



Received: 27/10/2022  
Accepted: 06/11/2022

Anales de Edificación  
Vol. 8, Nº1, 34-40 (2022)  
ISSN: 2444-1309  
Doi: 10.20868/ade.2022.5020

## Mejora del desempeño térmico del muro trombe a través de un acristalamiento electrocrómico con conmutación programada

## Improving the thermal performance of the trombe wall through programmed switching electrochromic glazing

Arturo Martínez<sup>a</sup>; Gloria Pérez<sup>b</sup>; David Levy<sup>c</sup>; Josep Ma. Adell<sup>a</sup>; Jorge Gallego Sánchez-Torija<sup>a</sup>; Fernando Martín-Consuegra<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (Universidad Politécnica de Madrid), Madrid, España.

<sup>b</sup>Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja-IETcc (Consejo Superior de Investigaciones Científicas-CSIC), Madrid, España.

<sup>c</sup>Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid-ICMM (Consejo Superior de Investigaciones Científicas-CSIC), Madrid, España.

**Resumen**-- El gasto energético que representa la climatización de edificios a nivel mundial hace necesaria la adopción y adaptación de técnicas pasivas para reducir las demandas de calefacción y refrigeración. Diversos estudios han comprobado los beneficios térmicos y energéticos del muro Trombe (MT), sobre todo en climas continentales. No obstante, este sistema genera sobrecalentamiento en climas con veranos cálidos. Mas allá del uso de sistemas tradicionales, esta técnica puede mejorar su capacidad de climatización en este tipo de climas a través de materiales cromogénicos como los vidrios electrocrómicos (EC). En este estudio se simula la rehabilitación energética de una habitación en un edificio de Madrid mediante un MT convencional (MTC) y uno que incluye un vidrio EC (MTEC), cuya conmutación fue programada para mediar las condiciones climáticas en un periodo con mayor contraste diario de temperatura. Los resultados muestran que el MTEC proporciona temperaturas interiores más confortables.

**Palabras clave**— Muro Trombe; Vidrio electrocrómico; Conmutación programada; Rehabilitación energética.

**Abstract**— The energy cost of air-conditioning buildings worldwide makes it necessary to adopt and adapt passive techniques to reduce heating and cooling demands. Several studies have proven the thermal and energy benefits of the Trombe wall (TM), especially in continental climates. However, this system generates overheating in climates with hot summers. Beyond the use of traditional systems, this technique can improve its climate control capacity in such climates through the use of chromogenic materials such as electrochromic glass (EC). This study simulates the energy rehabilitation of a room in a building in Madrid using a conventional MTC (MTC) and one that includes an EC glass (MTEC), whose switching was programmed to mediate the climatic conditions in a period with greater daily temperature contrast. The results show that the MTEC provides more comfortable indoor temperatures.

**Index Terms**— Trombe wall; Electrochromic glass; Programmed switching; Energy refurbishment.

A.M. and J.G. are assistant professor from Departamento Construcción y tecnología arquitectónicas at Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid from Universidad Politécnica de Madrid. Av. de Juan de Herrera, 4, 28040 Madrid. D.L. is Researcher at Instituto de ciencia de materiales de

Madrid (ICMM). Campus de Cantoblanco, C. Sor Juana Inés de la Cruz, 3, 28049 Madrid. F.M. is researcher at Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja (IETcc). C. de Serrano Galvache, 4, 28033 Madrid.

## I. INTRODUCCIÓN

El muro Trombe (MT) es una técnica de climatización solar pasiva muy efectiva en climas de tipo continental (Pittaluga, 2013). A través de un muro orientado al sur recubierto con pintura negra y un acristalamiento al frente que conforma una cámara de aire, se capta, acumula y transmite la energía solar al interior de una habitación. El calor se transmite retardadamente por conducción a través del muro masivo. En su versión más convencional, el muro tiene aberturas en la parte alta y baja. El aire ingresa por la abertura inferior y se calienta por efecto de convección a su paso por la cámara, reingresando a la habitación por la abertura superior (Fig. 1) (Hu, 2017).

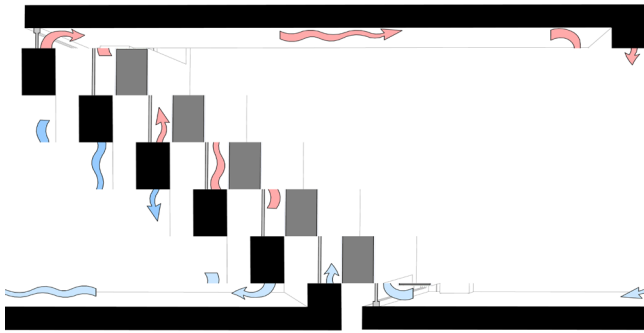


Fig. 1. Sistema de calefacción pasiva de un MT. (Fuente: Elaboración propia)

El MT es una de las técnicas de climatización más consolidada para cubrir parte de las cargas de calefacción de forma pasiva (Bellos, 2016). Existe un gran número de investigaciones sobre este sistema, la mayoría se centran en mejorar su capacidad de calefacción a través de una nueva configuración, la inclusión de accesorios o el uso de materiales con mayor capacidad de calentamiento (Zhou, 2015; Dong, 2019).

