

COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO DE UN PROTOTIPO LIVIANO EN MONTEVIDEO

A. Picción; M. Camacho; M. López Salgado; S. Milicua

Departamento de Clima y Confort en Arquitectura (DECCA)- Facultad de Arquitectura- Uruguay

Bvar Artigas 1031 Tel: +598 2 4001106 int 145

e-mail directora del proyecto: apiccion@farq.edu.uy

RESUMEN

Este artículo presenta los resultados de un período extenso de mediciones realizadas en un prototipo, sin ocupación, instalado en la ciudad de Montevideo. El objetivo es evaluar el comportamiento térmico del prototipo que está conformado con un sistema constructivo liviano de paneles sándwich compuesto por un núcleo central de poliestireno expandido revestido con láminas metálicas. **Método:** Las temperaturas y humedades relativas interiores y exteriores fueron registradas cada quince minutos; se determinaron los datos horarios de estas variables y se trataron estadísticamente. Se compararon para un mismo rango de temperatura los registros de temperatura interior y exterior. Los datos del monitoreo exterior se plotearon sobre la Carta Bioclimática de Montevideo y se analizaron posibles estrategias bioclimáticas para mejorar el comportamiento del prototipo. **Resultados:** Los datos indican importantes oscilaciones en las condiciones ambientales interiores. La radiación solar y la baja inercia térmica del sistema serían factores determinantes en la variabilidad de las temperaturas. **Conclusiones:** Las mediciones muestran la necesidad de adaptar el sistema constructivo y el diseño del prototipo a las condiciones climáticas del lugar, introduciendo estrategias pasivas que mejoren su desempeño térmico. Se analizaron estas estrategias a través de simulaciones que se presentan en otro artículo.

ABSTRACT

This paper presents the results of an extended data collect in a not occupied lightweight prototype, in Montevideo city. The aim is to assess thermal behaviour of a prototype made with polystyrene panels finished with metallic sheet. Methodology: Temperatures and humidity data have been collected every fifteen minutes for a year. Temperatures and humidity hourly data were determined and treated to analyze bioclimatic strategies so as to improve thermal performance. The data was plotted in the Bioclimatic Montevideo Chart to identify probable bioclimatic strategies. This research compared prototype temperature data with outdoor data for a specif comfort range. Results: The prototype interior temperature has a great oscillation. Solar radiation and low inertia should be determinate factors in data variability. Conclusions: It is necessary to introduce passive strategies so as to improve thermal performance of this construction system. We analyse this strategies in another paper.

1. INTRODUCCIÓN

El clima interior de los edificios, que determina las condiciones de confort y el consumo de energía, está afectado por el diseño del edificio, las propiedades termo físicas de los materiales que conforman los cerramientos y el clima exterior. El conocimiento del comportamiento térmico de los distintos sistemas constructivos y materiales cobra entonces vital importancia, especialmente en países en vías de desarrollo como Uruguay, donde la mayoría de la población no puede disponer recursos económicos para obtener condiciones de confort por medios artificiales. Por tanto, debe lograrse el máximo de confort obtenible por medio de soluciones pasivas y aprovechamiento de recursos naturales, a los efectos de minimizar el gasto en instalación y funcionamiento de sistemas artificiales de acondicionamiento, lo que supone un ahorro para el usuario y para el país.

Para lograr estos propósitos es necesario, entre otras cuestiones, que los actores involucrados en la construcción tengan conocimiento del comportamiento de los distintos sistemas constructivos utilizados en el país. Esto supone información técnica calificada sobre las propiedades de los materiales y sobre el desempeño térmico del sistema en la situación climática considerada.

En los últimos años se aplica frecuentemente sistemas constructivos no convencionales en la construcción en el Uruguay, tales como sistemas constructivos en madera, hormigón celular o metálicos, que tienen como característica similar el hecho de ser 'livianos' o de baja inercia térmica. Un porcentaje importante de estas construcciones livianas se destinan para viviendas de interés social, sector donde deben racionalizarse los costos, incluidos los de funcionamiento y mantenimiento. Los estudios analíticos sobre la experiencia realizada, más la información aportada por usuarios y técnicos y las patologías constatadas en construcciones livianas las señalan dentro de una problemática que merece ser profundice en su estudio.

