes de Enero, orientación Este y los dos valores de absorción solar. Los parámetros son: Carga térmica de enfriamiento (C_{enf}), Carga térmica de calentamiento (C_{cal}), Carga térmica total (C_{tot}) y el Factor de decremento superficial (FD_s).

Xalapa, Enero, Este				
$a = 0.2$				
Parámetro	EH	S-EHLS	EH–S-EHLS	E_r
$C_{enf} [\text{Wh/m}^2\text{día}]$	0.00	0.00	0.00	0.0 %
$C_{cal} [\text{Wh/m}^2\text{día}]$	361.09	388.58	-27.49	7.6 %
$C_{tot} [\text{Wh/m}^2\text{día}]$	361.09	388.58	-27.49	7.6 %
$FD_s [-]$	0.35	0.39	-0.04	10.2 %
$a = 0.9$				
$C_{enf} [\text{Wh/m}^2\text{día}]$	73.44	71.16	2.28	3.1 %
$C_{cal} [\text{Wh/m}^2\text{día}]$	220.85	225.38	-4.53	2.1 %
$C_{tot} [\text{Wh/m}^2\text{día}]$	294.29	296.54	-2.25	0.8 %
$FD_s [-]$	0.37	0.40	-0.03	7.3 %

Como se puede ver de las tablas 6.14 y 6.15, la diferencia en los resultados de los parámetros de evaluación del desempeño térmico en condición con aire acondicionado usando EH y el método S-EHLS son pequeñas y en algunos casos igual a cero. Para la C_{enf} la diferencia máxima es de $2.28 [\text{Wh/m}^2\text{día}]$ (3.1 %) en Xalapa, Enero, orientación Este con $a = 0.9$ y la mínima de cero en los casos donde la $a = 0.2$. La diferencia absoluta promedio para la C_{enf} para las simulaciones en Xalapa es $1.14 \text{ Wh/m}^2\text{día}$. Para la C_{cal} la diferencia

Tabla 6.15: Parámetros de evaluación del desempeño térmico para la condición con aire acondicionado para el BHC usando EH y el método S-EHLS, su diferencia (EH–S-EHLS) y el error relativo (E_r) para Xalapa, en el mes de Enero, orientación Norte y los dos valores de absortancia solar. Los parámetros son: Carga térmica de enfriamiento (C_{enf}), Carga térmica de calentamiento (C_{cal}), Carga térmica total (C_{tot}) y el Factor de decremento superficial (FD_s).

Xalapa, Enero, Norte				
$a = 0.2$				
Parámetro	EH	S-EHLS	EH–S-EHLS	E_r
C_{enf} [$Wh/m^2 día$]	0.00	0.00	0.00	0.00 %
C_{cal} [$Wh/m^2 día$]	394.55	421.05	-26.50	6.7 %
C_{tot} [$Wh/m^2 día$]	394.55	421.05	-26.50	6.7 %
FD_s [–]	0.37	0.40	-0.03	7.5 %
$a = 0.9$				
C_{enf} [$Wh/m^2 día$]	25.14	23.14	2.00	7.9 %
C_{cal} [$Wh/m^2 día$]	323.80	336.95	-13.15	4.1 %
C_{tot} [$Wh/m^2 día$]	348.93	360.09	-11.16	3.2 %
FD_s [–]	0.36	0.39	-0.03	8.8 %

máxima es $-27.49 \text{ Wh/m}^2\text{día}$ (7.6 %) para Xalapa, Enero orientación Este y $a = 0.2$, la diferencia mínima es de $-4.53 \text{ Wh/m}^2\text{día}$ (2.1 %) en Xalapa, Enero, orientación Este y $a = 0.9$. La diferencia absoluta promedio para la C_{cal} para Xalapa es $15.76 \text{ Wh/m}^2\text{día}$. Para la C_{tot} la diferencia máxima es $-27.49 \text{ Wh/m}^2\text{día}$ (7.6 %) para Xalapa, Enero, orientación Este y $a = 0.2$, la diferencia mínima es de $-2.25 \text{ Wh/m}^2\text{día}$ (1.0 %) en Xalapa, Enero, orientación Este y $a = 0.9$ y la diferencia absoluta promedio para la C_{tot} para Xalapa es $4.63 \text{ Wh/m}^2\text{día}$. Para el FD_s la diferencia máxima es -0.04 (10.2 %) para Xalapa, Enero, orientación Este y $a = 0.2$ y la mínima es de -0.03 para los demás casos. La diferencia absoluta promedio para el FD_s para Xalapa es 0.03.

