

**ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE UNA PARED SOLAR EN CLIMA TEMPLADO****Vitale G.\*, Rodríguez J.\*, Berges I.\*, Bove I.\*\***, Flores Larsen S.\*\*\*

\* Laboratorio de Energía Solar, Departamento de Física, Centro Universitario Regional Litoral Norte, Universidad de la República, Rivera 1350, Salto, Código Postal 50.000, (Salto) Uruguay, [gvitale@unorte.edu.uy](mailto:gvitale@unorte.edu.uy)

\*\* Laboratorio de Energía Solar, Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Julio Herrera y Reissing 565, Montevideo, Código Postal 11.300, (Montevideo) Uruguay.

\*\*\* Instituto Nacional en Energía No Convencional, Universidad Nacional de Salta, Avenida Bolivia 5150, Salta, Código Postal 4.400, (Salta) Argentina.

<https://doi.org/10.34637/cies2020.2.2134>

**RESUMEN**

Las paredes solares se utilizan desde épocas remotas y en lugares donde el clima presenta una considerable amplitud térmica. Hoy se utilizan incluso para ventilación en veranos de climas templados. Sin embargo, hay pocos estudios sobre el uso de esta tecnología en climas templados o húmedos. En este trabajo se realiza un estudio experimental y numérico de un cuarto de ensayo en Uruguay con un muro acumulador de energía solar orientado al ecuador, para diferentes configuraciones de sombreado del muro con una persiana programable. Se ajustan los parámetros del sistema logrando una buena concordancia entre los datos experimentales y un modelo numérico en el programa EnergyPlus. Además, se analiza el intercambio de energía del muro con la habitación en función de la apertura o no de la persiana.

**PALABRAS CLAVE:** pared solar, simulación numérica, eficiencia energética.

**ABSTRACT**

Solar walls have been used since ancient times and in places where the climate has a considerable thermal amplitude. Today solar walls are also used for ventilation in summers of temperate climates. However, there are few studies on the use of this technology in temperate or humid climates. In this work, an experimental and numerical study of a test room in Uruguay is carried out with a solar energy accumulator wall facing to the equator, for different shading configurations of the wall with a blind. The system parameters were adjusted achieving a good agreement between the experimental data and the numerical model in the EnergyPlus software. In addition, the energy exchange of the wall with the room is analyzed depending on the opening or not of the blind.

**KEYWORDS:** solar wall, numerical simulation, energy efficiency.

## INTRODUCCIÓN

En el último informe sobre la demanda energética del Uruguay realizado por Ministerio de Industria y Energía (MIEM) y la Dirección Nacional de Energía (DNE), (DNE-MIEM, 2018) se indica que el 20,4 % de la demanda de energía en el país proviene del sector residencial, con un crecimiento promedio anual aproximado del 2 %. De la demanda residencial el 44 % de se debe a energía eléctrica, 38 % a biomasa, 13 % a gas licuado de petróleo (GLP), y el resto corresponden a otras fuentes como queroceno, fuel oil, gas natural, etc. La biomasa utilizada en las residencias corresponde básicamente a leña para la calefacción. Parte del GLP y de la energía eléctrica también se utilizan para este propósito. Por otro lado, el mismo informe arroja que el 99 % de los hogares utilizan algún mecanismo para calefaccionar su vivienda en la temporada fría. Así, una parte importante de la energía utilizada en las edificaciones de Uruguay es para calefacción.

En el año 2008 en Uruguay se aprueba una política energética con prospectiva en el largo plazo (DNE-MIEM, 2005), la cual resalta la necesidad de promover la eficiencia energética y la incorporación de fuentes de energías renovables, en particular en el sector edilicio. Un tipo de soluciones que contempla estas necesidades es el acondicionamiento térmico pasivo para viviendas. En esta línea, la implementación más utilizada desde la antigüedad es el aprovechamiento de la energía solar térmica. El muro acumulador de calor o muro solar es un sistema de calefacción solar pasivo muy antiguo que bien dimensionado, y con una buena estrategia de uso, podría contribuir en la reducción del consumo de energía tradicional para calefacción en climas templados (leña, GLP y electricidad). Este sistema fue patentado en 1881 por Edward Morse y casi 100 años después utilizado en construcciones por el ingeniero Félix Trombe y el arquitecto Jacques Michel. Esencialmente cuentan con una pared masiva capaz de acumular gran cantidad de energía, orientada al norte en el hemisferio sur (o al ecuador, en forma general). Esta masa debe ser capaz de captar gran parte de la radiación solar incidente, por ese motivo generalmente son de color negro mate. Para favorecer el efecto invernadero evitando las pérdidas de energía por radiación se utiliza una cubierta de material transparente a la irradiación solar pero opaco a la infrarroja lejana (mayor a 3 mm) separada algunos cm del muro, de tal forma que se genera una cámara entre la cubierta y el muro. Puede poseer o no ventanillas para la circulación del aire entre la cámara y la habitación a calefaccionar. En el sistema sin ventanillas la energía entregada a la habitación es la que se conduce a través del muro hacia el interior, mientras que en los sistemas con ventanillas el aire a calentar ingresa por la ventanilla inferior y el caliente sale por la superior gracias al mecanismo de termosifón natural, además de la energía conducida al interior como en el caso anterior. Cada opción de muro acumulador tiene su ventajas y desventajas, pero se diferencian esencialmente en que el muro sin ventanillas acumula más cantidad energía durante el día y la entrega durante la noche a la habitación, siendo el desfase un punto crucial en el sistema. El muro con ventanillas entrega parte de la energía enseguida que calienta la superficie ecuatorial del muro, debido a eso acumula menor cantidad de energía para la noche. Aunque dependiendo de la superficie ecuatorial disponible se podría dimensionar para que cumpla ambas funciones (Krüger et al., 2013).