A pesar de los beneficios térmicos de esta técnica en la temporada invernal, en climas como el mediterráneo produce serios problemas de sobrecalentamiento en verano e incluso en otras temporadas (Bevilacqua, 2019). Este riesgo está presente aún en propuestas que involucran sistemas más complejos como el MT con enfriamiento evaporativo o el MT fotovoltaico para refrigeración (Hu, 2017)

Este problema ha restringido la propagación de esta técnica en regiones con climas cálidos en verano. Sin embargo, existen autores que intentan limitar el sobrecalentamiento reduciendo la captación solar de la técnica. Dabaieh (2015) utiliza dispositivos como persianas con alto albedo para reflejar los rayos solares y evitar que sean captados por el muro masivo.

Sin embargo, existen alternativas tecnológicamente más avanzadas que pueden mejorar el uso de este y otros sistemas de calefacción solar. Desde hace más de 70 años se ha pensado en envolventes dinámicas que logren mejorar el consumo energético de los edificios a través una estructura adaptable, cerramientos que modifiquen sus propiedades de acuerdo de las condiciones climáticas a las que son sometidos. Con este fin, los materiales cromogénicos representan una de las alternativas más sólidas en cuanto a envolventes adaptativas (Pittaluga, 2015).

Es muy limitada la investigación sobre materiales cromogénicos en el MT. En 1993 crean un gel termocrómico (TC) para el control de la insolación, el cual cambia su respuesta óptica en función de su temperatura. Según los autores, este material puede utilizarse en sistemas de climatización solar como el MT, ya que una capa de 1mm de esta sustancia entre dos paneles de vidrio reduce la transmisión hemisférica entre un 90 y 50% cuando se sobrepasa la temperatura de transición (Beck, 1993).

Desde hace 7 años, Gloria Pérez et al. (2018) han desarrollado un mortero que modifica sus propiedades termo ópticas al calentarse. Al pasar de un estado oscuro a claro, el material reduce su absorción solar hasta un 19%. Martín-Consuegra et al. utilizan este mortero como recubrimiento del muro masivo en un MT, sustituyendo el mortero con pintura oscura que se utiliza convencionalmente. A través de la simulación se han determinado los parámetros que condicionan el rendimiento térmico de este sistema y los resultados sirvieron para construir una célula experimental a escala real en Madrid que continúa bajo investigación (Martín-Consuegra, 2019).

En cuanto a elementos cromogénicos acristalados, los vidrios electrocrómicos son la tecnología cromogénica más desarrollada actualmente. Estudios como el de Tällberg en 2019 dan muestra de la eficiencia de este vidrio para reducir las cargas energéticas de climatización sobre otros vidrios cromogénicos como los fotocromáticos (FC) o termocrómicos (TC). Según el estudio, un vidrio electrocrómico (EC) controlado a través de la temperatura operativa del espacio en la ciudad de Madrid consume hasta 28.7% menos energía que los vidrios FC y TC, sobre todo en el consumo de refrigeración (Tällberg, 2019).

Los vidrios electrocrómicos pueden modificar sus propiedades ópticas al ser sometidos a una corriente eléctrica de 1 a 5V y se componen de óxidos metálicos de transición, como el pentóxido de vanadio ( $V_2O_5$ ). Para su uso como ventanas conmutables, se colocan en forma de películas delgadas dentro de vidrios aislantes o laminados. Al igual que los vidrios termocrómicos y gasocrómicos, los vidrios EC ofrecen protección solar tanto en el rango visible (380 - 780nm) como en el infrarrojo (780-2500 nm), por lo que pueden reducir el efecto invernadero dentro de los edificios (Pittaluga, 2015).

Pittaluga (2013) estima los beneficios de un MT que utiliza un vidrio EC como el componente acristalado del sistema. El autor configura el dispositivo cromogénico para que la mitad del año más fría se mantenga activo (entintado) y la otra mitad permanezca desactivado (claro). El MT electrocrómico logra un ahorro energético del 29.5% con respecto a un MT convencional.

Los resultados de esta última investigación muestran la efectividad del MTEC, sin embargo, la activación semestral del Vidrio EC no muestra la capacidad de adaptación del dispositivo, las ventajas que tendría en una temporada con altas y bajas temperaturas.

