

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE DISTINTAS ENVOLVENTES OPACAS EMPLEADAS EN URUGUAY

THERMAL PERFORMANCE OF OPAQUE ENVELOPES USED IN URUGUAY

Diego N. Passarella⁽¹⁾*

⁽¹⁾ Dr. Ing. en Materiales. PDU Procesos Industriales de la Madera. Universidad de la República. Tacuarembó, Uruguay

* Contacto: diego.passarella@cut.edu.uy

CÓDIGO: 4620090

Resumen

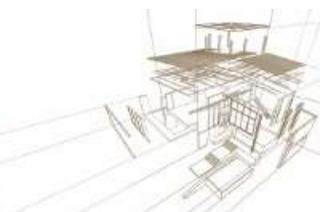
En este trabajo se analiza numéricamente el comportamiento térmico de diversas envolventes opacas (paredes) típicamente empleadas en la construcción residencial en Uruguay. En total se estudian diez envolventes opacas: tres viviendas basadas en entramado de madera con distintos tipos de fachadas ventiladas, tres paredes basadas en bloques de cemento y cuatro paredes de ladrillo de distinta tipología. Cada envolvente se modeló a través de su espesor (unidimensional) y como condiciones climáticas se consideraron los ciclos de temperatura promedio y extremos para la región norte de Uruguay (zona IIb, cálida) en verano e invierno. En el lado interior de cada pared se consideró la temperatura de confort para cada estación y se realizaron simulaciones dependientes del tiempo hasta alcanzar la respuesta representativa de cada pared a un ciclo térmico diario. Las simulaciones fueron realizadas empleando el método de diferencias finitas y aplicando condiciones de contorno de flujo en ambos extremos del dominio. Como resultados, se obtuvieron los ciclos térmicos para cada combinación de pared y condición climática en un ciclo de 24 horas. También se obtuvieron los flujos de calor incidentes y transmitidos por la pared, los cuales fueron empleados para calcular los factores de amortiguamiento, factor de retraso y consumo energético diario para mantener la condición de confort térmico interior. Los resultados obtenidos indican que las paredes de ladrillo consideradas son las que presentan mejor factor de amortiguamiento, aunque el consumo energético para mantener la temperatura de confort es similar en las paredes de ladrillo y entramado de madera con fachada ventilada.

Palabras-clave: Acondicionamiento térmico, Simulación numérica, Entramado ligero.

Abstract

The thermal behavior of opaque envelopes (walls) is numerically studied. The envelopes are representative of the ones used in housing construction in Uruguay. A total of ten opaque envelopes are analyzed: Three wood frame walls with ventilated facade, three concrete block walls and four typical brick walls where compared. Each envelope was studied along its width (one dimensional simulations). As climate conditions, thermal cycles corresponding to extreme and average summer and winter were taken into account. Temperature values representative of the northern region of Uruguay were applied. The inner side of the wall was assumed to be at comfort temperature for each season. Time dependent simulations were performed using the finite difference method up to attain a representative daily cycle response. Heat flux boundary conditions were applied at each side of the domain. As a result, the variation of temperature along the walls was obtained for each combination of envelope and climate condition. The heat fluxes were computed and values of dumping factor, thermal lag and total energy consumed to maintain the comfort temperate, were obtained. In general, brick walls present the best dumping factor, even thou wood frame with ventilated facade and brick walls require a similar amount of energy to keep comfort conditions.

Keywords: Thermal conditioning, Numerical Simulation, Wood frame



1. INTRODUCCIÓN

El noreste de Uruguay es la región que presenta indicadores más desfavorables de desarrollo social y económico en el país, Cal y otros (2012). Entre las deficiencias sistémicas de la región se encuentra el acceso a vivienda que cumplan con los estándares de confort. Dada la fuerte presencia de actividades forestales en la región y las necesidades mencionadas, en este trabajo se compara numéricamente el comportamiento de distintas envolventes utilizadas para la construcción de viviendas. En particular, se comparan envolventes de entramado de madera con fachada ventilada (EM) contra paredes típicas de construcción tradicional (T), Saez (2018) y de bloque de cemento (BC). Siendo esta última, uno de los materiales más empleados para las construcciones de bajos recursos.