Numerosas investigaciones recomiendan su uso como una alternativa efectiva para el ahorro de energía en lugares donde la calefacción es mucho más importante que la refrigeración (Sami y Gassman, 2006), descartando su uso en climas cálidos, aunque algunos autores sugieren su uso para favorecer la ventilación en veranos templados (Liu et al., 2013; Ruiz et al., 2005; entre otros). Sin embargo, existen pocos datos bibliográficos sobre su uso en clima templado, como el de Uruguay, donde la temperatura promedio mensual varía entre 11 °C y 25 °C, con temperaturas extremas de 41 °C en verano y -5 °C en invierno. Las obras para clima mediterráneo, un poco más frías que las de Uruguay, aseguran que este sistema tiene problemas de sobrecalentamiento en verano, sugiriendo estudios de estrategias para evitar la incidencia de la irradiancia solar en dicha temporada (Stazi et al., 2011; Abbassi et al., 2014; entre otros).

Además, para el estudio de diferentes configuraciones, orientaciones o analizar el comportamiento de una construcción en distintas épocas, hoy existe la alternativa de realizar un modelo numérico a partir de herramientas informáticas. Para esto se debe tener conocimiento de los parámetros de la construcción, las variables meteorológicas de la zona y un buen programa informático que permita proyectar el modelo en el tiempo y en el espacio. Muchos trabajos realizan ensayos experimentales y posteriormente ajustan un modelo numérico para investigar cómo afectan los distintos parámetros al rendimiento del sistema. Ruiz et al. (2005) realiza su propio modelo matemático para determinar la temperatura interior de la habitación de estudio a partir de resistencias térmicas, obteniendo resultados satisfactorios. Por otro lado, Sami y Gassman (2006) utiliza eQuest, una herramienta informática para modelado con énfasis en el balance de energía, y así diversos autores siguen en esa línea.

Por todo lo anterior, el objetivo de este trabajo será ensayar por un período extenso de tiempo, un cuarto experimental construido a escala 1 - 1, con un muro solar orientado al ecuador en un clima templado. A este cuarto se le anexa una persiana programable capaz de regular la incidencia de irradiancia solar en el muro acumulador y se analiza el aporte de energía del muro a la habitación en función de la apertura o no de la persiana. El sistema será modelado numéricamente y los resultados del mismo serán contrastados con los resultados experimentales.

A continuación se presenta el montaje experimental y las diferentes configuraciones de toma de datos respecto a cómo se usa la persiana. Luego se detalla el modelo numérico a utilizar con el programa EnergyPlus, los resultados obtenidos y la comparación con los datos experimentales. Por último se analizan las conclusiones y perspectivas.

