



Received: 25-02-2018
Accepted: 08-03-2018

Anales de Edificación
Vol. 4, Nº 1, 14-26 (2018)
ISSN: 2444-1309
Doi: 10.20868/ade.2018.3730

Sobre inercia térmica y aislamiento de viviendas en clima cálido-húmedo. On thermal inertia and insulation of buildings in warm-humid climate.

Guillermo De Ignacio Vicens ¹, Silvia Soutullo Castro ², Óscar López-Zaldívar ³, Rafael Vicente Lozano-Díez ³, Amparo Verdú Vázquez ³

Universidad Politécnica de Madrid (guillermo.deignacio@upm.es; oscar.lopezz@upm.es; rafaelvicente.lozano@upm.es; averdvaz@gmail.com)

Resumen— En el acondicionamiento natural de una vivienda en clima cálido-húmedo juegan un papel importante factores tales como la inercia térmica, el aislamiento, las diferentes tipologías constructivas y la ventilación. En este contexto, hay diversidad de opiniones sobre las funcionalidades de la inercia térmica y del aislamiento, por lo que este trabajo plantea revisar dichos factores en una localización geográfica representativa de este tipo de clima como es la de La Habana (Cuba). Se estudia la amortiguación y el desfase de la onda térmica; la evolución libre de las temperaturas interiores mediante simulación por ordenador, tomando como ejemplo una vivienda de aproximadamente 60 m² y sistema constructivo habitual de los bloques de viviendas de La Habana; y la incidencia del aislamiento aplicado a los cerramientos exteriores en el acondicionamiento natural de la vivienda, teniendo en cuenta las características concretas del clima cálido-húmedo que nos ocupa.

Palabras clave— Acondicionamiento ambiental, Diseño de viviendas, Temperatura de confort, Clima cálido-húmedo.

Abstract- For the natural conditioning of a dwelling in warm-humid climate, factors such as thermal inertia, insulation, different building typologies and ventilation play an important role. In this context, there are different opinions on the functionalities of thermal inertia and isolation. This paper proposes to review these factors in a representative geographical location of warm-humid climate such as that of Havana (Cuba). Both the damping and the lag of the thermal wave are studied. The free evolution of the inner temperatures by means of computer simulation are also analyzed, in a dwelling of 60 m² and traditional building system of the housing blocks in Havana. Likewise, the investigation focus on the effects of the insulation layer of the external enclosures in the natural conditioning of the house under the above mentioned conditions and its repercussion in comfort. Appropriate strategies for the environmental conditioning of houses are inferred.

Index Terms— Environmental conditioning, Building design, Comfort temperature, Warm-humid climate.

¹ Profesor Emérito, Universidad Politécnica de Madrid. (España)

² División de Energías Renovables, CIEMAT. Av. Complutense, 40, Tel.: 913 46 60 00. 28040 Madrid. (España)

³ Departamento Tecnología de la Edificación. ETS de Edificación. Avenida Juan de Herrera, 6. (28040 – Madrid) Tel.: 91 336 75 99. Universidad Politécnica de Madrid. (España)

I. INTRODUCCIÓN

A. Conceptos previos

Como es sabido, la palabra griega clima (κλίμα) significa inclinación, y desde la Antigüedad se asoció a la incidencia de la radiación solar sobre la superficie terrestre, que varía a lo largo del día y del año dependiendo de la latitud del lugar.

Sin embargo, este concepto de clima no resulta suficiente, puesto que es necesario considerar además los aspectos geográfico, físico y estadístico que conducen al concepto más abarcador de climatología, en el que contemplamos el régimen normal de intercambio de materia y energía entre la atmósfera y el suelo, en relación con los elementos meteorológicos (radiación, temperatura, presión, humedad y precipitaciones) y las características de localización geográfica.

Lo que llamamos, pues, clima está condicionado por una serie de factores: astronómicos (que en resumidas cuentas son función de la latitud); geográficos, tales como: la distribución de agua sobre la Tierra, el relieve, la altitud, la capa vegetal y las corrientes marinas (la climatología de un lugar se ve muy afectada por su mayor o menor proximidad al mar, lo que se conoce como grado de continentalidad); y meteorológicos, tales como la constitución de la atmósfera, la circulación general de la misma, la nubosidad, etc.

Ahora bien, a los efectos del diseño arquitectónico para condiciones ambientales (Mona et al., 2017; Madhavi, 20102; Dhaka et al., 2014), los aspectos del clima de interés inmediato son la radiación solar de onda larga (Imam & Banerjee, 2016; Weller et al., 2014), la temperatura (García-Fuentevilla et al., 2017; Shastri et al., 2014), la humedad (Mba et al., 2016) y el viento; estos elementos, junto con las precipitaciones y la presión atmosférica, caracterizan el sistema climático global (Markus et al., 1980). De entre estos elementos destacan por su importancia la temperatura y la humedad.

En función de la temperatura, se distinguen cuatro categorías (Ugarte, 2011):

- Clima frío, para temperaturas medias anuales inferiores a 10°C
- Clima templado, para temperaturas medias anuales comprendidas entre los 10 y los 20°C
- Clima cálido, para temperaturas medias anuales comprendidas entre 20 y 30°C
- Muy caliente, para temperaturas medias anuales superiores a 30°C

En función de la humedad, se distinguen dos categorías:

- Clima seco, para una humedad relativa inferior a 55%
- Clima húmedo, para una humedad relativa superior a 55%

B. Sobre los climas cálidos y húmedos

Hace años se procedió a la sistematización de los datos climáticos de amplias zonas de la Tierra, basándose en los valores de máxima frecuencia. La mayoría de las clasificaciones climatológicas surgidas de dichos estudios atienden principalmente a la temperatura del aire, al régimen pluviométrico y a la latitud (Barry & Chorley, 1985), siendo las dos clasificaciones más empleadas en la actualidad la de Köppen (Köppen, 1936) y la de Strahler (Strahler et al., 1993).

La clasificación de los climas terrestres propuesta por Strahler se considera una clasificación genética, es decir, se basa en la circulación general atmosférica. En concreto, Strahler toma como referencia las masas de aire dominantes para establecer tres climas principales:

- Climas de latitudes bajas. Controlados por las masas de aire tropical y ecuatorial
- Climas de latitudes medias. Controlados por masas de aire tropical y polar
- Climas de latitudes altas. Controlados por masas de aire polar y ártico

Estos tres grandes grupos se subdividen a su vez en distintos subgrupos para dar un total de 14 climas. Se incluye aparte de este sistema general de clasificación el clima montañoso, ya que sus características son debidas a la altura.