2. METODOLOGÍA

En este trabajo se estudia el comportamiento de diez envolventes, sometidas a cuatro condiciones climáticas. Para cada combinación, se calculó el factor de amortiguación, el tiempo de retardo entre los máximos/mínimos aplicados en el exterior y percibidos en el interior y la energía necesaria para mantener la condición de confort. Las envolventes consideradas, las condiciones climáticas aplicadas y los métodos de cálculo, se detallan a continuación.

2.1. Envolventes Opacas Analizadas

La caracterización de las diez envolventes se realiza a través del espesor de cada una, donde capas de distintos materiales están presentes. La conformación de cada envolvente y los respectivos espesores de cada capa están resumidos en las Tablas 1 a 3, donde se agrupan en: Entramado de Madera (EM) (Tabla 1), Bloque de Cemento (BC) (Tabla 2) y Tradicionales (T) (Tabla 3). Las capas de materiales están ordenadas desde el exterior hacia el interior, de forma descendente. Los espesores están expresados en milímetros. Las envolventes EM se diferencian por la fachada que presentan, siendo la cámara ventilada y el panel estructural, el mismo para todas. Las envolventes BC se diferencian en el tamaño del bloque de cemento. Dos de las paredes T están basadas en ladrillos y dos en bloques.

Tabla 1. Envolventes de entramado de madera con fachada ventilada

Capa	Espesor [mm]		
	EM1	EM2	EM3
Tablas de madera	25	–	–
Placa cementicia	–	8	–
Pared de ladrillo*	–	–	120
Cámara de aire ventilado	25		
Tablero de madera (plywood)	12		
Lana de vidrio	90		
Cámara de aire quieto	25		
Placa de yeso	12,5		

Tabla 2. Envolventes de bloques de cemento de distinto tamaño



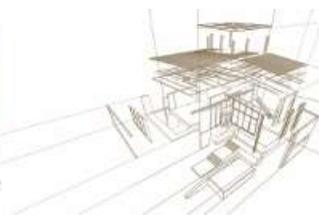
Capa	Espesor [mm]		
	BC1	BC2	BC3
Revoque	15		
Cemento	20		
Cámara de aire quieto**	80	–	–
	–	110	–
	–	–	150
Cemento	20		
Revoque	15		

Tabla 3. Envoltentes tradicionales

Capa	Espesor [mm]	
	T1	T2
Pared de ladrillo*	120	
Cámara de aire quieto	30	50
PS expandido	20	–
Revoque	10	
Pared de ladrillo*	120	
Revoque	15	
	T3	T4
Pared de ladrillo*	120	–
Cámara de aire quieto	30	–
Recubrimiento acrílico	–	10
PS expandido	20	50
Revoque	10	
Cemento	20	
Cámara de aire quieto**	80	
Cemento	20	
Revoque	15	

La respuesta térmica de los materiales de cada capa se caracteriza por la denominada difusividad térmica (α), la cual es el cociente entre la conductividad térmica (k) y el producto de la densidad por el calor específico ($\rho \cdot C_p$). Los valores de α para cada material se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Propiedades térmicas de materiales.



Material	α [m ² /s]
Yeso	1,56e-07
Aire quieto	2,14e-05
Lana de vidrio	6,25e-07
Madera	1,60e-07
Plywood	1,13e-07
Cemento	3,75e-07
Ladrillo	5,20e-07
PS expandido	7,62e-07
Acrílico	1,09e-07

En las envolventes, la pared de ladrillo* de las Tablas 1 a 3 fue considerada como una mezcla de 73% ladrillo y 27% cemento, teniendo en cuenta las juntas entre ladrillos. Por otro lado, en las envolventes con bloques, la cámara de aire quieto** fue considerada como una combinación de 57% aire y 43% cemento, por las nervaduras transversales que suelen presentar los bloques en su espesor. El resto de las capas fue considerada compuesta por 100% del correspondiente material.

