

*Importancia del análisis de transferencia
de calor dependiente del tiempo en
la evaluación del desempeño térmico
de la envolvente de una edificación*

Guadalupe Huelsz, Guillermo Barrios, Raúl Rechtman y Jorge Rojas
Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México
Correo: ghl@cie.unam.mx.

RESUMEN

En este trabajo se presentan resultados de simulaciones numéricas usando diferencias finitas de la transferencia de calor, dependiente del tiempo a través de un techo o muro de la envolvente de una edificación. Con estos resultados se muestra claramente que en climas donde la radiación solar es significativa y la variación de temperatura diaria es importante, como sucede en la mayoría de los climas de México, utilizar como único parámetro para evaluar el comportamiento térmico del elemento de la envolvente, el valor de su resistencia térmica puede producir una equivocada selección de los materiales de la envolvente de una edificación en dichos climas. En estas condiciones, un alto valor de la resistencia térmica no asegura un buen desempeño térmico, es necesario también que la envolvente tenga una alta capacidad de almacenamiento térmico y una disposición adecuada de las capas que lo conforman.

ABSTRACT

On this paper are presented the results of numerical simulations using finite differential of heat transfer dependent on time through a roof or wall in the building envelope. These results show clearly that on climates where solar radiation is significant and temperature swing are important, as it happens in the majority of the climates of Mexico, to use the thermal resistance of the envelope as the only parameter to evaluate thermal behavior can produce a wrong selection of the envelope building materials for such climates. Under these conditions, a high value of thermal resistance does not warrant a good thermal response. It is also necessary that the envelope has a high capacitance of thermal storage and the correct arrangement of the layers that form it.

KEYWORDS: Heat transfer on buildings, large thermal swing, heat storage capacitance, layer composi

ANTECEDENTES

En México aproximadamente el 30% del total del consumo de energía corresponde a los sectores residencial, comercial y de servicios. Se estima que en climas cálidos, cerca del 35% de esta energía es empleada para el acondicionamiento de las edificaciones.¹

Por lo que el diseño bioclimático de las nuevas edificaciones puede incidir significativamente en el ahorro de energía en México.

Un adecuado diseño bioclimático minimiza, llegando a anular, los requerimientos de energía para el acondicionamiento higrotérmico y de calidad de aire al interior de la edificación. Dentro de los componentes fundamentales en el diseño bioclimático está el uso de materiales para los elementos, muros y techos, de la envolvente con propiedades físicas adecuadas al clima.

1. FIDE, 2009, Taller sobre la envolvente térmica y el ahorro de energía, Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica, México.

Debido a que en los países que más han estudiado el efecto de los materiales de la envolvente, el principal problema para el acondicionamiento térmico es en el invierno, donde la variación diaria de la temperatura externa es pequeña comparada con la diferencia entre la temperatura externa y la temperatura a la que se desea acondicionar la edificación y que las ganancias de calor por la energía solar no varían apreciablemente durante las 24 horas, es que los métodos para evaluar los materiales de la envolvente basados en un análisis de transferencia de calor en estado estacionario dan resultados satisfactorios. Por ello y debido a la simplicidad de estos métodos, son los empleados para el desarrollo de las normas o reglamentos de construcción de estos países. Sin embargo en México, el principal problema de acondicionamiento térmico es en los climas cálidos². En estos climas la radiación solar es significativa y la oscilación de temperatura diaria es importante³, condiciones en la que los métodos basados en un análisis de la transferencia de calor en estado estacionario no son aplicables⁴. A pesar de esto, en México la norma oficial para la eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales, *NOM-008-ENER-2001*⁵ y la recientemente promovida por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, *Norma NMX460 Industria de la construcción – aislamiento térmico – valor R para las envolventes en vivienda por zona térmica para la República Mexicana – especificaciones y verificación*⁶, están basadas en análisis de transferencia de calor en estado estacionario.

El objetivo principal de este trabajo es demostrar la importancia del análisis de transferencia de calor dependiente del tiempo en climas con radiación solar significativa y una oscilación de temperatura ambiente diaria importante, así como señalar los errores que se pueden cometer en la selección de los materiales de la envolvente de una edificación en dichos climas si se considera el análisis de transferencia de calor en estado estacionario, esto es, independiente del tiempo.