Por lo que respecta a las latitudes medias, son varios los tipos climáticos que en la clasificación de Strahler dan cuenta de las características de las zonas próximas al Trópico de Cáncer en el hemisferio Norte: tropical, templado húmedo y seco, subtropical húmedo o mediterráneo. No son tipos cerrados, y a menudo se dan en una región concreta características que participan de uno y otro de ellos. En concreto, se identifica el clima subtropical húmedo (Tabla 1).

En la clasificación de Köppen, se trata de un clima templado húmedo: Cf, matizado con verano caluroso: a (temperatura media del mes más cálido superior a 22°C).

El clima cálido y húmedo se caracteriza por tener dos estaciones diferenciadas: la estación de lluvias y la estación seca. Los vientos alisios influyen de manera importante en este tipo de clima; soplan del noreste al suroeste en el hemisferio Norte. Los vientos locales son débiles, y los períodos calmos, frecuentes.

En España, en las Islas Canarias, de latitud comprendida entre 28°N y 29°N, y cuyo clima se clasifica como subtropical oceánico, la temperatura media anual está comprendida entre 19°C y 23°C; la temperatura máxima media está entre los 22°C y 26°C; la mínima media, entre 16°C y 19°C; y la humedad relativa media anual se sitúa en el 69%, por lo que también puede considerarse un clima mediterráneo (templado húmedo).

TABLA I
CLIMA SUBTROPICAL HÚMEDO

Nombre del clima	Características	Equivalencia Köppen
Clima subtropical húmedo. Lat. 20°-35° N y S	Propio de los márgenes orientales y subtropicales de los continentes, dominado por masas de aire marítimo húmedo que proceden de los bordes occidentales de los anticiclones oceánicos. En la estación en que el sol está alto, la precipitación es abundante y las temperaturas cálidas. Frecuentes tormentas ciclónicas.	Cfa

Cuba se encuentra situada entre las latitudes 20°N (Santiago de Cuba) y 23°N (La Habana). Los valores medios anuales de temperatura van desde 22°C hasta 28°C y más en las costas orientales; la temperatura máxima media está entre 27°C y 32°C, y la temperatura mínima media entre 17°C y 23°C, en tanto que la humedad relativa media anual se sitúa entre 68% y 75%. Por lo tanto, y de acuerdo con las categorías anteriores, estaríamos hablando de un clima cálido húmedo, participando también del templado húmedo (INSMET, 2016).

C. El bienestar en el clima cálido y húmedo

El clima cálido implica altos niveles de radiación solar y por lo tanto superávit para casi todo el año. A su vez, las altas temperaturas permiten al aire acumular más vapor de agua, y en consecuencia es mayor la humedad relativa.

Los climas cálidos y húmedos se localizan en África central, en Asia, en el norte de Australia y en el Caribe. Se caracterizan por fuertes precipitaciones concentradas en pocas horas, un alto grado de humedad acompañado por una oscilación diaria de temperaturas inferior a 10°C y una temperatura elevada a lo largo de todo el año. Hace calor durante todo el día y por la noche.

En este tipo de clima, si se considera una temperatura de bienestar diurna entre 22°C y 28°C en espacios con ventilación natural (Morales & Claret, 2014), y dado que la media anual de las temperaturas mínimas en La Habana se sitúa en 19.5°C, no existen motivos para almacenar el calor del día y reutilizarlo por la noche, porque la noche es también calurosa. El empleo de materiales pesados de gran inercia térmica (Couret, 2015; Ugarte, 2007) no haría más que empeorar la situación. La circulación del aire aparece como el factor esencial que permite disminuir la sensación de desagrado, resultado del clima (Adebamowo & Ilesanmi, 2012).

Por lo tanto, en este tipo de clima el bienestar se asegura con una construcción aislada, masiva o ligera, en la que la ventilación sea importante (De Ignacio, 1999) y los huecos exteriores estén bien orientados y sombreados, pero para lograrlo se requiere, al menos, un diseño cuidadoso y la planificación del sitio para la mejor orientación, siendo más

adecuados los emplazamientos que de alguna manera reciban corrientes de aire (Ugarte, 2013).

El factor crítico es el movimiento del aire, que debe ser constante para disipar las ganancias de calor solares e internas, y la exposición de las ventanas, que deben estar siempre protegidas del sol (Satwiko, 2017). El aislamiento sólo funciona si existe una buena ventilación (porque de otro modo los aportes solares e internos se acumulan al interior) y si la sombra y orientación de las ventanas son las correctas (Beltran et al., 2015; Shastry et al., 2014). Cabe, por tanto, plantearse cuál sea la incidencia del aislamiento bajo estos supuestos.

II. OBJETIVOS

Se pretende revisar las condiciones constructivas y de comportamiento de la vivienda, que permiten un acondicionamiento térmico de la misma en orden al confort interior en situaciones de clima cálido-húmedo, obteniendo esta situación de confort de modo natural mediante el aprovechamiento pasivo de los componentes y sistemas constructivos del edificio, sin acudir para ello a implementar sistemas de climatización en la vivienda.

III. METODOLOGÍA

En lo que sigue se considerarán dos aspectos del acondicionamiento térmico natural de la vivienda: lo relacionado con la inercia de los muros de cerramiento, en términos de amortiguamiento y desfase de la onda térmica; y la evolución libre de las temperaturas interiores de la vivienda con y sin aislamiento interior de los cerramientos exteriores, mediante simulación por ordenador, a los efectos de caracterización del comportamiento térmico de la misma en ambas situaciones.

A. Amortiguamiento y desfase.

A los efectos de analizar el comportamiento de los cerramientos exteriores, que son los elementos constructivos que reciben mayor radiación, hay que tener en cuenta que ni la energía se acumula instantáneamente en el muro, ni éste es capaz de cederla tampoco en un instante. Existe un período de

tiempo entre el momento en el que una forma de radiación incide sobre un material y el momento en el que, tras atravesarlo, es cedida al otro lado; ese período de tiempo se denomina desfase de la onda térmica.

