

EVALUACIÓN DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE LA ENVOLVENTE EN EDIFICACIONES CON DE AIRE ACONDICIONADO INTERMITENTE

Guillermo Barrios, Guadalupe Huelsz y Jorge Rojas

Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México, A. P. 34 Temixco Centro, Morelos, México,

Teléfono/Fax 55+56-22-97-41, gbv@cie.unam.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta la evaluación térmica de cinco sistemas constructivos para la envolvente de edificaciones con aire acondicionado bajo dos formas de operación. Aire acondicionado total en donde el sistema se opera todo el tiempo y la temperatura al interior se mantiene constante, en el segundo el aire acondicionado se opera de manera intermitente. El sistema de aire acondicionado intermitente modelado opera como la mayoría de los sistemas reales. En una época del año funciona como sistema de enfriamiento entrando solo en operación cuando la temperatura del aire al interior es mayor que un valor dado y en otra época del año funciona como sistema de calentamiento entrando en operación cuando la temperatura es menor que un valor dado. El modelado de aire acondicionado intermitente es importante en climas donde a lo largo del día, la temperatura exterior atraviesa la zona de confort. Las evaluaciones se realizan numéricamente usando un modelo de la transferencia de calor unidimensional dependiente del tiempo con condiciones periódicas al exterior. Se evalúan los cinco sistemas constructivos para todo el año de la ciudad de Torreón, Coahuila.

ABSTRACT

In this work the thermal evaluation of five building envelope constructive systems are presented. Two air-conditioned operation cases are considered, in the total air-conditioning, the system operates all time and the indoor air temperature is kept constant and in the second the air conditioning operates in an intermittent way. The intermittent air conditioning modeled operates as the most real systems. During one time of the year the air conditioner cools down the indoor air if its temperature is greater than a defined setpoint and in other time of the year heats the indoor air if the temperature is smaller than the setpoint. The intermittent modeling is important in climates where the exterior temperature crosses the comfort zone. The evaluations are carried out solving numerically the one dimensional time dependent heat transfer equation with outdoor periodic boundary conditions. The five building envelope systems are evaluated in Torreon city during all the year.

Palabras claves: aire acondicionado intermitente, evaluación térmica, envolvente, diseño bioclimático, ahorro de energía, confort.

INTRODUCCIÓN

Los techos y muros de una edificación son componentes importantes para el comportamiento térmico de la edificación. En general, el interés se ha centrado en encontrar la mejor configuración para un muro o techo cuando se hace uso de un sistema de acondicionamiento de aire. En este caso, la mejor configuración es aquella que requiere el menor uso de energía

para mantener constante la temperatura del cuarto en el valor deseado. El problema de transferencia de calor para muros y techos tomando un valor constante de la temperatura interior ha sido resuelto analíticamente usando la ecuación en una dimensión para la transferencia de calor con condiciones periódicas para la temperatura ambiente exterior y considerando muros de una sola capa (Alford et al 1935). Los métodos analíticos limitan la solución de la transferencia de calor a través de muros o techos de más de una capa, por lo tanto, este problema ha sido resuelto usando métodos numéricos en una y dos dimensiones (Kuehn et al 2001). Se han realizado estudios sobre el efecto de la posición de una capa específica dentro de un muro o techo, esto se ha realizado tanto analítica, numérica y experimentalmente (Yumrutas et al 2007, Asan y Sancaktar 1998 y Vijayalakshmi et al 2006).

A la fecha, la mayoría de los trabajos han considerado la temperatura al interior constante, es decir, bajo condición de uso de algún sistema de aire acondicionado durante todo el tiempo, y en muy pocos se ha considerado la temperatura al interior una función de la transferencia de calor a través del muro o techo, esto es, cuando no se utiliza un sistema de aire acondicionado. Se ha demostrado que una buena configuración de muro o techo para edificaciones con aire acondicionado puede no ser adecuada para edificaciones sin aire acondicionado (Barrios *et al* 2011).