### MONTAJE EXPERIMENTAL

El montaje experimental tiene lugar en la ciudad de Salto, Uruguay (Latitud = 31,28° S, Longitud = 57,92° W, Altitud = 65 m snm). Uruguay se ubica en la región de la Pampa Húmeda, al sureste de Sudamérica, cuya clasificación climática actualizada de Köppen-Geiger (Peel et al. 2007) es Cfa (clima templado-cálido, húmedo, con veranos calurosos). El montaje consiste de un recinto de 6,5 m<sup>2</sup> de base interior y 2,6 m<sup>2</sup> de altura, perfectamente orientado Norte-Sur, Este-Oeste, construido con poliestireno expandido de 10 cm de espesor en toda la envolvente menos la cara norte la cual limita con la pared de adobe. En la pared norte se construye una viga semi enterrada de hormigón ciclópeo de 15 x 30 cm de base y 2 m de largo, aislada con poliestireno expandido del ambiente exterior y del suelo. Sobre ella se monta una pared de adobe negro de 30 cm de espesor y 4,6 m<sup>2</sup> de superficie. Los ladrillos de adobe en Uruguay consisten en una mezcla de barro con tierra negra, cáscara de arroz y estiércol de caballo, que son secados a la intemperie por dos semanas o más dependiendo las condiciones climáticas. Posteriormente pasarían al horno de secado para convertirse en ladrillos, pero en este caso se trabaja con el adobe sin hornear, por eso su color negro (ver Fig. 1). La densidad promedio de los ladrillos de adobe es de aproximadamente 1300 kg/m<sup>3</sup>. El dispositivo experimental además cuenta con un recinto exterior al anterior, con el objetivo de protección, de 15,7 m<sup>2</sup> construido básicamente con una envolvente de materiales livianos como se muestra en la Figura 1. En la cara norte del sistema, 5 cm frente a la pared de adobe, se coloca una cubierta transparente de vidrio común de 5.9 mm de espesor formando así una cámara de aire hermética de 0,30 m<sup>3</sup>. Continuando hacia el norte se coloca una persiana enrollable de PVC de 2 cm de espesor, hueca, con un sistema de apertura-cierre programable. El vidrio se fija a la viga con marcos de aluminio, cubriendo las juntas con tiras de caucho y silicona.



Fig. 1. Montaje experimental.

En el dispositivo experimental se monta un sistema de medidas controladas por un adquisidor de datos DataTaker DT85, en el que se instalaron 25 sensores de temperatura y 2 de irradiancia solar. Los sensores de temperatura son sensores del tipo PT1000 montados, ajustados y calibrados en el laboratorio con una incertidumbre menor a 0,3 °C, 16 de ellos miden temperatura de superficie y 9 temperatura de aire. Los sensores de irradiancia son LI-COR modelo Li-200 instalados en plano vertical en la pared norte, uno delante y otro detrás del vidrio como se puede apreciar en la Figura 1. Todas las mediciones se toman de forma sincronizada, cada 20 s, y se registra cada minuto la media de 3 lecturas consecutivas. Además de la instrumentación montada en el dispositivo, se cuenta con medidas de irradiancia global y difusa en plano horizontal, y directa en incidencia normal, provenientes de un seguidor solar SOLYS2 con dos CMP10 y un CHMP1 marca Kipp & Zonen, que son medidas permanentes del laboratorio, adquiridas en la misma frecuencia temporal. Todos los radiómetros son calibrados bianualmente con el estándar secundario del laboratorio (KZ CMP22 calibrado en el World Radiation Center con trazabilidad a la referencia radiométrica mundial). Además, se tiene medidas climáticas de una estación Campbell, próxima al dispositivo experimental. Esta estación cuenta con un adquisidor modelo CR1000, sensor de temperatura y humedad relativa modelo CS215, sensor de rapidez y dirección del viento CS03002, sensor de precipitaciones TE525-LC, y sensor de presión atmosférica CS100. Los datos de la estación son de frecuencia minutal y se encuentran disponibles en la base de datos del laboratorio.

MODELO NUMÉRICO

Se construye un plano en tres dimensiones en el programa SketchUp compuesto por tres zonas térmicas como se ilustra en la Fig. 2 (vista de arriba): (A) recinto correspondiente a la Habitación, (B), recinto entre el muro de adobe y la cubierta de vidrio correspondiente al Recinto Norte y (C) espacio entre los recintos correspondiente al Local Envolverte.

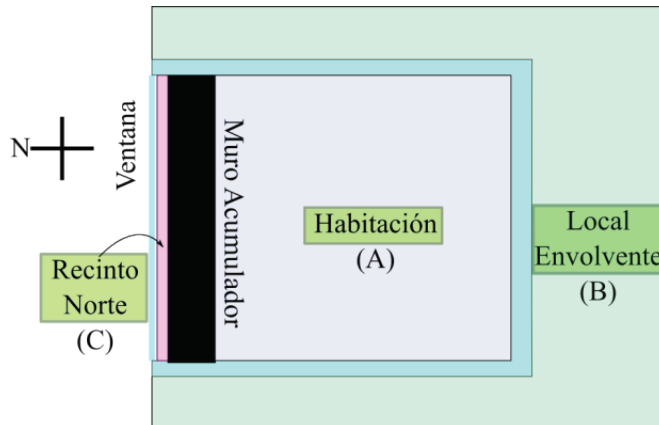


Fig. 2. Zonas térmicas del modelo numérico.