De tal modo, esta investigación tiene como objetivo mostrar el desempeño térmico de un MT mejorado con una ventana EC en una temporada media, cuya oscilación térmica abarque

temperaturas por encima y por debajo del rango de confort del habitante. Se analizará la efectividad de la conmutación programada para el vidrio EC con la premisa de activarse para evitar el sobrecalentamiento de la habitación. El resto del tiempo el sistema actuara como un MT convencional.

## II. METODOLOGÍA

A través de la simulación computacional se ha analizado la efectividad de un vidrio electrocrómico para mejorar el desempeño térmico de un MT dentro de un clima con veranos cálidos. Se ha utilizado el sistema Energy Plus para calcular las temperaturas generadas en el interior de una habitación ubicada en la ciudad de Madrid y estimar la capacidad del cambio de propiedades del dispositivo cromogénico para reducir la radiación solar.

### A. Definición del caso de estudio y sus variantes

Design builder (DB) ha sido la interfaz para acceder al motor de cálculo de Energy Plus. Mediante este programa se ha modelado una habitación de 4.5m x 4.5m (Fig. 2), ubicada teóricamente en la parte media de un edificio (horizontal y verticalmente), cuya composición corresponde a una tipología constructiva del periodo entre 1940 y 1980 en la ciudad de Madrid. Un periodo con grandes limitaciones tecnológicas en el sector constructivo cuya tipología termina al entrar en vigor las normativas que establecen condiciones de aislamiento mínimas para las fachadas. En 2011 este tipo de construcciones representaba el 45% de los edificios en esta ciudad. Según las propiedades térmicas de los materiales y sistemas utilizados para su edificación se puede asumir que estos edificios requieren de una rehabilitación energética (Ruíz-Rivas, 2015).

La fachada de la habitación modelada se compone de 5 capas (exterior a interior): 10mm de mortero de cemento, 105mm de ladrillo perforado, una cámara de aire no ventilada de 50mm, 40mm de ladrillo perforado y 10mm de enlucido de yeso. Las particiones son muros enlucidos con 10mm de yeso en ambos lados. El suelo y el techo son forjados unidireccionales de viguetas de hormigón con entrevigado cerámico, además de un piso cerámico de 10mm.

Se ha considerado un coeficiente de conductividad térmica para la fachada de 1.69 W/m<sup>2</sup>-K establecido por Alonso en su

investigación sobre “Rehabilitación energética de fachadas”, trabajo que estudia el parque edificatorio seleccionado (Ruíz-Rivas, 2015). El factor U para forjados y particiones se calculó a través de DB con base en el Código Técnico de la Edificación (IETcc, 2010). Sin embargo, para simplificar el modelo todos los cerramientos con excepción de la fachada se han considerado adiabáticos, no existe transmisión de calor entre la habitación bajo estudio y las habitaciones que la rodean, asumiendo que estos espacios presentan temperaturas interiores similares (Ruíz-Rivas, 2015).

La fachada está orientada al sur y tiene una ventana de 1.5 x 2.0m (Fig. 3). El acristalamiento tiene las propiedades y composición de la ventana EC en modo desactivado (tabla 1) y en ningún momento será activada.

Para estimar las cargas por actividad y equipo en la habitación se han establecido las características de uso de una recámara, con una densidad de 0.0987 personas por m<sup>2</sup> y una densidad de potencia de 4.32 W/m<sup>2</sup>.

A través del modelo se estimarán las temperaturas interiores que presenta la habitación durante el mes de abril. Posteriormente se añadirá un MT convencional (MTC) de 1.7 x 2.7m con el fin de mejorar el ambiente térmico interior (Fig. 1 y 4). El muro masivo se ha conformado con ladrillo perforado de 1 pie, enlucido con yeso en la parte interior y recubierto con mortero en la parte exterior. Este elemento tiene una abertura en la parte inferior y otra en la superior, ambas miden 1.5 x 0.20 m. El muro se ha colocado detrás de una ventana con las mismas dimensiones (contando los marcos). La separación entre ambos elementos conforma una cámara de 15cm donde se calienta el aire que ingresa por la abertura inferior.

La ventana consta de una unidad de ventilación aislada compuesta por un vidrio exterior electrocrómico de 8.77mm, una cámara de aire de 13mm y un vidrio claro de 6mm. En el caso del MTC, el vidrio cromogénico permanecerá inactivo en todo momento. La activación del vidrio da lugar al tercer caso de estudio, un MT con vidrio EC (MTEC).

Para el caso de la habitación con el MTEC, el entintado del vidrio EC se activa cada que la temperatura exterior supera los 14°C, con el objetivo de reducir la radiación solar que incide en el muro masivo. Por debajo de esta temperatura de consigna el vidrio permanecerá desactivado y se comportará como el MTC.

