

Ecoenvolventes: análisis del uso de fachadas ventiladas en clima cálido-húmedo

Sara Luciani-Mejía, Rodrigo Velasco-Gómez, Roland Hudson

Universidad Piloto de Colombia, Bogotá (Colombia)

Facultad de Arquitectura y Artes, Programa de Arquitectura

Grupo de investigación HD+i

Luciani-Mejía, S., Velasco-Gómez, R., & Hudson, R. (2018). Ecoenvolventes: análisis del uso de fachadas ventiladas en clima cálido-húmedo. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 20(2), 62-77. Doi: <http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2018.20.2.1726>

<http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2018.20.2.1726>



Sara Luciani-Mejía

Arquitecta, Universidad Piloto de Colombia, Bogotá (Colombia).

Maestría en Gestión Urbana, Universidad Piloto de Colombia, Bogotá (Colombia).

Docente-investigador, Universidad Piloto de Colombia.

Publicaciones recientes

(2015). Simulaciones ambientales para la selección de materiales en diseño de alojamientos temporales en climas tropicales. *Revista de Arquitectura*, 16, 96-104.

<https://orcid.org/0000-0003-3243-6370>

sara-luciani@unipiloto.edu.co

Rodrigo Velasco-Gómez

Arquitecto, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá (Colombia).

M. Eng in Computational Design, Ostwestfalen-Lippe University of Applied Sciences, Detmold (Alemania).

Docente-investigador, Universidad Piloto de Colombia (Colombia).

Desarrollo de investigación de doctorado titulada Fibre Reinforced Plastics in the Construction of Buildings Envelopes, University of Nottingham, UK, 2000-2005

Publicaciones recientes

(2015). Notes on the design process of a responsive sun-shading system: A case study of designer and user explorations supported by computational tools. *Aiedam*, 29 (04), 483-502.

<https://orcid.org/0000-0002-4108-3805>

rodrigo-velasco@unipiloto.edu.co

Roland Hudson

BSc General Architecture Studies, University of Bath (Reino Unido).

MSc Software Engineering, University of Liverpool (Reino Unido).

Master of Architecture, University of Bath (Reino Unido).

PhD, University of Bath (Reino Unido).

Profesor de cátedra, Universidad de Los Andes

Publicaciones recientes

Rodríguez, C., Niblock, C. y Hudson, R. (2017). Collaborative learning in architectural education: Benefits of combining conventional studio, virtual design studio (VDS) and live projects. *British Journal of Educational Technology*.

<https://orcid.org/0000-0001-5605-0187>

roland-hudson@unipiloto.edu.co

Resumen

Con el objetivo de aportar a la reducción de impactos en la construcción de edificaciones fueron diseñados varios sistemas de fachadas ventiladas y convencionales, involucrando fachadas opacas, elementos vegetales y cámaras de aire. Tales sistemas fueron evaluados con simulaciones ambientales y mediciones en prototipo en las diversas etapas de la investigación, lo que permitió la comparación de resultados y la identificación de comportamiento en términos de confort térmico. Los resultados de las simulaciones frente a mediciones vislumbraron dos cuestiones: las discrepancias y similitudes entre los datos de entrada y salida en los dos tipos de proceso mencionados; así como la utilidad de las fachadas ventiladas opacas en clima tropical húmedo como Girardot, lo que sugirió una última etapa de evaluación de estrategias de diseño pasivo en la búsqueda del confort térmico y la sostenibilidad en el proyecto arquitectónico.

Palabras clave: arquitectura bioclimática, clima, datos climáticos, diseño arquitectónico, modelo de simulación, temperatura.

Eco-friendly coverings: Analysis of the use of ventilated facades in hot, humid weather

Abstract

Aiming to contribute to impact reduction in the construction of buildings, various systems of ventilated and conventional facades were designed, involving opaque facades, plant elements, and air chambers. Such systems were evaluated through environmental simulations and prototype measurements at various stages of the project, which allowed comparing results and identifying their behavior in terms of thermal comfort. The results of these simulations compared against measurements highlighted two issues: discrepancies and similarities between inputs and outputs in the above mentioned two process types; as well as the performance of opaque ventilated facades in humid tropical climate such as in Girardot, which suggested a last stage to evaluate passive design strategies in search for thermal comfort and sustainability in architectural projects.

Keywords: Bioclimatic architecture, climate, climatic data, architectural design, simulation model, temperature.

Ecoenvolventes: análise do uso de fachadas ventiladas em clima quente e úmido

Resumo

Com o objetivo de contribuir com a redução de impactos na construção de prédios foram desenhados vários sistemas de fachadas ventiladas e convencionais, que envolvem fachadas opacas, elementos vegetais e duto de ar. Esses sistemas foram avaliados com simulações ambientais e medições em protótipo nas diversas etapas da investigação, o que permitiu a comparação de resultados e a identificação de comportamento em termos de conforto térmico. Os resultados das simulações ante medições vislumbraram duas questões: as discrepâncias e as semelhanças entre os dados de entrada e saída nos dois tipos de processo mencionados, assim como a utilidade das fachadas ventiladas opacas em clima tropical úmido, como Girardot (Colômbia), o que sugeriu uma última etapa de avaliação de estratégias de desenho passivo na busca de conforto térmico e de sustentabilidade no projeto arquitetônico.

Palavras-chave: arquitetura bioclimática, clima, dados climáticos, desenho arquitetônico, modelo de simulação, temperatura.

Recibido: noviembre 2 / 2017

Evaluado: abril 3 / 2018

Aceptado: mayo 17 / 2018

Introducción

La investigación denominada Ecoenvolventes, desarrollada por la Universidad Piloto de Colombia en las sedes de Bogotá y Girardot, tuvo como fin aportar información para contribuir a la reducción de impactos en la construcción de edificaciones y mejorar el confort térmico; esto llevó a considerar diversas estrategias para la proyección de construcciones sostenibles tales como las fachadas ventiladas.

Estas son definidas por Barbosa e Ip (2014, p. 1021) como una fachada tradicional con una cámara de aire y una piel externa adicional, usualmente en vidrio, con circulación de aire controlada entre capas. Ante esto, Ciampi, Leccese y Tuoni (2003, p. 491); Afonso y Oliveira (2000, p. 79); Balocco (2002, p. 469) y Marinosci, Strachan, Semprini y Morini (2011, p. 287) demuestran que una fachada ventilada diseñada de forma adecuada puede ayudar a reducir las cargas de calor producidas por la radiación solar.

Asimismo, Theodosiou, Tsikaloudakia y Bikas (2017, p. 397); Ghaffarianhoseini, Ghaffarianhoseini, Berardi, Tookey, Hin Wa Li y Karimnia (2016, p. 1053); Høseggen, Wachenfeldt y Hanssen (2008, p. 821) y Poirazis (2004, p. 61), mencionan que las fachadas ventiladas presentan ventajas sobre las fachadas simples en varios aspectos como eficiencia térmica en la medida en que funciona como aislamiento térmico y reduce la demanda de sistemas activos (HVAC); reducción de niveles de ruido al interior de las edificaciones por transmisión entre los espacios y desde el exterior, lo que permite la ventilación natural en sitios donde normalmente no es posible por los altos niveles de ruido; además de protección frente a la radiación solar, polución y condiciones adversas del clima; reducción de los efectos de presión del viento; resistencia al fuego y eficiencia estructural.

Por otra parte, Haase, Silva y Amato (2009, p. 361); Høseggen *et al.* (2008, p. 821) y Poirazis (2004, p. 66), señalan como desventajas la reducción del espacio útil de la construcción, el costo considerablemente alto con respecto a las fachadas tradicionales (en promedio un 60 a 80%), los costos adicionales de operación y mantenimiento, el incremento en el peso de la estructura que repercute en el incremento de costos, y el riesgo de sobrecalentamiento al interior del espacio en clima cálido, a causa de un diseño inapropiado.

Ante las desventajas del uso de fachadas ventiladas transparentes en clima cálido, Peci, Jensen, Heiselberg y Ruiz de Adana (2012, p. 265) proponen como alternativa el uso de fachadas ventiladas opacas en las cuales las dos superficies son opacas, condición que permite la absorción de la radiación solar por la superficie externa

y reduce el riesgo de sobrecalentamiento; además de considerar un menor costo debido a la posibilidad de ser construidas en materiales convencionales y la reducción de aproximadamente el 58% de cargas térmicas con respecto a las fachadas tradicionales, según estudios realizados por Fantucci, Marinosci, Serra y Carbonaro (2017, p. 619).

No obstante, en cuanto al estudio de fachadas ventiladas opacas, Marinosci, Semprini y Morini (2014, p. 280); Marinosci, Strachan, Semprini y Morini (2011, p. 854); Aparicio, Vivancos, Ferrer y Royo (2014, p. 564) mencionan que este tipo de fachadas ha recibido menos atención que otras configuraciones con vidrio, y Giancola, Sanjuan, Blanco y Heras (2012, p. 363) sugieren que existen todavía menos estudios sobre el desempeño energético de las mismas; asimismo, Barbosa e Ip (2014, p. 1020) afirman que se requiere mayor investigación para la comprensión de los procesos relacionados con las fachadas ventiladas y las implicaciones de su uso en diversas condiciones climáticas, razón por la cual esta investigación se centra en el uso de fachadas ventiladas opacas en clima tropical húmedo con el diseño de algunos sistemas de fachadas ventiladas opacas presentadas en Rubiano (2015, p. 113), donde tales sistemas han sido evaluados con simulaciones ambientales y calibradas a través de un prototipo en las diversas etapas de la investigación, lo que permite la comparación de datos y la identificación de comportamiento en términos de confort térmico.

Así, la primera etapa de la investigación partió de una caracterización y diagnóstico ambiental del área de estudio (Girardot, Colombia), seguida de la identificación del estado del arte en términos funcionales y de diseño para envolventes arquitectónicas de bajo impacto ambiental, teniendo en consideración tecnologías y estructuras para envolventes. Esto permitió el desarrollo de los primeros modelos de envolventes doble capa con especies vegetales bajo una exploración de diseño paramétrico con herramientas digitales como Grasshopper y simulaciones de confort como Ecotect® y Design Builder®, publicado en Velasco y Robles (2011, p. 542). El uso de especies vegetales es considerado debido a que según Stec, Paassen y Maziarz (2005, p. 419), las plantas tienen la capacidad de disipar la radiación solar, y la transferencia de calor es más baja que la transferencia producida por las persianas, además de tener beneficios adicionales como mejorar el aislamiento térmico y la reducción del ruido por la absorción y reflexión del sonido.