Cuando en nuestro medio se trata de utilizar sistemas no convencionales, sucede que faltan datos porque en el mercado existen pocos productos que cuenten con información técnica calificada desde el punto de vista térmico, no se cuenta con un laboratorio de ensayos y además las normas térmicas específicas son aún de alcance limitado.

El trabajo realizado pretende aportar información sobre el comportamiento térmico de un prototipo, sin ocupación, realizado con un sistema constructivo liviano de paneles sándwich compuesto por un núcleo central de poliestireno expandido revestido con láminas metálicas. Este artículo presenta el análisis de los resultados para las condicionantes climáticas de la ciudad de Montevideo, en base a un período extenso de mediciones (desde diciembre de 2005 a enero de 2007).

1.1 Descripción del prototipo

El prototipo está totalmente realizado en paneles multicapa de 0.1 m de espesor, compuestos por un núcleo de poliestireno expandido y terminación de chapa de acero zincado en ambas caras, pre pintado epoxi y acabado de poliéster blanco. El núcleo de poliestireno expandido tiene una densidad de $16-20\text{kg/m}^3$ y 0.09m de espesor. El peso aproximado del prototipo es 680 kg, es decir 17 kg/m^2 . Sus dimensiones exteriores son de 3.68m x 2.33m x 2.59m de altura. Consta de una única habitación cuya pared norte tiene una ventana de aluminio de 1.20x1.20m, sin protección solar y una puerta de 0.90x2.10m conformada con el mismo tipo de panel pero de 0.05m de espesor (fig 1). Se ubicó en la azotea de la Facultad de Arquitectura, Montevideo, ($34^\circ 58'$ latitud Sur y longitud $56^\circ 12'$ longitud Oeste).

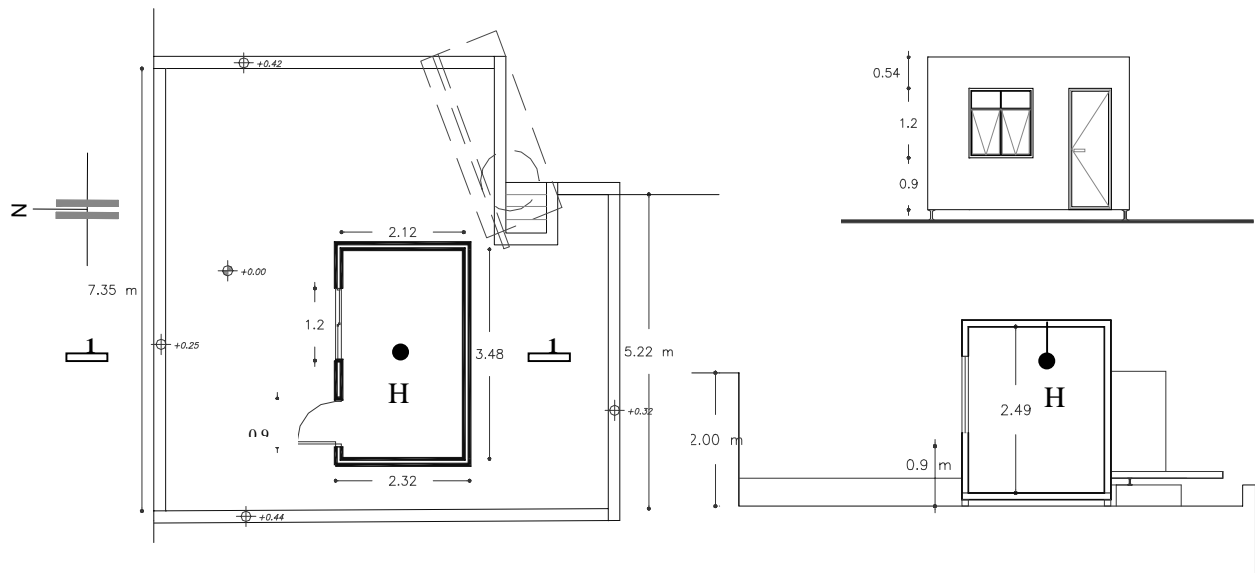


Fig 1. Planta, fachada norte y corte del prototipo y ubicación de los adquirentes de datos interior (H)

1.2 Clima de Montevideo

Montevideo es una ciudad localizada en la costa del Río de la Plata al sur del Uruguay, latitud $34^{\circ}50'$. Los promedios mensuales de temperaturas, humedad relativa e insolación presentan variaciones a lo largo del año. La temperatura media alcanza su valor máximo en enero con 23°C y el mínimo en julio con 10.5°C . La amplitud media anual es de 9°C , siendo la amplitud media mayor en enero con 10.4°C y la amplitud media menor en julio con 7.4°C . Como es lógico, el índice medio de humedad relativa mensual es mayor en invierno, superando el 80%, mientras que en el verano la humedad relativa media está en el entorno del 67%. El máximo índice de insolación se recibe en el mes de enero, 66%, y el mínimo en julio con 45%. El clima de Montevideo es templado con influencia marítima, lo que implica un período frío más extenso y comprometido y otro caluroso, bien diferenciados.

