

Modelización de un sistema de fachada integral en herramienta de simulación energética de edificios.

Modelization of curtain walls in building energy simulation tool.

Maureen de Gastines

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) – CONICET – CCT Mendoza
Av. Ruiz Leal s/n, Parque Gral San Martin, 5500 Mendoza, Argentina
mdegastines@mendoza-conicet.gob.ar

Andrea Pattini

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) – CONICET – CCT Mendoza
Av. Ruiz Leal s/n, Parque Gral San Martin, 5500 Mendoza, Argentina
apattini@mendoza-conicet.gob.ar

Código del manuscrito: 10_007

Fecha de aceptación: 04/10/2019

Resumen

Las fachadas integrales son frecuentemente utilizadas en cerramientos de edificios, pero su comportamiento energético es todavía un tema de estudio en el ámbito científico. Si bien estos sistemas presentan frentes integralmente vidriados, se sostienen mediante elementos constructivos que son potenciales puentes térmicos. En este trabajo, se evalúan los índices energéticos (transmitancia térmica y factor solar) de un sistema de fachada integral comúnmente utilizado en Argentina, y se analiza el impacto de la modelización de la fachada sobre las estimaciones de cargas térmicas edilicias mediante simulaciones en el programa EnergyPlus. Los resultados indican que la estructura metálica del sistema de fachada integral incrementa significativamente la transmitancia térmica de la fachada con respecto a la transmitancia del vidriado sólo. Como consecuencia, se comprueba que la modelización de las fachadas integrales sin considerar adecuadamente la estructura portante puede producir errores significativos en la estimación mediante herramientas computacionales de las demandas energéticas para calefacción y refrigeración de edificios.

Palabras claves: Fachada integral, Vidriado, Índices energéticos, EnergyPlus

Abstract

Curtain walls are frequently used in building enclosures, but their energy performance is still under study. Although those systems may have integrally glazed fronts, they are sustained by constructive elements that are potential thermal bridges. In this work, thermal indexes (thermal transmittance and solar heat gain coefficient) are calculated for a commonly used curtain wall system in Argentina. The impact of curtain wall modelization on building thermal loads estimates is then analyzed through building simulations in EnergyPlus. The results indicate that the metallic structure increases the whole façade thermal transmittance compared with the glazing thermal transmittance. Consequently, modelizing curtain walls in building energy simulation software without considering their self-supporting structure is found to produce significant errors of building heating and cooling demands estimates.

Keywords: Curtain Wall, Glazing, Energy indexes, EnergyPlus

Introducción

Las fachadas integrales son uno de los elementos dominantes de la arquitectura moderna y contemporánea. Consisten en retículas de elementos constructivos de aluminio o hierro en las cuales se insertan paños de vidrio, formando superficies continuas y ligeras que delimitan completamente el espacio interior respecto al exterior del edificio. El frente integral, la piel de vidrio y el vidriado estructural son diferentes sistemas de fachadas integrales, que se diferencian por el grado de visibilidad exterior de la estructura metálica portante de la fachada. Las fachadas integrales son apreciadas por su liviandad, rapidez de montaje y por ser símbolo de modernidad, prosperidad y transparencia. En Argentina, su uso se ha hecho cada vez más extensivo en edificios comerciales y de oficinas, y en menor medida, en el sector residencial.

En el contexto actual de crisis ambiental y energética, la eficiencia energética de los edificios es fundamental, ya que los mismos son responsables de un 30% del consumo energético final, principalmente debido al acondicionamiento térmico (Pérez-Lombard, Ortiz, & Pout, 2008). Una forma de evaluar y comparar el comportamiento energético de las envolventes edilicias es a través de sus índices energéticos, principalmente la transmitancia térmica (también llamada factor K) y el factor solar (FS). Sin embargo, los índices energéticos de los sistemas de fachadas integrales en uso en Argentina no han sido caracterizados todavía. Los datos disponibles se limitan a las propiedades de los vidriados (IRAM 11601, 2002) y de los sistemas tradicionales de aventanamientos (de Gastines & Pattini, 2019). No obstante, como los sistemas de fachadas integrales actualmente fabricados en Argentina poseen estructuras portantes metálicas de alta conductividad (sin ruptura de puente térmico) y de perfil interior proyectante, se puede anticipar (de Gastines, Villalba, & Pattini, 2016) que la transmitancia térmica de estos sistemas es elevada.