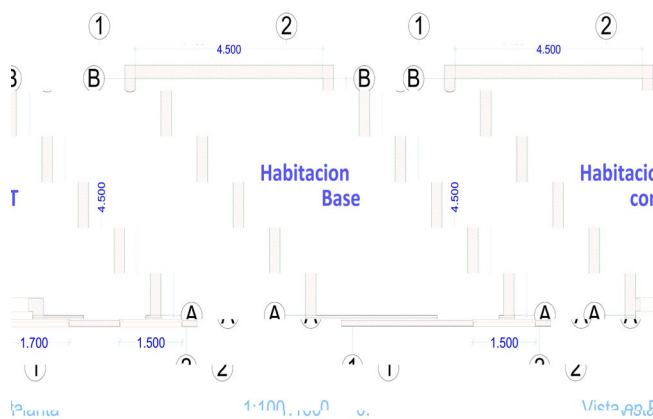


Fig. 2. Plantas de habitación base y habitación con MT. (Fuente: Elaboración propia)

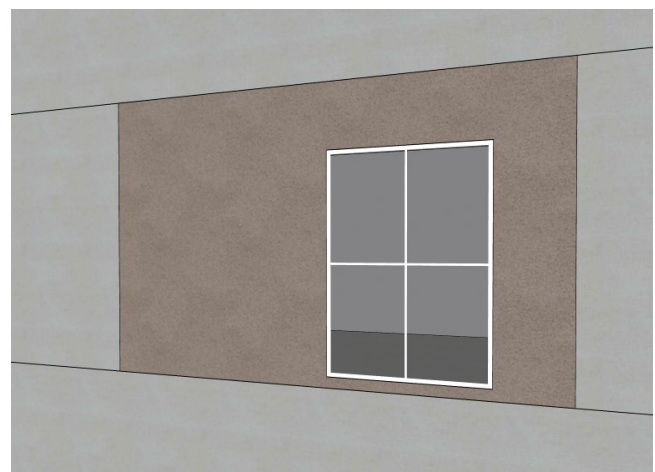


Fig. 3. Modelo de habitación base. (Fuente:Elaboración propia).

El vidrio EC es un vidrio de uso comercial de la compañía Sage Electrochromic y comercializado por la compañía Saint Gobain. El vidrio tiene un espesor es de 8.77mm y conductividad térmica de 0.727 W/m-K. Las propiedades ópticas de su estado activado y desactivado se muestran en la Tabla 1.

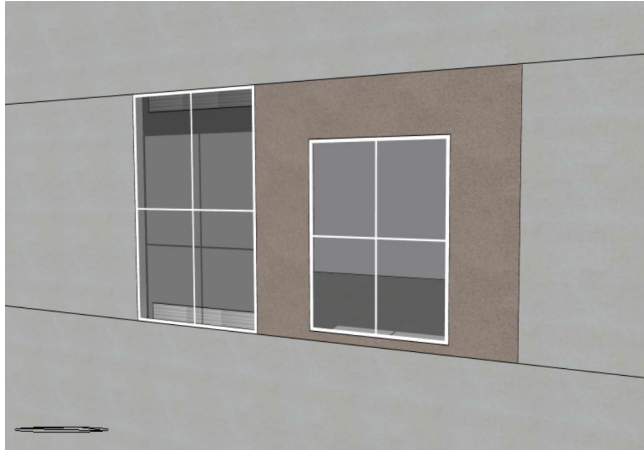


Fig. 4. Modelo de habitación que muestra el MT utilizado para los casos MTC y MTEC. (Fuente: Elaboración propia)

**B. Definición climática y de confort**

Se ha utilizado Climate consultant para calcular el rango de confort para habitantes de Madrid con base en el estándar ASHRAE 55. El resultado muestra un límite inferior de 20.3°C y un límite superior de 24.3°C. Para el cálculo se consideraron los coeficientes de vestimenta de 0.5 Clo y una actividad de 1.1met.

Los archivos climáticos internacionales para cálculos energéticos (IWECC) establecen el clima típico de una región mediante registros de hasta 18 años (Energy Plus, 2021). Según esta base de datos, el clima de Madrid en abril presenta temperaturas exteriores superiores e inferiores a la zona de confort y una alta radiación solar directa normal (Tabla 2).

TABLA II  
PROPIEDADES ÓPTICAS DEL VIDRIO ELECTROCRÓMICO

Temperatura exterior promedio (°C)	Temperatura exterior máxima (°C)	Temperatura exterior mínima (°C)	Radiación directa normal máxima (W/m <sup>2</sup> )
11.7	27.2	-1.9	908

Mediante la definición de las características constructivas de los casos de estudio y el uso del archivo IWECC, se ha realizado la simulación que permite establecer el comportamiento térmico del edificio durante el mes de abril.