La expresión con la que se calcula el desfase de la onda térmica en un muro homogéneo es la siguiente (Chapman, 1990; Bedoya & Neila, 1986):

$$\phi = \frac{e}{2} \sqrt{\frac{\rho c T}{\lambda \pi}}$$

en la que:

- ϕ , desfase de la onda térmica
- T, duración periódica del fenómeno
- ρ , densidad del material
- c, calor específico a presión constante
- λ , conductividad térmica del material
- e, espesor del muro

Pero la masa del muro no solo provoca el desfase de la onda térmica, sino que amortigua su intensidad. El amortiguamiento,

definido como la relación entre la amplitud de la onda de temperatura en la superficie exterior y la registrada en el interior, se expresa como:

$$\mu = \frac{\theta_i}{\theta_0} = \exp\left(-e \sqrt{\frac{\pi \rho c}{\lambda T}}\right)$$

Teniendo en cuenta que el fenómeno es la radiación solar, su período es de 24 horas. Sustituyendo este valor en las expresiones anteriores:

$$\phi = 1.382 \frac{e}{\lambda} \sqrt{\rho \lambda c}$$

$$\mu = \exp\left(-0.362 \frac{e}{\lambda} \sqrt{\rho \lambda c}\right)$$

En la Tabla 2 se muestran los resultados del desfase ϕ y amortiguamiento μ obtenidos para distintos tipos de cerramientos, y donde:

$A = \lambda \cdot \rho \cdot c$ (admisividad del material)

$fa = 1 - \mu$ (factor de amortiguación)

TABLA II
COMPARACIÓN ENTRE ALGUNOS TIPOS DE CERRAMIENTO

	ρ (kg/m ³)	λ (kcal/h.m.°C)	c (kcal/kg.°C)	e (m)	Admisividad	Φ (horas)	μ	θ_i (°C)	T _{max,i}	fa (%)
ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS										
Panel de hormigón armado	2400	1,40	0,22	0,12	739,20	3,22	0,43	2,0	26,3	57
	2400	1,40	0,22	0,20	739,20	5,37	0,25	1,2	25,5	75
	2400	1,40	0,22	0,25	739,20	6,71	0,17	0,8	25,1	83
Losa spiroll	1300	0,75	0,22	0,20	214,50	5,40	0,24	1,2	25,5	76
Muro de bloque hueco de hormigón	1200	0,42	0,22	0,15	110,88	5,20	0,26	1,2	25,5	74
	1200	0,42	0,22	0,20	110,88	6,93	0,16	0,8	25,1	84
Muro de ladrillo perforado	1600	0,65	0,22	0,12	228,80	3,86	0,36	1,7	26,0	64
	1600	0,65	0,22	0,24	228,80	7,72	0,13	0,6	24,9	87
Panel de hormigón en masa	2000	1,00	0,22	0,06	440,00	1,74	0,63	3,0	27,3	37
MATERIALES AISLANTES										
cartón-yeso	900	0,16	0,2	0,06	28,80	2,78	0,48	2,3	26,6	52
porexpan tipo III	15	0,03	0,4	0,02	0,19	0,38	0,91	4,3	28,6	9

De la tabla se deduce que se obtienen en general factores de amortiguación aceptables en función del espesor del cerramiento, si bien los desfases de la onda térmica no serían los deseables, ya que el máximo interior se producirá en horas en que la ventilación natural aún no es efectiva. Se plantea, por tanto, estimar la influencia del aislamiento en el comportamiento térmico de los distintos tipos de cerramiento.

La amplitud θ es la diferencia entre la temperatura media y la máxima o la mínima, es decir:

$$\begin{aligned} \theta &= t_{max} - t_{med} = t_{max} - \frac{t_{max} + t_{min}}{2} \\ &= \frac{t_{max} - t_{min}}{2} \end{aligned}$$

La amplitud de la onda térmica en el interior es:

$$\begin{aligned} \theta_i &= t_{max,i} - t_{med,i} = \mu \theta_0 = \mu (t_{max,e} - t_{med,e}) \\ &= \mu t_{max,e} - \mu t_{med,e} \end{aligned}$$

y si suponemos $t_{(med,i)} \approx t_{(med,e)}$ podemos obtener la temperatura máxima interior:

$$t_{max,i} = \mu t_{max,e} + (1 - \mu) t_{med}$$

El factor $fa = (1 - \mu)$ es el factor de amortiguación, que es la reducción en porcentaje experimentada por la onda térmica incidente al pasar al interior. Esta reducción, que puede llegar a ser considerable, es debida al retroceso de parte de la energía acumulada en una segunda onda térmica de sentido contrario.

En el caso de La Habana (Cuba), la temperatura máxima en media anual, como se ha visto, está entre 27°C y 32°C (típicamente, 29.5°C), y la media anual mínima entre 17°C y 23°C (típicamente 20°C), por lo que la amplitud de la onda térmica es:

$$\theta_0 = \frac{29.5 - 20.0}{2} = 4.75^\circ C$$

En consecuencia, la amplitud de la onda de temperatura al alcanzar la cara interior de un cerramiento de bloques de hormigón de 20 cm es:

$$\theta_i = \mu \theta_0 = 0.16 \times 4.75 = 0.8^\circ C$$

y la desviación respecto de la temperatura media es pequeña, inferior a 1°C.

B. Cerramientos multicapa

Si el cerramiento consta de más de una capa, se define el amortiguamiento y el desfase de la pared homogénea equivalente como sigue:

$$\mu = \exp\left(-A \sqrt{\frac{\pi B}{T}}\right) = \exp(-0.362A\sqrt{B})$$

$$\phi = \frac{T}{2} A \sqrt{\frac{B}{\pi T}} = 1.382A\sqrt{B}$$

A es la resistencia térmica equivalente:

$$A = \sum_1^n \frac{e_i}{\lambda_i}$$

B es la admisividad equivalente, cuya expresión es:

$$B = \frac{1}{A} \left\{ 1.1 \sum_1^{n-1} \left(\frac{e_i}{\lambda_i} \lambda_i \rho_i c_i \right) + \lambda_n \rho_n c_n \left[\frac{e_n}{\lambda_n} - 0.1 \sum_1^{n-1} \frac{e_i}{\lambda_i} \right] \right\}$$

expresión empírica en la que, en condiciones de flujo del exterior al interior, n es la capa externa de la pared compuesta. Si la expresión entre corchetes del segundo término es negativa (lo que ocurre cuando la resistencia térmica de la capa exterior es pequeña en relación a las otras capas), ésta debe considerarse cero; y si una de las capas es una cámara de aire, el término $\lambda \rho c$ de esta capa debe ser considerado nulo (Yáñez, 1982).