2.2. Condiciones Climáticas Consideradas

La caracterización térmica de la región se realizó utilizando datos de temperaturas medias y extremas de la Zona IIb (Cálida) durante verano e invierno, Picción y otros (2009) y aplicándolas en un perfil del tipo Parson & Logan, Soto Francés y otros (2013). El perfil está descrito en las ecuaciones (1) y (2) el cual requiere de valores máximos y mínimos de temperatura y horarios de salida y puesta del sol. Los ciclos térmicos estudiados y el rango de la temperatura de confort se presentan en la Figura 1. Se consideró la condición de verano máximo, verano medio, invierno medio e invierno mínimo. Como temperatura de confort del ambiente interior, se consideró 20°C para invierno y 27°C para verano, de acuerdo con Picción y otros (2009) y Saez (2018).

$$T_{\text{día}} = (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) \sin\left(\frac{\pi(t-t_{\text{min}})}{Y+2a}\right) + T_{\text{min}} \quad (1)$$

$$T_{\text{noche}} = T_{\text{min}} + (T_{\text{atr}} - T_{\text{min}}) e^{\frac{-b(t-t_{\text{atr}})}{Z}} \quad (2)$$

donde:

- $T_{\text{día}}$ y T_{noche} son las temperatura durante el día y la noche, respectivamente
- T_{max} y T_{min} son las temperaturas máximas y mínimas registradas, respectivamente.
- t_{min} es la hora a la que se registra la temperatura mínima (amanecer)
- Y y Z son la duración del día y de la noche, respectivamente
- a es el coeficiente de retraso de la temperatura máxima
- T_{atr} es la temperatura al amanecer
- b es un coeficiente elegido para empalmar de forma continua en el punto mínimo

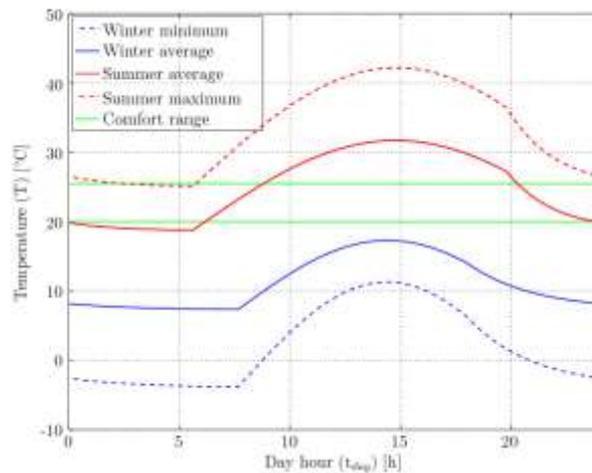
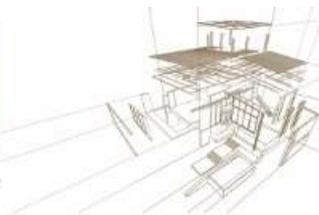


Figura 1. Ciclos térmicos considerados

2.3. Modelos

El comportamiento de las envolventes opacas fue estudiado a través de la respuesta de cada envolvente ante una secuencia de ciclos térmicos tal como los descritos en la sección 2.2. Partiendo de una condición de temperatura constante en cada envolvente, se aplicaron del orden de diez ciclos térmicos hasta que la respuesta en el interior de la pared se corroboró cíclica también. Las paredes sin fachada ventilada fueron resueltas a través de la ecuación de conducción, mientras que en el caso de la presencia de fachadas ventiladas, se incorporó un modelo específico, de acuerdo a Soto Francés (2013).

2.3.1. Conducción Térmica

La conducción térmica a través de las envolventes descritas en las tablas 2 y 3 fue resuelta a través de la ecuación de conducción (ecuación (3)), empleando condiciones de contorno de flujo en ambos extremos y tomando la temperatura exterior variable ($T_{ext}(t)$) y la de confort constante (T_{conf}) (ecuaciones (4) y (5)) en valores acordes a la estación considerada. La condición inicial de temperatura fue constante, o lineal en el caso que la temperatura exterior e interior no tuvieran un valor coincidente (ecuación (6)).