En la primera sección de este trabajo se presenta el modelo físico y se definen los parámetros para evaluar el desempeño térmico de un elemento, ya sea muro o techo, de la envolvente. La segunda sección contiene las ecuaciones para el análisis de transferencia de calor en estado estacionario y la tercera las correspondientes al análisis de la transferencia de calor dependiente del tiempo. En la cuarta sección se presentan los resultados, divididos en tres subsecciones. La primera presenta el análisis comparativo del desempeño de un elemento formado por un solo material, según sus propiedades físicas. En la segunda se analiza el desempeño térmico de elementos de la envolvente, que tienen una capa de material aislante, en función de la ubicación de la capa aislante. En la tercera se presenta el análisis del desempeño térmico de un elemento con una capa aislante en la parte externa, como función del espesor de dicha capa. Por último, en la quinta sección se presentan las conclusiones derivadas de este trabajo.

2 Morillón-Gálvez et al., 2004. Human bioclimatic atlas for Mexico, Solar Energy, Vol. 76, p. 781-792.

3 Sistema Meteorológico Nacional, 2009. <http://smn.cna.gob.mx/productos/map-lluv/hmproduc.html>

4 Kuehn et al. 2001. Thermal Environmental Engineering, Prentice Hall, New Jersey, p. 559-560.

5 Diario Oficial, 2001. Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001, Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales. Diario Oficial Miércoles 25 de abril de 2001. Segunda sección, México, p. 59-100.

6 ONNCE, 2009, Norma NMX460 Industria de la construcción – aislamiento térmico – valor R para las envolventes en vivienda por zona térmica para la República Mexicana – especificaciones y verificación. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación México.

MODELO FÍSICO

Para evaluar el comportamiento térmico de un elemento (muro o techo) de la envolvente de una edificación se puede usar, como una aproximación, un modelo unidimensional, es decir, se desprecian los efectos bidimensionales y tridimensionales por las uniones con otros elementos, o por vanos en el elemento a evaluar. El modelo unidimensional se considera una buena aproximación, ya que en la envolvente la proporción de las zonas de muros y techos, donde los efectos bidimensionales y tridimensionales son importantes, es pequeña comparada con las zonas donde no lo son.

Los efectos de convección y radiación en las superficies del elemento se modelan usando coeficientes de transferencia de calor de película, h_o para la superficie exterior y h_i para la interior, ambos en $W/m^2 \text{ } ^\circ C$. El modelo físico se esquematiza en la Figura 1, para el caso particular de un elemento compuesto por dos capas. Las temperaturas ambiente, exterior e interior, están denotadas por T_o y T_i respectivamente, T_{wo} es la temperatura de la superficie externa del elemento y T_{wi} es la temperatura de la superficie interna del elemento. El modelo considera que al interior, a una distancia d del elemento, existe una condición de flujo de calor cero, ya sea por una pared adiabática o por una condición de simetría.

En el modelo, el efecto combinado de la radiación solar incidente en el elemento de la envolvente y la temperatura del aire exterior se toma en cuenta a través de una temperatura equivalente llamada temperatura sol-aire.⁷

$$T_{sa} = T_o + \frac{al}{h_o} - RF$$

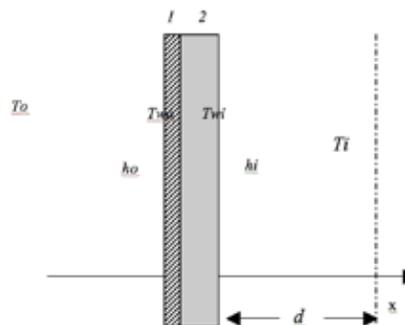


Figura 1. Modelo físico de la transferencia de calor a través de un elemento de la envolvente. Caso de un elemento compuesto por dos capas