La segunda etapa evolucionó hacia la verificación *in situ* de la compatibilidad de especies vegetales autóctonas (Bolaños y Moscoso, 2011, p. 16), sistemas y modalidades de mediciones térmicas, el desarrollo de la estructura de soporte y componentes del sistema; además de verificar la influencia de los diferentes factores como flujo

de aire, masa, coeficiente de transmisión térmica y presencia de agua en el confort térmico, y así definir estrategias en favor de la reducción del impacto ambiental de los componentes del sistema en el ciclo de vida.

La tercera etapa adelantó la construcción del prototipo en Girardot para la medición de temperaturas con un sistema de fachada que comprende muros, puertas y ventanas en PVC (Rubiano, 2015, p. 113) y Varini (2013), con el registro de comportamientos en superficies internas. Los resultados de las mediciones realizadas entre octubre y diciembre de 2012 fueron comparados con las simulaciones ambientales realizadas en el software Design Builder®, a fin de evaluar las discrepancias entre simulaciones y experimentación ya que, como menciona Jentsch, Bahaj y James (2008, p. 2148), los archivos de datos climáticos para simulación podrían no considerar los impactos potenciales del cambio climático, ni los riesgos de sobrecalentamiento local. Por tanto, una etapa posterior a la aquí presentada prevé el desarrollo de una herramienta de visualización de datos climáticos que facilite la comprensión de las particularidades del clima tropical húmedo, a fin de ayudar en la toma de decisiones y en el diseño de edificaciones que aumenten el confort térmico.

El desempeño térmico resultado de la etapa anterior sugirió la necesidad de una estrategia para la disminución de temperaturas al interior de la edificación, razón por la cual se diseñaron tres tipos de fachada: la primera ventilada opaca, la segunda con el uso de parasoles, y la tercera utilizando estrategias de masa térmica. Sobre estos diseños se realizaron simulaciones ambientales, asumiendo condiciones base del prototipo construido, lo que permitió reconocer el desempeño de las fachadas ventiladas en comparación con otras estrategias en clima cálido húmedo, particularmente para bajas latitudes y humedad media como Girardot.

De esta manera, este artículo tiene como fin presentar los resultados de la última etapa de la investigación, considerando la comparación entre simulaciones ambientales frente a las mediciones en sitio, y el desempeño de tres sistemas de fachadas opacas para la disminución de la temperatura al interior de la edificación en clima tropical húmedo.

Metodología

El trabajo contempló tres fases de desarrollo; la primera implicó la realización de simulaciones digitales de sistemas de fachada para definir la viabilidad de materiales y estrategias generales para confort en Girardot, la segunda involucró la construcción de un edificio in situ para realizar mediciones del comportamiento real de la estructura a fin de calibrar modelos digitales de simulación, y, finalmente, la tercera fase impli-

có la realización de simulaciones finales para tres tipos diversos de fachada con el ánimo de generar información aplicable en el contexto de la construcción local.

Simulaciones y estudios previos

De acuerdo con lo expuesto en Velasco y Robles (2011, p. 541), un análisis previo para climas como el de Girardot demuestra que el uso de estrategias pasivas puede llegar a subir los porcentajes de confort percibido desde un 5 a un 65 % en promedio anual. En ese sentido, además de la ventilación natural, es de suma importancia evitar las ganancias de calor utilizando elementos de control solar, y en las zonas con temperaturas nocturnas menores, es útil el uso de masa térmica en fachadas, así como ventilación nocturna.

Teniendo en cuenta lo anterior, y con el ánimo de evaluar diversos tipos de fachadas ventiladas para este clima, se realizaron 66 simulaciones digitales organizadas dentro de cinco grupos generales, a saber: modelos con muro sencillo multicapa sin cámara de aire, muro sencillo multicapa con cámara de aire, muro doble con protección solar en los costados de mayor exposición oriente-occidente y zenit, con cámara de aire; muro sencillo multicapa ventilada, y muro doble con protección solar en los costados de mayor exposición oriente-occidente y zenit con ventilación (Figura 1).

Para las simulaciones se modeló un edificio de 3x3x3 m, cubierto exclusivamente en las caras superior, oriental y occidental, mediante las configuraciones descritas en la Tabla 1.

Medición de prototipo in situ para calibración de simulaciones

Para las mediciones in situ se construyó una edificación de 3,10x3,10x3,10 m, ubicada en Girardot, Cundinamarca, con latitud 4°18'4.19"N y longitud 74°48'40.32"O, en la sede de la Universidad Piloto de Colombia, Seccional Magdalena. La construcción está situada a nivel de segundo piso y girada aproximadamente 30° con relación a la malla vial de la ciudad, a fin de que las fachadas laterales estén dispuestas en sentido oriente y occidente, expuestas a la radiación solar directa, lo que permite probar el desempeño de los materiales en condiciones extremas.

El prototipo está conformado por superficies en PVC de 2 mm, con una cámara de aire de 6 cm entre las superficies, con una ventana dispuesta en la fachada norte y una puerta en la fachada sur, y cubierta inclinada en *drywall*, no ventilada; además de unos parales metálicos sobre las fachadas oriente y occidente para la instalación de los diversos diseños de revestimiento.

Es allí donde se sitúan los cuatro termopares para la medición de las superficies interiores y exteriores con el objeto de identificar las diferencias de temperatura entre estas, además de un termopar en el centro del espacio para calcular la

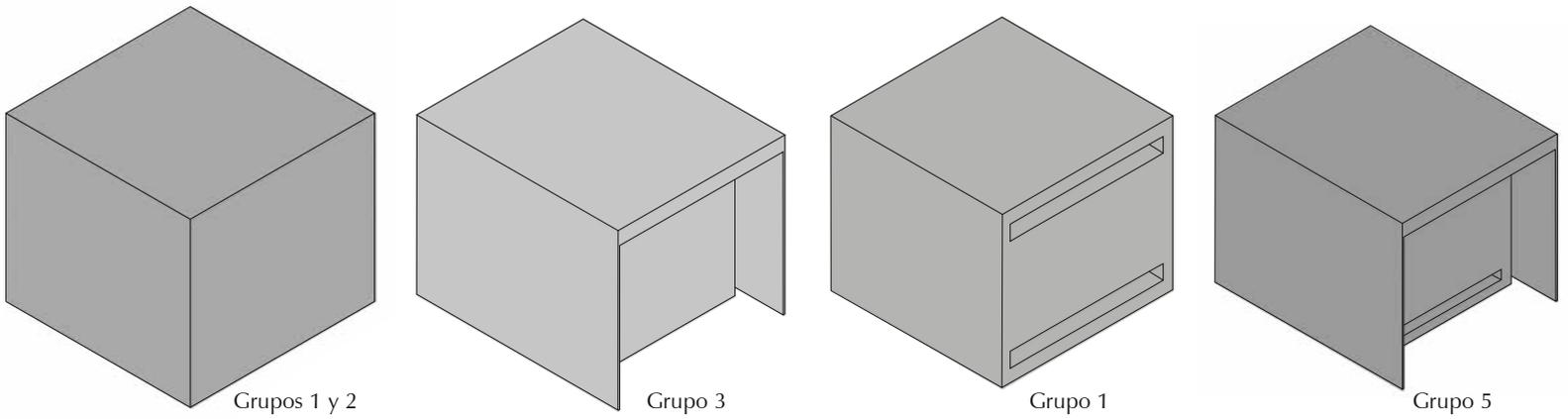


Figura 1. Esquema de las configuraciones de modelos de simulaciones según grupos
Fuente: elaboración propia, 2017.

Modelos con muro sencillo multicapa sin cámara de aire

Nº de modelo	Materiales	Composición		Operación
1	Enredadera	Polietileno alta densidad	1 mm	Capa interna
		Corcho	1 mm	Capa externa
2	Bolsillos	Ceramic tiles	2 cm	Capa interna
		Tierra	10 cm	
3	Paneles verdes	Corcho	1 mm	Capa externa
		Polietileno alta densidad	3 mm	Capa interna
4	Mampostería	Tierra	15 cm	
		Pañete	1,5 cm	Capa interna
5	Mampostería a la vista	Ladrillo	12 cm	Capa externa
		Pañete	1,5 cm	Capa interna
6	Bloque Nº 5	Bloque Nº 5	10 cm	
		Pañete	1,5 cm	Capa externa
7	Madera	Madera pino	2,5 cm	Única capa
8	Tableta	Clay tile	1 cm	Única capa
9	Fibrocemento	Fibrocemento	16 mm	Única capa
10	Vidrio	Vidrio	4 cm	Única capa
11	Madera	Pañete	1,5 cm	Capa interna
		Ladrillo	12 cm	
		Pañete	1,5 cm	
12	Tableta	Madera pino	3 cm	Capa externa
		Pañete	1,5 cm	Capa interna
		Ladrillo	12 cm	
13	Fibrocemento	Pañete	1,5 cm	Única capa
		Ladrillo	12 cm	
		Pañete	1,5 cm	Capa interna
14	PVC-Concreto	Fibrocemento	16 mm	Única capa
		PVC	2 mm	Capa interna
		Concreto	10 cm	Capa externa
15	PVC-Poliuretano	PVC	2 mm	Capa externa
		PVC	2 mm	Capa interna
		Poliuretano	10 cm	
16	PVC-Tierra	PVC	2 mm	Capa externa
		Tierra	10 cm	Capa interna

Sin ventilación

Tabla 1. Configuraciones de los modelos de simulación con muro sencillo multicapa sin cámara de aire
Fuente: elaboración propia, 2013.