La suposición de que la temperatura al interior de un cuarto se mantenga constante es válida en climas donde durante un día la temperatura exterior no cruza la zona de confort térmico y por lo tanto el sistema de aire acondicionado calienta (o enfría) el aire al interior durante todo el día. Para regiones donde la temperatura exterior cruza la zona de confort térmico, esta suposición implica que el sistema de aire acondicionado debe ser capaz de calentar y enfriar, según sea requerido, para mantener la temperatura en el valor deseado durante el mismo día. La mayoría de los sistemas de aire acondicionado existentes no hacen esto.

El propósito de este trabajo es analizar el desempeño térmico de diferentes sistemas constructivos de techos en cuartos donde el sistema de aire acondicionado funciona de manera intermitente y comparar el desempeño de estos sistemas constructivos cuando se considera que sistema de aire acondicionado funciona todo el tiempo y mantiene la temperatura constante, ambos en un clima donde la temperatura exterior cruza la zona de confort térmico. Para esto, se resuelve numéricamente la ecuación de transferencia de calor dependiente del tiempo usando condiciones periódicas en el exterior. Para evaluar los sistemas constructivos usando el sistema intermitente de aire acondicionado (iA/A) se miden la energía por unidad de área y el desconfort térmico. Para evaluar los sistemas constructivos usando el sistema de aire acondicionado total donde la temperatura se mantiene constante (A/A) sólo se mide la energía por unidad de área.

MODELO TEÓRICO

Para analizar la transferencia de calor a través de un techo compuesto por N capas de materiales, con un espesor total L , se emplea para cada j -ésima capa, la ecuación de conducción de calor en una dimensión dependiente del tiempo

$$\frac{\partial T_j}{\partial t} - \alpha_j \frac{\partial^2 T_j}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

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/techo 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 del material $C_j = \rho_j c_j$, 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

$$-k_j \frac{dT}{dx} \Big|_{j,j+1} = -k_{j+1} \frac{dT}{dx} \Big|_{j,j+1} \quad (2)$$

en la superficie externa

$$-k_1 \frac{dT}{dx} \Big|_{w,x_o} = h_o (T_o - T_w) \quad (3)$$

y en la superficie interna

$$-k_N \frac{dT}{dx} \Big|_{w,x_i} = h_i (T_w - T_i) \quad (4)$$

Donde T_o y T_w ($^\circ C$) son las temperaturas exterior y de la superficie externa del techo, T_i y T_w ($^\circ C$) son las temperaturas interior y de la superficie interna, h_o y h_i son los coeficientes de transferencia de calor de película exterior y el interior.

Para el caso donde se usa aire acondicionado todo el tiempo y para el caso intermitente, cuando se está operando el sistema, la temperatura del aire al interior es conocida y constante. En el caso del aire acondicionado intermitente, cuando el sistema de aire acondicionado no está en operación, la temperatura interior del aire es función de la transferencia de calor a través del techo y se calcula a partir de

$$(\rho_a c_a) \left(\frac{\partial T_i}{\partial t} \right) = h_i (T_w - T_i)$$

donde ρ_a y c_a son la densidad y el calor específico del aire. Se supone que existe una distancia d desde la superficie interna del techo hacia el interior de la edificación a la cual no hay transferencia de calor (condición adiabática).

Dado que se necesita evaluar a los techos, es necesario definir un parámetro para este fin. Cuando se evalúe un techo en un cuarto con aire acondicionado (A/A) se mide la energía por unidad de área usada para mantener la temperatura deseada. En un cuarto con un sistema de aire acondicionado intermitente que enfría (iA/Ac) se mide además el disconfort térmico frío, definido como

$$DTF = \sum_i \Delta t_i (T_c - \Delta T_c - T_i)$$

tal que $T_i < T_c - \Delta T_c$, donde $T_c - \Delta T_c$ es el límite inferior de confort térmico. En un cuarto con un sistema de aire acondicionado intermitente que calienta (aA/Ah) se mide además de la energía, el disconfort térmico cálido definido como

$$DTC = \sum_i \Delta t_i (T_i - T_c - \Delta T_c) \quad (7)$$

tal que $T_i > T_c + \Delta T_c$, donde $T_c + \Delta T_c$ es el límite superior de confort térmico.