Así, por ejemplo, en un panel de hormigón armado de 12 cm de espesor, con revestimiento interior y exterior de mortero (solución constructiva habitual para viviendas en Cuba), se tiene:

$$A = \frac{0.01}{1.20} + \frac{0.10}{1.40} + \frac{0.01}{1.20} = 0.0879$$

$$B = \frac{1}{0.0879} \left\{ 1.1 (0.10 \times 2400 \times 0.25 + 0.01 \times 2000 \times 0.25) + 1.20 \times 2000 \times 0.25 \left[\frac{0.01}{1.20} - 0.1 \left(\frac{0.10}{1.40} + \frac{0.01}{1.20} \right) \right] \right\} =$$

$$= 11.3765(72.0720 + 0.2072) = 821.8384$$

Entonces:

$$\mu = \exp(-0.362 \times 0.0879 \sqrt{821.8384}) = 0.40$$

$$\phi = 1.382 \times 0.0879 \times \sqrt{821.8384} = 3.5 \text{ horas}$$

y por lo tanto:

$$fa = (1 - 0.40) \times 100 = 60\%$$

$$\theta_i = 0.4 \times 4.75 = 1.9^\circ C$$

$$t_{max,i} = 1.9 + 24.3 = 26.2^\circ C$$

La onda térmica se amortigua un 60% al atravesar el cerramiento, y la temperatura máxima interior es casi tres grados inferiores a la máxima exterior, con un desfase de 3.5 horas respecto a ésta.

Si ahora colocamos un panel de 2 cm de aislamiento (PE III) sobre la cara interior del cerramiento, se obtiene:

$$\mu = 0.14, \phi = 7.4 \text{ horas};$$

y por lo tanto:

$$fa = 86\%$$

$$\theta_i = 0.7^\circ C$$

$$t_{max,i} = 25.0^\circ C$$

Se aprecia una clara mejoría, ya que la temperatura interior es prácticamente constante e inferior en 4°C a la máxima exterior; y el desfase respecto de ésta es de algo más de siete horas, casi al comienzo del período nocturno.

Si consideramos fábrica de ladrillo cerámico de 12 cm, asimismo revestida interior y exteriormente de mortero, resulta:

$$\begin{aligned}\mu &= 0.31, \phi = 4.4 \text{ horas;} \\ f_a &= 69\% \\ \theta_i &= 1.9^\circ\text{C} \\ t_{\max,i} &= 26.2^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Y la misma fábrica también con aislamiento interior de PE III de 2 cm, nos da:

$$\begin{aligned}\mu &= 0.14, \phi = 7.4 \text{ horas;} \\ f_a &= 86\% \\ \theta_i &= 0.9^\circ\text{C} \\ t_{\max,i} &= 25.2^\circ\text{C}\end{aligned}$$

condiciones que son similares, en ambos supuestos, a las del panel de hormigón.

Como se ve, según la teoría las situaciones de cerramientos con aislamiento interior son claramente ventajosas, sobre todo en lo que se refiere al desfase de la onda térmica, por cuanto permitiría entrar directamente en las condiciones de ventilación nocturna.

C. Simulación en evolución libre de temperaturas

Sin embargo, las expresiones anteriores proporcionan el amortiguamiento y desfase de la onda térmica de período diario con independencia de las temperaturas exteriores, y suponiendo temperatura interior constante, por lo que los resultados que nos ofrecen hay que considerarlos como referidos a un régimen periódico cuasi-estacionario. Por otra parte, nos estamos refiriendo a la transferencia de calor por conducción a través de lo que se conoce como sólido semi-infinito (el muro o pared de cerramiento), sin que se consideren los efectos del recinto cerrado.

Para evaluar la fiabilidad de los cálculos anteriores, se ha estudiado el comportamiento de una vivienda a partir de datos reales de temperatura mes a mes, día a día y hora a hora,

analizando su comportamiento en evolución libre mediante un modelo de simulación.

El modelado de un edificio está caracterizado por un conjunto de ecuaciones matemáticas acopladas que describen su balance de energía en unas determinadas condiciones de contorno. La resolución matemática de dicho sistema determina el tipo de programas empleado.

Para que un modelo de simulación pueda describir, pronosticar y prever situaciones tanto presentes como pasadas, debe ser congruente con el objetivo de la investigación y con las capacidades técnicas del propio programa. En este caso, el objetivo final es analizar la evolución horaria de la temperatura del aire interior de viviendas con diferentes configuraciones constructivas y en diferentes climatologías.

Para ello se ha empleado el programa de simulación dinámica TRNSYS 16.1 (Transient Energy System Simulation Tool). Este programa es modular y flexible, permitiendo diseñar sistemas complejos y modificar en cada tiempo de paso las variables de entrada y las condiciones de contorno.

El proyecto final de TRNSYS se ha creado mediante el acoplamiento de subrutinas propias del software para cada una de las partes del sistema: climatología, vivienda, elementos de sombra, etc.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este trabajo se analiza el caso de una vivienda en planta intermedia de un edificio en altura, con cerramiento exterior de medio pie de ladrillo macizo, enfoscado interior y exteriormente con mortero de cemento, condiciones típicas de los edificios de viviendas de La Habana. La planta, la sección transversal y la orientación de la vivienda, según Proyecto, se muestran en la Figura 1.

Se han considerado las siguientes variables de entrada:

- Evolución libre (sin cargas internas)
- Infiltración constante de 0.8 ren/h
- Ventilación diurna de salubridad constante de 1.2 ren/h
- Clima: secuencia anual de temperaturas de La Habana (Cuba), tomada de la base de datos del Programa de Simulación EnergyPlus .

En la Tabla 3 se presentan los resultados de la temperatura media interior, en la simulación efectuada, en promedio mensual, frente a la exterior también en promedio mensual.