Modelos con muro sencillo multicapa con cámara de aire

Nº de modelo	Materiales	Composición		Operación	
17	Madera doble	Madera pino	2,5 cm	Capa interna	Off
		Airgap	12 cm		
		Madera pino	3 cm	Capa externa	
18	Enredadera	Pañete	1,5 cm	Capa interna	Off
		Ladrillo	12 cm		
		Pañete	1,5 cm		
		Polietileno alta densidad	5 mm		
		Airgap	75 mm		
		Corcho	1 mm	Capa externa	
19	Bolsillos	Pañete	1,5 cm	Capa interna	Off
		Ladrillo	12 cm		
		Pañete	1,5 cm		
		Ceramic tiles	1 cm		
		Tierra	20 cm		
		Airgap	75 mm		
20	Paneles verdes	Corcho	1 mm	Capa externa	Off
		Pañete	1,5 cm	Capa interna	
		Ladrillo	12 cm		
		Pañete	1,5 cm		
		Polietileno alta densidad	3 mm		
		Tierra	15 cm		
21	PVC	PVC	2 mm	Capa interna	Off
		Airgap	10 cm		
		PVC	2 mm	Capa externa	
22	PVC compuesto de aire	PVC	3 mm	Capa interna	Off
		Airgap	20 cm		
		PVC	2 mm	Capa externa	
		Airgap	10 cm		
23	PVC compuesto de perlita	PVC	3 mm	Capa interna	Off
		Airgap	20 cm		
		PVC	2 mm	Capa externa	
		Perlita	10 cm		
24	PVC compuesto de leca	PVC	3 mm	Capa interna	Off
		Airgap	20 cm		
		PVC	2 mm	Capa externa	
		Leca	10 cm		
25	PVC compuesto de tierra	PVC	3 mm	Capa interna	Off
		Airgap	20 cm		
		PVC	2 mm	Capa externa	
		Tierra	10 cm		
26	PVC compuesto de concreto	PVC	3 mm	Capa interna	Off
		Airgap	20 cm		
		PVC	2 mm	Capa externa	
		Concreto	10 cm		
27	PVC compuesto de leca abertura 30% vent. sin operación nocturna	PVC	3 mm	Capa interna	Off
		Airgap	20 cm		
		PVC	2 mm	Capa externa	
		Leca	10 cm		
		PVC	2 mm	Capa externa	

Tabla 2. Configuraciones de los modelos de simulación con muro sencillo multicapa con cámara de aire
Fuente: elaboración propia, 2013.

Modelos con muro doble con protección solar en los costados de mayor exposición oriente-occidente y zenit, con cámara de aire

Nº de modelo	Materiales	Composición			Operación
28	Ext: Enredadera -Int: Mamp 12 cm + Madera 5 cm	Madera pino	2,5 cm	Capa interna	Off
		Ladrillo	12 cm		
		Madera pino	2,5 cm		
		Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)			
		Polietileno alta densidad	5 mm		
		Airgap	75 mm		
		Corcho	1 mm	Capa externa	
29	Ext: Enredadera-Int: Mamp 24 cm + Madera 5 cm	Madera pino	2,5 cm	Capa interna	Off
		Ladrillo	24 cm		
		Madera pino	2,5 cm	Capa externa	
		Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)			
		Polietileno alta densidad	5 mm	Capa interna	
		Airgap	75 mm		
		Corcho	1 mm	Capa externa	
30	Ext: Panel verde-Int: Mamp 12 cm + Madera 5 cm	Madera pino	2,5 cm	Capa interna	Off
		Ladrillo	12 cm		
		Madera pino	2,5 cm	Capa externa	
		Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)			
		Polietileno alta densidad	3 mm	Capa interna	
		Tierra	15 cm		
		Airgap	75 mm		
31	Ext: Panel verde-Int: Mamp 24 cm + Madera 5 cm	Madera Pino	2,5cm	Capa interna	Off
		Ladrillo	24cm		
		Madera Pino	2,5cm	Capa externa	
		Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)			
		Polietileno alta densidad	3 mm	Capa interna	
		Tierra	15 cm		
		Airgap	75 mm		
32	Ext: Bol-sillos-Int: Mamp 12 cm + Madera 5 cm	Madera pino	2,5 cm	Capa interna	Off
		Ladrillo	12 cm		
		Madera pino	2,5 cm	Capa externa	
		Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)			
		Ceramic tiles	1 cm	Capa interna	
		Tierra	20 cm		
		Airgap	75 mm		
33	Ext: Bol-sillos-Int: Mamp 24 cm + Madera 5 cm	Madera pino	2,5 cm	Capa interna	Off
		Ladrillo	24 cm		
		Madera pino	2,5 cm	Capa externa	
		Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)			
		Ceramic tiles	1 cm	Capa interna	
		Tierra	20 cm		
		Airgap	75 mm		
34	Ext: Mamp 15 cm-Int: Mamp 15 cm	Pañete	1,5 cm	Capa interna	Off
		Ladrillo	12 cm		
		Pañete	1,5 cm	Capa externa	
		Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)			
		Pañete	1,5 cm	Capa interna	
		Ladrillo	12 cm		
		Pañete	1,5 cm	Capa externa	
35	Ext: Mamp 15 cm-Int: Mamp 27 cm	Pañete	1,5 cm	Capa interna	Off
		Ladrillo	12 cm		
		Pañete	1,5 cm	Capa externa	
		Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)			
		Pañete	1,5 cm	Capa interna	
		Ladrillo	12 cm		
		Pañete	1,5 cm	Capa externa	
36	Ext: Mamp 15 cm-Int: Mamp 12 cm + Madera 5 cm	Madera pino	2,5 cm	Capa interna	Off
		Ladrillo	12 cm		
		Madera pino	2,5 cm	Capa externa	
		Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)			
		Pañete	1,5 cm	Capa interna	
		Ladrillo	12 cm		
		Pañete	1,5 cm	Capa externa	



Nº de modelo	Materiales	Composición			Operación
37	Ext: Mamp 15 cm-Int: Mamp 24 cm + Madera 5 cm	Madera Pino	2,5 cm	Capa interna	Off
		Ladrillo	24 cm		
		Madera Pino	2,5 cm	Capa externa	
		Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)			
		Pañete	1,5 cm	Capa interna	
		Ladrillo	12 cm		
38	Ext: Mamp 3 cm-Int: Mamp 15 cm	Pañete	1,5 cm	Capa externa	Off
		Pañete	1,5 cm	Capa interna	
		Ladrillo	12 cm		
		Pañete	1,5 cm	Capa externa	
		Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)			
		Ladrillo	3 cm	Única capa	
39	Ext: Cerámica 4 cm-Int: Mamp 24 cm + Madera 5 cm	Madera pino	2,5 cm	Capa interna	Off
		Ladrillo	24 cm		
		Madera pino	2,5 cm	Capa externa	
		Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)			
		Cerámica	4cm	Única capa	
		Pañete	1,5 cm	Capa interna	
40	Ext: Cerámica 4 cm-Int: Mamp 12 cm + airgap 12 cm + Madera 2,5 cm	Ladrillo	6 cm		Off
		Airgap	12 cm		
		Ladrillo	6 cm		
		Madera pino	2,5 cm	Capa externa	
		Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)			
		Cerámica	4 cm	Única capa	
41	Ext: Cerámica 4 cm-Int: Termoarcilla 24 cm + Madera 2,5 cm	Pañete	1,5 cm	Capa interna	Off
		Termoarcilla	24 cm		
		Madera Pino	2,5 cm	Capa externa	
		Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)			
		Cerámica	4 cm	Única capa	
		Pañete	1,5 cm	Capa interna	
42	Int Mampostería Ext PVC	Mampostería	12 cm		Off
		Pañete	1,5 cm	Capa externa	
		Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)			
		PVC	2 mm	Capa interna	
		Airgap	10 cm		
		PVC	2 mm	Capa externa	
43	Int PVC Ext PVC	PVC	2 mm	Capa interna	Off
		Airgap	10 cm		
		PVC	2 mm	Capa externa	
		Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)			
		PVC	2 mm	Capa interna	
		Airgap	10 mm		
44	Int PVC Madera 2,5 cm Ext Madera 2,5 cm	PVC	2 mm	Capa externa	Off
		Madera pino	2,5 cm	Capa interna	
		PVC	2 mm		
		Airgap	10 cm		
		PVC	2 mm	Capa externa	
		Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)			
45	Int PVC Madera 2,5 cm Ext Panel verde	Madera pino	2,5 cm	Única capa	Off
		Madera pino	2,5 cm	Capa interna	
		PVC	2 mm		
		airgap	10 cm		
		PVC	2 mm	Capa externa	
		Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)			
		Polietileno de alta densidad	3 mm	Capa Interna	
		Tierra	15 cm		
		Airgap	75 mm		
		Corcho	1 mm	Capa externa	

Tabla 3. Configuraciones de los modelos de simulación con muro doble con protección solar en los costados de mayor exposición oriente-occidente y zenit, con cámara de aire

Fuente: elaboración propia, 2013.

Modelos con muro sencillo multicapa ventilada

Nº de modelo	Materiales	Composición			Operación
46	Mampostería 15 cm - ventilación inferior - 3,8%	Pañete	1,5 cm	Capa interna	On
		Ladrillo	12 cm		
47	Mampostería 15 cm - ventilación superior - 3,8%	Pañete	1,5 cm	Capa externa	On
		Ladrillo	12 cm		
48	Mampostería 15 cm - ventilación superior 3,8% - inferior 3,8%	Pañete	1,5 cm	Capa interna	On
		Ladrillo	12 cm		
49	Mampostería 15 cm - puerta-ventana	Pañete	1,5 cm	Capa externa	On
		Ladrillo	12 cm		
50	Mampostería 15 cm - puerta-ventana	Pañete	1,5 cm	capa interna	On
		Ladrillo	12 cm		
51	Cubo Básico 6,6% superior - 6,6% inferior	Pañete	1,5 cm	Capa externa	On
		Ladrillo	12 cm		
52	Cubo Básico 33% superior - 33% inferior	Pañete	1,5 cm	Capa interna	On
		Ladrillo	12 cm		
53	Cubo Básico 66% superior - 66% inferior	Pañete	1,5 cm	Capa externa	On
		Ladrillo	12 cm		
54	Cubo Básico 100% superficie	Pañete	1,5 cm	Capa interna	On
		Ladrillo	12 cm		
55	PVC compuesto de Leca abertura 30% vent. nocturna	PVC	3 mm	Capa interna	22:00 a 7:00
		Airgap	20 cm		
		PVC	2 mm		
		Leca	10 cm		
56	PVC compuesto de Leca abertura 30% - ventana sin operación nocturna	PVC	2 mm	Capa externa	22:00 a 7:00
		PVC	3 mm	Capa interna	
		Airgap	20 cm		
		Leca	10 cm		
57	PVC compuesto de Leca abertura 30% - ventana con operación nocturna	PVC	2 mm	Capa externa	22:00 a 7:00
		PVC	3 mm	Capa interna	
		Airgap	20 cm		
		Leca	10 cm		
58	PVC compuesto de Leca abertura 30% - ventana nocturna pantalla cerrando ventana	PVC	2 mm	Capa externa	22:00 a 7:00
		PVC	3 mm	Capa interna	
		Airgap	20 cm		
		Leca	10 cm		
59	PVC compuesto de Leca abertura 15% - ventana nocturna	PVC	2 mm	Capa externa	22:00 a 7:00
		PVC	3 mm	Capa interna	
		Airgap	20 cm		
		Leca	10 cm		

Tabla 4. Configuraciones de los modelos de simulación con muro sencillo multicapa ventilada

Fuente: elaboración propia, 2013.