2. METODOLOGÍA

El desempeño térmico de los edificios con relación al confort térmico y al ahorro energético resulta de la interacción dinámica de tres variables: clima, edificio y usuario. En este estudio de caso se analizaron de la siguiente forma:

Clima: Los parámetros climáticos de temperatura, humedad relativa y dirección y velocidad del viento se registraron en la estación meteorológica colocada en la azotea de Facultad. La radiación solar no se midió directamente sino que se calculó a partir de valores medidos de nubosidad.

Edificio: se monitorearon los parámetros del ambiente interior (temperatura de bulbo seco, humedad relativa) del prototipo, con registradores de datos autónomos.

Usuario: el monitoreo se realizó con el prototipo desocupado para tener un mejor control sobre otras variables.

Para recabar datos ambientales de calidad se siguieron criterios que mejoran la variabilidad de los datos obtenidos en el monitoreo (Lomas, 1991). De acuerdo a estos criterios, los datos que se obtuvieron se encuentran dentro del nivel A, es decir aceptable para la validación de programas de simulación, porque el edificio a estudiar no incluye sistemas de calefacción solar o refrigeración, los datos climáticos fueron recogidos en el mismo lugar (con excepción de la nubosidad que corresponde a la estación Carrasco, la más próxima al lugar de medición) y los intervalos de tiempo de mediciones fueron menores a una hora. También cumple con algunas condiciones del nivel B en cuanto a que el prototipo se monitoreó desocupado.

Los equipos utilizados para la adquisición de datos fueron los siguientes: data loggers HOBO H8 Family, de Onset Computer Corporation, para medición de temperatura con una apreciación de $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa interior con un error de medición de $\pm 5\%$. Una Hobo Weather Station de 512Kb de memoria para medición de los parámetros exteriores, que consta de sensores de: temperatura con una precisión de $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$, humedad relativa con un error de $\pm 3\%$, velocidad con un error de ± 0.5 m/s, dirección con un error de $\pm 5^{\circ}$ y ráfagas de viento con un error de ± 0.5 m/s. Los sensores interiores se colocaron en el baricentro aproximado del prototipo y de tal manera que no reciban radiación solar directa (ver figura 1).

La adquisición de registros de los parámetros fue realizada cada 15 minutos, estando el prototipo con puerta y ventana cerradas. Se realizaron los promedios para calcular las temperaturas y humedades medias horarias. Los datos se debieron tratar estadísticamente para poder compararlos y a través de una regresión se determinó un modelo que trata de predecir la temperatura interior del prototipo en función de la temperatura exterior.

Los datos de temperatura de bulbo seco y humedad relativa exteriores fueron plotados en el Climograma de Givoni para determinar los porcentajes de horas en que es necesario o posible aplicar estrategias bioclimáticas para corregir las condiciones climáticas en el interior, utilizando el software Anaysis Bio 2.1.1 (Labee, 2004). Asimismo se determinó el porcentaje de horas que el prototipo y el exterior no permanecen dentro de un rango de temperaturas de confort.

3. RESULTADOS

Se presentan las mediciones de la temperatura interior del prototipo comparadas con las temperaturas exteriores para los dos períodos: el período caluroso y el período frío.

Debido a la gran variabilidad de los datos se realizó un tratamiento estadístico para homogeneizar y normalizar los datos, que se presenta en el punto 3.4.

3.1 Período caluroso

Dentro del período de monitoreo se presentó una gran variabilidad en el andamio de las temperaturas de bulbo seco exterior, por lo que se descartaron algunas semanas y se optó por la semana 17 que presenta datos más homogéneos con días sucesivos de temperatura exterior y condiciones de asoleamiento similares (ver gráfico 1).