Donde, T_{sa} es la temperatura sol-aire ($^\circ C$), T_o es la temperatura del aire en el exterior ($^\circ C$), I es la radiación solar por unidad de área sobre la superficie del elemento (W/m^2), estas tres cantidades son función del tiempo. Los factores a y h_o son respectivamente la absorptividad de la superficie (adimensional) y el coeficiente de transferencia de calor de película exterior debida a la convección y la radiación ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$). El término RF es el factor por la radiación infrarroja radiada desde la superficie del elemento hacia el cielo, ASHRAE recomienda asignar un valor de $3.9^\circ C$ para superficies horizontales que miran hacia arriba (techos). Para un muro vertical RF se toma como cero⁸. Utilizando esta temperatura equivalente, la temperatura exterior del elemento de la envolvente T_{wo} se sustituye por T_{sa} . Entonces, el problema consiste en conocer la temperatura al interior T_i por efecto del elemento, dada una temperatura sol-aire T_{sa} .

En general se puede decir que un elemento de la envolvente es mejor térmicamente que otro si: amortigua más la variación de la temperatura exterior, si produce un retraso del máximo de la temperatura interior con respecto al máximo de la temperatura sol-aire lo más cercano a doce horas y en clima cálida

7 Ulgen, 2002. Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. Energy and Buildings, Vol. 34, p. 273-278.

8 ASHRAE 1997. ASHRAE Handbook Fundamentals, SI Edition, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta. p. 28.5

do, si produce menor sobrecalentamiento en el interior. Para cuantificar estos parámetros se utilizan las cantidades que se presentan a continuación.

El amortiguamiento A , que se calcula como uno menos la razón de la amplitud máximo a mínimo de la oscilación interna $Ti_{max}-Ti_{min}$ entre la amplitud máximo a mínimo de la oscilación de la temperatura sol-aire $Tsa_{max}-Tsa_{min}$.

$$A = 1 - \frac{Ti_{max} - Ti_{min}}{Tsa_{max} - Tsa_{min}} \quad (3)$$

El amortiguamiento puede tomar valores entre 0 y 1, donde 0 significa que la temperatura al interior tiene la misma amplitud de oscilación que la temperatura sol-aire, 1 significa que el elemento ha amortiguado totalmente la oscilación de la temperatura al interior y la temperatura al interior tiene un valor constante.

El tiempo de retraso TR , que está dado por la diferencia del tiempo en el cual ocurre el máximo de la temperatura interior y el tiempo en el cual ocurre el máximo de la temperatura sol-aire.

$$TR = t(Ti_{max}) - t(Tsa_{max})$$

Cabe señalar que cuando el amortiguamiento es cercano a 1 (>0.9), el tiempo de retraso pierde su importancia.

El sobrecalentamiento S , que se calcula como la diferencia de la temperatura media en el interior menos la temperatura media exterior.

$$S = Ti_m - To_m$$

En la Figura 2 se esquematiza la temperatura sol-aire (línea discontinua) y la temperatura interna (línea continua), durante un día. Se señalan el tiempo de

retraso TR y las amplitudes máximo a mínimo de las oscilaciones, de la temperatura sol-aire $Tsa_{max}-Tsa_{min}$ y de la temperatura interna $Ti_{max}-Ti_{min}$.

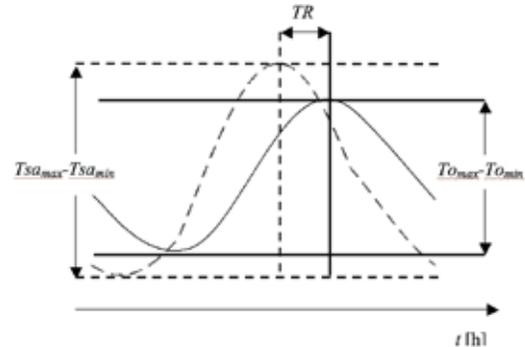


Figura 2. Temperatura sol-aire (línea discontinua) y la temperatura interna (línea continua), durante un día. Tiempo de retraso TR y amortiguamiento de la oscilación de temperatura interna Ti con respecto a la oscilación de la temperatura sol-aire Tsa .

TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESTADO ESTACIONARIO

Cuando la amplitud máximo a mínimo de la oscilación de la temperatura del aire al exterior es pequeña con respecto a la diferencia de temperatura media entre el exterior y la temperatura media del interior y la radiación solar es poco importante, se puede analizar la transferencia de calor a través de un elemento compuesto por N capas de materiales, cada una de espesor L_j , empleando para cada j -ésima capa, la ecuación de conducción de calor en una dimensión independiente del tiempo.⁹

$$\frac{d}{dx} \left(k_j \frac{dT}{dx} \right) = 0$$

Donde, k_j es la conductividad térmica de la j -ésima capa ($W/m \text{ } ^\circ C$). El espesor total del elemento está dado por la suma de los espesores de sus componentes. Por conservación de energía en las uniones de las capas se debe cumplir:

⁹ Incropera and De Witt 2002. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, New York. p. 88-93

$$-k_j \frac{dT}{dx} \Big|_{jj+1} = -k_{j+1} \frac{dT}{dx} \Big|_{jj+1}$$

y en las superficies externa e interna

$$-k \frac{dT}{dx} \Big|_{wo} = ho (To-Two)$$

$$-k \frac{dT}{dx} \Big|_{wi} = hi (Twi-Ti)$$

Two (°C) es la temperatura de la superficie externa del elemento y Twi (°C) es la temperatura de la superficie interna del elemento, tal como se muestra en la Figura 1.

La ley de Fourier proporciona el flujo de calor por unidad de área.

$$q_x'' = \frac{To - Two}{1/ho} = \frac{Two - T_{1,2}}{L_1/k_1} = \dots = \frac{T_{N-1,N} - Two}{L_N/k_N} = \frac{Twi - Ti}{1/hi}$$

Al utilizar el concepto de resistencia térmica R (también conocido como valor R), el flujo de calor por unidad de área se puede expresar como

$$q_x'' = \frac{To - Ti}{R},$$

donde la resistencia térmica R está dada por la suma de las resistencias en las superficies externa e interna, $1/ho$ y $1/hi$, respectivamente, más las resistencias conductivas de las N capas

$$R = \frac{1}{ho} + \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_j}{k_j} + \dots + \frac{L_N}{k_N} + \frac{1}{hi}$$

Por lo tanto, en estado estacionario, la única propiedad del elemento que determina la transferencia de calor es la resistencia térmica R , a mayor resistencia térmica, mejor es su desempeño térmico.

TRANSFERENCIA DE CALOR
DEPENDIENTE DEL TIEMPO

Cuando la amplitud máximo a mínimo de la oscilación de la temperatura del aire al exterior no es pequeña con respecto a la diferencia de temperatura media entre el exterior y la temperatura media del interior y la radiación solar es importante, se debe hacer un análisis dependiente del tiempo.

Para analizar la transferencia de calor a través de un elemento compuesto por N capas de materiales, se emplea para cada j -ésima capa, la ecuación de conducción de calor en una dimensión dependiente del tiempo.¹⁰

$$\frac{\delta T_j}{\delta x} - \alpha_j \frac{\delta^2 T_j}{\delta x^2} = 0$$

Esta ecuación describe la variación de la temperatura dentro de la j -ésima capa T_j como función del tiempo t y de la posición transversal al muro x . El coeficiente α_j es la difusividad térmica del material de la j -ésima capa (m^2/s) y se define como la relación entre la conductividad térmica k y la capacidad de almacenamiento térmico o capacidad calorífica del material $C_j = \rho_j c_j$

$$\alpha_j = \frac{k_j}{C_j} = \frac{k_j}{\rho_j c_j},$$

donde, ρ_j es la densidad (kg/m^3) y c_j es el calor específico ($J/kg^\circ C$). Por conservación de energía en las uniones de las capas y en las superficies exterior e interior del elemento, se deben cumplir las ecuaciones (6) a (8). La temperatura de la superficie externa del elemento Two se sustituye por la temperatura solar Tsa que es función del tiempo y está dada por la ecuación (1). Se asume que la única fuente calor para modificar la temperatura interior Ti es a través del elemento y que la superficie interna del elemento tiene una distancia d al centro de la habitación. Por lo tanto, el comportamiento térmico del elemento

10 Incropera and De Witt 2002. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, New York. p. 254

no sólo depende de la resistencia térmica (L_j/k_j) de sus componentes, sino también de la capacidad de almacenamiento térmico ($L_j C_j$) de las componentes.