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha(x) \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \quad (3)$$

con

$$k \frac{\partial T}{\partial x} = h_{ext} (T(x, t) - T_{ext}(t)) \text{ en } x=0 \text{ y para todo } t \quad (4)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h_{inn} (T(x, t) - T_{conf}) \text{ en } x=x_f \text{ y para todo } t \quad (5)$$

$$T(x, 0) = T_0(x) \text{ en todo } x \text{ y para } t=0 \quad (6)$$

donde:

- h_{ext} es el coeficiente de transferencia de calor hacia el exterior, igual a 18,6 W/K.m², según Xing Jin y otros (2012)
- $T_{ext}(t)$ es la temperatura descrita por las ecuaciones (1) y (2)



- h_{inn} es el coeficiente de transferencia de calor hacia el exterior, igual a $8,7 \text{ W/K.m}^2$, según Xing Jin y otros (2012)
- T_{conf} es la temperatura de confort de cada estación
- $T_0(x)$ es la temperatura inicial

En este modelo, el intercambio térmico hacia ambos lados de la envolvente se impone como flujos de calor lineales con la diferencia de temperatura entre el medio (exterior o interior) y la superficie (externa o interna) de la pared (ecuaciones (4) y (5)). De esta forma, el intercambio está controlado por la diferencia de temperatura, más que la temperatura misma, siendo ésta una descripción más representativa de la realidad que la imposición de valores en los extremos.

2.3.2. Fachada Ventilada

El modelo transferencia de calor a través de la fachada ventilada fue adaptado de Soto Francés y otros (2013). En una fachada ventilada, se permite la convección de aire entre la piel exterior y la pared estructural. En ese proceso, el aire es calentado/enfriado por la fachada, el cual a su vez, circula y calienta/enfría a la pared. Para describir el proceso, es necesario calcular la evolución de la temperatura del aire en la cámara ventilada, su velocidad y los coeficientes de transferencia de calor entre las dos capas de la envolvente y la cámara de aire. El modelo utilizado se describe por las siguientes ecuaciones:

$$h_f = 0.85 \left(1.959 + 1.517(|T_f - T_a|)^{1/3} + 4/3 v_a \right) \quad (7)$$

$$h_w = 0.85 \left(1.959 + 1.517(|T_w - T_a|)^{1/3} + 4/3 v_a \right) \quad (8)$$

donde

- h_f y h_w son los coeficientes de transferencia de calor entre la cámara ventilada y la fachada y pared, respectivamente.
- T_f y T_w son las temperaturas en las superficies de la fachada y la pared que están expuestas a la cámara ventilada.
- T_a es la temperatura del aire que circula por la fachada ventilada
- v_a es la velocidad de convección del aire dentro de la fachada

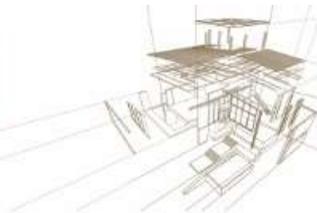
Los coeficientes h_f y h_w son usados en condiciones de contorno similares a las ecuaciones (4) y (5), pero tomando a T_a como temperatura de referencia y describiendo el intercambio entre la piel exterior y la pared estructural a través de la cámara ventilada. La velocidad de convección del aire se presenta en la ecuación (9), mientras que la evolución de la temperatura del aire, en la ecuación (10). Ésta última ecuación toma como longitud característica el espesor de la cámara, dado que el modelo describe la transferencia de calor a través de esa dirección.

$$v_a = 0.29 \sqrt{2gL \frac{|T_f - T_a|}{T_a}} \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = \frac{-v_a}{L} (T_a - T_f) \quad (10)$$

donde:

- g es la aceleración de la gravedad
- L es el espesor de la cámara ventilada



Considerar que la temperatura de la fachada (T_f) es la encargada de dictar las variaciones de temperatura y velocidad del aire, corresponde a que en este modelo, la actuación del exterior es la responsable de los cambios en el lado interior de la envolvente.

El modelo de fachada ventilada asume que en todo el espesor de la cámara ventilada, la temperatura del aire es constante.