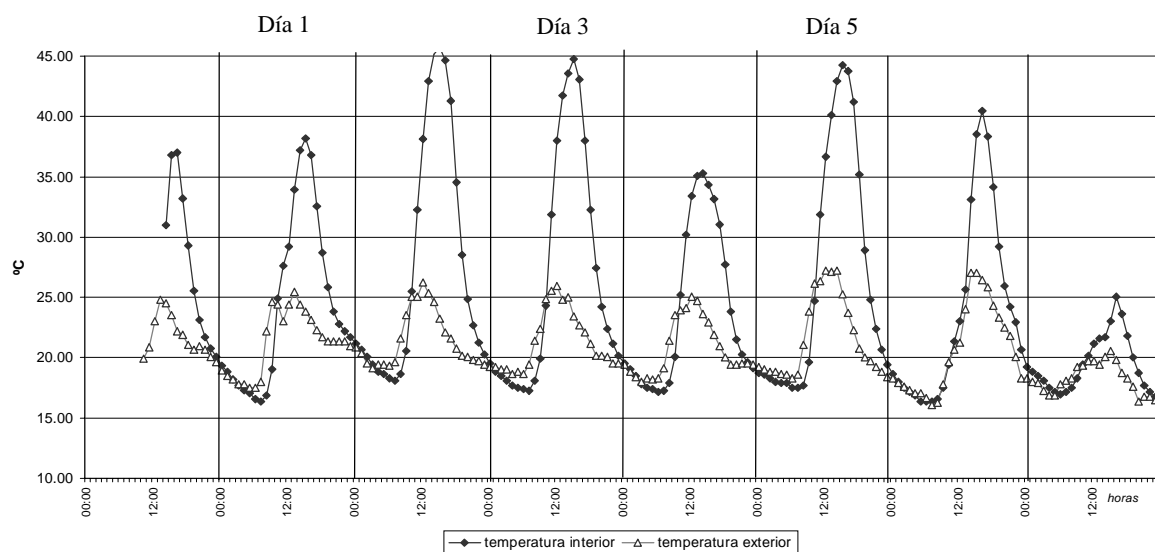


Gráfico 1. Distribución de temperaturas horarias de la semana 17 (marzo)

Del análisis de las fluctuaciones en el período caluroso se observa que el prototipo, con ventana y puerta cerradas, sin protección solar y desocupado, presentó valores de temperatura máxima interior y amplitudes muy superiores a la exterior. No se observa retardo con respecto a la temperatura exterior (ver figura 2).

fecha	ti	te	$\Delta t = ti - te$	Ai	Ae	HRi	HRe
día 1	23.83	20.75	3.08	18.13	7.09	60.97	77.74
día 2	26.61	21.55	5.06	26.76	8.94	59.02	78.16
día 3	23.68	20.59	3.09	24.10	10.93	64.1	78.59
día 4	19.47	18.26	1.21	25.08	4.19	72.13	78.32
día 5	20.51	16.31	4.20	20.40	4.38	47.47	53.67
día 6	19.12	15.47	3.65	21.99	5.44	43.81	52.97
promedio				23.72	7.03		
				Ai / Ae = 3.37			
ti = temperatura interior media diaria te = temperatura exterior media diaria Δt = diferencia promedio entre ti y te Ai = amplitud de temp. interior media diaria				Ae = amplitud de temp. exterior media diaria HRi = humedad relativa interior media diaria HRe = humedad relativa exterior media diaria AI / Ae = coeficiente entre promedios Ai y Ae			

Fig 2. Temperatura y humedad relativa interior y exterior en una semana del período caluroso

3.2 Período frío

Al igual que en el punto anterior los parámetros interiores del prototipo presentaron gran variabilidad, siendo una constante que el prototipo expuesto a la radiación solar presenta valores altos de temperatura máxima (ver gráfico 2).