En la figura 6.5 se muestran los resultados de los parámetros de evaluación para todas las simulaciones realizadas en condición de uso con aire acondicionado de manera gráfica. En la figura 6.5 (a) se presenta la carga térmica de calentamiento C_{cal} y se puede observar que la diferencia entre los resultados es mínima y como era de esperarse la C_{cal} es mayor en el clima de Torreón en el mes de Enero, seguido de Xalapa en el mes de Enero y Torreón en el mes de Mayo el cual presentó cargas térmicas iguales y por debajo de $200 \text{ Wh/m}^2\text{día}$. En la figura 6.5 (b) se presenta la carga térmica de calentamiento C_{enf} , en ella se puede observar que la mayor C_{enf} se encuentra en el muro de Torreón, Mayo, orientación Oeste y $a = 0.9$, separada por más del doble de las demás simulaciones realizadas en Torreón en el mes de Mayo, debido a la gran cantidad de energía que es necesaria para alcanzar la temperatura de confort. De igual manera que el FD_s en las evaluaciones en condición de uso sin aire acondicionado el FD_s es casi el mismo para todas las simulaciones, estando entre 0.3 y 0.4, por ser un parámetro que depende del sistema constructivo, el cual fue el mismo en todas las simulaciones.

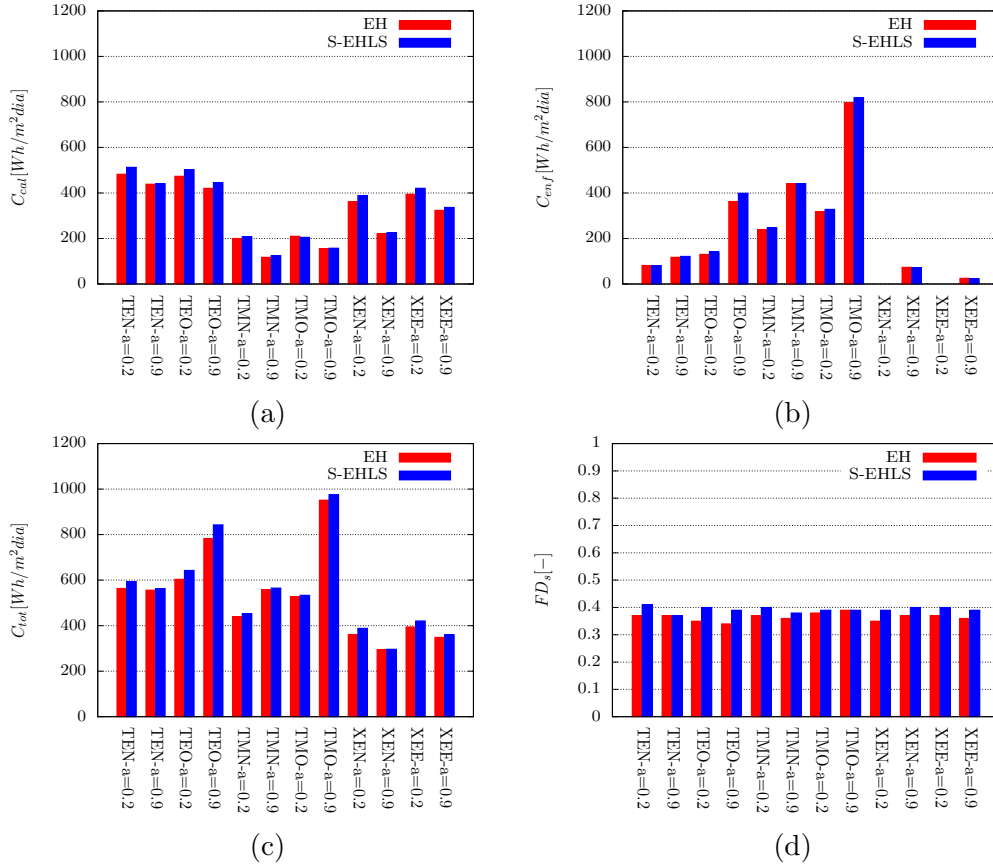


Figura 6.5: Resultados de las simulaciones con el método S-EHLS comparado con los resultados obtenidos en EH. Se muestra (a) la carga térmica de calentamiento C_{cal} , (b) la carga térmica de enfriamiento C_{enf} , en (c) carga térmica total C_{tot} y (d) el factor de decremento superficial FD_s .

6.4. Conclusiones

En este capítulo se mostraron los resultados de las simulaciones realizadas con el fin de validar el método simplificado del conjunto de capas homogéneas (S-EHLS) con los resultados obtenidos por la herramienta numérica Ener-Habitat (EH). Para ello se utilizó un módulo diseñado con las condiciones de frontera de EH, en el que sólo existe transferencia de calor a