A nivel internacional, se ha buscado reducir la transmitancia térmica de los sistemas de fachadas integrales mediante el uso de materiales aislantes, por ejemplo ruptura de puente térmico, triple vidriado hermético, poliéster reforzado con fibra de vidrio (Cordero, García-Santos, & Overend, 2015), o mediante el uso de una doble envolvente, donde la fachada acristalada disimula otra piel de baja transmitancia térmica (Bronwyn, 2018). Sin embargo, estas estrategias están asociadas a un alto costo inicial, que limita su generalización en el país.

En climas dominados por la demanda de refrigeración, el factor solar tiene mayor impacto que el factor K, especialmente cuando hay altos porcentajes de vidrio en fachada y para las orientaciones más expuestas al sol directo (Tskaloudaki, Laskos, Theodosiou, & Bikas, 2015). Más específicamente, el consumo energético total para calefacción y refrigeración aumenta en forma cuadrática con la "apertura solar", definida como el producto del factor solar y del porcentaje de fachada vidriada (Lee, Jung, Park, Lee, & Yoon, 2013). Por lo tanto, resulta fundamental reducir el factor solar de los sistemas de fachadas integrales en climas soleados. El impacto de la fachada vidriada en las demandas energéticas se reduce levemente con el uso de cortinas interiores, y de manera más significativa con persianas exteriores (Aste, Buzzetti, Del Pero, & Leonforte, 2018). Sin embargo, los sistemas de control solar opacos exteriores comprometerían la estética buscada de las fachadas integrales. En respuesta al riesgo de sobrecalentamiento, los fabricantes recomiendan el uso de vidrios de control solar, en los cuales se deposita una capa metálica que refleja la radiación de longitud de onda corta, reduciendo el ingreso de calor radiante del sol.

La eficiencia energética de los sistemas de fachadas integrales para un clima determinado puede ser evaluada mediante simulaciones edilicias. Sin embargo, las simulaciones son una representación simplificada de la realidad y pueden conllevar errores de estimación de eficiencia energética. En particular, al momento de modelizar un edificio con un sistema de fachada continua vidriada, es común considerar únicamente el vidriado. Sin embargo, más allá de que los perfiles estén visualmente cubiertos por los paños vidriados, la retícula ocupa típicamente un 20% de la superficie total de fachada (considerando paños vidriados de 1 m x 1 m y perfiles marco-hoja de 10 cm de ancho), y debido a la alta conductancia del aluminio, constituye un puente térmico en la fachada. Además, existen efectos de borde en los perímetros de los paños vidriados que influyen en el valor de transmitancia térmica total. Es posible también que el cálculo de las ganancias solares se vea modificado por la presencia de los perfiles opacos de la carpintería. Por lo tanto, es cuestionable la modelización de la fachada sin considerar la estructura metálica que sostiene los paños vidriados.