El conjunto de ecuaciones de conducción de calor en una dimensión dependiente del tiempo correspondientes las N capas (ecuación 12), con las condiciones de frontera dadas por las ecuaciones (6) a (8) se resolvieron por el método de diferencias finitas usando un esquema explícito¹¹ programado en lenguaje C. Para la condición inicial se usó un procedimiento iterativo de tal manera que la temperatura en todo x , la temperatura en el tiempo inicial $t=0$ la tuviera el mismo valor ($+0.1$ oC) que la temperatura en $t=24$ h.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como el objetivo de este trabajo es demostrar la importancia del análisis de transferencia de calor, dependiente del tiempo en climas con radiación solar significativa y una oscilación de temperatura ambiente diaria importante, para todos los resultados que se muestran a continuación se supuso una oscilación de la temperatura ambiente senoidal, con temperatura media de 26°C, diferencia entre máximo y mínimo de 14°C y con máximo a las 14:00 horas¹². Se consideró la radiación diurna tipo senoidal con máximo $I_{max}=800$ W/m² a las 12:00 horas del día solar¹³ y un factor de radiación infrarroja al cielo de $RF=3.9$ °C. Esta distribución de la radiación solar y este factor de radiación infrarroja corresponden a un techo horizontal, para simular muros se modifican estos valores. Es importante señalar que las conclusiones derivadas de los resultados que aquí se presentan son las mismas que se obtienen de las si-

mulaciones de muros. Se utilizó un valor de la absorptividad de la superficie exterior del elemento para la radiación solar de $a=0.4$ que corresponde a un gris claro¹⁴. Se utilizaron los valores de los coeficientes de transferencia de calor de película para techos de la norma NOM-008-ENER-2001¹⁵, para la superficie exterior $h_o=13$ W/m²°C y para la interior $h_i=6.6$ W/m²°C y se consideró $d=1.2$ m.

ELEMENTO DE UN SOLO MATERIAL

En esta subsección se presentan los resultados de las simulaciones de un techo simple compuesto por un solo material, es decir, está formado por una sola capa. Ya que el objetivo es la comparación entre los materiales con distintas propiedades térmicas, se supuso en todos los casos un espesor total del elemento de 10cm. Se analizaron tres materiales distintos: concreto de alta densidad (CAD), concreto aereado (CA) y poliestireno expandido (EPS). Los valores de las propiedades son los usados por el programa *E Plus*¹⁶ como típicos para este tipo de materiales y se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de los materiales

Material muro	K [W/m°C]	ρ [kg/m ³]	c [J/kg°C]	C [J/m ³ °C]	α [m ² /s]
CAD	2.000	2400	1000	240X10 ⁴	8.3X10 ⁻⁷
CA	0.120	550	1004	55.2X10 ⁴	2.2X10 ⁻⁷
EPS	0.040	15	1400	2.1X10 ⁴	19.0X10 ⁻⁷

Como se puede observar en la Tabla 1, el concreto de alta densidad (CAD), presenta la mayor conductividad térmica k y la mayor capacidad de almacenamiento térmico C , mientras que presenta un valor intermedio de la difusividad térmica α . El concreto

11 Incropera and De Witt 2002. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, New York. p. 280-288

12 Sistema Meteorológico Nacional 2009. <http://smn.cna.gob.mx/productos/map-lluv/hmproduc.html>

13 Galindo y Cifuentes 1996. Irradiación solar global en la República Mexicana: valores horarios medios, Programa Universitario de Energía, UNAM, México.

14 Givoni 1981. Man, Climate and Architecture, Applied Science Publishers, Londres, p.108.

15 Diario Oficial 2001. Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001, Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales. Diario Oficial Miércoles 25 de abril de 2001. Segunda sección, México, p. 59-100.

16 DOE 2009. Energy Plus Energy U.S. Department of Energy <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>

aereado (CA) presenta valores intermedios de k y de C , pero es el que tiene menor valor de α . El poliestireno expandido (EPS) tiene la menor k y la menor C , dando por resultado la mayor α .