Modelos con muro doble con protección solar en los costados de mayor exposición oriente-occidente y zenit, con ventilación

Nº demodelo	Materiales	Composición	Operación
60	Cerámica ventilación hole 0%	Madera Pino 2,5 cm	On
		Ladrillo 24 cm	
		Airgap 12 cm	
		Madera Pino 2,5 cm	
		Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)	
61	Cerámica ventilación hole 6,6% inferior - 6,6% superior	Cerámica 4 cm	On
		Madera Pino 2,5 cm	
		Ladrillo 24 cm	
		Airgap 12 cm	
		Madera Pino 2,5 cm	
62	Cerámica ventilación hole 33% superior - 33% inferior	Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)	On
		Cerámica 4 cm	
		Madera Pino 2,5 cm	
		Ladrillo 24 cm	
		Airgap 12 cm	
63	Cerámica ventilación hole 66% superior - 66% inferior	Madera Pino 2,5 cm	On
		Ladrillo 24 cm	
		Airgap 12 cm	
		Madera Pino 2,5 cm	
		Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)	
64	Cerámica ventilación hole 100% superficie	Cerámica 4 cm	On
		Madera Pino 2,5 cm	
		Ladrillo 24 cm	
		Airgap 12 cm	
		Madera Pino 2,5 cm	
65	Guadua	Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)	On
		Cerámica 4 cm	
		Madera Pino 2,5 cm	
		Termoarcilla 24 cm	
		Airgap 12 cm	
66	Ladrillo Helios	Madera Pino 2,5 cm	On
		Ladrillo 24 cm	
		Airgap 12 cm	
		Madera Pino 2,5 cm	
		Espacio de separación entre muro y elemento de protección solar (15 cm)	
		Cerámica Helios 4 cm	Única capa

Tabla 5. Configuraciones de los modelos de simulación con muro doble con protección solar en los costados de mayor exposición oriente-occidente y zenit, con ventilación

Fuente: elaboración propia, 2013.

temperatura interior del aire. Tales condiciones del prototipo son recreadas en el modelo para las simulaciones ambientales (Figura 2).

Para esta etapa del proyecto las mediciones y simulaciones se realizaron en el periodo entre octubre y diciembre de 2012, con recolección de datos a través de un *data logger* (registrador de datos) y un anemómetro, identificando el comportamiento de las 24 horas de un día, una vez por semana, a fin de poder contrastar los datos.

Parámetros de diseño de tres casos propuestos

Finalmente, con un modelo digital calibrado, y la experiencia de las mediciones y simulaciones realizadas, se propuso el diseño de tres sistemas de fachada diferenciados, para ser analizados mediante simulaciones ambientales. Estos sistemas fueron: Modelo 1 - Fachada doble capa (no ventilada) con masa térmica externa; Modelo 2 - Fachada en PVC sin masa térmica (ventilada); Modelo 3 - Fachada doble capa (no ventilada) con masa térmica interna (Figura 3).

Para ello se establecen tres fechas de análisis que contemplan las condiciones extremas a las cuales deberían responder los dos diseños, por lo cual las simulaciones se realizan el día de mayor temperatura identificado como el 5 de agosto; el día con la temperatura más baja, el 16 de noviembre, y el día de temperatura promedio registrado como el 28 de julio; tales simulaciones son elaboradas con intervalos horarios con el fin de establecer la incidencia de los elementos diseñados en términos de temperaturas en el transcurso de un día. Los archivos de datos climáticos son extraídos de la base de datos de *Meteonorm* (2018).

En relación con la configuración del modelo de análisis, se establece como herramienta el *software* Design Builder® en funcionamiento con EnergyPlus®, un software de código abierto desarrollado por el Departamento de Energía de Estados Unidos (U.S. Department of Energy / DOE, 2018). EnergyPlus es un motor de cálculo para simulaciones térmicas en edificaciones que permite modelar sistemas de ventilación natural usando un mecanismo de flujo de aire aproximado según Mateus, Pinto y Carrilho da Graça (2014, p. 515).

Según Blanco, Buruaga, Rojí, Cuadrado y Pelaz (2016, p. 327), Andelkovic, Mujan y Dakic (2016, p. 30) y Andarini (2014, p. 218), Design Builder® considera de manera precisa la incidencia de la radiación solar sobre los materiales, tanto como la radiación solar difusa y directa; además, permite de forma precisa, detallada y relativamente rápida, modelar geometrías en tres dimensiones de edificaciones para la evaluación de desempeño energético, confort térmico, ganancias o pérdidas de temperatura, producción de CO₂ de sistemas activos, y análisis de fluido dinámico computacional, razón por la cual se escoge como herramienta de simulación en la investigación.

Teniendo en cuenta que, como mencionan Mateus *et al.* (2014, p. 515), las decisiones tomadas en el modelado de las zonas térmicas pueden tener impactos en los resultados, se diseñó el modelo como un edificio que contiene tres bloques: el primer edificio recoge los datos del modelo completo; el segundo, denominado "casa", resume los datos de la zona interior del prototipo, que permite verificar la temperatura del espacio revestido por los diseños que se van a analizar; el tercero, denominado "sistema", recoge los datos de análisis de la zona intermedia

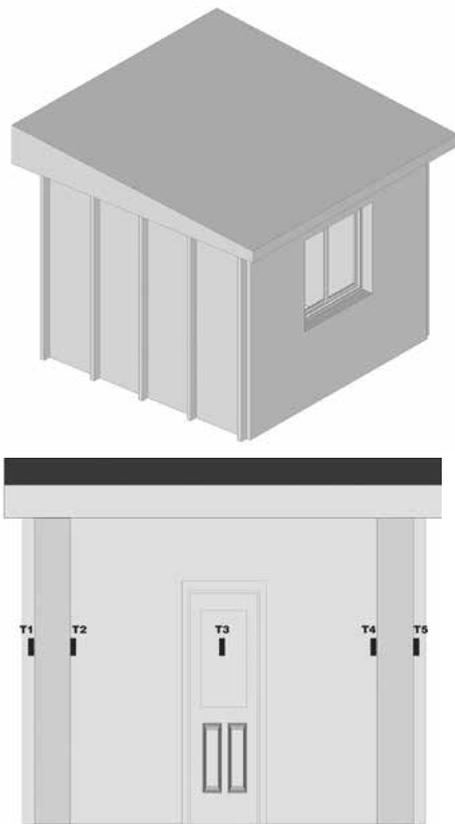


Figura 2. Modelo básico y ubicación de termopares en el prototipo
Fuente: elaboración propia, 2017.

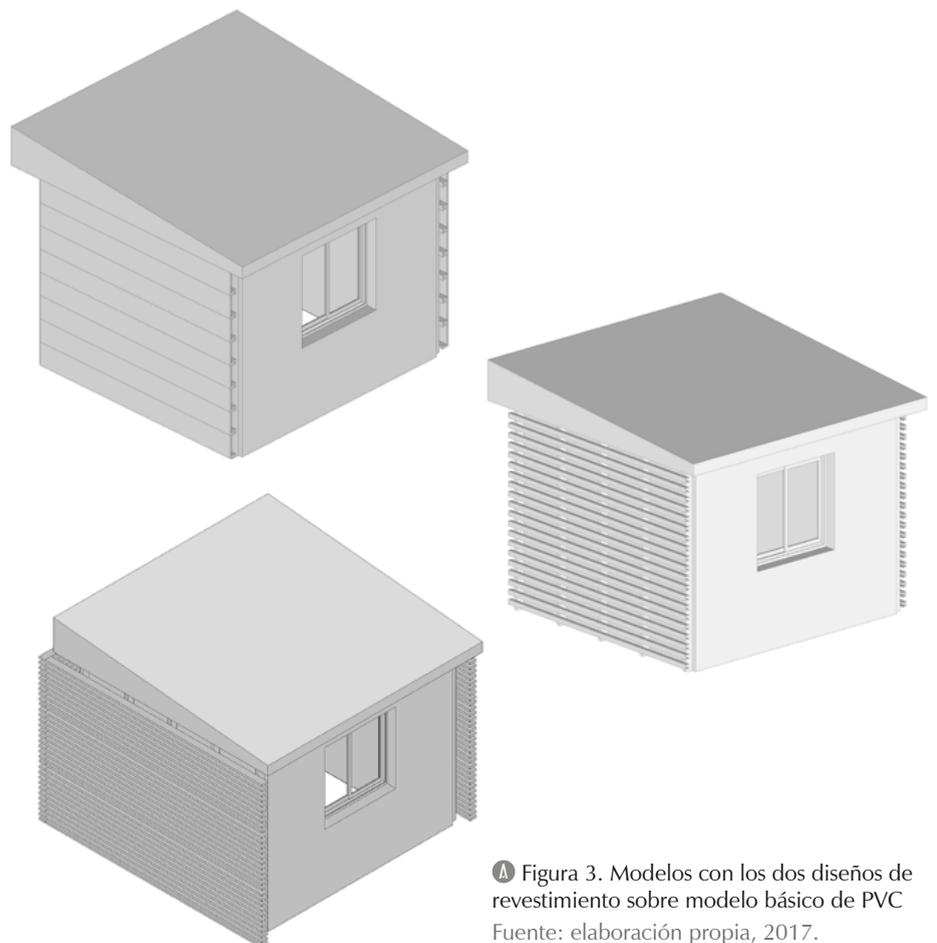


Figura 3. Modelos con los dos diseños de revestimiento sobre modelo básico de PVC
Fuente: elaboración propia, 2017.

entre los diseños de fachada ventilada propuesta y el interior de la construcción.