Luego, dicho modelo se exporta al programa EnergyPlus donde se cargaran las características constructivas de los cerramientos. Para la cubierta de vidrio, de 5,90 mm de espesor, se utiliza una transmitancia en incidencia normal de 0,80 y un índice de refracción de 1,53. Dichas propiedades se estimaron a partir de los datos experimentales de irradiancia solar en plano vertical en Vitale et al. (2019). El resto de las propiedades termo-físicas de los materiales fueron ajustadas en base a valores dados por las referencias Incropera y De Witt (1999) y CIBSE (2006), como se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades termo-físicas de materiales.

Material	Adobe	Poliestireno	Zinc	OSB	Hormigón
Conductividad térmica (W/(m.K))	1,5	0,055	45	0,13	1,3
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1300	15	7800	650	2000
Calor específico (J/(Kg.K))	1800	1450	480	1800	1000
Absortancia solar	0,9	0,9	0,05	0,8	0,9
Emisividad	0,9	0,2	0,55	0,8	0,9

Para la persiana se considera una resistencia térmica de 0,83 m<sup>2</sup>.K/W, una absortancia térmica de 0,4 y una emisividad de 0,94. Para el caudal de aire debido a infiltraciones q (m<sup>3</sup>/s) se utilizó el modelo Sherman y Modera (1986), esto es:

$$q = \frac{A_L}{1000} \sqrt{C_s |\Delta t| + C_w v^2} \quad (1)$$

en donde A<sub>L</sub> (cm<sup>2</sup>) es el área efectiva de huecos a una diferencia de presión de 4 Pa, C<sub>s</sub> y C<sub>w</sub> son coeficientes que dependen de la implantación y la altura del edificio, Δt (°C) es la diferencia de temperatura entre el aire exterior y el interior, y v (m/s): la rapidez del viento a diez metros de altura. Para determinar el área efectiva de huecos se ensaya el recinto con un sistema Blower Door, de acuerdo a la norma ISO 9972:2015 (ISO, 2015). A través de este ensayo se estima un área efectiva de huecos de 1120 cm<sup>2</sup> para la zona B, las otras zonas se consideraron herméticas, es decir, A<sub>L</sub> = 0 cm<sup>2</sup>. Para el coeficiente C<sub>s</sub> se utiliza un valor de 1,45 x 10<sup>-4</sup> y para el coeficiente C<sub>w</sub> un valor de 1,74 x 10<sup>-4</sup> (ASHRAE, 2010). Para la reflectividad del suelo se utiliza un valor de 0,25, dado para el pasto (ver Fig. 1).

El dispositivo se ensaya a lo largo de los dos años de toma de datos (2017 y 2018) de cuatro formas distintas según el uso de la persiana: (I) sin persiana, (II) con persiana durante el día, (III) con persiana durante la noche, y (IV) con persiana todo el día. El uso de la persiana en el modelo se controla por horarios. Para el caso (II) la persiana se cierra a las 7:00 y se abre a las 19:00. Para el caso (III) se tienen dos casos: (a) la persiana se cierra a las 19:30 y se abre a las 8:30, y (b) la persiana se cierra a las 17:30 y se abre a las 6:30. De los dos años de datos se seleccionan diez secuencias diferentes, el periodo y la configuración de la persiana de cada secuencia se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Secuencias.

Secuencia	Configuración	Período de simulación			Energía diaria media intercambiada por el muro con la habitación (Wh/m <sup>2</sup> )		
		Inicio	Fin	# de días	Entregada	Absorbida	Total
1	I	01. ene. 2017	02. feb. 2017	32	134.5	-128.3	6.2
2	I	28. mar. 2017	23. abr. 2017	26	217.2	-103	114.2
3	I	24. jun. 2017	11. jul. 2017	17	175	-76.8	98.1
4	I	18. sep. 2018	9. dic. 2018	82	407.8	-308.4	99.4
5	II	10. mar. 2018	22. abr. 2018	43	121.7	-200.6	-78.9
6	III-a	9. feb. 2017	2. mar. 2017	21	210.9	-120.5	90.4
7	III-a	16. may. 2017	21. jun. 2017	36	214.6	-92.4	122.2
8	III-b	24. may. 2018	12. jul. 2018	49	264.2	-141.4	122.8
9	IV	16. feb. 2018	7. mar. 2018	19	106.8	-178.5	-71.6
10	IV	2. may. 2018	22. may. 2018	20	65.5	-66.5	-1.1

Para que el modelo sea independiente de las condiciones previas al inicio (desconocidas) las secuencias se simulan 5 veces de forma consecutiva y al seleccionar los periodos se cuida que las condiciones de temperatura y nubosidad al inicio y al final de cada secuencia sean similares.