2.4. Métodos Numéricos

El modelo, ya sea para envolventes con o sin fachada ventilada, fue resuelto por el método de diferencias finitas. Se empleó un esquema centrado en el espacio e implícito en tiempo, con una evolución temporal dada por un esquema Crank-Nicholson, Quarteroni, A. y Salieri, F. (2006). La ecuación (3) discretizada de acuerdo a los esquemas seleccionados, queda:

$$T_i^{j+1} = T_i^j + \frac{h_t}{h_x^2} \left\{ \frac{1}{2} [\alpha_{i-1/2} T_{i-1}^{j+1} - (\alpha_{i-1/2} + \alpha_{i+1/2}) T_i^{j+1} + \alpha_{i+1/2} T_{i+1}^{j+1}] + \dots \right. \\ \left. \frac{1}{2} [\alpha_{i-1/2} T_{i-1}^j - (\alpha_{i-1/2} + \alpha_{i+1/2}) T_i^j + \alpha_{i+1/2} T_{i+1}^j] \right\} \quad (11)$$

donde:

- h_t es el intervalo de la discretización temporal, tomado como $h_t = 10s$
- h_x es el intervalo de la discretización espacial, tomado como $h_x = 1$ o 2 mm, dependiendo del espesor de cada capa de material.
- i son los índices que indican la posición del nodo en el espesor de la envolvente
- j son los índices que indican la evolución temporal de la simulación.

El esquema de la ecuación (11) es un esquema implícito, por lo que la evolución temporal se resuelve con un bucle que recorre los índices desde $j=2$ ($j=1$ es la condición inicial de temperatura) hasta $j=N_t$, donde para cada tiempo se resuelve el sistema lineal:

$$A(\alpha(x)) T^{j+i} = b(T^j) \quad (12)$$

donde:

- $A(\alpha(x))$ es una matriz tridiagonal con coeficientes que dependen del valor de la difusividad térmica en cada punto del espesor de la envolvente.
- T^{j+i} es el vector de temperaturas en el tiempo $j+1$ a ser resuelto
- $b(T^j)$ es el vector de términos independientes que dependen de la temperatura en el tiempo j y de las condiciones de contorno.

Las condiciones de contorno a cada lado de la envolvente (ecuaciones (4) y (5)) quedan:

$$k \frac{-3T_0^i + 4T_1^i - T_2^i}{2h_x} = h_{ext} (T_0^i - T_{ext}(t_i)) \quad (13)$$

$$-k \frac{T_{N_x-2}^i - 4T_{N_x-1}^i + 3T_{N_x}^i}{2h_x} = h_{inn} (T_{N_x}^i - T_{conf}) \quad (14)$$

De esta forma se obtienen los valores de los extremos (T_0^i y $T_{N_x}^i$) como función de los valores en el interior de la envolvente y de ambos lados externos. Estos valores son los que son integrados en el vector $b(T)$ en el sistema lineal de la ecuación (12).

Una aplicación similar de las condiciones de contorno se realiza entre la cámara ventilada y la piel exterior o la pared portante, en el caso de envolventes con fachada ventilada.

El par de ecuaciones (13) y (14) permiten computar directamente el valor del flujo de calor que



ingresa/sale de la envolvente desde el exterior (ecuación (13)) y el equivalente en el lado interior (ecuación (14)). Estos valores son los que serán usados para evaluar el factor de amortiguamiento, el tiempo de retraso y la energía térmica consumida por cada envolvente.

El comportamiento de cada envolvente durante un ciclo diario se obtiene de la respuesta ante la aplicación de entre ocho y diez ciclos consecutivos tales como los descritos en la Figura 1. El último ciclo (día) de la simulación es el utilizado para evaluar la envolvente.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para cada combinación de envolvente (Tablas 1, 2 y 3) y condición climática (Figura 1) se obtuvieron los valores de temperatura y flujos de calor durante un ciclo diario. Como ejemplo, se presenta en la Figura 2 la evolución de temperaturas para la envolvente de fachada ventilada con piel exterior de madera (EM1), para el caso de temperaturas mínimas de invierno. En ella se observa la temperatura exterior (línea negra), la temperatura de la piel exterior de madera (línea roja), la temperatura del aire que circula por la cámara ventilada (línea verde), como las temperaturas exteriores e interiores de la pared portante de entramado de madera (líneas azules). En esa figura se observan, el efecto de amortiguación (en capas interiores de la envolvente las temperaturas son menos extremas) que toman los valores de temperatura en diversas partes de a envolvente, cómo así también el fenómeno de retardo, en el cual los máximos y mínimos se van desfasando en el tiempo.