SIMULACIONES NUMÉRICAS

Las simulaciones numéricas se llevaron a cabo considerando un techo horizontal con $RF = 3.9$ $^\circ C$. Los datos climáticos necesarios para el modelo tales como máximo y mínimo de temperatura, radiación para la ciudad de Torreón, Coahuila fueron tomados del año típico reportado por Meteonorm. La radiación solar se aproximó con una sinusoidal con una duración acorde a la época del año y lugar establecido. Los coeficientes convectivos de película para el exterior e interior se consideraron como 13 y 6.6 $W/m^2^\circ C$, respectivamente. La absorptividad de las superficies en el exterior es $a=0.2$ y la distancia del techo a la condición adiabática es 2.5m, la cual puede ser tomada como la altura del techo.

Para el estudio se han considerado cinco sistemas constructivos de techo compuestas con tres materiales, presentados en la Tabla 1 junto con sus propiedades termofísicas. Los sistemas constructivos se describen en la Tabla 2, cabe señalar que los cinco sistemas constructivos tienen un espesor total de 12cm. Se evalúan durante todo un año considerando el uso de A/A y también iA/Ac para enfriar el aire al interior en caso de sobrepasar el límite superior de confort.

En la Figura 1 se presenta la temperatura del aire al interior de un cuarto con un techo de 10 cm fabricado de poliestireno expandido considerando iA/Ac, además se muestra la temperatura sol-aire correspondiente al mes de junio y las líneas sólidas indican la zona de confort térmico. Como se puede ver, cuando se usa el sistema de aire acondicionado de enfriamiento intermitente la temperatura del aire al interior no puede ser mayor al límite superior de confort pero si tener un valor abajo de la zona de confort térmico, por lo que es necesario medir el disconfort térmico frío.

Tabla 1: Propiedades termofísicas del concreto de alta densidad (CAD), poliestireno expandido (EPS) y mortero (M)

Material	k W/(mK)	ρ kg/m ³	c J/(kg K)	α m ² /s
CAD	2.00	2400	1000	0.833e-6
EPS	0.04	15	1400	1.900e-6
M	0.88	2800	896	0.350e-6

Tabla 2: Sistemas constructivos evaluados

Configuración	Descripción del interior al exterior
1	EPS 0.12m
2	CAD 0.12m
3	EPS 0.02m + CAD 0.10m
4	EPS 0.02m + CAD 0.08m + EPS 0.02m
5	M 0.02m + EPS 0.08m + M 0.02m

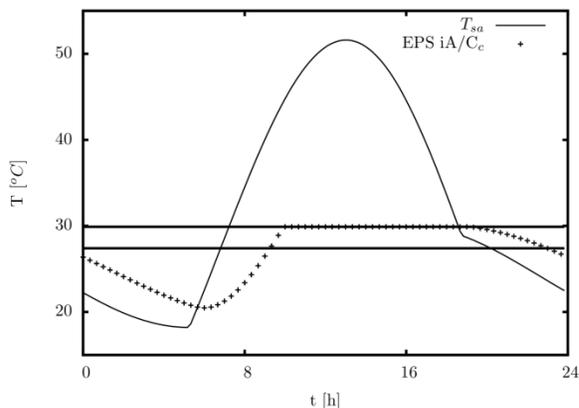


Figura 1: Temperatura del aire al interior de un cuarto con techo fabricado con poliestireno expandido cuando se usa un sistema de aire acondicionado de enfriamiento intermitente (EPS iACc), temperatura sol-aire (T_{sa}) y zona de confort (zona entre las líneas horizontales), correspondientes al mes de mayo en Torreón.

En la Figura 2 se presenta la energía anual usada por unidad de área a lo largo de un año para los cinco sistemas constructivos con A/A y iA/Ac, también se presenta el disconfort térmico frío. Para esto, se llevaron a cabo las simulaciones numéricas con el clima típico de cada mes para cada uno de los cinco sistemas constructivos y se calcularon los valores anuales. Cuando se usa A/A el menor gasto de energía por unidad de área determina la mejor configuración, en los casos evaluados, la mejor es la configuración 4 (concreto de alta densidad cubierto en ambos lados con poliestireno expandido) seguido por la configuración 1 (poliestireno expandido). Al analizar los resultados correspondientes al cuarto que usa iA/A se deben tomar en cuenta la energía por unidad de área y el disconfort térmico. En este caso la mejor configuración es la 5 (poliestireno expandido cubierto en ambos lados con mortero), seguido por la 4 y 3. La configuración 1 gasta muy poca energía pero el disconfort es el más alto de todas las sistemas constructivos.