La elaboración de las tres zonas establecidas permite recoger los resultados de temperatura asumiendo como parámetro de análisis la temperatura operativa que se presenta como promedio entre la temperatura del aire interior y la radiante; además de la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa; asimismo, registrar resultados de superficie interior y exterior en relación con la temperatura de bulbo seco.

La descripción de las tres zonas coincide con el prototipo realizado, y es presentada en términos del edificio con actividad definida como desocupado, con muros externos en PVC de 2 mm, con cámara de aire de 6 cm no ventilada y de nuevo recubrimiento de PVC de 2 mm, cubierta de *drywall* de 12 cm no ventilada, y suelo de concreto de 12 cm; ventanas con marco en madera de roble pintado en la fachada norte, y una puerta en madera y vidrio en la fachada sur. La zona denominada casa tiene las mismas condiciones; mientras que para la zona denominada sistema se considera la actividad para una zona estándar desocupada, con muros externos de PVC, en donde el muro oriental adyacente a la fachada ventilada diseñada, el suelo, las dos superficies laterales y la superficie superior se encuentran perforados por un vano. La cavidad de la fachada ventilada corresponde a 10 cm, en

concordancia con lo establecido por Poirazis (2004, p. 25), y Barbosa e Ip (2014, p. 1020), en donde el espesor de la cavidad varía de acuerdo con el diseño de la fachada y los requerimientos de mantenimiento y limpieza. En relación con la definición de los tres sistemas de fachada opaca diseñados en el modelo, se dispuso el sistema como bloques de componente (Tabla 6).

Resultados

Simulaciones y estudios previos

Los resultados de las 66 simulaciones realizadas demuestran que el Grupo 3 (modelos 28-45), modelos con cámara de aire, tienen el mejor comportamiento general, conservando temperaturas internas cercanas a las mínimas del día tal como se describe en Varini (2011, p. 5; 2013, p. 27) (Gráfica 1).

Medición de prototipo en sitio para calibración de simulaciones

Como resultado de las simulaciones para reconocer el desempeño del material PVC frente a materiales convencionales como la mampostería, se registró que el PVC redujo hasta 3 °C la temperatura, el 21 de julio que es un día de temperatura extrema, frente a la mampostería que redujo 2,2 °C centígrados de temperatura interior, es decir, el modelo compuesto por PVC presentó mejor desempeño.

Configuración de materiales en modelos de simulación

Modelo	Capa	Espesor (m)	Conductividad térmica (W/m K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg K)
Modelo básico	PVC	0,002	0,16	1380	1000
	Airgap	0,06	-	-	-
Modelo 1. Fachada doble capa (no ventilada) con masa térmica externa	PVC	0,002	0,16	1380	1000
	PVC	0,002	0,16	1380	1000
	Airgap	0,06	-	-	-
	Concreto	0,05	0,9	1950	840
Modelo 2. Fachada ventilada en PVC (sin masa térmica)	PVC	0,002	0,16	1380	1000
	Airgap	0,06	-	-	-
	PVC	0,002	0,16	1380	1000
	Concreto	0,05	0,9	1950	840
Modelo 3. Fachada doble capa (no ventilada) con masa térmica interna	Revoque	0,01	0,431	1250	1088
	Mampuesto	0,11	0,711	2000	836.8
	Revoque	0,01	0,431	1250	1088
	Concreto	0,05	0,9	1950	840

Gráfica 1. Resultados de simulaciones realizadas comparando temperaturas máximas y mínimas exteriores e interiores

Fuente: elaboración propia, 2017.

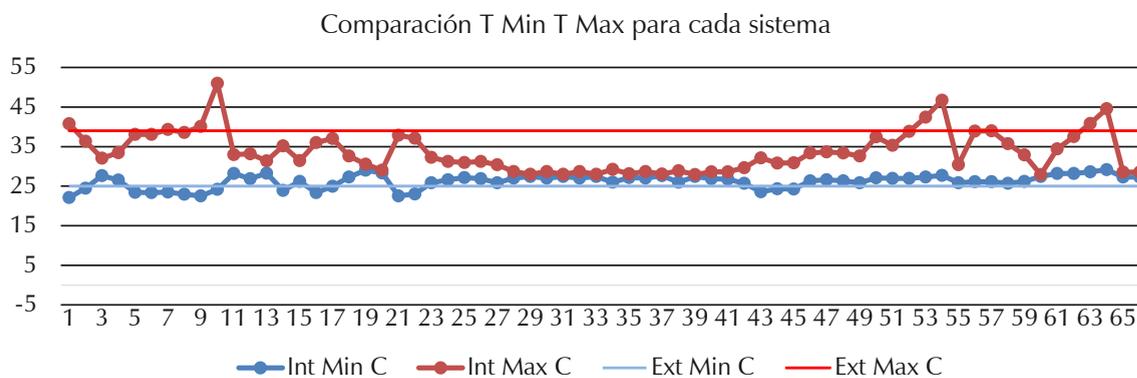
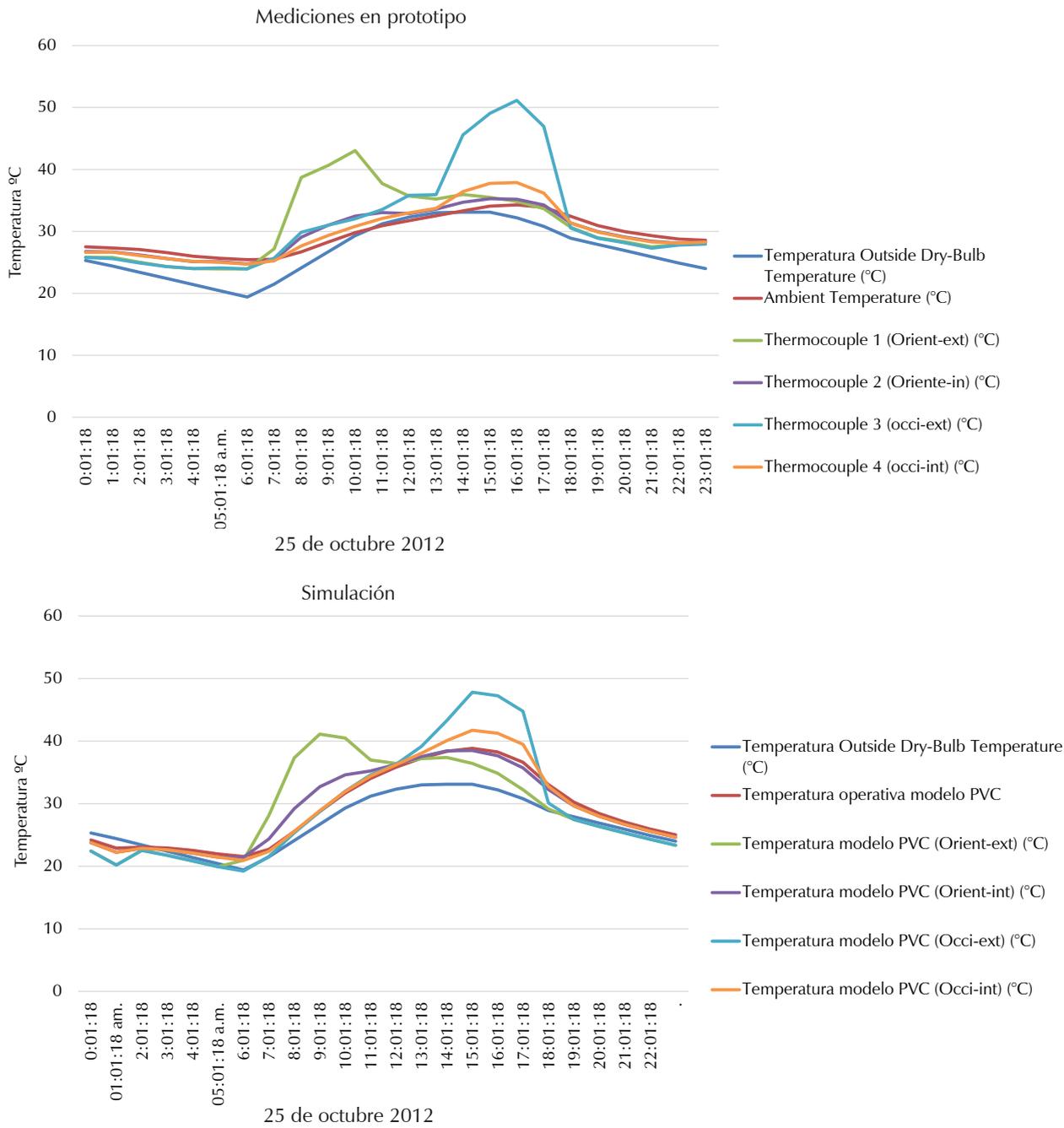


Tabla 6. Especificaciones de configuraciones de materiales para fachadas de los modelos de simulación

Fuente: elaboración propia, 2017.



Gráfica 2. Resultados de simulaciones y mediciones en el prototipo el 25 de octubre de 2012
Fuente: elaboración propia, 2017.

Respecto a las simulaciones del modelo en PVC frente a las mediciones del prototipo construido en Girardot, aunque estas develan tendencias similares en el comportamiento del material en el registro horario, como se presenta en el análisis del 25 de octubre (Gráfica 2), existen diferencias de temperatura al interior del espacio hasta de 6 °C en casos como el 8 y 30 de noviembre, y 8 de diciembre.

Así, la confrontación de mediciones y simulaciones presentadas permitió identificar que aunque la construcción con PVC disminuye la temperatura al interior y permite una diferencia de esta entre la superficie interior y exterior que componen la edificación, el desempeño total no alcanza aún los valores de confort al interior del espacio; por tanto, es necesario hacer estudios sobre el diseño de revestimiento de fachada que complementen este sistema o contribuya a mejorar el desempeño térmico.