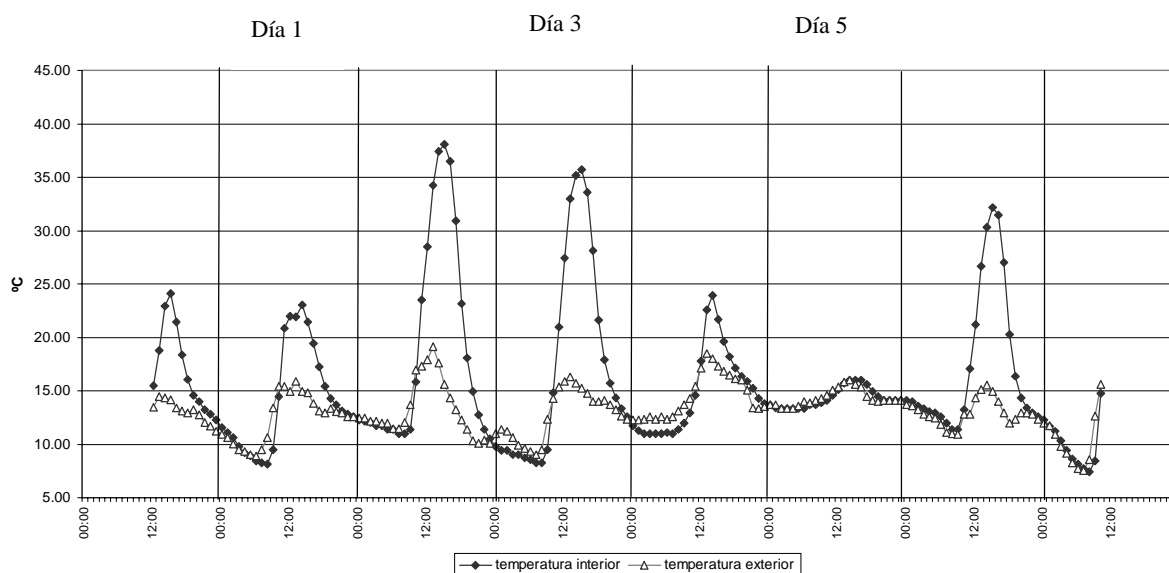


Gráfico 2. Distribución de temperaturas horarias de la semana 24 (junio)

fecha	ti	te	$\Delta t = t_i - t_e$	Ai	Ae	HRi	HRe
día 1	14.08	12.40	1.68	14.92	6.97	65.00	81.18
día 2	18.83	13.27	5.56	27.60	9.03	56.39	78.90
día 3	17.26	12.73	4.53	27.47	7.26	61.54	81.98
día 4	14.85	14.48	0.38	12.93	6.21	68.77	77.07
día 5	14.33	14.33	0.00	2.68	2.68	93.73	98.54
día 6	17.38	12.96	4.42	20.76	4.63	67.77	83.01
promedio				17.41	5.88		
				$A_i / A_e = 2.96$			

Fig 3. Temperatura y humedad relativa interior y exterior en una semana del período frío

En promedio el prototipo presenta una amplitud térmica de 17 °C mientras que en el exterior es de 6°C y no se observa un retardo con respecto a la temperatura exterior (ver figura 3).

3.3 Análisis bioclimático

3.3.1. Períodos anuales de confort y desconfort

Para ambos períodos, frío y caluroso, se adoptaron valores límite de temperaturas y humedades definidas como “confort” y se determinó en qué porcentaje de horas se cumplía con este rango. El rango de temperaturas se define entre 20 y 25°C, ampliado de 18°C a 25 °C para invierno y de 20 a 27 °C para verano y el de humedad relativa de 40 a 70% (Chauvie 2006)

El período caluroso estudiado presentó mayor cantidad de horas de confort que el calculado para el año típico de Montevideo (Picción y Milicua, 2006), aunque sus temperaturas medias fueron similares. Asimismo el período frío medido presentó mayores horas de confort que el año típico pero las temperaturas medias fueron superiores a las normales climáticas.

Tanto en el ambiente interior como en el exterior el porcentaje de horas de desconfort es alto; en el exterior el mayor porcentaje de desconfort es por frío mientras que en el interior se eleva significativamente el correspondiente a desconfort por calor (ver figura 4).