través de una sola componente de la envolvente, mientras que el piso, el techo y las demás paredes se definen como adiabáticas y sin masa térmica. Las simulaciones se realizaron bajo condiciones de uso sin y con aire acondicionado, para el día típico del mes más cálido y el mes más frío del año en Torreón, Coahuila y el día típico del mes más frío del año en Xalapa, Veracruz. Las comparaciones se llevaron a cabo usando el factor de decremento sol-aire (FD_{sa}), tiempo de retraso (TR), energía transmitida (ET) y la temperatura promedio del aire al interior ($\langle T_{in} \rangle$) para los casos en condición de uso sin aire acondicionado. Para los casos en condición de uso con aire acondicionado la comparación se llevó a cabo usando la carga térmica de enfriamiento (C_{enf}), la carga térmica de calentamiento (C_{cal}), la carga térmica total (C_{tot}) y el factor de decremento superficial (FD_s).

Condición de uso sin aire acondicionado

Cuando se evaluó en condición de uso sin aire acondicionado se reportaron las siguientes diferencias máximas y mínimas en los parámetros para el desempeño térmico:

- FD_{sa} : Para el cual se obtuvo que la diferencia máxima es de -0.04 (9.2 %) en el caso de Torreón, Enero, orientación Oeste y $a = 0.9$ y la mínima es de 0.01 (1.5 %) en el caso de Torreón, Mayo, orientación Norte y $a = 0.2$; para el TR , la diferencia máxima es $0.77h$ (20.3 %) en el caso de Torreón, Mayo, orientación Oeste y $a = 0.2$ y la diferencia mínima es de $-0.01h$ (0.2 %) para Torreón, Mayo, orientación Norte con $a = 0.2$.
- ET : Se obtuvo que la diferencia máxima es $-1.56 Wh/m^2 día$ (7.4 %) para Torreón, Enero, orientación Oeste y $a = 0.9$, y la diferencia mínima de $-0.10 Wh/m^2 día$ (1.7 %) y
- TR : Para el TR la diferencia máxima es $0.77 h$ (20.3 %) para Torreón,

Mayo, orientación Oeste y $a = 0.2$ y la diferencia mínima es de $0.08\ h$ (1.8 %) para Torreón, Mayo, orientación Norte con $a = 0.2$.