## RESULTADOS

En la tabla 2 se observa la energía intercambiada por el muro con la habitación (promedio diario), tanto la entregada, la absorbida, como el total diario, para cada secuencia. Se observa que cuando la persiana está cerrada solo durante el día (configuración II) el aporte del muro es negativo, mientras que cuando está cerrada solo durante la noche (configuración III) el aporte es netamente positivo. Cuando la persiana está abierta todo el tiempo (configuración I) hay un aporte neto, aunque depende del clima exterior. Algo similar ocurre con la persiana siempre cerrada (configuración IV) donde el intercambio depende del clima exterior, pero en este caso el saldo neto es negativo. Debido a la baja conductividad del muro de adobe, la cara a la habitación no sufre grandes variaciones de temperatura, funcionando así también como muro estabilizador.

Para evaluar el desempeño del modelo en EnergyPlus se determina, para cada secuencia y para cada zona (A, B y C), la desviación media (*Mean Bias Deviation* - MBD) y el desvío cuadrático medio (*Root Mean Square Deviation* - RMSD) como se muestra en las ecuaciones siguientes:

$$MBD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{T}_i - T_i), rMBD = \frac{MBD}{T_{max} - T_{min}} \quad (2)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{T}_i - T_i)^2}, rRMSD = \frac{RMSD}{T_{max} - T_{min}} \quad (3)$$

donde  $T_i$  es la temperatura experimental,  $\hat{T}_i$  es la temperatura dada por el modelo en EnergyPlus, y  $n$  es la cantidad de datos (horas) de cada secuencia. Es importante notar que las temperaturas de las zonas presentan distintos grados de variabilidad y no es lo mismo un valor de RMSD de 1 °C asociado a una variabilidad de 10 °C que el mismo valor de RMSD asociado a una variación 40 °C. Por este motivo, se relativizaron los indicadores dados MBD y RMSD para cada secuencia, dividiéndolos por la diferencia entre la máxima y la mínima temperatura experimental ( $T_{max} - T_{min}$ ) de una determinada serie de datos. El cálculo de estos indicadores relativizados, rMBD y rRMD, también se muestra en las Ecs. (2) y (3).

Para el cálculo de los indicadores no se tiene en cuenta los primeros cinco días de cada secuencia. En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos. La zona Recinto Norte presenta la mayor variabilidad exhibiendo valores de la diferencia ( $T_{max} - T_{min}$ ) para las diferentes series entre 25,3 °C y 61,2 °C, le sigue la zona Local Envoltante con diferencias ( $T_{max} - T_{min}$ ) entre 24,6 °C y 38,7 °C, y por último la zona Habitación con diferencias ( $T_{max} - T_{min}$ ) entre 11,6 °C y 26,4 °C. La alta variabilidad en el Recinto Norte está marcada porque en algunas series las medidas son en días claros de invierno, llegando a altas temperaturas debido a la radiación durante el día, y bajas temperaturas durante la noche; además, en otras series dicho recinto está cubierto por una persiana, haciendo que la variación de temperatura esté altamente amortiguada. La temperatura en el Local Envoltante acompaña bastante la temperatura ambiente, aumentando sensiblemente cuando recibe radiación, sobre todo en verano. Por último, en la Habitación, si



bien gracias al muro solar se logra evitar bajas temperaturas dentro de la misma, si en verano se usa sin persiana, se llega a temperaturas muy superiores a las de confort.

Tabla 3. Indicadores y variabilidad para cada secuencia.