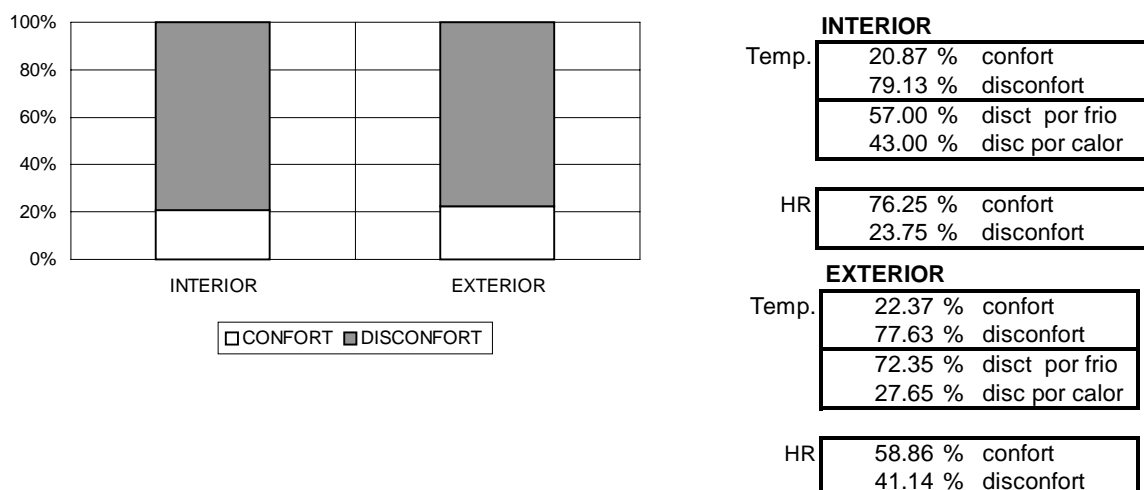


Fig 4. Porcentaje de horas dentro del rango de temperatura y humedad relativa adoptado para el prototipo y el exterior.

3.3.2. Estrategias bioclimáticas

El programa Analysis Bio 2.1.2 (Labee, 2004) permitió visualizar la distribución de los datos climáticos a lo largo del año de mediciones en la Carta bioclimática de Givoni, indicando que un 61% de las horas sería necesario aplicar alguna estrategia para poder reestablecer el confort, siendo masa térmica y sombreadamiento las de mayor porcentaje (ver figura 5).

Confort		38.60%	
Disconfort		61.40%	
calor	11.80%	ventilación	10.90%
		alta inercia p/refrescamiento	3.35%
		refres. Evap.	3.21%
		aire acondicionado	0.14%
frío	49.60%	masa térmica y sis. Solares pasivos	23.70%
		calentamiento solar pasivo	6.51%
		calentamiento artificial	19.30%
Sombreamiento		43.30%	

Fig 5. Porcentaje que se le asigna a cada estrategia bioclimática para el año de monitoreo

El concepto de confort aplicado es una aproximación ya que sólo se trabajó con un rango de temperaturas y humedades, dejando de lado las posibles acciones que el usuario puede desarrollar en los ambientes donde habita, pero es un primer dato.

3.3.3. Verificación preliminar de estrategias

A efectos de una verificación de la hipótesis planteada, se hizo otro estudio experimental del prototipo agregando masa térmica en el piso y protección solar en la ventana. En forma simultánea se monitoreó el comportamiento térmico del mismo sistema constructivo liviano pero aplicado a un modelo de mayores dimensiones y sometido a otro ritmo de cargas térmicas. Se eligió una vivienda de un dormitorio, ocupada y también con masa térmica en el piso y ventanas con protección solar. El monitoreo se realizó entre el 8 y el 13 de enero de 2007 (ver gráfico 3).