Simulaciones finales para los tres casos propuestos

Dado lo anterior, se realizaron simulaciones ambientales sobre el modelo en PVC presentado, para verificar el comportamiento de los dos

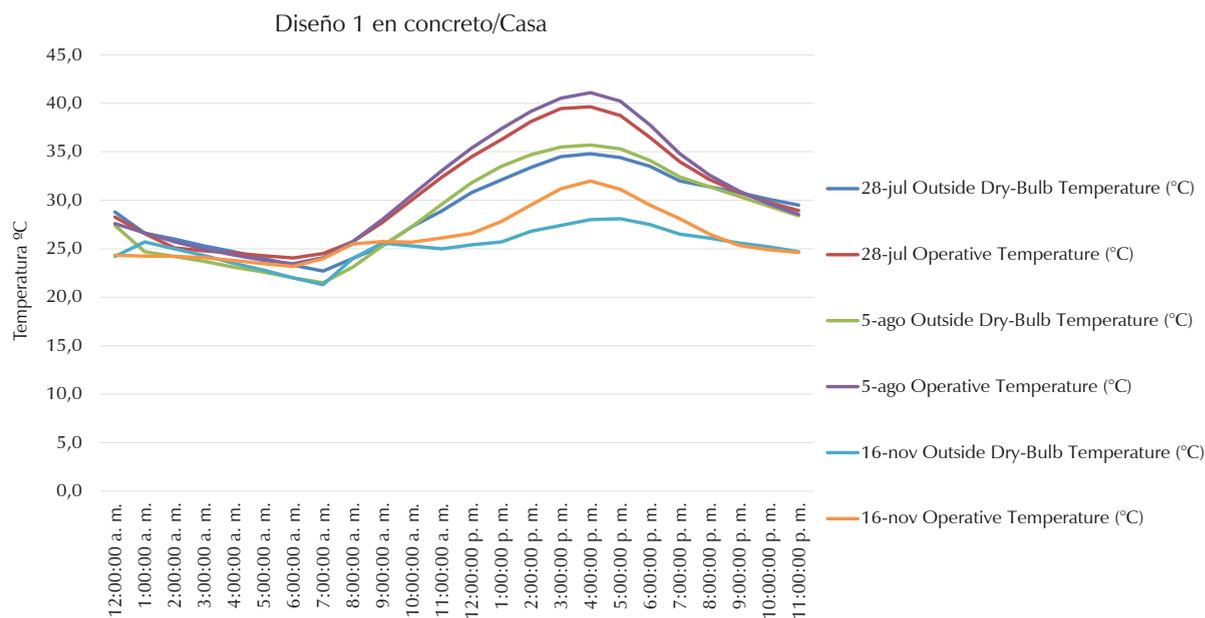
diseños de revestimientos mencionados en las tres fechas seleccionadas (28 de julio, 5 de agosto y 16 de noviembre), diferenciando la temperatura exterior de bulbo seco y la temperatura operativa, y la divergencia entre los dos datos para dilucidar cuántos grados centígrados puede reducir o aumentar el sistema de fachada.

Modelo 1

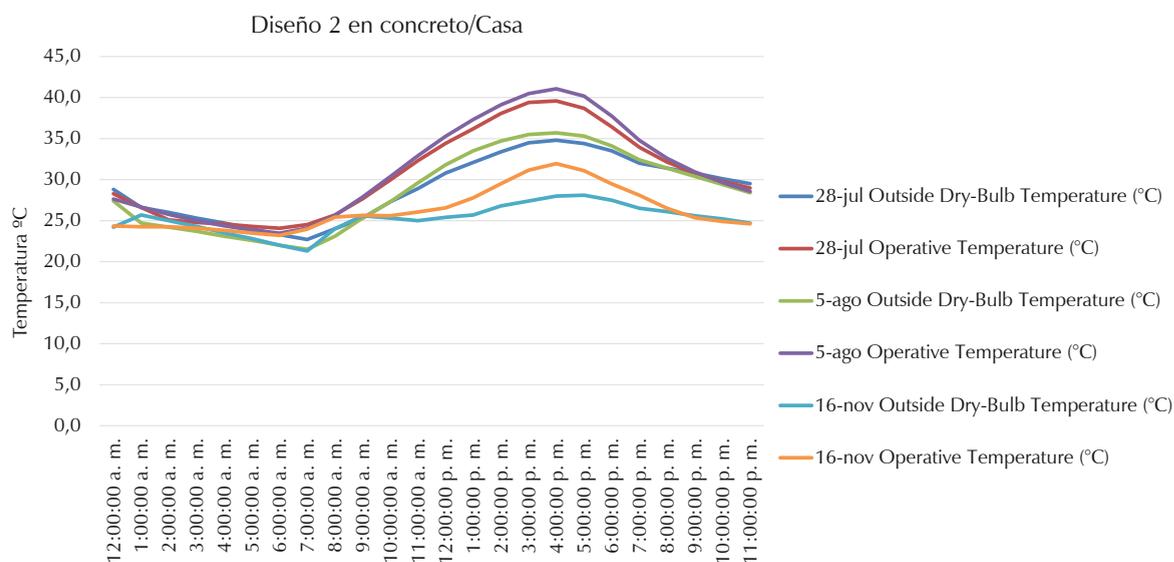
En el análisis del modelo 1 en concreto se encontró que en la zona denominada edificio se registró una pérdida de calor hasta de 2,8 °C entre 1:00 y 2:00 a.m. el 28 de julio y 16 de noviembre y, de 1,2 °C el 5 de agosto, y ganancia de calor hasta de 11,9 °C entre 2:00 y 3:00 p.m., consideradas las horas de mayor temperatura. En relación con la zona denominada casa, la pérdida de calor se redujo casi a la mitad el 16 de noviembre –hasta 1,5 °C a la 1:00 a.m.–; el 28 de julio se redujo a 0,9 °C, y en agosto no hubo reducción, solo ganancia de calor hasta de 5,4 °C entre 3:00 y 4:00 p.m., consideradas las horas de mayor temperatura (Gráfica 3).

Modelo 2

En el modelo 2, con el material de concreto, se encontró que en la zona denominada edificio



Gráfica 3. Datos de simulación del modelo 1 en concreto, zona denominada casa
Fuente: elaboración propia, 2017.



Gráfica 4. Datos de simulación del modelo 2 en concreto, zona denominada casa
Fuente: elaboración propia, 2017.

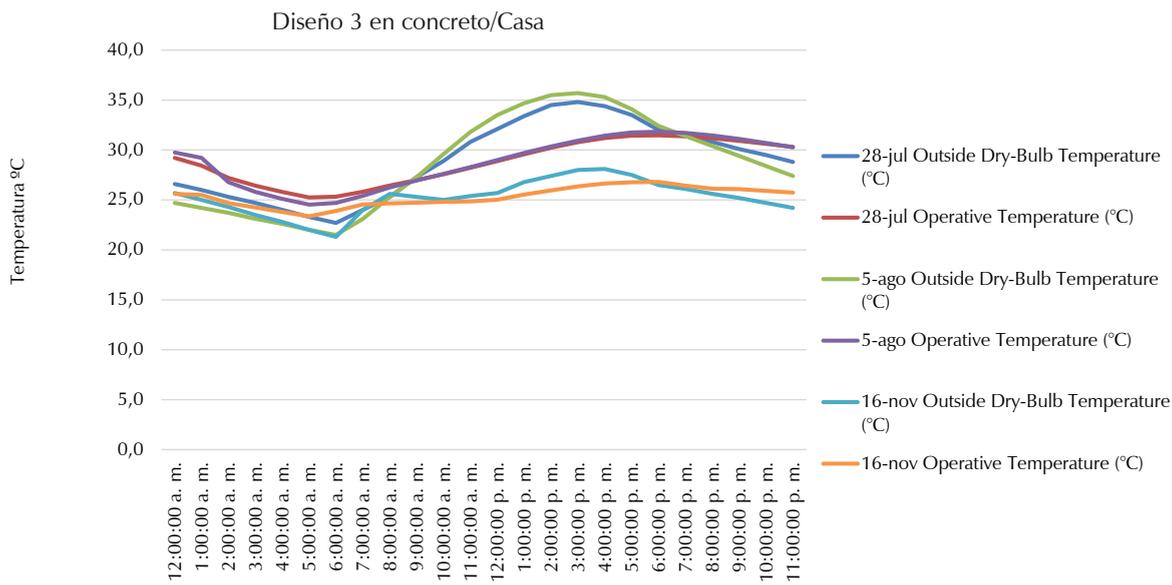
se registró una pérdida de calor hasta de 2,8 °C entre 1:00 y 2:00 a.m. el 28 de julio y 16 de noviembre, y de 1,2 °C el 5 de agosto, y ganancia de calor hasta de 11,9 °C entre 2:00 y 3:00 p.m., consideradas las horas de mayor temperatura. En relación con la zona denominada casa, la pérdida de calor se redujo casi a la mitad el 16 de noviembre –hasta 1,4 °C a la 1:00 a.m.–; el 28 de julio se redujo a 0,9 °C, y en agosto no hubo reducción, solo ganancia de calor hasta de 5,4 °C entre 3:00 y 4:00 p.m. (Gráfica 4).

Modelo 3

Con el análisis de las simulaciones es posible deducir que la incidencia de los dos sistemas anteriores sobre la temperatura interior de la zona denominada casa es muy baja, lo que puede atribuirse al espesor de los sistemas de fachada; por otra parte, aunque con una ligera diferencia, se deriva mejor desempeño en el modelo 2, que demuestra iguales pérdidas de calor pero menor ganancia de temperatura; no obstante, la temperatura interior sigue siendo muy alta, por lo que se hace necesario implementar además algunas estrategias pasivas, mencionadas en Velasco, Hudson y Luciani (2017, p. 999), como protección solar, masa térmica, ventilación nocturna, puestas a prueba con simulaciones sobre el modelo base en PVC.