Por otro lado, la modelización detallada de las fachadas integrales presenta dificultades. Una de ellas es la geometría no homogénea de la fachada, que cuenta con diferentes perfiles de columna y travesaño, y numerosos paños vidriados con sus respectivos efectos de borde perimetrales. Otra dificultad es que el modelo de simulación empleado en los programas de simulación energética de edificios no es adecuado para los perfiles de carpinterías de alta transmitancia térmica y de geometría no compacta (de Gastines et al., 2016). Para evaluar las transferencias de calor a través de los marcos en cada paso de la simulación, teniendo en cuenta que la transmitancia térmica incluye coeficientes peliculares que no son representativos de las condiciones climáticas (variables), los programas de simulación suelen utilizar un valor de conductancia de los perfiles. Sin embargo, la ecuación utilizada para calcular la conductancia es válida para materiales homogéneos y planos, y conduce a errores de estimación cuando se utiliza para perfiles de carpintería como los que se utilizan en Argentina. Frente a esta observación, de Gastines, Correa, & Pattini (2019) propusieron un modelo corregido para usar en EnergyPlus, que toma en cuenta factores de compacidad de los perfiles y valores reducidos de emisividad en el cálculo de la conductancia y de las transferencias de calor en cada paso de la simulación.

El objetivo de este trabajo es evaluar la importancia de considerar adecuadamente la estructura autoportante de las fachadas integrales en las simulaciones de eficiencia energética edilicia. En un primer momento, se determinan los índices K y FS de un sistema de fachada integral comúnmente instalado en Argentina, con el fin de compararlos con los índices energéticos del vidriado sólo. Luego se simula un edificio totalmente vidriado, por un lado sin considerar la estructura portante, y por otro lado modelizando dicha estructura de manera detallada, y se comparan las estimaciones de las cargas térmicas para calefacción y refrigeración resultantes.

Metodología

Caso de estudio

Se seleccionó un sistema de fachada integral de uso común en Argentina, que consiste en una retícula conformada por columnas y travesaños de aluminio, sobre la cual se adhieren los paños vidriados mediante silicona estructural (o cinta acrílica). Este sistema es llamado a veces “piel de vidrio” debido a que la fachada presenta una estética vidriada continua (los marcos quedan ocultos), como lo ilustra la figura 1.



Figura 1. Imagen izquierda: Sistema de carpintería seleccionado para el estudio. Imagen derecha: apariencia exterior de un sistema “piel de vidrio”.

El vidriado seleccionado es un doble vidriado hermético (DVH) compuesto por un vidrio claro y un vidrio de control solar (tonalizado con capa reflectiva SunCool) de 6 mm separados por una cámara de aire de 13 mm.

Cálculo de los índices térmicos del sistema de fachada integral

Para el cálculo de la transmitancia térmica y del factor solar del sistema de fachada integral bajo estudio, se utilizaron los programas WINDOW 7.7 y THERM 7.7 desarrollados por el LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory). Se consideraron condiciones de borde representativas de un día de invierno en Buenos Aires (tabla 1), calculadas a partir de los datos climáticos detallados en la norma IRAM 11603 (2012).

Tabla 1. Condiciones ambientales utilizadas para el cálculo de los índices energéticos, representativas del clima de Buenos Aires (IRAM 11603), donde T_i , T_o son las temperaturas del aire interior y exterior, T_{ri} , T_{ro} son las temperaturas media radiante interior y exterior, y h_{ci} , h_{co} son los coeficientes convectivos interior y exterior.

T_o	T_{ro}	h_{co}	T_i	T_{ri}	h_{ci}
12.9°C	12.9°C	9.33 W/m ² K	20°C	20°C	3.29 W/m ² K

WINDOW permite calcular las propiedades de los vidriados (K_v y FS_v), mientras que las secciones de los perfiles de carpinterías se simulan en THERM. Este programa utiliza el método de los elementos finitos para calcular los flujos de calor en el componente estudiado de acuerdo a las condiciones de borde indicadas. Arroja el valor de transmitancia del marco (K_m) y del borde del vidriado (K_b), que corresponde a una franja perimetral de 63.5 mm, en la que se manifiestan los efectos de borde entre el marco y el vidriado. La figura 2 indica las diferentes partes del sistema de fachada integral (centro del vidriado, borde, perfil marco/hoja de columna o travesaño), y sus respectivas superficies en un módulo base de la fachada. Para el cálculo del factor solar de las columnas y travesaños, se utilizó la ecuación propuesta por la norma ISO 15099 (2003) para los marcos de ventana (materiales opacos). Como los perfiles de aluminio están recubiertos por una lámina de vidrio, se consideró una absorptancia solar igual a la suma de la absorptancia y transmitancia solar del vidrio claro. Al ser plana la superficie exterior de los perfiles de columna y travesaño, la ecuación se reduce al producto de la absorptancia solar por la transmitancia térmica del perfil, dividido por el coeficiente convectivo exterior. Una vez obtenidos los índices térmicos de las diferentes partes del sistema de fachada integral, se calculó el promedio ponderado por área de los mismos.