TABLA I  
PROPIEDADES ÓPTICAS DEL VIDRIO ELECTROCRÓMICO

Estado	Transmitancia solar	Reflectancia solar		Transmitancia visible	Reflectancia visible	
		Exterior	Interior		Exterior	Interior
Desactivado	0.256	0.059	0.118	0.453	0.048	0.028
Activado	0.003	0.054	0.111	0.007	0.046	0.012

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se analizan las temperaturas interiores generadas en la habitación modelada en los tres casos establecidos (MB, MTC y MTEC). En primer lugar, se describe la curva térmica del caso base, describiendo las temperaturas obtenidas por día y su relación con respecto al rango de confort establecido. Se ha establecido la situación de la habitación (frio, calor, confort) por horas, como parámetro para establecer la efectividad de cada caso. Finalmente se muestran las temperaturas superficiales del muro masivo del MT para los casos del MTC y MTEC para comprobar la efectividad de activación del vidrio EC.

**A. Temperaturas interiores**

Al inicio del mes, la temperatura generada en el interior de la habitación base está considerablemente por debajo de la zona de confort con una temperatura promedio de 14.5°C, mientras que la temperatura exterior es de 13.3°C en promedio. El día 5 a partir de las 15:00h los registros muestran temperaturas interiores dentro del rango de confort. Prácticamente los 5 días siguientes la temperatura interior de la habitación es confortable. Del día 11 al 14 las temperaturas entran a la zona de confort entre las 16:00 y 18:00 h. En ese periodo, cada día gana mayor número de horas de confort, 2, 6, 9 y 12 respectivamente (Fig. 5).

En el día 15 se presentan las temperaturas más bajas de todo el mes, incluso con registros de -1.9°C. Como consecuencia, las

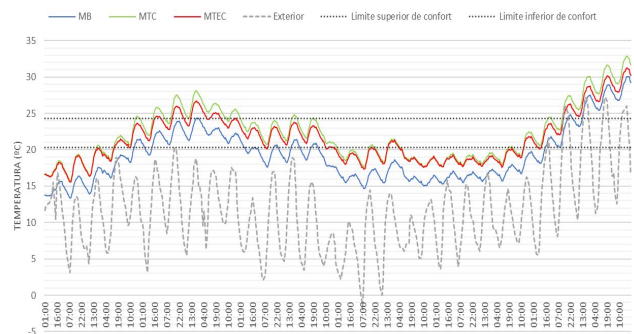


Fig. 5. Temperaturas interiores obtenidas por los 3 casos analizados durante el mes de abril (Elaboración propia).

temperaturas del día 15 al 25 permanecen fuera de confort, incluso en los días con radiación superior a los 800 W/m<sup>2</sup>. En este periodo la temperatura promedio es de 16.6°C, es decir, 3.7°C por debajo del límite inferior del rango confortable.

A partir del día 26 se presenta un repunte en la temperatura exterior con máximas de 21.6°C a 27.2°C. Este aumento ocasiona que, en los últimos tres días del mes, la temperatura interior de la habitación sobrepase hasta por 5.8°C el límite superior del rango confortable.

Al incluir un MT en la habitación las temperaturas interiores aumentan considerablemente. Los registros de los casos con

MT (MTC y MTEC) inician con un aumento de alrededor de 2.9°C en la temperatura interior de la habitación. El MTC mantiene esta diferencia en promedio con una oscilación entre 2.1°C y 4°C durante todo el mes. Al activar el vidrio electrocrómico en el MT la diferencia promedio disminuye a 2.2°C. La reducción de la diferencia entre las temperaturas interiores del MB y el MTEC se da sobre todo en temperaturas con sobrecalentamiento.

Con cifras más altas, las temperaturas de la habitación con el MTEC ingresan a la zona de confort el día 4 a partir de las 15:00h mientras que el MTC lo hace 1 hora antes. El confort se mantiene la mayor parte de los días 4,5 y 6. Sin embargo el MTEC logra 4 horas más de confort. Del día 7 al 9 la habitación con MT comienza a sobrecalentarse. La temperatura promedio con el MTC registra 25.9°C y con el MTEC 24.76°C. Las horas de desconfort interior comienzan a aumentar, sobre todo en la habitación sin vidrio EC, al obtener un total de 65h de sobrecalentamiento en estos tres días, mientras que el sistema con vidrio EC obtuvo 47h

El MTEC mantiene temperaturas confortables prácticamente desde el día 10, al igual que el MB, mientras que el MTC lo consigue un día después. A partir de ahí, ambos sistemas se mantienen con situación mayoritariamente confortable hasta el día 15, a diferencia del MB que se encuentra por debajo del límite inferior de confort. Del día 16 al 25 la habitación con MT permanece fría hasta las 13:00 hrs del último día de este periodo. Las pocas horas de activación del vidrio EC hacen que ambos MT presenten un comportamiento casi idéntico. Con referencia a la habitación base, en este periodo el MT logran obtener una temperatura interior 2.3°C más alta. Los últimos tres días, los casos MTC y MTEC logran temperaturas promedio de 28.3°C y 27°C, mientras la habitación base registra 25.7°C.