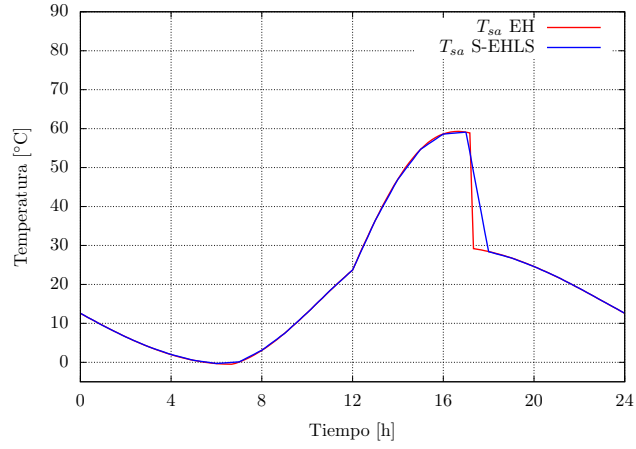
- $\langle T_{in} \rangle$: Para la cual la diferencia máxima es de $0.35\ ^\circ C$ (1.1 %) para Torreón, Mayo, orientación Oeste y $a = 0.9$, y la diferencia mínima es $0\ ^\circ C$ o cercano a $0\ ^\circ C$ para la mayoría de los casos.

De los parámetros evaluados el TR fue el que obtuvo la mayor diferencia, sin embargo se observó que esto es debido a una diferencia en la T_{sa} del archivo de clima con las iteraciones que utiliza E+, además de que al ser diferencias pequeñas, el error porcentual es grande, el caso de Torreón, orientación Oeste, en el mes de mayo con una absortancia solar de 0.9 fue el que obtuvo el mayor error porcentual con un 36.9 % de diferencia, a pesar de que la diferencia total fue de 0.48 horas o aproximadamente 29 minutos. Se encontró que mientras que el archivo de clima registra los valores cada 10 minutos, el método S-EHLS tiene que obtener valores de temperatura cada minuto, lo cual logra haciendo iteraciones de la T_{sa} del archivo de clima, provocando que en las zonas donde hay una oscilación de la T_{sa} muy amplia en un periodo corto de tiempo, se forme una no concordancia entre la T_{sa} de EH y el método S-EHLS como se puede observar en las figuras 6.6 (a) y 6.6 (b), alterando así los resultados finales. Esto se puede comparar con los casos donde el TR fue mínimo como en las figuras 6.7 (c) y 6.7 (d) donde la oscilación es muy sutil, por lo que se presenta una concordancia entre la temperatura T_{sa} de cada método.

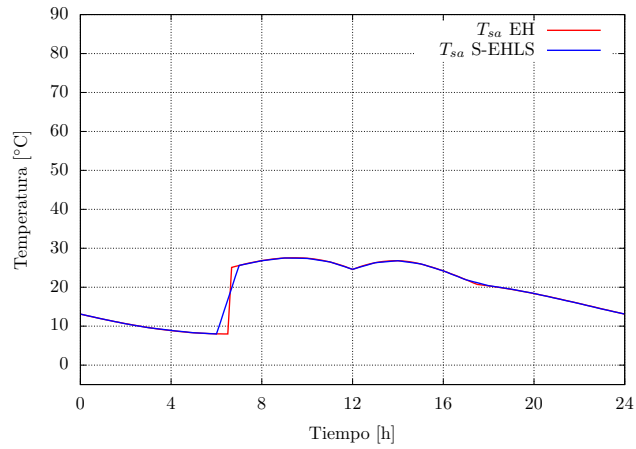
Condición de uso con aire acondicionado

Cuando se evaluó en condición de uso con aire acondicionado se reportaron las siguientes diferencias en los parámetros para el desempeño térmico:

- C_{enf} : Se obtuvo que la diferencia máxima es de $-30.50\ Wh/m^2 día$ (6.3 %) para Torreón, Enero, orientación Norte con $a = 0.2$ y las mínimas son 0 para los casos de Xalapa con $a = 0.2$ debido a que no se presentaron cargas térmicas. La diferencia promedio absoluta para la C_{enf} de todas las simulaciones es de $13.82\ Wh/m^2 día$.
- C_{cal} : La diferencia máxima es $6.22\ Wh/m^2 día$ (2.60 %) para Torreón, Enero orientación Norte y $a = 0.2$ la diferencia mínima es de $-1.93\ Wh/m^2 día$ (1.2 %) en Torreón, Mayo, orientación Oeste y $a = 0.9$. La