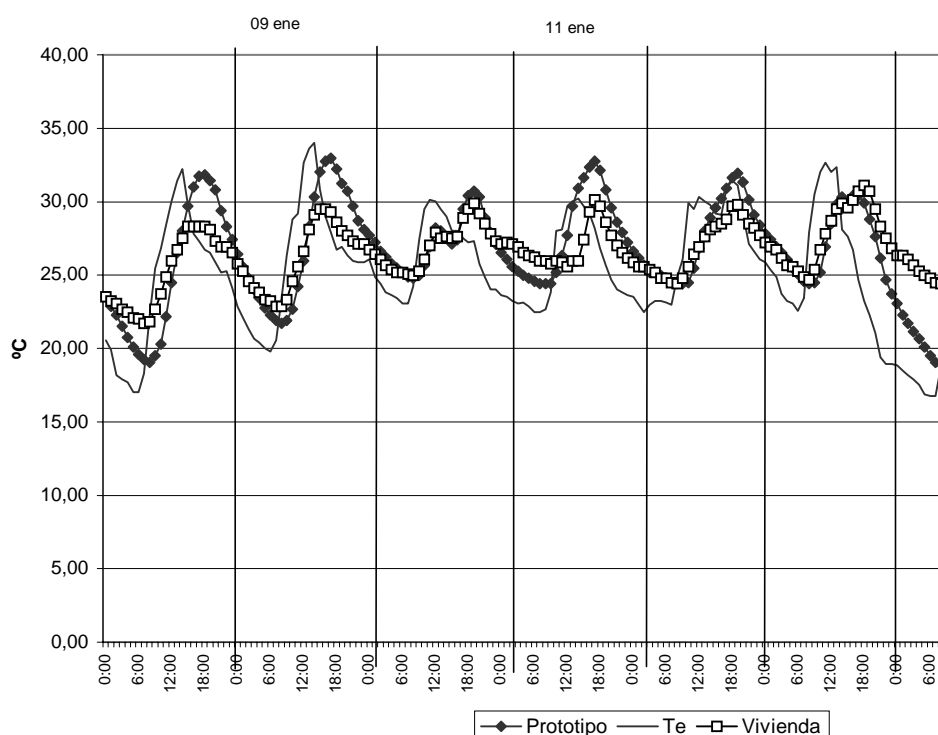


Gráfico 3. Distribución de temperaturas horarias del prototipo y la casa

El análisis de los registros obtenidos mostró un comportamiento térmico similar entre ambos modelos (prototipo y vivienda) y especialmente que las estrategias planteadas mejoran el comportamiento térmico global del sistema. Se verifican valores menores de temperatura máxima interior y por tanto menor amplitud térmica.

3.4. Tratamiento de los datos

Para poder trabajar con los datos del monitoreo se efectuó un tratamiento estadístico de los mismos utilizando:

- 1- ANVA (análisis de varianza) para tratamientos iguales y
- 2-REGRESIÓN, a partir de la temperatura interior (dependiente de la exterior), para generar un modelo que pudiera predecir a las respuestas térmicas del prototipo.

Para la utilización de la estadística paramétrica se probaron los supuestos (Snedecor y Cochran, 1984) de: 1- normalidad, 2- homogeneidad de varianza; 3-aleatoriedad y 4-independencia. Se utilizó el software Past y Excel Office 2000.

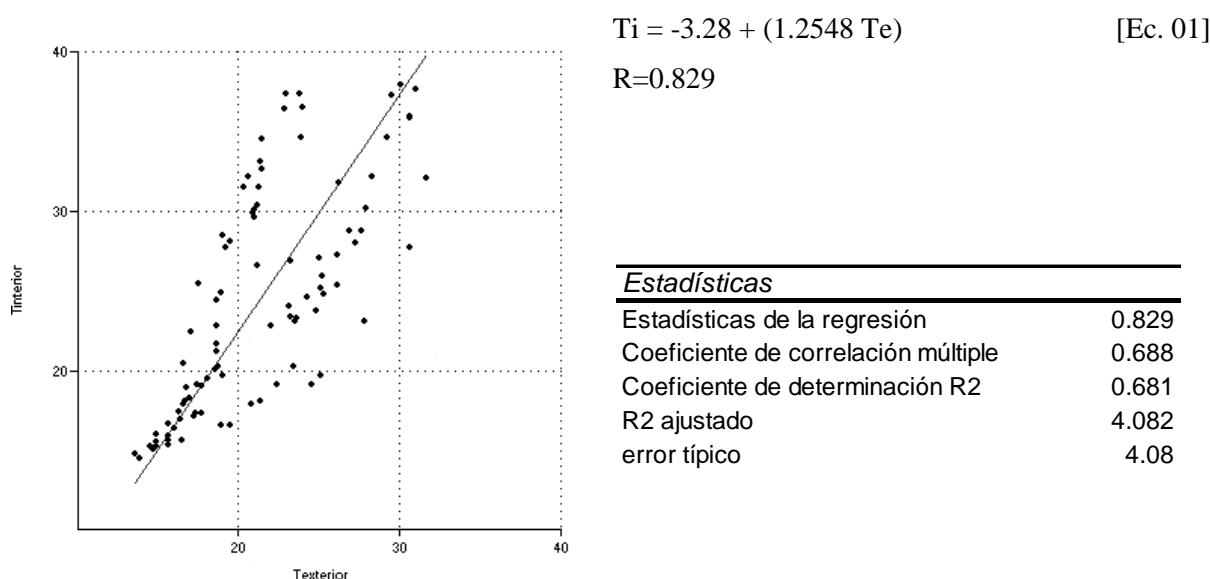


Fig. 6. Regresión de la temperatura interior

El tratamiento permitió elaborar un modelo que trata de predecir con un 95% de confianza la temperatura interior del prototipo en función de la temperatura exterior. Se muestra que la temperatura interior es dependiente de la exterior según una función lineal; la temperatura interior supera a la exterior a partir de los 15°C y este sobrecalentamiento se hace mayor a medida que las temperaturas exteriores superan los 30°C.