Secuencia	Zona	RMSD (°C)	rRMSD (%)	MBD (°C)	rMBD (%)	T <sub>max</sub> -T <sub>min</sub> (°C)
1	Habitación	0,8	6,5 %	-0,4	-3,8 %	11,6
	Recinto Norte	1,4	4,3 %	-1,1	-3,4 %	33,5
	Local Envolverte	0,9	2,8 %	-0,2	-0,6 %	33,2
2	Habitación	2,0	11,5 %	-1,7	-9,8 %	17,2
	Recinto Norte	5,9	10,6 %	-5,2	-9,3 %	55,7
	Local Envolverte	2,4	7,2 %	-0,6	-1,9 %	34,1
3	Habitación	2,5	17,4 %	-1,6	-11,3 %	14,4
	Recinto Norte	3,2	5,6 %	-2,0	-3,5 %	56,9
	Local Envolverte	1,5	6,1 %	-0,4	-1,5 %	24,6
4	Habitación	1,5	7,1 %	-0,2	-1,1 %	20,0
	Recinto Norte	3,7	7,9 %	-3,2	-6,8 %	47,4
	Local Envolverte	2,0	5,2 %	0,0	0,0 %	38,0
5	Habitación	1,5	8,3 %	0,6	3,5 %	17,9
	Recinto Norte	1,7	5,1 %	-0,9	-2,6 %	33,6
	Local Envolverte	2,4	6,3 %	-0,7	-1,9 %	38,7
6	Habitación	2,3	16,2 %	2,1	14,6 %	14,1
	Recinto Norte	2,8	6,9 %	-1,2	-3,0 %	41,6
	Local Envolverte	2,1	7,5 %	-0,4	-1,3 %	27,7
7	Habitación	2,7	14,8 %	-2,0	-10,9 %	18,3
	Recinto Norte	4,5	7,5 %	-3,4	-5,6 %	60,1
	Local Envolverte	1,6	4,9 %	-0,1	-0,2 %	32,9
8	Habitación	2,7	11,3 %	-1,7	-7,0 %	24,1
	Recinto Norte	3,4	5,6 %	-1,9	-3,4 %	61,2
	Local Envolverte	1,7	4,4 %	0,0	0,1 %	38,3
9	Habitación	2,0	7,6 %	0,5	1,7 %	26,4
	Recinto Norte	2,1	5,4 %	-1,0	-2,5 %	38,1
	Local Envolverte	2,5	5,7 %	-0,5	-1,1 %	43,5
10	Habitación	1,1	8,0 %	0,5	3,6 %	13,4
	Recinto Norte	1,6	6,2 %	-0,6	-2,3 %	25,3
	Local Envolverte	1,9	7,2 %	0,4	1,4 %	27,0

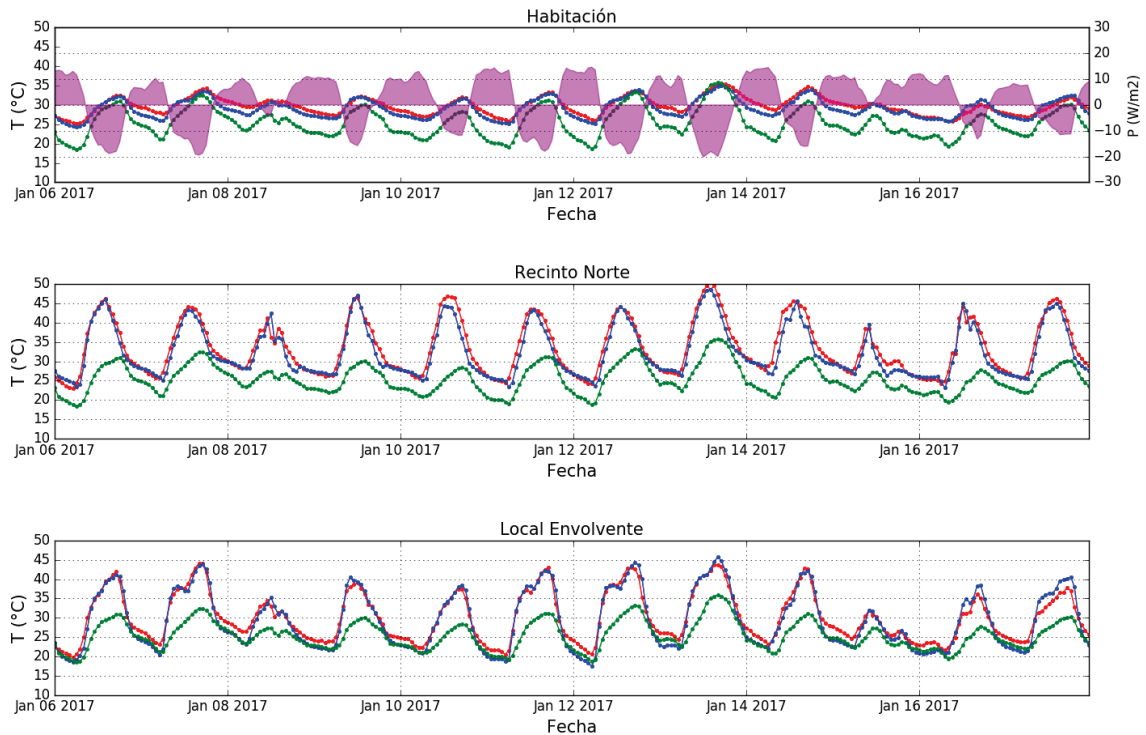


Fig. 3. Temperatura en función del tiempo para un período de 12 días de la secuencia 1 (sin persiana). La curva roja representa los datos horarios experimentales, la azul los datos modelados, y la verde la temperatura ambiente exterior. En la habitación se muestra en magenta la potencia intercambiada por el muro.