En la Figura 3 se muestra la gráfica de la temperatura del aire al interior T_i como función del tiempo solar para elementos de CAD, CA y EPS. Para referencia, se incluyen también las temperaturas ambiente T_o y sol-aire T_{sa} . En esta gráfica se observa claramente que el elemento de EPS es el que amortigua menos la oscilación de temperatura sol-aire. La radiación solar absorbida por la superficie exterior produce que la temperatura al interior para los tres casos alcance valores mayores que el máximo de la temperatura ambiente al exterior.

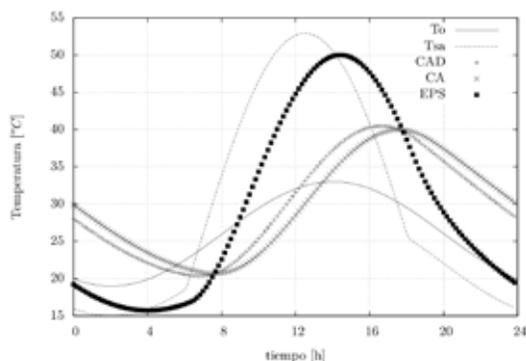


Figura 3. Gráfica de la temperatura del aire al interior como función del tiempo solar, para elementos de un solo material: concreto de alta densidad (CAD), de concreto aereado (CA) y de poliestireno expandido (EPS). Para referencia, se incluyen las temperaturas ambiente T_o y sol-aire T_{sa} .

En la Tabla 2 se muestran los valores de los parámetros cuantitativos de evaluación para los tres materiales. Para el análisis de transferencia de calor en estado estacionario el parámetro es la resistencia térmica R y para el análisis de transferencia de calor dependiente del tiempo, el amortiguamiento A , el tiempo de retraso TR y el sobrecalentamiento S . Como puede observarse, el elemento de EPS, es el que tiene la resisten-

cia térmica más alta, por lo que según el análisis de transferencia de calor en estado estacionario debería tener el mejor desempeño térmico. Sin embargo es el que amortigua menos la oscilación de temperatura y produce un tiempo de retraso más lejano de doce horas. El sobrecalentamiento es igual que para los otros dos elementos.

Lo anterior muestra claramente que, seleccionar un material de acuerdo al análisis de transferencia de calor en estado estacionario, puede dar resultados erróneos para el diseño bioclimático en climas con una alta insolación y una significativa oscilación de la temperatura externa. Cabe señalar, que aunque en la práctica el EPS no se usa como único material para construir un elemento de la envolvente, estos resultados muestran de una manera contundente, que el seleccionar el material del elemento de la envolvente solamente por su alta resistencia térmica da resultados perjudiciales en el desempeño térmico de la edificación en estos climas. El elemento de concreto aereado es el que presenta el mejor desempeño térmico, porque combina el tener una relativa baja conductividad (alta resistencia térmica) y una relativa alta capacidad de almacenamiento térmico, dando por resultado una baja difusividad térmica.

Tabla 2. Parámetros de evaluación, del análisis de estado estacionario: resistencia térmica R , del análisis dependiente del tiempo: amortiguamiento A , tiempo de retraso TR y sobrecalentamiento S , de los elementos de un solo material.

Transferencia de calor	Estado estacionario	Dependiente del tiempo		
		A	TR	S
Material del elemento	R [m ² °C/W]	A [-]	TR [h]	S [°C]
CAD	0.28	0.47	4.13	3.8
CA	1.06	0.49	5.10	3.8
EPS	2.73	0.10	1.91	3.8

Aunque la transferencia de calor en un sistema como el modelado es muy compleja, en la mayoría de los casos, un elemento formado por un solo material, a menor difusividad térmica del material mejor desempeño térmico.

UBICACIÓN DEL AISLANTE

En esta subsección se analiza el desempeño térmico de un elemento dependiendo de la ubicación de una capa de material aislante dentro del elemento. Se consideran tres distintas ubicaciones del material aislante, en la parte exterior, en la central y en la parte interna. La capa del aislante se consideró de EPS de 2cm, el espesor total del elemento se consideró como en la subsección anterior de 10cm. El material de la(s) otra(s) capa(s) es de CAD. Se utilizaron las propiedades físicas de la Tabla 1.