La cuantificación de las horas en situación de frío, calor y confort, muestra la ventaja del uso del MT en un clima como el de Madrid (Fig. 6). El MTC y el MTEC logran reducir el uso de un sistema de calefacción 181 horas y 147 horas al mes respectivamente. El vidrio EC reduce la capacidad de refrigeración del sistema convencional, sin embargo, reduce las horas de sobrecalentamiento que genera el MT en este tipo de climas. El MT aumenta de 68 a 197 las horas que requieren de un sistema de refrigeración. El MTEC logra reducir este

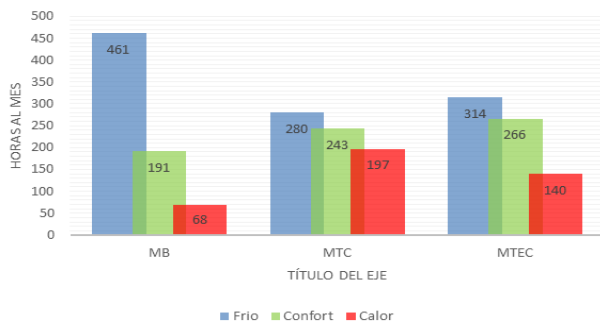


Fig. 6. Horas en situación de frío, calor y confort de los casos de estudio

aumento a 140 horas, 72 horas más que el caso base. En cuanto a las horas de confort, es notable la mejoría con el MTEC al

obtener 266 horas, 23 horas más que el MTC y 75 más que el caso base.

En este caso solo se están analizando las horas que precisan del uso de un sistema de calefacción o refrigeración adicional. Sin embargo, no se está considerando la ventilación natural en la habitación o en el mismo MT, la cual puede reducir sustancialmente las altas temperaturas.

### B. Temperaturas superficiales

La diferencia que existe entre las temperaturas interiores del MTC y MTEC se explica por la protección solar que ofrece el vidrio EC. En la Fig. 1 se muestra las temperaturas superficiales que capta el elemento masivo del MT con y sin protección solar. Con el MTC la temperatura superficial promedio fue de 29.4°C, mientras que con el MTEC fue de 25.9°C. Aunque esta diferencia no supera los 3.5°C, al analizar las cifras máximas se establece la capacidad del vidrio EC para reducir la radiación solar (Fig. 7).

Los primeros 3 días la activación del vidrio es esporádica, por lo que las curvas de temperatura muestran poca diferencia. Sin embargo, entre los días 7 y 8, la diferencia entre los registros se vuelve notable, al alcanzar diferencias máximas entre 18.5°C y 21.9°C, este última fue la mayor diferencia en todo el mes.

No obstante, esta diferencia no se transmite en la misma proporción al interior de la habitación. El muro masivo ha registrado una temperatura superficial de 62.2°C con el MTC, mientras que con el MTEC alcanza 40.3°C. Esta desigualdad de casi 22°C en la superficie del muro masivo solo logra una diferencia máxima de 1.5°C en la temperatura interior de la habitación en el resto del día, aunque en esa hora exacta solo fue de 1.4°C

Los días 9,10,12,13y 14 presentan diferencias máximas de 11.9°C a 14.7°C, esta última registrada cuando el muro masivo del MTC alcanza 53.8°C y el del MTEC solo 39.1°C. Nuevamente, esta diferencia resulta menos significativa en términos de la temperatura interior, ya que solo se registra una diferencia máxima de 1°C el resto de la jornada.

En el periodo que comprende del día 15 al 20 y el día 24 se registra poca o nula activación del vidrio, lo que mantiene juntas las curvas de temperatura. Del día 25 al 30 se presentan las mayores temperaturas del mes, por lo que el entintado permanece activo la mayor parte del tiempo. Las diferencias

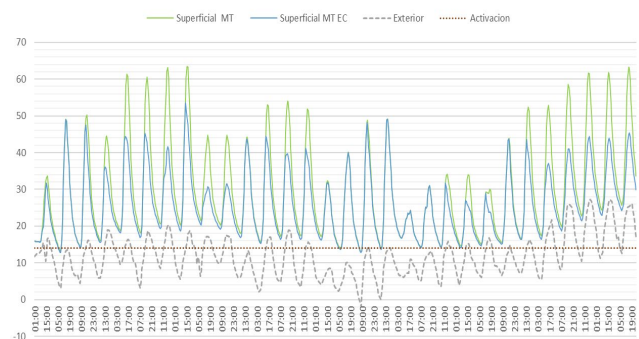


Fig. 7. Temperaturas superficiales obtenidas por el MTC y el MTEC (Elaboración propia).

máximas entre las temperaturas superficiales inician con 13.5°C y terminan con 18.4°C el día 30, con temperaturas superficiales

de 63.4 con el MTC y 45.0°C con el MTEC, lo que representa una diferencia máxima de 1.7°C en la temperatura interior durante el resto de la jornada.