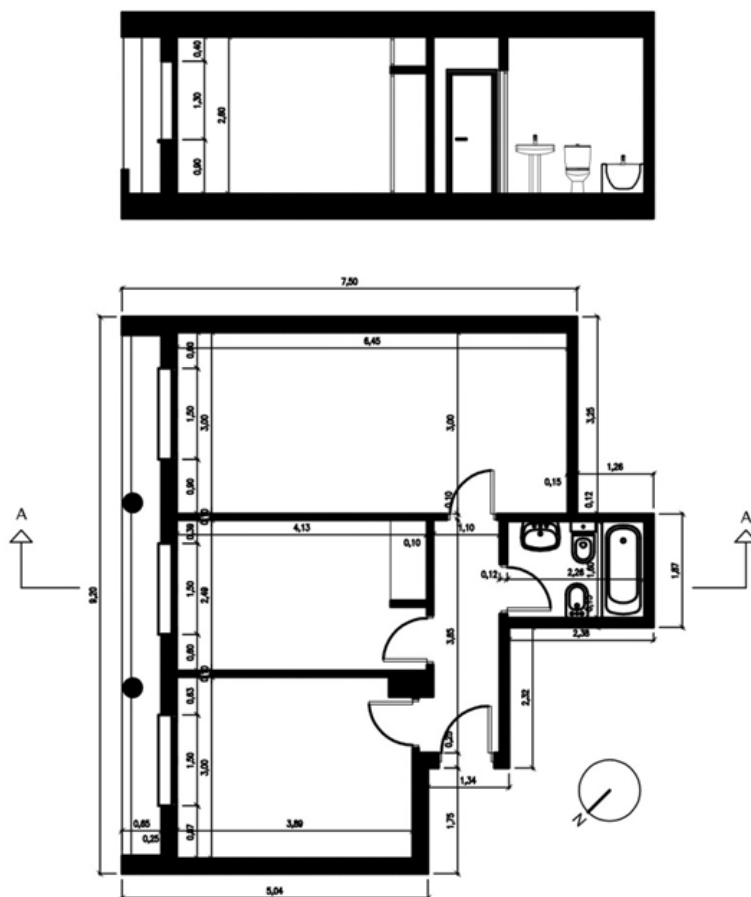


Fig. 1. Planta y sección a-a de la vivienda analizada.

TABLA III
TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES (EN °C)

	Temperatura exterior	Temperatura interior
enero	21,5	22,4
febrero	21,8	22,8
marzo	22,7	23,6
abril	24,6	25,1
mayo	25,7	26,4
junio	26,6	27,6
julio	27,0	28,1
agosto	27,1	28,0
septiembre	26,5	27,4
octubre	25,3	26,4
noviembre	23,9	24,9
diciembre	22,6	23,6
Anual	24,6	25,5

Puede llamar la atención que la temperatura media mensual interior sea del orden de 1°C más alta que la exterior; sin embargo, ello es consecuencia de la menor oscilación diaria de las temperaturas en el interior, como puede verse, por ejemplo, en la figura 2, donde se ha representado la evolución de las temperaturas exterior e interior correspondientes al mes de

abril. En cambio, como después se verá, las temperaturas interiores sí son claramente inferiores a las exteriores en el período diurno, resultando en cambio más elevadas en el período nocturno.

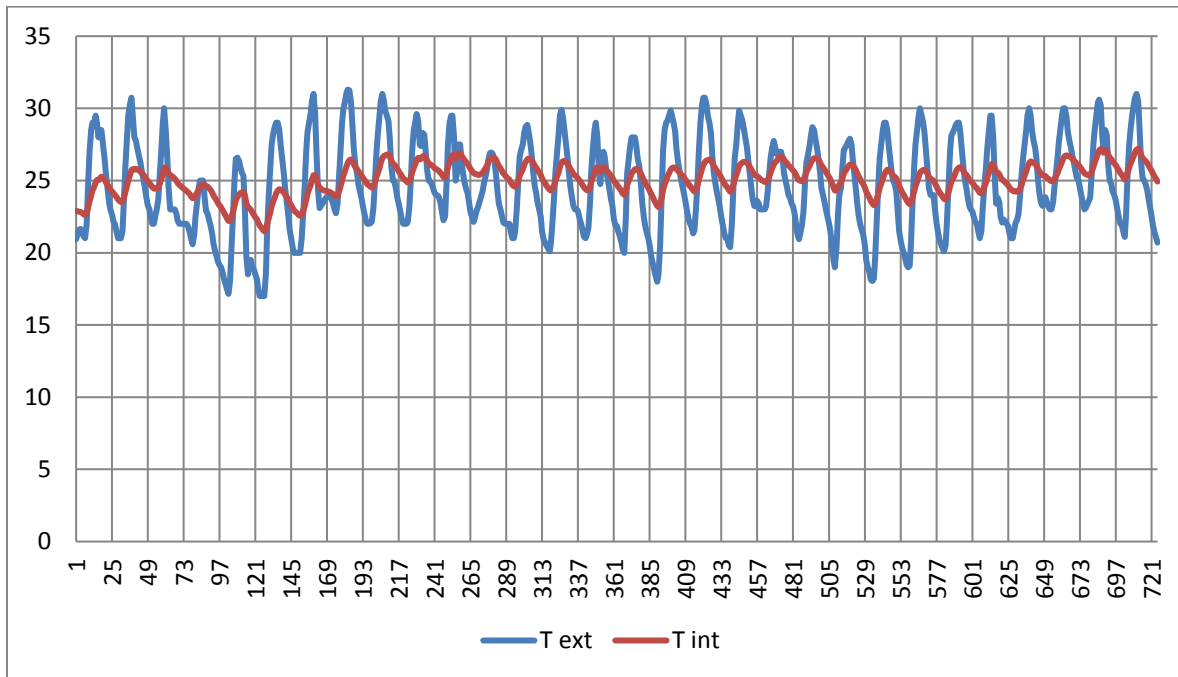


Fig. 2. Oscilación diaria de las temperaturas. (Eje horizontal: horas del mes. Eje vertical: temperaturas en °C)

A. Amortiguamiento y desfase

Se han procesado los datos de temperatura diaria exterior e interior, hora a hora, de cada uno de los meses de las estaciones de “invierno” (noviembre a abril) y “verano” (mayo a octubre),

características del Caribe. En las tablas 4a y 4b se muestran los valores medios mensuales de las temperaturas máxima y mínima exterior e interior, junto con la hora en que ambas se presentan, en media.