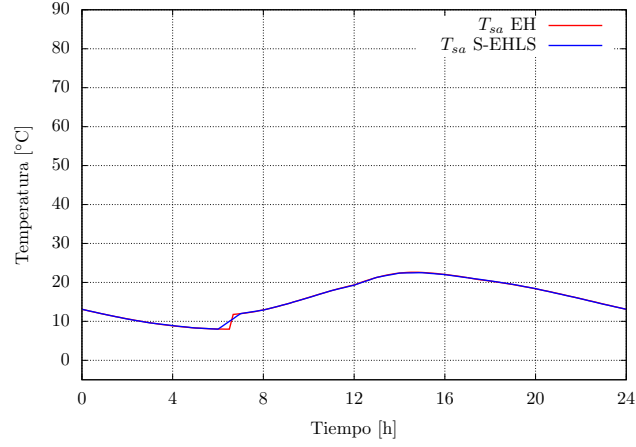


(a)

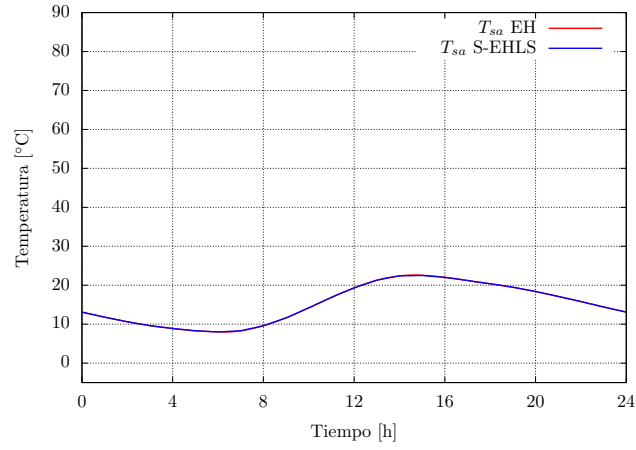


(b)

Figura 6.6: Comparación de la T_{sa} calculada con EH y el método S-EHLS para las simulaciones que obtuvieron el error máximo en el TR, en (a) Torreón, Enero, orientación este con una absortancia solar de 0.9 y (b) Xalapa, Enero, orientación este con absortancia solar de 0.9



(a)



(b)

Figura 6.7: Comparación de la T_{sa} calculada con EH y la calculada con el método S-EHLS para las simulaciones que obtuvieron el error mínimo en el TR, en (a) Xalapa, Enero, orientación este con una absorptancia solar de 0.2 y (b) Xalapa, Enero, orientación norte con absorptancia solar de 0.9

Tabla 6.16: Promedio de las diferencias y errores relativos porcentuales, para cada serie de simulaciones de acuerdo al lugar y temporada, en condición de uso sin aire acondicionado.

	Torreón Enero		Torreón Mayo		Xalapa Enero	
Parámetro	EH-S-EHLS	E_r	EH-S-EHLS	E_r	EH-S-EHLS	E_r
$FD_{sa} [-]$	0.03	6.0 %	0.01	2.7 %	0.006	1.3 %
$ET [Wh/m^2día]$	0.92	5.6 %	0.45	3.2 %	0.16	2.2 %
$TR [h]$	0.24	6.1 %	0.34	15.3 %	0.34	4.8 %
$\langle T_{in} \rangle [^{\circ}C]$	0.08	0.4 %	0.16	0.5 %	0.04	0.2 %

diferencia promedio absoluta para la C_{cal} de todas las simulaciones es de $13.82 Wh/m^2día$.