En los resultados numéricos presentados hasta aquí, el sistema iA/Ac sólo enfría el aire al interior si la temperatura de éste sobrepasa el límite superior de la zona de confort. En las Figuras 3 y 4 se presentan los resultados para las cinco sistemas constructivos ubicadas en Torreón para los meses de diciembre y junio, respectivamente. La diferencia se encuentra en que durante el mes frío, el sistema intermitente de aire acondicionado calienta el aire al interior iA/Ah y durante el mes cálido el sistema intermitente enfría iA/Ac. Para el mes de diciembre y usando iA/Ah se puede ver que los mejores sistemas constructivos son 5, 4 y 3, todos con cero disconfort. Aunque la configuración 1 usa muy poca energía, su disconfort es muy alto debido a la falta de capacidad de almacenamiento térmico del material. Cuando se usa un sistema de A/A los mejores sistemas constructivos son 1, 4 y 5. Para el mes de junio, cuando se enfría el aire al interior del cuarto en el sistema intermitente, los mejores sistemas constructivos son otra vez 5, 4 y 3, mientras que cuando se usa A/A las mejores sistemas constructivos son 4, 1 y 5.

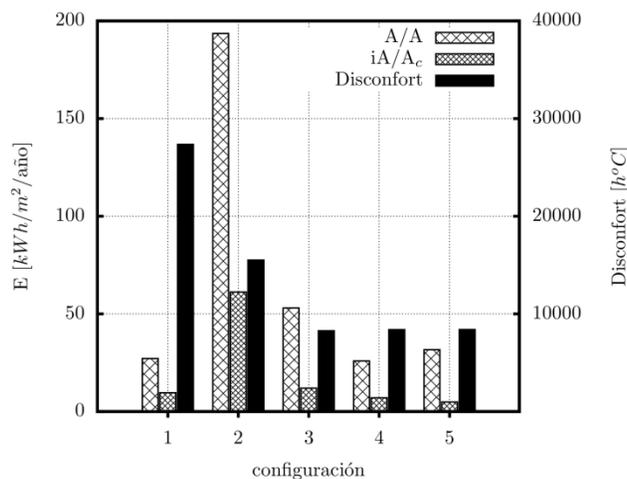


Figura 2: Energía anual usada por unidad de área a lo largo de un año para las cinco sistemas constructivos de techos para uso de sistema de aire acondicionado total (A/A) e intermitente de enfriamiento (iA/Ac) y disconfort térmico frío (Disconfort) para cuartos con aire acondicionado intermitente.

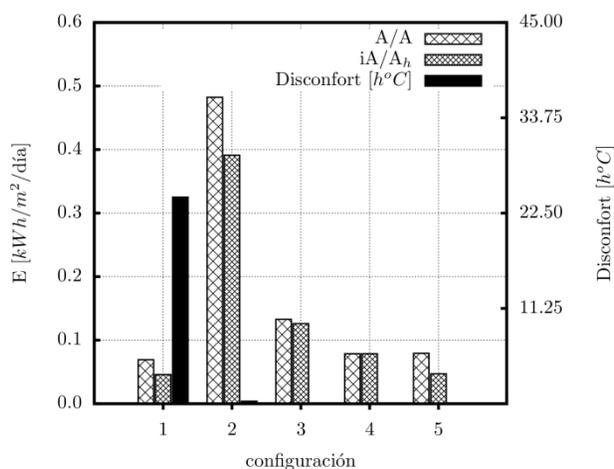


Figura 3: Energía por unidad de área en un día para cuartos donde se usa un sistema de aire acondicionado total (A/A) e energía por unidad de área en un día (iA/Ah) y disconfort térmico cálido (Disconfort) para cuartos con aire acondicionado intermitente en el mes de diciembre en Torreón.