TABLA IV.A
VALORES MEDIOS (INVIERNO)

mes	Tmax ext	hora	Tmin ext	hora	Tmax int	hora	Tmin int	hora
NOVIEMBRE	28,7	14,0	19,8	4,3	26,0	15,8	23,7	7,3
DICIEMBRE	27,2	14,4	18,9	4,9	24,8	16,2	22,4	7,6
ENERO	25,7	14,0	18,0	4,6	23,5	16,2	21,3	7,6
FEBRERO	26,4	14,7	17,9	5,6	23,9	16,6	21,6	7,6
MARZO	27,2	14,2	18,6	5,0	24,6	16,4	22,5	7,0
ABRIL	29,3	14,0	20,7	5,3	26,1	16,5	24,0	6,9
Invierno	27,4	14,2	19,0	5,0	24,8	16,3	22,6	7,3

TABLA IV.B
VALORES MEDIOS (VERANO)

mes	Tmax ext	hora	Tmin ext	hora	Tmax int	hora	Tmin int	hora
MAYO	30,7	13,6	21,5	4,6	27,5	16,1	25,3	6,6
JUNIO	30,9	13,6	23,6	5,2	28,5	15,4	15,4	6,7
JULIO	31,6	13,9	23,7	5,0	29,1	15,5	27,2	6,7
AGOSTO	32,0	13,9	23,4	5,1	29,0	16,0	26,9	6,9
SEPTIEMBRE	31,5	13,3	22,9	5,3	28,5	16,0	26,3	7,0
OCTUBRE	29,4	14,1	21,9	5,8	27,4	16,2	25,4	7,1
Verano	31,0	13,7	22,8	5,2	28,3	15,9	24,4	6,8

De aquí obtenemos los valores de las amplitudes exterior θ_0 e interior θ_i , y de ahí el amortiguamiento μ , ya que:

$$\mu = \frac{\theta_i}{\theta_0}$$

así como el desfase ϕ entre los máximos de temperatura exterior e interior.

Los resultados, para cada uno de los meses citados, son los reflejados en las tablas 5a (invierno) y 5b (verano).

TABLA VA
AMORTIGUAMIENTO Y DESFASE EN INVIERNO

mes	θ_0 (°C)	θ_i (°C)	μ	ϕ (horas)
noviembre	4,4	1,1	0,25	1,8
diciembre	4,2	1,2	0,28	1,8
enero	3,9	1,1	0,27	2,3
febrero	4,2	1,1	0,27	2,0
marzo	4,3	1,1	0,26	2,3
abril	4,3	1,0	0,24	2,5
Invierno	4,2	1,1	0,26	2,1

TABLA VB
AMORTIGUAMIENTO Y DESFASE EN VERANO

mes	θ_0 (°C)	θ_i (°C)	μ	ϕ (horas)
mayo	4,6	1,1	0,24	2,5
junio	3,7	0,9	0,24	2,0
julio	3,9	1,0	0,25	1,6
agosto	4,3	1,0	0,24	2,1
septiembre	4,3	1,1	0,25	2,7
octubre	3,8	1,0	0,26	2,1
Verano	4,1	1,0	0,25	2,2

Como se ve en las tablas, los valores mes a mes son similares; el amortiguamiento promedio es $\mu = 0.26$ para invierno ($fa = 74\%$), y $\mu = 0.25$ en verano ($fa = 75\%$), en tanto que el desfase promedio se sitúa en 2.1 horas en invierno y 2.2 horas en verano.

Si comparamos ahora estos valores, obtenidos de las series de temperaturas, con los valores predichos por la teoría para el mismo tipo de cerramiento, encontramos que la amplitud de la onda interior y el desfase de la onda térmica están ambos en el entorno del 55% de lo predicho, mientras que el factor de amortiguación y la temperatura máxima interior (en media) se mantienen en valores similares a los predichos por la teoría.

En cuanto a la temperatura máxima calculada en el interior del cerramiento, al ser función directa del amortiguamiento, deberá ser próxima en media a la obtenida en la simulación, como así sucede, por calcularse aquélla sobre la base del valor medio anual de la temperatura máxima y de la temperatura media anual, que son ambos datos climáticos del lugar.

B. Influencia del aislamiento

El desfase obtenido de la secuencia de datos de simulación, del orden de la mitad del correspondiente al cálculo teórico, resulta claramente insuficiente desde el punto de vista de la

consecución de condiciones de confort interior en clima cálido-húmedo, lo que hace necesario plantear la incidencia real de la utilización de aislamiento en los paramentos interiores, al objeto de minimizar los efectos de la inercia térmica.

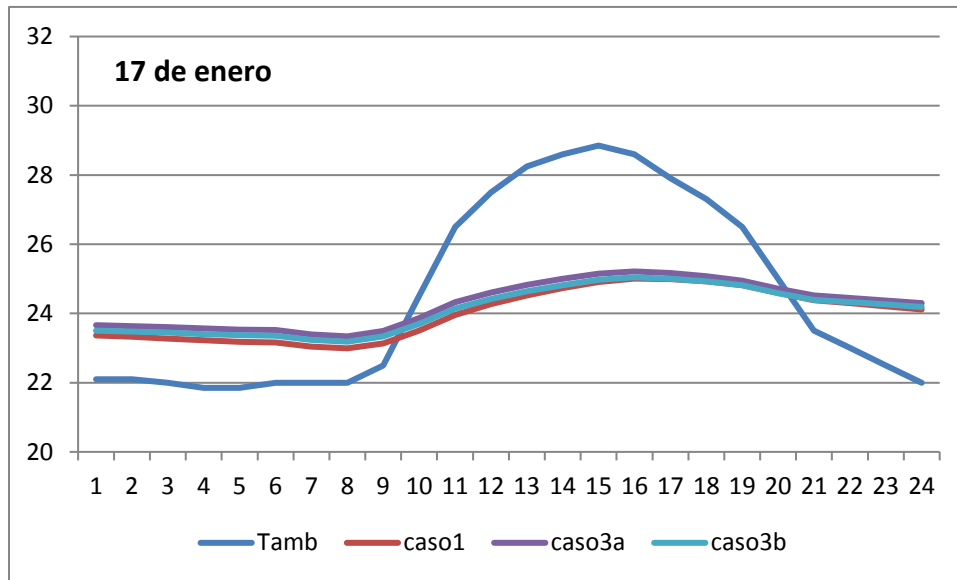
Se ha ensayado un aislamiento de 6 cm de Poliéstireno Expandido Tipo III (porexpan) aplicado al cerramiento exterior por su cara interna, y otro también de 6 cm de cartón-yeso (material de baja conductividad térmica, relativamente disponible en Cuba) a efectos de comparación, con las mismas condiciones anteriores, comparándose los resultados de la evolución de las temperaturas sin aislamiento (caso1) y con aislamiento de porexpan (caso3a) y de cartón-yeso (caso3b), ambas frente a la temperatura ambiente exterior (T_{amb}).