En la Figura 4 se muestra la gráfica de la temperatura del aire al interior T_i como función del tiempo solar para elementos de CAD con EPS en la parte exterior, central e interior y sólo CAD. En esta gráfica se observa claramente que la posición del aislante es importante en el desempeño térmico del elemento y que el aislante en la parte interior produce el menor amortiguamiento y tiempo de retraso.

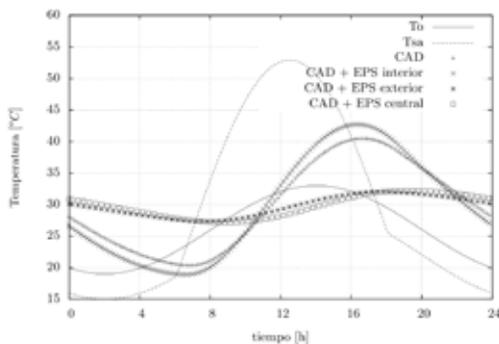


Figura 4. Gráfica de la temperatura del aire al interior como función del tiempo solar, para elementos con diferente ubicación del aislante térmico. Para referencia, se incluyen las temperaturas ambiente T_o y sol-aire T_{sa} .

En la Tabla 3 se muestran los resultados de los parámetros cuantitativos de evaluación correspondientes. Como es de esperarse por la ecuación (11), los tres elementos que tienen aislante térmico, no importando su ubicación, presentan el mismo valor de resistencia térmica, lo que significaría que su desempeño térmico debería ser igual de acuerdo al análisis de transferencia de calor en estado estacionario. Sin embargo, como ya se mencionó, su desempeño térmico es diferente. Los elementos que tienen el aislante en la parte exterior y en la parte central presentan mejor desempeño térmico, A es ligeramente mayor para el que tiene el EPS en la parte exterior, mientras que TR es más cercano a doce horas para el que tiene el EPS en la parte central, el sobrecalentamiento es igual para ambos y ligeramente menor que para el elemento solo de CAD y para el que tiene el EPS en la parte interior. Como se observó en la Figura 4, el elemento que tiene el EPS en la parte interior es el que presenta el peor desempeño térmico, incluso que el elemento que no tiene aislante térmico, ya que además de producir menor amortiguamiento, produce un tiempo de retraso más lejano a la doce horas.

Tabla 3. Parámetros de evaluación, del análisis de estado estacionario: resistencia térmica R , del análisis dependiente del tiempo: amortiguamiento A , tiempo de retraso TR y sobrecalentamiento S , de los elementos con diferente ubicación del material aislante.

Transferencia de calor	Estado estacionario	Dependiente del	tiempo	
Material del elemento	R [m ² °C/W]	A [-]	TR [h]	S [°C]
CAD	0.28	0.47	4.13	3.8
CAD+EPS exterior	0.77	0.88	5.18	3.7
CAD+EPS central	0.77	0.88	6.77	3.7
CAD+EPS interior	0.77	0.37	3.85	3.8

En la Figura 5 se presenta una gráfica que resume los resultados de resistencia térmica R [m²°C/W], amortiguamiento A [-] y tiempo de retraso TR [h] de los

elementos evaluados. De todos ellos, el que tiene mayor R es el EPS y sin embargo es el que presenta los menores A y TR . Sustituir una parte (en estas simulaciones, el 20%) del CAD con una capa de aislante (EPS) en la parte exterior o central puede ayudar a aumentar A y TR .

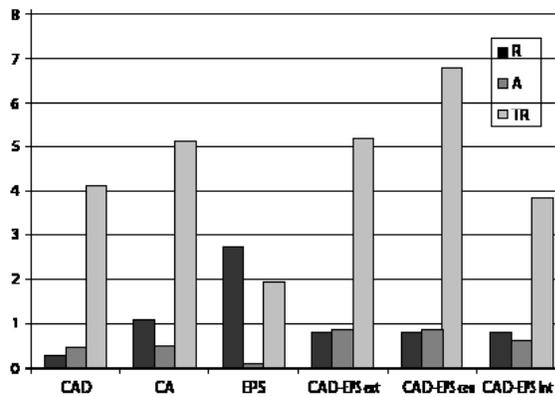


Figura 5. Resultados de la resistencia térmica R , amortiguamiento A y tiempo de retraso TR de los elementos evaluados.