4. CONCLUSIONES

Como es sabido, el análisis de datos experimentales medidos en un cierto período permite detectar patrones de comportamiento repetitivos y su frecuencia. En nuestro caso, el objetivo es evaluar el comportamiento global del prototipo liviano. Se consideró las temperaturas del aire interior y exterior como las variables relevantes que intervienen en el comportamiento térmico de la edificación estudiada.

Se obtienen los valores horarios de temperatura, los valores de temperaturas mínima y máxima diarias, y los patrones de comportamiento del prototipo sometido a determinadas condiciones ambientales y de uso. La tendencia de la temperatura interior es representativa del comportamiento

térmico de un edificio desocupado, ya que las temperaturas internas máximas siguen a las temperaturas del aire exterior (Givoni, 1994).

El análisis de los datos muestra importantes oscilaciones en las condiciones ambientales interiores. Durante la noche la temperatura interior sigue ajustadamente el andamio y valores de la temperatura exterior. De día se verifican altos valores de temperatura máxima interior durante las horas de temperatura exterior alta y/o alta intensidad de radiación solar, siendo la amplitud térmica interior superior a la exterior en más de 10°C la mayor parte del tiempo. La conclusión preliminar es que la respuesta de la edificación al incremento de la temperatura exterior y/o la ganancia solar es muy rápida debido a la baja capacidad de almacenar energía del prototipo.

Se aplica una serie de estudios y métodos para evaluar el comportamiento térmico del prototipo sometido a determinadas condiciones ambientales y de uso. Este cuerpo de datos constituye información suficiente para considerar la pertinencia de la aplicación de alguna estrategia bioclimática para mejorar el comportamiento térmico del prototipo, lo que determinará un mejor comportamiento energético del mismo. Asimismo ha sido posible estimar el porcentaje de tiempo en que es necesaria o probable su aplicación, siendo la utilización de masa térmica necesaria en el 27% y de sombreado en el 43% de las horas tanto para el período caluroso como el frío.

La evaluación de desempeño térmico de las distintas alternativas propuestas también se realizó mediante simulación computacional y se presentan en otro artículo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- CHAUVIE, V. (2006) "Evaluación del desempeño térmico de sistemas constructivos no convencionales en viviendas sociales para el clima de Montevideo". Tesis de Maestría, UPM, Madrid, España.
- DIRECCIÓN DE METEOROLOGÍA, (1996) Normales Climatológicas, Uruguay.
- GIVONI, B. (1992) "Comfort, climate analysis and building design guidelines". Energy and Buildings 18/1.
- GIVONI, B. (1994) Passive and Low Energy Cooling of Buildings. Van Nostrand Reinhold, NY.
- GARDE F. ET ALL.(2004) "Implementation and experimental survey of passive design specifications used in low-cost housing under tropical climates". Energy and Buildings 36/4.
- LINDBERG R. ET ALL (2004) "Five-year data of measured weather, energy consumption and time-dependent temperature variations within different exterior wall structures". Energy and Buildings 36/6.
- LABEEE, (2004). Analysis Bio 2.1.2. Software
- LOMAS K. EPEL H. (1992) "Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs". Energy and Buildings 19.
- PICCIÓN, A y MILICUA, S. (2005). "Tratamiento de datos climáticos de localidades de Uruguay para evaluación térmica y energética de proyectos y edificios". Informe Final CSIC, Montevideo.
- PICCIÓN, A; CAMACHO, M; LÓPEZ SALGADO, M. Y MILICUA, S. (2006) "Evaluación del desempeño térmico de verano de un prototipo liviano para la situación climática de Uruguay implementación de estrategias de diseño bioclimáticas". Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente Vol. 10 .ISSN 0329-5184.
- RAICHIJK, C; GROSSI GALLEGOS, H. RIGHINI, R. (2006). Análisis de los datos de heliofanía en la República Oriental del Uruguay. Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente Vol. 10 ISSN 0329-5184.
- SNEDECOR, G. y W. COCHRAN (1984). Métodos Estadísticos. CECSA, México.
- UNIVERSIDAD DE OSLO, (2006). PAST, software.