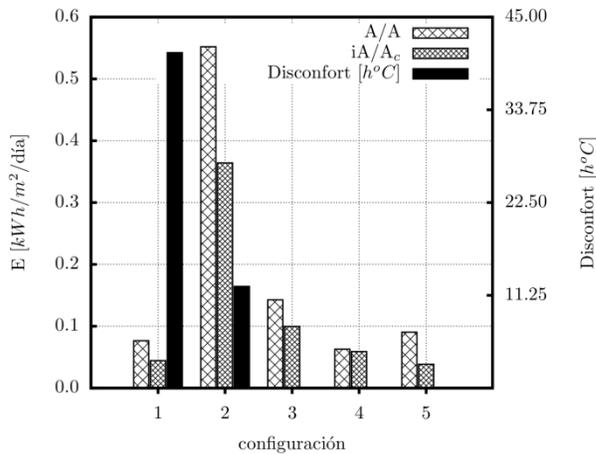


Figura 4: Energía por unidad de área en un día para cuartos donde se usa un sistema de aire acondicionado total (A/A) y energía por unidad de área en un día (iA/Ac) y disconfort térmico frío (Discomfort) para cuartos con aire acondicionado intermitente en el mes de junio en Torreón.

CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó una comparación de cinco sistemas constructivos de techo en dos condiciones de operación del aire acondicionado. Aire acondicionado total donde la temperatura del aire al interior se mantiene constante (A/A) y el aire acondicionado intermitente, en el cual el sistema solo enfría (iA/Ac) o calienta (iA/Ah) el aire al interior durante un día. Cuando se evalúa un techo usando iA/Ac o iA/Ah los parámetros usados son la energía por unidad de área y el disconfort térmico. Cuando se usa un sistema de aire acondicionado total (A/A), los sistemas constructivos se evalúan usando la energía por unidad de área necesaria para mantener la temperatura del interior del cuarto constante.

La mayoría de los sistemas de aire acondicionado solo calientan o enfrían durante un mismo día (algunos pueden tener las dos funciones, pero no de forma automática). En climas donde la temperatura exterior se encuentra todo el día por arriba (o por abajo) de la zona de confort térmico, estos sistemas enfriando (o calentando) todo el día, mantienen la temperatura del aire al

interior constante. Sin embargo en climas donde la temperatura exterior cruza los límites de la zona de confort térmico durante el mismo día, como sucede en gran parte del territorio nacional, la operación del acondicionado para enfriar (o para calentar) es intermitente.

La conclusión principal de este trabajo es que la mejor configuración desde el punto de vista térmico de un techo (o un muro) depende de la condición de operación del aire acondicionado. Cuando se usa un sistema de aire acondicionado en forma intermitente en un clima en el que durante el mismo día, la temperatura exterior atraviesa la zona de confort, la evaluación debe hacerse considerando tanto la energía por unidad de área que emplea el sistema de aire acondicionado como el disconfort térmico que se presenta cuando no opera el sistema.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente apoyado por el proyecto S0019-2009-01-118665 financiado por el Fondo de Sustentabilidad Energética CONACyT-SENER y por el proyecto FOMIX-Morelos 93693.

REFERENCIAS

- J. S. Alford, J. E. Ryan, F. O. Urban (1935), Effect of heat storage and variation in indoor temperature and solar intensity on heat transfer through walls, *ASHVE Trans* 45, 369–396.
- H. Asan, Y. S. Sancaktar (1998), Effects of walls thermophysical properties on time lag and decrement factor, *Energy and Buildings* 28, 159–166.
- G. Barrios, G. Huelsz, R. Rechtmann, J. Rojas (2011), Wall/roof thermal performance differences between air-conditioned and non air-conditioned rooms, *Energy and Buildings* 43, 219–223.
- T. H. Kuehn, W. W. Ramsey, J. L. Threlkeld (2001), *Thermal Environmental Engineering*, Prentice Hall, New Jersey.
- M. M. Vijayalakshmi, E. Natarajan, V. Shanmugasundaram (2006), Thermal behaviour of building wall elements, *Journal of Applied Sciences* 6, 3128–3133.
- R. Yumrutaş, Kaşka, E. Yildirim (2007), Estimation of total equivalent temperature difference values for multilayer walls and flat roofs by using periodic solutions, *Building and Environment* 42, 1878–1885.