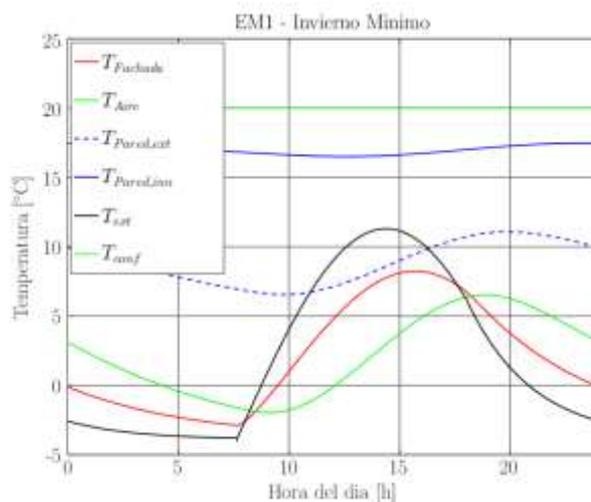


Figura 2. Ejemplo de evolución de temperaturas durante un ciclo diario

En este trabajo se trabajó con los flujos de calor (ecuaciones (4) y (5)) como valores descriptivos del comportamiento térmico, en contraposición a fijar el valor de temperatura en los extremos de la envolvente, tal como se realizan Picción y otros (2009) y Soto Francés y otros (2013). A partir de los flujos de calor se obtuvieron los valores de factor de amortiguamiento (f), tiempo de retardo (Φ) y energía térmica consumida (Q_d), tal como se presenta en Xin Jing y otros (2012). El cómputo de estos valores de detalla a continuación:

$$f = \frac{\max(q_w^{inn})}{\max(q_w^{ext})} \quad (15)$$

$$\phi = t(\max(q_w^{inn})) - t(\max(q_w^{ext})) \quad (16)$$

$$Q_d = \int q_w^{inn} dt \quad (17)$$



Donde f es el cociente entre el máximo (mínimo) flujo de calor que se manifiesta en el interior de la envolvente y el correspondiente que incide en el exterior. Los máximos se computan en estaciones estivales, mientras que los mínimos en invernales. Cuanto menor a la unidad resulte f , más amortiguación térmica presentará la envolvente. Φ es el tiempo que tarda en manifestarse el correspondiente extremo en el interior, una vez ocurrido en el exterior. Valores convenientes de Φ deben ser cercanos a 12 horas, para actuar a contra fase del momento más frío/cálido del día. Por último, la energía térmica consumida, es la integral del flujo de calor actuante en la cara interior de la envolvente. Es un valor de energía total diaria por metro cuadrado de envolvente, que debe ser entregada a (o absorbida de) ella para mantener la condición de confort. Valores negativos indican la necesidad de calefaccionar el ambiente, mientras que valores positivos, lo contrario. Es deseable que se mantenga cercano a cero, indicando que no hay que entregar/absorber energía neta durante el día.

Un resumen de los valores obtenidos de f , Φ y Q_d , para cada condición climática y envolvente, se presentan en las Tabla 5 y 6. Los resultados indican que la condición de invierno es más severa que la de verano en cuanto a la distancia de la condición de confort. El conjunto de paredes con mayor capacidad de amortiguamiento son las tradicionales, seguidas por aquellas con fachada ventilada y entramado de madera. En general, todas las envolventes presentan tiempos de retraso aceptables, a excepción de la EM3 y las tradicionales, las cuales poseen tiempos ligeramente extensos. La energía térmica necesaria por metro cuadrado de envolvente, para mantener la condición de confort durante un día, se presenta en la Tabla 6. Las envolventes más convenientes vuelven a resultar las tradicionales, con un consumo aproximadamente 20% superior por parte de las de entramado de madera. Los consumos energéticos por parte de las envolventes de bloques son cercanos al doble de las otras, demostrando la inconveniencia de su uso.