ESPESOR DEL AISLANTE

En esta subsección se analiza el desempeño térmico de un elemento formado por dos capas, la exterior de aislante térmico EPS y la interior de CAD, como función del espesor de la capa aislante. La capa de CAD se mantiene constante de 10cm. Las propiedades físicas son las de la Tabla 1. En la figura 6 se muestran el amortiguamiento como función del espesor de la capa aislante. Como se puede observar el amortiguamiento aumenta asintóticamente con el espesor de la capa aislante. Para esta combinación de materiales, aumentar el espesor de 2cm a 4cm, lo que implica duplicar la cantidad de material, sólo aumenta el 3% del valor del amortiguamiento.

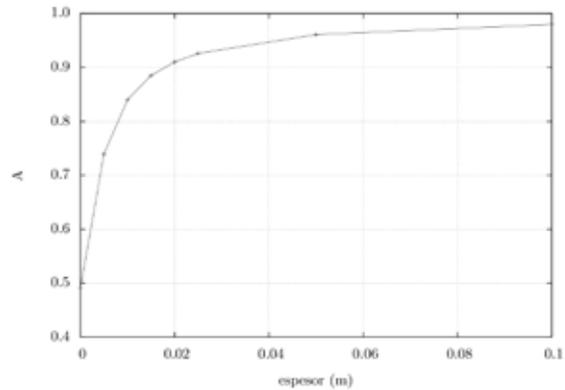


Figura 6. Amortiguamiento A como función del espesor de la capa aislante EPS en la parte exterior de una capa de 10cm de CAD.

CONCLUSIONES

Los resultados de las simulaciones numéricas de la transferencia de calor dependiente del tiempo a través de un techo de la envolvente que recibe radiación solar alta durante el día y con variación de temperatura exterior diaria importante, condiciones en la mayoría de los climas de México, muestran que utilizar como único parámetro para evaluar el comportamiento térmico del elemento 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. En estos climas, un alto valor de la resistencia térmica no asegura un buen desempeño térmico, es necesario también que la envolvente tenga una alta capacidad de almacenamiento térmico y una disposición adecuada de las capas que lo conforman.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo fue apoyado por los proyectos CONACYT FOMIX- Estado de Morelos 93693 y CONACYT 25116.

FUENTES DE INFORMACIÓN

- ASHRAE** (1997). *ASHRAE Handbook Fundamentals*, SI Edition, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
- Diario Oficial** (2001). Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001, Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales. Diario Oficial Miércoles 25 de abril de 2001. Segunda sección, México.
- DOE** (2009). Energy U.S. Energy Plus Department of Energy, <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>
- FIDE** (2009), Taller sobre la envolvente térmica y el ahorro de energía, Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica, México.
- Galindo I. E., Cifuentes G. N.** (1996). Irradiación solar global en la República Mexicana: valores horarios medios, Programa Universitario de Energía, UNAM, México.
- Givoni B.** (1981). *Man, Climate and Architecture*, Applied Science Publishers, Londres.
- Incropera, F. P. and De Witt, D. P.** (2002). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, New York.
- Kuehn T.H., Ramsey W.W., Threlkeld J.L.** (2001). *Thermal Environmental Engineering*, p. 559-560. Prentice Hall, New Jersey.
- Morillón-Gálvez D., Saldaña-Flores R., Tejeda-Martínez A.** (2004). Human bioclimatic atlas for Mexico, *Solar Energy*, Vol. 76, p. 781-792.
- ONNCCE** (2009), Norma NMX460 Industria de la construcción–aislamiento térmico–valor R para las envolventes en vivienda por zona térmica para la República Mexicana–especificaciones y verificación. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación México.
- SMN** (2009), Sistema Meteorológico Nacional. <http://smn.cna.gob.mx/productos/map-lluv/hmproduc.html>
- Ulgen K.** (2002). Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, Vol. 34, p. 273-278.