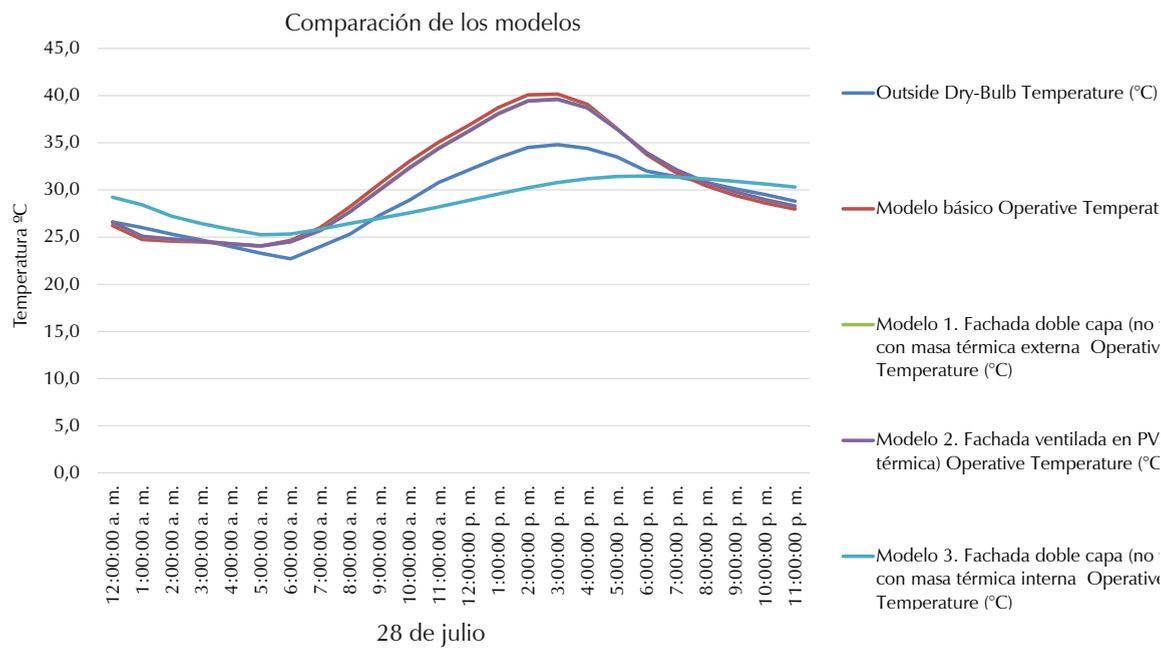
Las nuevas estrategias comprenden, para la cubierta, una capa de aislamiento de 5 cm en poliestireno expandido sobre la configuración inicial, además de un elemento de sombreado a 50 cm de la cubierta, lo que crea una cámara de aire y protege de la radiación solar directa; con relación a la envolvente, se añadieron persianas como control solar a fin de reducir la absorción de calor por radiación directa; las persianas están dispuestas a 20 cm de la superficie externa del volumen y configuran una superficie ventilada; asimismo, se implementó la operación de aperturas para la ventilación natural nocturna sobre las ventanas, dispuestas en la parte superior de las superficies, a fin de permitir la ventilación cruzada, y se aumentó la masa térmica ampliando el espesor del muro a 50 cm en concreto (Gráfica 5).

La simulación del modelo con las estrategias de protección solar, aumento de masa térmica y ventilación nocturna, presenta una reducción de la temperatura interior de 8,6 °C frente al modelo base sin fachada ventilada, y de 3,5 °C con respecto a la temperatura exterior, y evidencia mayor efectividad que los modelos anteriores en los que la reducción de temperatura frente al modelo base fue de aproximadamente 3,0 °C; también presenta disminución de temperaturas con respecto a la temperatura de bulbo seco (Gráfica 6).



Gráfica 5. Datos de simulación del modelo 3, con estrategias en la zona denominada casa

Fuente: elaboración propia, 2017.



Gráfica 6. Datos de simulación de los modelos analizados

Fuente: elaboración propia, 2017.

Discusión

Con respecto a las diferencias encontradas entre las mediciones en sitio y las simulaciones, autores como Marinosci, Semprini y Morini (2014, p. 280) consideran que en general hay una dificultad por predecir el comportamiento de este tipo de sistemas, debido a la fuerte influencia de algunos parámetros como las cambiantes condiciones externas, tales como radiación solar y velocidad del viento; la configuración de patrones de flujos de aire y el comportamiento de la radiación de las superficies externas e internas.

Asimismo, Kim y Park (2011, p. 3636) sugieren que gran parte de las discrepancias entre simulaciones y mediciones pueden ser influenciadas por tres situaciones; la primera es la incertidumbre sobre los parámetros de entrada para las simulaciones y las mediciones; la segunda son las suposiciones o simplificaciones de la realidad durante el proceso de modelado; y por último, las limitaciones de la herramienta, que en el caso de Design Builder® en funcionamiento con EnergyPlus®, las dificultades podrían presentarse en las opciones de simplificación del modelo, en las decisiones sobre el modelado de la totalidad del edificio o en la incertidumbre sobre los datos de entrada de los flujos de viento alrededor del edificio, esta última tam-

bién mencionada por Kim y Park (2011, p. 3644) y Vernay, Raphael y Smith (2014, p. 412).

Otro aspecto por considerar sobre las diferencias entre simulaciones y mediciones es la fiabilidad de los archivos de datos climáticos con los que se realizan las simulaciones; según Pyrgou, Castaldo, Pisello, Cotana y Santamouris (2017, p. 224), los archivos comúnmente usados no consideran el impacto del fenómeno de microclima en contexto urbano ni los eventos aleatorios de clima extremo, que pueden alterar significativamente el comportamiento térmico y energético de las edificaciones, lo que acarrea consecuencias no solo en las decisiones de los diseñadores e investigadores procurando predecir el desempeño térmico y energético, sino también para las industrias y los proyectos que buscan pronosticar la eficiencia de fuentes renovables de energía por medio de herramientas de simulación.

En el caso de Girardot, el archivo de datos climáticos extraído de la base de datos de Meternorm está basado en información recogida por la estación meteorológica de Santiago, ubicada en el aeropuerto de Flandes, a una distancia de 6,14 km del sitio de construcción del prototipo que se encuentra en el área urbana, lo que explicaría por qué es más alta la temperatura en las mediciones en sitio que en las simulaciones; no obstante las

diferencias, hay que reconocer que las tendencias son similares y es posible comprender las dinámicas de funcionamiento de la edificación aun cuando los resultados numéricos no sean idénticos.

Por otra parte, sobre los resultados de los diseños de fachadas ventiladas con respecto al modelo base en PVC la discusión se centra en la relación costo-desempeño, al considerar que, aunque el sistema de fachada ventilada puede disminuir la temperatura interior en la edificación, la construcción de la misma aumentaría el valor de la inversión en construcción de la edificación; esto lleva a preguntarse si tal disminución de temperatura puede ser suficiente para no usar sistemas mecánicos de ventilación, y, de ser así, si es razonable el costo económico. En caso de no reducir suficientemente la temperatura al interior aumentaría el costo, no solo de construcción, sino además de consumo energético y disminución del área útil de la edificación, lo que incrementaría las desventajas de este sistema.

Asimismo, en cuanto al ahorro de consumo energético, Gratia y De Herde (2004, p. 1150) afirman que este puede ser reducido por el hecho de que la doble fachada puede disminuir el paso de luz al interior del espacio, lo que lleva a mantener encendido el sistema de iluminación por periodos prolongados, hecho que incrementa el costo total de consumo.

Por último, la simulación del modelo con las estrategias demuestra que hay mayor efectividad en aumentar la inercia térmica, y en ventilación nocturna; Gratia y De Herde (2007, p. 447) señalan que la ventilación natural nocturna reduce en general las cargas de refrigeración, y resaltan la importancia de la relación entre inercia térmica y disminución de la temperatura durante la noche; sumado a esto, Gagliano, Patania, Nocera y Signorello (2014, p. 369) afirman que el cierre de ventilación en horas diurnas es más efectivo, pero es contrario a las preferencias de los habitantes sobre la apertura de las ventanas durante el día.

El desarrollo de las simulaciones y mediciones de desempeño de las fachadas ventiladas en clima cálido húmedo permitió identificar que, como afirman Gaillard, Giroux-Julien, Ménézo y Pabiou (2014, p. 241), es indispensable monitorear los sistemas en prototipos a escala real como una herramienta para verificar y mejorar el comportamiento de los diseños de fachadas; así como el desarrollo de simulaciones térmicas como un medio para evaluar el desempeño energético; por esta razón, autores como Andarini (2014, p. 225) recomiendan el uso de las simulaciones durante la fase inicial de diseño debido a que en esta etapa hay más oportunidades de mejorar y realizar un diseño más cercano a la realidad. Esta herramienta permite también modelar diversos escenarios en función de obtener, no solo óptimos diseños, sino de optimizar la operación y el desempeño del mismo a fin de prever la respuesta de la edificación ante condiciones adversas.

Asimismo, este estudio permitió comprender la importancia de la creación de nuevos archivos climáticos que, como mencionan Pyrgou et al. (2017,

p. 236), deben construirse a través de la recolección de estaciones climatológicas locales instaladas en áreas urbanas a fin de considerar fenómenos como los microclimas, o el efecto isla de calor, y las particularidades del clima en contexto urbano para reducir así el margen de error en las predicciones de comportamientos térmicos y energéticos, reforzando las decisiones de diseño en la búsqueda de resultados cercanos a la realidad.

En el contexto colombiano es necesaria la creación de archivos climáticos actualizados con las mediciones de los últimos años considerando las variaciones del clima propias del contexto urbano, pero en especial la creación de archivos de acceso abierto debido a que en la actualidad el único archivo de datos climáticos disponible abiertamente es el de la ciudad Bogotá, lo que dificulta la precisión de las simulaciones si se tiene en cuenta la diversidad geográfica del país y la particularidad de los climas locales.