En la Fig. 3 se muestran los datos de temperatura teóricos y experimentales para 12 días correspondientes a la secuencia 1 (sin persiana), y en la Fig. 4 se muestran los datos de temperatura teóricos y experimentales para 12 días correspondiente la secuencia 5 (persiana durante el día).

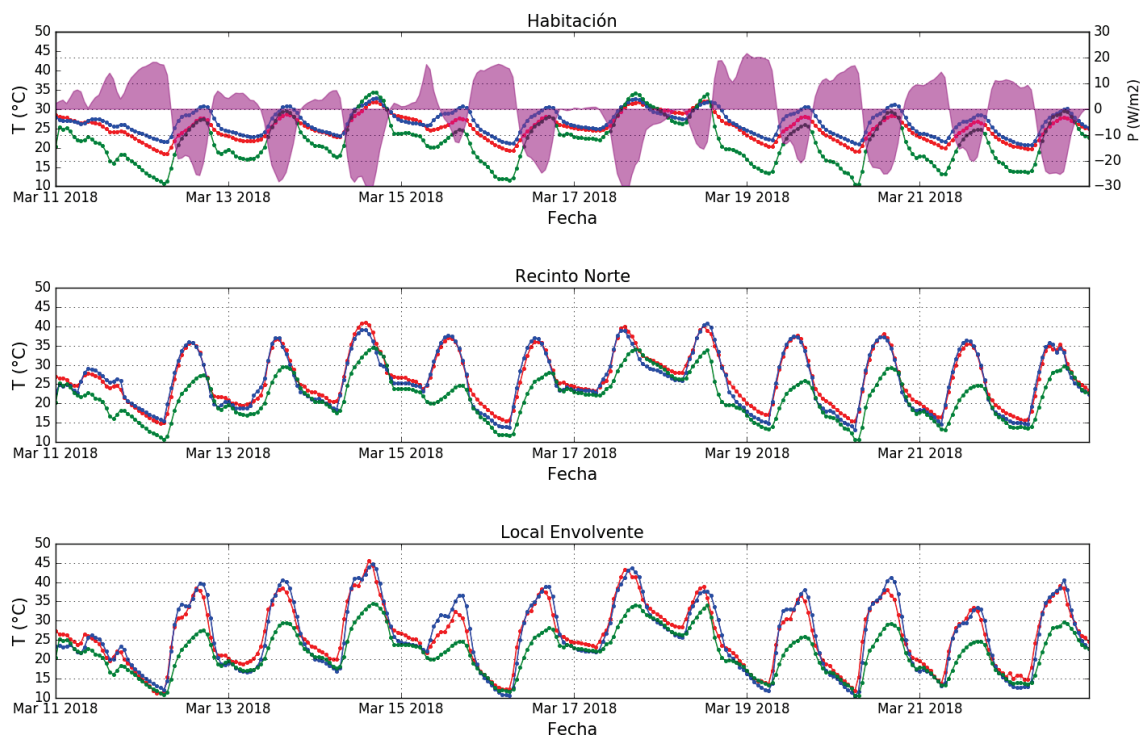


Fig. 4. Temperatura en función del tiempo para un período de 12 días de la secuencia 5 (persiana durante el día). La curva roja representa los datos horarios experimentales, la azul los datos modelados, y la verde la temperatura ambiente exterior. En la habitación se muestra en magenta la potencia intercambiada por el muro.

Las secuencias 1, 4, 5, 9 y 10 presentan un muy buen nivel de concordancia entre datos teóricos y experimentales con valores de rRMSD entre 2,8 % y 8,3 % y valores de rMBD entre -6,8 % y 3,6 %. Dichas secuencias representan el 57 % de los datos experimentales. Las secuencias restantes 2, 3, 6, 7 y 8 presentan un buen nivel de concordancia en las zonas B y C, con rRMSD entre 4,5 % y 10,6 % y rMBD entre -9,3 %, y 0,1 % pero en la zona A la concordancia no es tan buena presentando valores de rRMSD entre 11,3 % y 17,4 % y valores de rMBD entre -11,3 % y 14,6 %.

## CONCLUSIONES

Se logra construir un cuarto de ensayo con una pared solar y una persiana programable, y se lo equipa con sensores de temperatura e irradiancia solar en plano vertical. Se toman medidas durante dos años consecutivos en cuatro configuraciones diferentes del sistema, en cada una de ellas se programa la persiana para que cubra la pared solar en distintos momentos del día. A partir de los dos años de medida se seleccionan 9 secuencias donde cada configuración se encuentra representada por redundancia. Se simulan las secuencias en EnergyPlus utilizando algunos parámetros determinados a partir de los datos experimentales y ajustando el resto a partir de referencias.