- C_{tot} : La diferencia máxima es $-60.31 Wh/m^2día$ (7.7 %) para Torreón, Enero orientación Oeste y $a = 0.9$ y la diferencia mínima es de $-2.25 Wh/m^2día$ (1.0 %) en Xalapa, Enero, orientación Este y $a = 0.9$. La diferencia absoluta promedio para la C_{cal} de todas las simulaciones es de $18.06 Wh/m^2día$.
- FD_s : La diferencia máxima es $-0.05 Wh/m^2día$ (12.9 %) para Torreón, Enero, orientación Oeste con $a = 0.2$ y $-0.05 Wh/m^2día$ (14.2 %) para Torreón, Enero, orientación Oeste con $a = 0.9$ y la mínima de cero para Torreón, Mayo, orientación Oeste con $a = 0.9$.

El promedio de los resultados para la diferencia y el error relativo porcentual para cada uno de los parámetros de evaluación, tanto en condición de uso con y sin aire acondicionado se mantuvo por debajo del 10 %, figuras 6.16 y 6.17, con excepción del TR , por las razones antes expuestas, sobre la diferencia en los pasos de tiempo al momento de hacer la evaluación en cada método. Por lo que se puede concluir que el error obtenido es lo suficientemente pequeño para considerar validado el método S-EHLS, y se tiene la perspectiva de que el error puede ser disminuido ya que se localizó una fuente de error en la T_{sa} utilizada en E+, la cual no corresponde con la referencia en los pasos temporales, si se hacen los ajustes correctos como un diseño de archivos de clima que se ajusten a los pasos temporales del método S-EHLS.

Tabla 6.17: Promedio de las diferencias y errores relativos porcentuales, para cada serie de simulaciones de acuerdo a su condición climática, en condición de uso con aire acondicionado.

	Torreón Enero		Torreón Mayo		Xalapa Enero	
Parámetro	EH-S-EHLS	E_r	EH-S-EHLS	E_r	EH-S-EHLS	E_r
C_{enf}	12.58	5.4 %	9.84	2.2 %	1.1	1.5 %
C_{cal}	21.55	4.7 %	4.93	3.1 %	15.8	4.6 %
C_{tot}	33.82	5.1 %	12.42	1.9 %	14.6	4.0 %
FD_s	0.03	9.5 %	0.02	4.3 %	0.03	8.1 %

Capítulo 7

Conclusiones

En esta tesis se realizó la validación del método simplificado para el conjunto de capas homogéneas (S-EHLS) usando para la validación los resultados obtenidos con la herramienta numérica Ener-Habitat.

El método S-EHLS se realiza con EnergyPlus, por lo que se realizó una simulación igual a Ener-Habitat, para esto se considera un módulo en el que sólo existe transferencia de calor a través del sistema constructivo evaluado (muro) mientras que los muros, el piso y el techo se definen como adiabáticos, sin masa térmica, y sin emitancia. El módulo se simuló bajo condiciones con y sin aire acondicionado en Torreón durante el mes más cálido (Mayo) y el mes más frío (Enero) y el mes más frío en Xalapa (Enero).

Se realizaron las simulaciones de un sistema constructivo formado por el bloque hueco de concreto usando el método EHLS para la obtención de la tabla de conductividades equivalentes dependientes de la temperatura de la capa intermedia, que es la capa que contiene los huecos de aire, del bloque hueco de concreto y esta tabla se incorporó a EnergyPlus con el objeto *VariableThermalConductivity*. Cabe resaltar que esta opción solo funciona cuando el algoritmo por el cual se resuelve la transferencia de calor es por diferencias finitas.