Conclusiones

En términos generales, y de acuerdo con los resultados de las mediciones y simulaciones realizadas, es posible generar las siguientes conclusiones:

- Las fachadas de muro sencillo (sin cámara de aire) presentan desventajas en su desempeño comparadas con las que tienen cámara de aire, como se evidencia en las simulaciones iniciales; son mayores las diferencias de temperaturas máximas y mínimas de los modelos contenidos en el grupo 1.
- Las fachadas dobles y ventiladas requieren protección solar adicional en las superficies que reciben mayor radiación solar, en este caso oriental, occidental y cubierta; de otra manera su desempeño es bajo, como demuestra la diferencia entre los grupos 3 y 5 frente a los demás.
- El porcentaje de apertura exterior de las fachadas ventiladas debe ser controlado a fin de evitar superar el 5% del área total para impedir ganancias térmicas en horas de mayor temperatura externa, como lo demuestran las variaciones en grupos 4 y 5.
- El grado de ventilación de la cavidad de aire no representa diferencias fundamentales en su desempeño; sin embargo, la ventilación restringida a horario nocturno presenta ventajas, como se evidencia en los resultados del grupo 5.
- La inercia térmica es un factor principal en el funcionamiento de las fachadas dobles, como se demuestra en los resultados iniciales de todos los grupos, y su posicionamiento al interior de la configuración hace una diferencia importante, como se demuestra comparando los resultados finales de los modelos 1, 2 y 3.

De esa manera, se evidenció que si bien el uso de fachadas ventiladas puede resultar una estrategia viable para llegar a condiciones de confort en climas cálidos húmedos, esto sucede solamente cuando los diseños específicos integran el uso de estrategias pasivas, principalmente inercia térmica, protección solar y ventilación nocturna. Se encontró, sin embargo, que el uso de

estas estrategias puede ser igualmente eficiente por sí solo, y requiere una menor inversión. Al mismo tiempo, las fachadas ventiladas pueden ser más complejas de controlar y modelar por las constantes variables del clima, tal como lo mencionan Gagliano *et al.* (2014, p. 362), sobre la ventilación natural. Por esta razón, como sugie-

ren Gratia y De Herde (2007, p. 447), es necesario el estudio de diversas configuraciones de fachadas ventiladas a fin de entender la complejidad y el comportamiento de los flujos de vientos que estos involucran en cada caso específico, ya que estas configuraciones ofrecen ventajas adicionales en términos de aislamiento acústico.

Referencias

- Afonso, C. y Oliveira, A. (2000). Solar chimneys: simulation and experiment. *Energy and Buildings* (32), 71-79. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00038-9)
- Andarini, R. (2014). The role of building thermal simulation for energy efficient building design. *Energy Procedia* (47), 217-226. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.217>
- Andelkovic, A. S., Mujan, I. y Dakic, S. (2016). Experimental validation of aEnergyPlus model: Application of a multi-storey naturally ventilated double skin façade. *Energy and Buildings*(118), 27-36. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.045>
- Aparicio-Fernández, C., Vivancos, J.-L., Ferrer-Gisbert, P. y Royo-Pastor, R. (2014). Energy performance of a ventilated façade with experimental validation. *Applied Thermal Engineering* (66), 563-570. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.041>
- Balocco, C. (2002). A simple model to study ventilated facades energy performance. *Energy and Buildings* (34), 469-475. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00130-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00130-X)
- Barbosa, S. e Ip, K. (2014). Perspectives of double skin façades for naturally ventilated buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (40), 1019-1029. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.192>
- Blanco, J. M., Buruaga, A., Rojí, E., Cuadrado, J. y Pelaz, B. (2016). Energy assessment and optimization of perforated metal sheet double-skin façades through Design Builder. A case study in Spain. *Energy and Buildings* (111), 326-336. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.053>
- Bolaños, T. y Moscoso, A. (2011). Consideraciones y selección de especies vegetales para su implementación en ecoenvolventes arquitectónicos: una herramienta metodológica. *Revista Nodo*, 5(10), 5-20. Recuperado de <http://csifesvr.uan.edu.co/index.php/nodo/article/view/138>
- Ciampi, M., Leccese, F. y Tuoni, G. (2003). Ventilated facades energy performance in summer cooling of buildings. *Solar Energy* (75), 491-502. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.09.010>
- Design Builder (19 de octubre de 2017). *Design Builder Software Ltd.* Recuperado de <https://www.designbuilder.co.uk/>
- EnergyPlus (19 de octubre de 2017). *EnerPlus*. Recuperado de <https://energyplus.net/>
- Fantucci, S., Marinosci, C., Serra, V. y Carbonaro, C. (2017). Thermal performance assessment of an opaque ventilated façade in the summer period: calibration of a simulation model through in-field measurements. *Energy Procedia* (111), 619-628. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.224>
- Gagliano, A., Patania, F., Nocera, F. y Signorello, C. (2014). Assessment of the dynamic thermal performance of massive buildings. *Energy and Buildings* (72), 361-370. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.060>
- Gaillard, L., Giroux-Julien, S., Ménéz, C. y Pabiau, H. (2014). Experimental evaluation of a naturally ventilated PV double-skin building envelope in real operating conditions. *Solar Energy* (103), 223-241. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.02.018>
- Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., Berardi, U., Tookey, J., Hin Wa Li, D. y Kariminia, S. (2016). Exploring the advantages and challenges of double-skin façades (DSFs). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (60), 1052-1065. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.130>
- Giancola, E., Sanjuan, C., Blanco, E. y Heras, M. R. (2012). Experimental assessment and modelling of the performance of an open joint ventilated façade during actual operating conditions in Mediterranean climate. *Energy and Buildings* (54), 363-375. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.035>
- Gratia, E. y De Herde, A. (2004). Optimal operation of a south double-skin facade. *Energy and Buildings* (36), 41-60. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.05.004>
- Gratia, E. y De Herde, A. (2007). Guidelines for improving natural daytime ventilation in an office building with a double-skin facade. *Solar Energy* (81), 435-448. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.08.006>
- Haase, M., Silva, F. M. y Amato, A. (2009). Simulation of ventilated facades in hot and humid climates. *Energy and Buildings* (41), 361-373. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.11.008>
- Høseggen, R., Wachenfeldt, B. J. y Hanssen, S. O. (2008). Building simulation as an assisting tool in decision making Case study: With or without a double-skin façade? *Energy and Buildings* (40), 821-827. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.05.015>
- Jentsch, M. F., Bahaj, A. S. y James, P. A. (2008). Climate change future proofing of buildings—Generation and assessment of building simulation weather files. *Energy and Buildings*, 40(12), 2148-2168. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.005>
- Kim, D.-W. y Park, C.-S. (2011). Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin façade with EnergyPlus. *Energy and Buildings* (43), 3635-3645. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.038>
- Marinosci, C., Semprini, G. y Morini, G. (2014). Experimental analysis of the summer thermal performances of a naturally ventilated rainscreen façade building. *Energy and Buildings* (72), 280-287. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.044>
- Marinosci, C., Strachan, P., Semprini, G. y Morini, G. (2011). Empirical validation and modelling of a naturally ventilated rainscreen façade building. *Energy and Buildings* (43), 853-863. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.005>
- Mateus, N. M., Pinto, A. y Carrilho da Graça, G. (2014). Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell. *Energy and Buildings* (75), 511-522. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.043>
- Meteonorm (22 de 02 de 2018). *Meteonorm*. Recuperado de <http://www.meteonorm.com/>
- Peci López, F., Jensen, R., Heiselberg, P. y Ruiz de Adana, M. (2012). Experimental analysis and model validation of an opaque ventilated facade. *Building and Environment* (56), 265-275. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.017>
- Poirazis, H. (2004). *Double Skin Façades for Office Buildings*. Lund: Division of Energy and Building Design Department of Construction and Architecture Lund Institute of Technology, Division of Energy and Building Design. Recuperado de http://www.ebd.lth.se/fileadmin/energi_byggnadsdesign/images/Publikationer/Bok-EBD-R3-C5_alt_2_Harris.pdf
- Pyrgou, A., Castaldo, V. L., Pisello, A. L., Cotana, F. y Santamouris, M. (2017). Differentiating responses of weather files and local climate change to explain variations in building thermal-energy performance simulations. *Solar Energy* (153), 224-237. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.040>
- Rubiano Martín, M. A. (2015). Ventajas del uso de fachada ventilada, en Giradot (Colombia). *Revista Nodo*, 10(19), 111-120. Recuperado de <http://revistas.uan.edu.co/index.php/nodo/article/view/538>
- Stec, W. J., Paassen, A. H. y Maziarz, A. (2005). Modelling the double skin façade with plants. *Energy and Buildings* (37), 419-427. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.08.008>
- Theodosiou, T., Tsikaloudaki, K. y Bikas, D. (2017). Analysis of the thermal bridging effect on ventilated facades. *Procedia Environmental Sciences* (38), 397-404. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.121>
- U.S. Department of Energy (22 de 02 de 2018). *energy.gov*. Recuperado de <https://energy.gov/>
- Varini, C. (2011). Ecoenvolventes R & D. Passive architectural envelopes high thermal performance and low environmental impact for tropical geo-climatic zones with cultivated native woods and plants. SB Helsinki World Sustainable Building Conference. Helsinki: Finnish Association of Civil Engineers RIL and VTT Technical Research Centre of Finland. Recuperado de http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC22949.pdf
- Varini, C. (2013). Ecoenvelopes R&D. Passive architectural envelopes high thermal performance and low environmental impact for tropical geoclimatic zones. *Informes de la Construcción*, 65, 23-30. Doi: <https://doi.org/10.3989/ic.11.147>
- Velasco, R. y Robles, D. (2011). Eco-envolventes: A parametric design approach to generate and evaluate façade configurations for hot and humid climates. En T. Zupančič *et al.* (eds.), *eCAADe 2011 Respecting fragile places: Proceedings of the 29th Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe* (pp. 539-548). Ljubljana: Brussels: Education in Computer Aided Architectural Design in Europe; Ljubljana: Faculty of Architecture.
- Velasco, R., Hudson, R. y Luciani, S. (2017). Tools and strategies to improve climate-driven façade design in the tropics: A pilot project for Colombia. *12th Conference on Advanced Building Skins* (pp. 995-1003). Bern: Advanced Building Skins GmbH.
- Vernay, D. G., Raphael, B. y Smith, I. F. (2014). Augmenting simulations of airflow around buildings using field measurements. *Advanced Engineering Informatics* (28), 412-424. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2014.06.003>