Los resultados predichos por este programa ajustan muy bien a los datos experimentales, siendo el mejor ajuste para la habitación del 6,5 %, 4,3 % para el local envolvente y 2,8 % para el recinto norte. Todas ellas correspondientes a la secuencia 1 (sin persiana). Una posible forma de mejorar aún más el ajuste numérico, es dada la variabilidad constructiva del adobe en las distintas regiones, calcular los parámetros termo físicos usados en la modelación como la absorptancia solar, emisividad infrarroja, conductividad térmica y calor específico del adobe a partir de los datos experimentales. En este trabajo, dichos parámetros fueron obtenidos de tablas.

Se observa que una persiana frente a un muro acumulador contribuye a regular los aportes y pérdidas de energía al muro, lo que se traduce en diferentes intercambios de energía con la habitación en función de la posición de la persiana.

A partir de este modelo mejorado y usando el año meteorológico típico (Alonso-Suárez et al., 2016), se piensa realizar un estudio para determinar que configuración (material, espesor) se ajusta mejor a un clima templado como el de Uruguay. Además, se puede optimizar su manejo con el uso de la cortina, aumentando su eficiencia en la temporada fría y minimizando sus contribuciones en la temporada calurosa.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Agencia Nacional de Investigación en Innovación (ANII), Uruguay, por el apoyo financiero a través de los proyectos FSE 2013 10649 y FSE 2017 1144779.

## REFERENCIAS

Abbassi, F., Dimassi, N., Dehmani, L. (2014). Energetic study of a Trombe wall system under different Tunisian building configurations. *Energy and Buildings*, 80, 302–308.

Alonso-Suárez, R., Bidegain, M., Abal, G., Modernell, P. (2016). Año Meteorológico Típico para Aplicaciones de Energía Solar (AMTUes): series horarias típicas para 5 sitios del Uruguay. Memoria Técnica del LES/UdelaR, versión 2.4, (junio de 2016). Disponible en [http://les.edu.uy/wp-content/uploads/2016/06/MT\\_1-2\\_AMTUes\\_final.pdf](http://les.edu.uy/wp-content/uploads/2016/06/MT_1-2_AMTUes_final.pdf)

CIBSE (2006). CIBSE Guide A: Environmental Desing. 7ta edición. Londres, Inglaterra: Chartered Insitution of Building Services Enginners.

DNE-MIEM (2005). Políticas Energéticas 2005 – 2030. Ministerio de Industria Energía y Minería - Dirección Nacional de Energía, Política energética y energía solar. Disponible en <http://www.energiasolar.gub.uy/>

DNE-MIEM (2018), Prospectiva de la demanda Energética: 2018, Ministerio de Industria, Energía y Minería - Dirección Nacional de Energía, Informe anual. Disponible en <https://observatorio.miem.gub.uy/>

Incropera, F., De Witt, D. (1999). Fundamentos de transferencia de calor. 4ta ed. Ed Pretince Hall, México.

ISO 9972 (2015). Thermal performance of buildings: determination of the air permeability of buildings, fan pressurization method. ISO Standar 9972. Geneva: International Organization of Standarization.



Krüger, E., Suzuki, E., Matoski, A. (2013). Evaluation of a Trombe wall system in a subtropical location. *Energy and Buildings*, 66, 364–372.

Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A. (2007). Update world map of the köppen-geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11, 1633-1644.

Ruiz, Á., Salmerón, J.M., Sánchez, F., González, R., Álvarez, S. (2005). A calculation model for Trombe walls and its use as a passive cooling technique. International Conference “Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment”, May 2005, Santorini, Greece.

Sami, V., Gassman, J. (2006). Modelling Methodology to Analyze Passive Solar Performance of Trombe Walls. The 23 Conference on Passive and Low Energy Architecture, 6-8 September 2006, Geneva, Switzerland.

Sherman, M.H., Modera, M.P. (1986). Comparison of Measured and Predicted infiltration Using the LBL Infiltration Model. Measured Air Leakage of Buildings, ASTM STP 904, H.R. Trechsel and P.L. Lagus, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 325-347.

Stazi, F., Mastrucci, A., Di Perna, C. (2011). Experimental and numerical study on the performance of solar walls in Mediterranean climates. World Renewable Energy Congress – Sweden.

Vitale, G., Bove, I., Pereyra, J., Abal, G. (2019). Global solar transmittance of vertical glazings oriented towards the equator. Sometido a Proceedings of ISES Solar World Congress 2019, 1-11. Noviembre, 2019, Santiago de Chile, Chile.