Para la condición de uso sin aire acondicionado, para el parámetro del factor de decremento sol-aire, se obtiene una diferencia relativa promedio de 2.7 % y 6 % para el periodo frío y cálido de Torreón, respectivamente, y 1.3 %

para el periodo frío en Xalapa. Para el parámetro de energía transmitida a través de la envolvente, se obtiene una diferencia relativa promedio de 5.6 % Y 3.2 % para el periodo frío y cálido de Torreón, respectivamente, y 2.2 % para el periodo frío en Xalapa. Para el parámetro del tiempo de retraso, se obtiene una diferencia relativa promedio de 6.1 % Y 15.3 % para el periodo frío y cálido de Torreón, respectivamente, y 4.8 % para el periodo frío en Xalapa. Para el parámetro de la temperatura promedio del aire al interior, se obtiene una diferencia relativa promedio de 0.4 % Y 0.5 % para el periodo frío y cálido de Torreón, respectivamente, y 0.2 % para el periodo frío en Xalapa.

Se encontró una discordancia entre la T_{sa} obtenida y usada en los archivos de clima .epw, y la T_{sa} obtenida en la simulación del método S-EHLS, esto se debió a que los archivos de clima se diseñaron usando un paso temporal cada 10 minutos, mientras que la simulación se realizó usando un paso temporal por minuto, para lograr esto E+ iteró los valores del archivo de clima, provocando que en las zonas donde hay una oscilación de la T_{sa} muy amplia en un periodo corto de tiempo, se forme una no concordancia entre la T_{sa} de EH y el método.

Para la condición de uso con aire acondicionado para el parámetro de la carga térmica de enfriamiento, se obtiene una diferencia relativa promedio de 5.4 % y 2.2 % para el periodo frío y cálido de Torreón, respectivamente, y 1.5 % para el periodo frío en Xalapa. Para el parámetro de la carga térmica de calentamiento, se obtiene una diferencia relativa promedio de 4.7 % y 3.1 % para el periodo frío y cálido de Torreón, respectivamente, y 4.6 % para el periodo frío en Xalapa. Para el parámetro del factor de decremento superficial, se obtiene una diferencia relativa promedio de 9.5 % y 4.3 % para el periodo frío y cálido de Torreón, respectivamente, y 8.1 % para el periodo frío en Xalapa.

Como trabajo a futuro se sugiere encontrar una manera de diseñar archivos de clima .epw con pasos temporales debajo de la hora para poder obtener resultados más precisos sobre el comportamiento de los materiales al compararlos con Ener-Habitat. De igual forma se propone crear bibliotecas de datos que incluyan los módulos .idf de E+, con los datos de la conductividad variable dependiente de la temperatura para diferentes materiales en las diferentes ciudades y climas de la república mexicana para que la simulación de los sistemas constructivos de la edificación sea más sencilla y directa. Impulsando así al buen diseño de la edificación.

Bibliografía

- [1] F. Manzini and P. Macías. Nuevas energías renovables: una alternativa energética sustentable para México. *Instituto de Investigaciones Legislativas del Senado de la Republica de México*, 2004.
- [2] U.S. Energy Information Administration. International energy outlook. Technical report, U.S. Energy Information Administration, 2016.
- [3] International Renewable Energy Association. Rethinking energy 2017: Accelerating the global energy transformation. *International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi*, 2017.
- [4] Secretaría de Energía. Balance nacional de energía 2015. Technical report, Secretaría de Energía, 2016.
- [5] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout. A review on buildings energy consumption information. *Energy and buildings*, 40(3):394–398, 2008.
- [6] U.S. Energy Information Administration (EIA). Commercial buildings energy consumption survey (cbeccs). 2015.
- [7] G. Huelsz, G. Barrios, R. Rechtman, and J. Rojas. Importancia del análisis de transferencia de calor dependiente del tiempo en la evaluación del desempeño térmico de la envolvente de una edificación. *Anuario de Arquitectura 2009*, 2010.
- [8] S. Shaik, K.K. Gorantla, and A. Setty. Investigation of building walls exposed to periodic heat transfer conditions for green and energy efficient building construction. *Procedia Technology*, 23:496–503, 2016.