Tabla 5. Resultados de factor de amortiguamiento y retraso para las condiciones estudiadas

	Factor de amortiguamiento f [--]				Tiempo de retraso Φ [h]			
	Ver Max	Ver Med	Inv Med	Inv Min	Ver Max	Ver Med	Inv Med	Inv Min
EM1	0,48243	0,41953	0,80647	0,76682	6,4417	7,1861	8,8056	8,8333
EM2	0,48061	0,42206	0,80733	0,76812	6,4889	7,4278	9,0806	9,111
EM3	0,5647	0,43304	0,83324	0,79414	5,7333	5,5500	4,6056	4,5889
BC1	0,63537	0,57022	0,87046	0,84256	5,3028	7,8361	10,553	10,553
BC2	0,57599	0,51242	0,84323	0,81043	5,6472	7,8028	10,289	10,308
BC3	0,51586	0,45245	0,81489	0,77714	5,9889	7,7722	9,9833	10,003
T1	0,14138	0,098905	0,33212	0,29975	11,003	12,967	14,256	14,267
T2	0,14629	0,10343	0,33847	0,30651	10,736	12,700	13,958	13,972
T3	0,16179	0,11642	0,3535	0,3228	10,353	12,306	13,697	13,711
T4	0,22229	0,19023	0,37161	0,3534	7,4667	9,0222	10,578	10,592

Tabla 6. Resultados de energía térmica necesaria para mantener el confort diario



	Energía térmica consumida Q_d [kcal/m ²]			
	Ver Max	Ver Med	Inv Med	Inv Min
EM1	164,51	-50,379	-413,77	-474,45
EM2	171,23	-52,45	-415,74	-479,07
EM3	170,97	-52,32	-415,6	-478,7
BC1	325,18	-101,35	-803,96	-914,11
BC2	322,91	-100,66	-798,38	-907,77
BC3	319,57	-99,619	-790,13	-898,39
T1	137,57	-42,891	-340,15	-386,76
T2	142,14	-44,316	-351,46	-399,62
T3	155,76	-48,563	-385,14	-437,91
T4	186,51	-58,149	-461,17	-524,36

4. CONCLUSIONES

Se realizó un estudio comparado del comportamiento térmico de distintas envolventes empleando simulación numérica. Los resultados sugieren que las envolventes de entramado de madera con fachada ventilada poseen un comportamiento similar a las tradicionales, pudiéndose mejorar la demanda energética necesaria para mantener las condiciones de confort.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cal, D., Rodríguez Miranda, A., Bonino Gayoso, N. y Viejo Mandl, C. (2012). Diagnósticos y diferentes visiones sobre la dinámica socio-económica en la Región Noreste. Serie: Documentos de Trabajo de CCI N° 4, Udelar, Uruguay.

Picción, A., Camacho, M., López Salgado, Ma N. y Milicua, S. (2009). Pautas de diseño bioclimático para optimizar condiciones de confort y uso de energía en el sector residencial financiado por organismos públicos, para Uruguay, caso de clima complejo. Facultad de Arquitectura, Udelar, Uruguay.

Quarteroni, A. y Salieri, F. (2006) Scientific Computing with MATLAB and Octave. Springer (2nd edition).

Saez, S. (2018) Caracterización de envolventes opacas edilicias de construcción tradicional más utilizadas en Cooperativas de Vivienda de Montevideo, Uruguay. Análisis del perfil de sus variables termo-energetico-constructivas-economicas. Especialización en Arquitectura y Hábitat Sustentable, Universidad Nacional de La Plata, Argentina (tesis).

Soto Francés, V.M., Sarabia Escriva, E.J., Pinazo Ojer, J.M., Bannier, E., Cantavella Soler, V. y Silva Moreno, G. (2013). Modeling of ventilated facades for energy building simulation software. Energy and Buildings 65, pgs. 419-428.

Xing Jin, Xiaosong Zhang, Yiran Cao y Geng Wang (2012). Thermal performance evaluation of the wall using heat flux time lag and decrement factor. Energy and Buildings 47, pgs. 369-374.