En la Tabla 6 se presentan los resultados de la simulación efectuada, en media para cada uno de los meses y en promedio anual. Los valores se mantienen por encima de la temperatura ambiente en media, y no se aprecia apenas variación entre las tres situaciones utilizadas.

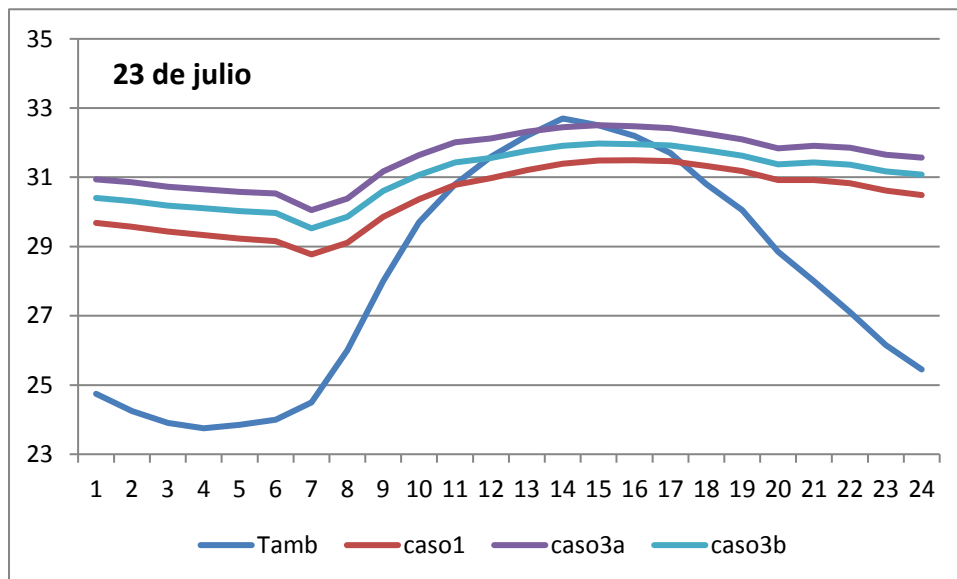
En las Figuras 3a y 3b se presenta como ejemplo la evolución de las temperaturas indicadas correspondientes a los días 17 de enero (situación de invierno) y 23 de julio (situación de verano).

TABLA VI
COMPARACIÓN DE TEMPERATURAS MEDIAS

Mes	$T_{ambiente}$	Caso 1	Caso 3a	Caso 3b
enero	21,49	22,62	23,11	22,9
febrero	21,83	23,15	23,79	23,5
marzo	22,73	24,69	25,44	25,1
abril	24,6	26,92	27,87	27,44
mayo	25,75	28,68	29,74	29,27
junio	26,65	30,23	31,37	30,86
julio	27,03	30,7	31,88	31,35
agosto	27,11	30,25	31,37	30,87
septiembre	26,51	28,95	29,89	29,47
octubre	25,33	27,2	27,97	27,62
noviembre	23,91	25,11	25,77	25,47
diciembre	22,55	23,72	24,37	24,08
Anual	24,64	26,87	27,74	27,35



(a)



(b)

Fig. 3. (a) Oscilación diaria de la temperatura interior en invierno. (b) Oscilación diaria de la temperatura interior en verano. (Eje horizontal: horas del día. Eje vertical: temperaturas en °C)

Como se ve, prácticamente se solapan las distribuciones de la temperatura interior en invierno, con valores próximos a la media, y ligeramente más altos de día.

En verano, en cambio, y aunque la diferencia entre las tres situaciones no alcanza los 2°C, los valores de temperatura con aislamiento se mantienen constantemente superiores a la temperatura ambiente interior, y su valor medio se aproxima a la temperatura máxima exterior, con una pequeña oscilación en situaciones diurna y nocturna.

V. CONCLUSIONES

En las expresiones teóricas para el cálculo del amortiguamiento y desfase de la onda térmica se considera una onda periódica de período diario (24 horas), pero con independencia de la secuencia efectiva de las temperaturas, y suponiendo además una temperatura interior constante, por lo que hay que considerar las citadas expresiones como referidas a un régimen cuasi-estacionario.

La simulación del comportamiento térmico de la vivienda en evolución libre avala la formulación teórica en lo que atañe a las características físicas del propio cerramiento. El factor de amortiguamiento puede considerarse típico de cada sistema constructivo con independencia de la secuencia de temperaturas exteriores, confirmándose así el carácter cuasi-estacionario de las citadas expresiones.

Se aprecia una notable desviación respecto de lo predicho en la teoría acerca de la amplitud de la onda interior y del desfase de la onda térmica, que resultan ser del orden de un 55% de aquéllas, al estar ambas directamente relacionadas con la secuencia real de la temperatura ambiente exterior, lo que justifica plenamente el estudio del comportamiento térmico del ambiente interior de la vivienda mediante el uso de modelos de simulación.

De los resultados obtenidos se infiere que el aislamiento no introduce prácticamente diferencia en la temperatura interior respecto a la situación previa, pero con una ligera tendencia a superar a aquélla, al menos con el sistema constructivo utilizado, por lo que parece necesario ampliar el estudio de su incidencia en las condiciones de confort de la vivienda con diferentes sistemas constructivos, siempre en el contexto del clima cálido-húmedo objeto de estudio.