Es necesario considerar el papel que juega la temperatura exterior y la radiación solar en el comportamiento térmico del MT y la habitación. Se llamará caso 1 al momento en que la diferencia máxima entre las temperaturas superficiales fue de 21.9°C. En ese momento la radiación solar registró 880 W/m<sup>2</sup> y la temperatura exterior 19.5°C. Esta diferencia entre la temperatura superficial del muro masivo solo representó una diferencia de 1.4°C en la temperatura interior de la habitación, con registros de 26.6°C (MTC) y 25.3°C (MTEC).

Por otro lado, se llamará caso 2 cuando se alcanzó la diferencia máxima en la temperatura interior durante el mes, la cual fue de 1.7°C, con registros de 32.5°C (MTC) y 30.82°C (MTEC). En este momento la diferencia en la superficie del muro fue de 15.3°C, la superficie con vidrio convencional (MTC) ha presentado una temperatura de 59.5°C y la protegida (MTEC) de 44.2°C, es decir el 2.7°C mayor y 3.9°C menor respectivamente que en el caso 1. En esa hora la radiación ha sido de 753 W/m<sup>2</sup> y la temperatura exterior de 25.7°C.

Tanto el caso 1 como el caso 2 suceden en condiciones de sobrecalentamiento. En el primero existe una radiación solar más fuerte que en el segundo, esto genera que el MTC obtenga una temperatura superficial más alta en el muro masivo y por lo tanto la mayor diferencia en estos registros, a pesar de que la temperatura exterior fue 6.2°C más baja que la ocurrida en el caso 2. Por otro lado, en el caso 2 la temperatura exterior más alta provocó que existiera mayor diferencia en la temperatura al interior de la habitación, a pesar de que la radiación solar fue más baja que la registrada en el caso 1.

El caso 2 resulta más provechoso en términos de confort, ya que logra una mayor reducción en el sobrecalentamiento de la habitación. Por lo tanto, se puede asumir que, debido a las altas temperaturas en esta temporada, el MTEC tendrá un mejor desempeño térmico en los meses de verano.

#### IV. CONCLUSIONES

A través de la simulación se ha analizado una habitación ficticia con características constructivas de edificios construidos en el periodo de 1940-1980 en la ciudad de Madrid, tipología que requiere una rehabilitación energética. Se opta por la inclusión de un MT que integre un vidrio EC que permita reducir el sobrecalentamiento que genera la técnica convencional en climas como el de Madrid, con veranos cálidos. Se selecciona abril, un mes de temporada media, para analizar la efectividad de la conmutación del vidrio EC ante temperaturas por encima y por debajo de la zona de confort.

La habitación presenta temperaturas interiores fuera de la zona de confort en su configuración inicial. A pesar de ser una temporada de temperatura intermedia, el espacio requiere de un sistema de calefacción la mayor parte del tiempo. Al final del mes se presenta un aumento de temperatura, el cual provoca que se genere sobrecalentamiento en el espacio.

Al añadir un MT las temperaturas interiores aumentan un promedio de 2.9°C, lo que acerca la curva térmica a la zona de

confort. Ante el aumento de la temperatura exterior, la técnica convencional (MTC) presenta registros por encima del límite superior de confort. Al activar el entintado del vidrio EC el MTEC reduce el sobrecalentamiento interior, siendo 1.7°C la máxima reducción que se logra en la temperatura interior con el vidrio cromogénico.

Al cuantificar las horas que requieren de climatización, el MTEC genera mayor número de horas con temperaturas de confort, a pesar de requerir más horas de refrigeración que la habitación base, requiere una demanda menor que al añadir el MTC. Además, logra reducir eficientemente las horas de frío presentadas inicialmente.

En cuanto a la temperatura superficial, la alta radiación solar provoca que la superficie del muro masivo con el MTC alcance temperaturas superiores a los 62°C. Con la protección del entintado en el MTEC se reduce esta temperatura hasta 40.3°C. Sin embargo, esta diferencia no se refleja con el mismo impacto en la temperatura interior. Se ha comprobado que la máxima reducción de la temperatura interior no depende de la radiación solar, si no de una alta temperatura exterior. En este caso, la máxima reducción de temperatura interior fue de 1.7°C cuando la temperatura exterior ha registrado 25.7°C.

Para finalizar, se comprueba la efectividad del vidrio EC para mejorar el desempeño térmico del MT en climas con veranos cálidos. Además, el presente trabajo abre la posibilidad de investigar con otros materiales cromogénicos para mejorar aún más el desempeño térmico del sistema o para reducir su coste de instalación.