- [9] G. Huelsz, G. Barrios, R. Rechtman, and J. Rojas. Importancia del análisis de transferencia de calor dependiente del tiempo en la evaluación del desempeño térmico de la envolvente de una edificación. *Anuario de Arquitectura 2009*, 2010.
- [10] G. Barrios, J.M. Casas, G. Huelsz, and J. Rojas. Ener-habitat: An online numerical tool to evaluate the thermal performance of homogeneous and non-homogeneous envelope walls/roofs. *Solar Energy*, 131:296–304, 2016.
- [11] B.K. Karambakkam, B. Nigusse, J.D. Spitler, et al. A one-dimensional approximation for transient multidimensional conduction heat transfer in building envelopes. 2005.
- [12] P. Mahattanatawe, C. Puvanant, and D. Mongkolsawat. The energy performance of the cold-formed steel-frame and wood-frame houses developed for thailand. *IBPSA-USA Journal*, 2(1), 2006.
- [13] *Fundamentos de transferencia de calor*. Pentice Hall Hispano Americana SA, Mexico, cuarta edición edition, 1999.
- [14] G. Huelsz. Transferencia de calor en edificaciones: Conceptos básicos-introducción a ener-habitat, 2013.
- [15] ASHRAE Handbook Fundamentals ASHRAE and Data Book. American society of heating. *Refrigeration and Air Conditioning Engineers Standard 90.1*, 1997.
- [16] G. Barrios, G. Huelsz, J. Rojas, J.M. Ochoa, and I. Marincic. Envelope wall/roof thermal performance parameters for non air-conditioned buildings. *Energy and Buildings*, 50:120–127, 2012.
- [17] K.J. Kontoleon and D.K. 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, 2007.
- [18] G Barrios, P Elías, G Huelsz, and J Rojas. Selección de los materiales de muros y techos para mejorar el confort térmico en edificaciones no climatizadas. *Marincic I. Estudios sobre Arquitectura y Urbanismo del Desierto*, 3(3):70–84, 2010.

- [19] G. Barrios, G. Huelz, J. Rojas, J.M. Ochoa, and I. Marincic. Parámetros para medir el desempeño térmico de muros/techos de la envolvente de una edificación que no usa aire acondicionado. *Memorias XXXVI SNES*, pages 231–235, 2012.
- [20] Sitio web de Ener-Habitat. ¿qué es ener-habitat? <http://www.enerhabitat.unam.mx/Cie2/introduccion.jsp>, 2016. [Consultado el 14 de Enero de 2018.].
- [21] Sitio web de EnergyPlus. Documentación. <https://energyplus.net/documentation>, 2016. [Consultado el 14 de Enero de 2018.].
- [22] G. Huelsz, G. Barrios, and J. Rojas. Equivalent-homogeneous-layers-set method for time-dependent heat transfer through hollow-block walls. *Applied Thermal Engineering*, 102:1019–1023, 2016.
- [23] A.C. Borbón, R.E. Cabanillas, and J.B. Pérez. Modelación y simulación de la transferencia de calor en muros de bloque de concreto hueco. *Información tecnológica*, 21(3):27–38, 2010.
- [24] J.B. Pérez, R.E. Cabanillas, J.F. Hinojosa, and A.C. Borbón. Estudio numérico de la resistencia térmica en muros de bloques de concreto hueco con aislamiento térmico. *Información tecnológica*, 22(3):27–38, 2011.
- [25] G. Barrios, G. Huelsz, R. Rechtman, and J. Rojas. Wall/roof thermal performance differences between air-conditioned and non air-conditioned rooms. *Energy and Buildings*, 43(1):219–223, 2011.
- [26] G. Barrios, P. Elías, G. Huelsz, and J. Rojas. Selección de los materiales de muros y techos para mejorar el confort térmico en edificaciones no climatizadas. *Marincic I. Estudios sobre Arquitectura y Urbanismo del Desierto*, 3(3):70–84, 2010.
- [27] G. Barrios, J. Rojas, G Huelsz, R. Tovar, and S. Jalife. Implementation of the equivalent-homogeneous-layers-set method in whole-building simulations: Experimental validation. *Applied Thermal Engineering*, 125:35–40, 2017.