Además, el estudio anterior se ha llevado a cabo sobre una vivienda con un solo cerramiento exterior (orientado al NE según Proyecto), por lo que se considera necesario realizar un estudio análogo para la misma vivienda con orientación predominantemente Sur, y secuencialmente en una vivienda independiente del tipo bohío cubano, para así considerar el efecto del aislamiento colocado en los cuatro cerramientos exteriores.

Adicionalmente, se considera necesario estudiar la influencia de los sistemas constructivos de doble hoja, con y sin aislamiento intermedio, en las condiciones del clima cálido-húmedo del Caribe, y su comparación posterior con los mismos sistemas constructivos en el clima de las Islas Canarias (España), como posible elemento de referencia.

REFERENCIAS

- Adebamowo, Mike; Ilesanmi, Adetokunbo O. (2012) Study of building adaptation in warm humid climate in Nigeria. *Open House International*. Volumen: 37 N° 4, pp: 72-80.
- Barry, R.G.; Chorley, R.J.. (1985). *Atmósfera, Tiempo y Clima*. Ediciones Omega, 4ª edición. 1985. pp. 395.
- Bedoya, C.; Neila, J. (1986). *Acondicionamiento Y Energía Solar En Arquitectura*. COAM. Madrid.
- Beltran, R. David; Castillo, Juan; Mino-Rodriguez, Isabel; Naranjo-Mendoza, Carlos; Avila, Carlos (2016) *Proceedings Of Asme 9th International Conference On Energy Sustainability*, 2015, VOL 2. ASME, ISBN:978-0-7918-5685-7.
- Chapman, A.J. (1990). *Transmision Del Calor*. Bellisco. Madrid.
- Dania G. Couret (2015). *La Arquitectura Bioclimática en Cuba*. Instituto de Arquitectura Tropical. Editorial on line.
- De Ignacio, G. (1999) *Sistemas pasivos de acondicionamiento de edificios*. Encuentro Internacional Sobre Conservación Del Patrimonio Documental Y Bibliográfico En Clima Subtropical. Santa Cruz de la Palma (I. Canarias).
- Dhaka, S., Mathur, J., & Garg, V. (2014). Effect of building envelope on thermal environmental conditions of a naturally ventilated building block in tropical climate. *Building Services Engineering Research & Technology*, 35(3), 280-295. doi:<http://dx.doi.org/10.1177/0143624413490177>
- Garcia-Fuentevilla, L.; Payan-de-Tejada-Alonso, A.; Moron-Fernandez, C. (2017) Temperature and relative humidity monitoring system in buildings. A study case of a flat in madrid. *DYNA* Volumen: 92 Número: 2 Páginas: 226-229. DOI: 10.6036/8203.
- Imam, A. K., & Banerjee, U. K. (2016). A methodology to estimate solar radiation for design of thermally efficient buildings. *Current Science* (00113891), 111(7), 1148-1149.
- INSMET Instituto de Meteorología de la República de Cuba. Enero 2016.
- Köppen, W.; *Das geographische System der Klimate*, in *Handbuch der Klimatologie*, vol. 1, Berlino, Borntraeger, 1936.
- Madhavi Indraganti.(2010) Thermal comfort in naturally ventilated apartments in summer: Findings from a field study in Hyderabad, India. *Applied Energy*. Volume 87, Issue 3, March 2010, Pages 866-883. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.08.042>.
- Markus, T. A.; Morris, E. N. (1980). *Buildings, Climate And Energy*. London ; Marshfield, Mass. : Pitman Pub., c1980. ISBN - 027300266X.
- Mba, L.; Meukam, P.; Kemajou, A. (2016) Application of artificial neural network for predicting hourly indoor air temperature and relative humidity in modern building in humid region. *Energy And Buildings* Volumen: 121 Páginas: 32-42. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.046>.

- Mona Doctor-Pingel, Hugo Lavocat & Nehaa Bhavaraju (2017) Performance of naturally ventilated buildings in a warm-humid climate: a case study of Golconde Dormitories, South India, *Architectural Science Review*, 60:3, 205-214, DOI: 10.1080/00038628.2017.1300133.
- Morales, B.; Claret, G. (2014). Temperaturas de confort e implicaciones energéticas en viviendas climatizadas mecánicamente. Estudio en clima cálido y húmedo. Tesis Doctoral. ETSI Industriales – UPM.
- Satwiko, Prasasto; Tuhari (2017). The development of hybrid longitudinal windcatcher for basement ventilation in warm humid climate. *International Journal Of Ventilation* Volumen:16 Número:1 Páginas:15-29. DOI:10.1080/14733315.2016.1252148
- Shastri, V.; Mani, M.; Tenorio, R. (2014) Impacts of modern transitions on thermal comfort in vernacular dwellings in warm-humid climate of Sugganahalli (India). *Indoor And Built Environment*. Volumen: 23, Número: 4. Páginas: 543-564. DOI: 10.1177/1420326X12461801.
- Shastri, Vivek; Mani, Monto; Tenorio, Rosangela (2014) Impacts of modern transitions on thermal comfort in vernacular dwellings in warm-humid climate of Sugganahalli (India). *Indoor And Built Environment*. Volumen: 23 Número: 4 Páginas: 543-564. DOI: 10.1177/1420326X12461801.
- Strahler, A.N.; Pellegrini, G.B.; Sauro, U.; Zanon, G. (1993). *Geografía física*, Padova. Piccin.
- Ugarte, J. (2007). Notas sobre el Trópico Americano. El Caribe. Instituto de Arquitectura Tropical. Editorial on line.
- Ugarte, J. (2011). Guía de arquitectura bioclimática. Construir en países cálidos. Instituto de Arquitectura Tropical. San José (Costa Rica).
- Ugarte, J. (2013). Guía De Arquitectura Bioclimática II. Instituto de Arquitectura Tropical. San José (Costa Rica), 2013.
- Weller, B.; Wunsch, J.; Horn, S. and Fahrion, M.S. (2014) Calculative determination of the effect of solar radiation on the building envelope. *STAHLBAU* Volumen: 83 Suplemento: 1, pp.: 323-336. DOI: 10.1002/stab.201490071
- Yáñez, G. (1982). *Energía solar, edificación y clima*. MOPU. Madrid.



Reconocimiento – NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.