#### V. INVESTIGACIONES FUTURAS

Los resultados positivos de este estudio alientan a seguir profundizando en esta línea de investigación. Como continuación de este estudio, se podría analizar el desempeño térmico y energético del sistema en un periodo anual completo. Se puede explorar las diferentes configuraciones de ventilación que son posibles con el MT, la ventilación exterior a exterior a manera de fachada ventilada o la configuración de una chimenea solar con una ventilación de interior a exterior.

El aprovechamiento de los materiales cromogénicos en sistemas de calefacción solar como el MT se pueden justificar en términos de sustentabilidad energética. Sin embargo, es necesario tener en cuenta la sustentabilidad económica de estos materiales. En particular, las ventanas electrocrómicas son muy costosas y complicadas de suministrar a territorios como el europeo, sobre todo en pedidos pequeños.

Actualmente se está trabajando con materiales cromogénicos experimentales, como el mortero termocrómico (TCC) desarrollado por Gloria Pérez y su equipo de trabajo del IETcc-CSIC y los Externally Modulated Displays (EMD) creados por David Levy y Marcos Zayat del ICMM-CSIC. Los EMDs son acristalamientos cromogénicos cuyos componentes permiten reducir su costo de forma importante. Ambas tecnologías en conjunto podrían mejorar la eficiencia del MT en climas con veranos cálidos.

#### AGRADECIMIENTOS

La presente investigación ha contado con el apoyo del Grupo de Sistemas Constructivos y Habitabilidad en la Edificación de IETcc-CSIC. Particularmente Arturo Martínez agradece la beca de estudios de doctorado en el extranjero otorgada por el Consejo Nacional de Tecnología de México y la Fundación del Instituto Nacional de Bellas Artes

#### REFERENCES

- C. Alonso Ruiz-Rivas, Rehabilitación energética de fachadas: Propuesta metodológica para la evaluación de soluciones innovadoras, basándose en el diagnóstico de viviendas sociales construidas entre 1940 y 1980, Universidad Politécnica de Madrid, 2015. <http://oa.upm.es/id/eprint/39249/contents>.
- A. Beck, T. Hoffmann, W. Korner, J. Fricke, Thermochromic gels for control of insolation, 1993.
- E. Bellos, C. Tzivanidis, E. Zisopoulou, G. Mitsopoulos, K.A. Antonopoulos, An innovative Trombe wall as a passive heating system for a building in Athens—A comparison with the conventional Trombe wall and the insulated wall, *Energy Build.* 133 (2016) 754–769. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.035>.
- P. Bevilacqua, F. Benevento, R. Bruno, N. Arcuri, Are Trombe walls suitable passive systems for the reduction of the yearly building energy requirements?, *Energy*. 185 (2019) 554–566. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.003>.
- M. Dabaieh, A. Elbably, Ventilated trombe wall as a passive solar heating and cooling retrofitting approach ; a low-tech design for off-grid settlements in semi-arid climates, *Sol. Energy*. 122 (2015) 820–833. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.10.005>.
- J. Dong, Z. Chen, L. Zhang, Y. Cheng, S. Sun, J. Jie, Experimental investigation on the heating performance of a novel designed trombe wall, *Energy*. 168 (2019) 728–736. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.125>.
- Energy Plus, Energy Plus <https://energyplus.net/> (acceso Marzo 15, 2021).
- Z. Hu, W. He, J. Ji, S. Zhang, A review on the application of Trombe wall system in buildings, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 70 (2017) 976–987. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.003>.
- Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Catálogo de Elementos Constructivos del CTE, Madrid, 2010. <http://itec.cat/cec/>.
- F. Martín-Consuegra, C. Alonso, G. Perez, A. Guerrero, M.J. Gavira, B. Frutos, I. Oteiza, Design and Optimisation of a Thermochromic Trombe Wall, in: *Int. Conf. Sustain. Mater. Syst. Struct. (SMSS 2019) Energy Effic. Build. Des. Legis.*, Rovinj, Croatia, 2019: pp. 42–50.
- G. Pérez, V.R. Allegro, M. Corroto, A. Pons, A. Guerrero, Smart reversible thermochromic mortar for improvement of energy efficiency in buildings, *Constr. Build. Mater.* 186 (2018) 884–891. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.246>.
- M. Pittaluga, The electrochromic wall, *Energy Build.* 66 (2013) 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.028>.
- M. Pittaluga, Electrochromic glazing and walls for reducing building cooling needs, Elsevier Ltd., 2015. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-380-5.00017-0>.
- R. Tällberg, B.P. Jelle, R. Loonen, T. Gao, M. Hamdy, Comparison of the energy saving potential of adaptive and controllable smart windows: A state-of-the-art review and simulation studies of thermochromic, photochromic and electrochromic technologies, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. (2019). <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.02.041>.
- G. Zhou, M. Pang, Experimental investigations on thermal performance of phase change material - Trombe wall system enhanced by delta winglet vortex generators, *Energy*. 93 (2015) 758–769. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.096>.



**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.