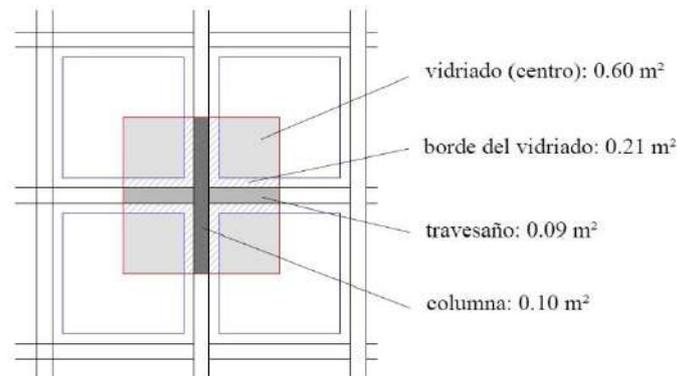


Figura 2. Módulo base del sistema de fachada integral, donde se identifican las diferentes partes que lo componen y sus respectivas áreas.

Simulaciones de un edificio con piel de vidrio

Se definió un edificio en altura, de planta rectangular de 450 m^2 orientada este-oeste, con piel de vidrio en sus cuatro fachadas. Se simuló en EnergyPlus una planta intermedia (cuarto piso), dividida en cinco zonas térmicas, correspondientes a las cuatro orientaciones y una zona central (figura 3). Se consideraron 2 renovaciones de aire por hora y unas ganancias internas promedias de 5 W/m^2 . Se utilizó un archivo climático TMY3 (año meteorológico típico) realizado por Weather Analytics para la ciudad de Buenos Aires, y se consideró un entorno sin obstrucciones.

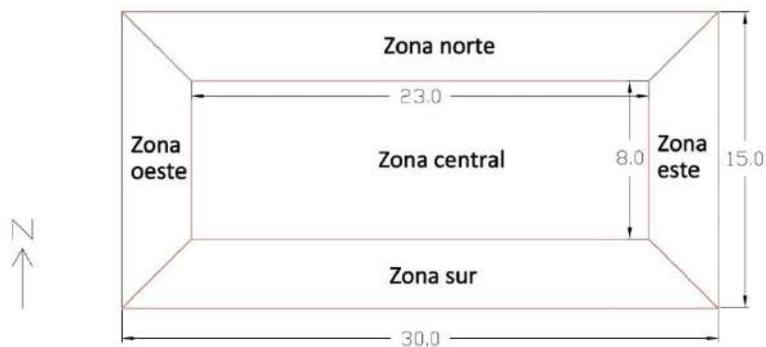


Figura 3: Esquema de la planta simulada, con sus diferentes zonas térmicas.

Se calcularon las cargas térmicas ideales por metro cuadrado y por año. Las temperaturas consideradas para el acondicionamiento térmico fueron de 20°C en invierno y 25°C en verano. Se compararon dos modelizaciones:

- 1) Modelo simplificado: se considera únicamente el DVH (sin retícula)
- 2) Modelo detallado: Se toma en cuenta la retícula soporte y se utiliza el algoritmo mejorado de cálculo de transferencias de calor en marcos (de Gastines et al., 2019).

Determinación de los datos de entrada de la fachada vidriada

La construcción del DVH seleccionado y los datos espectrales de los vidrios que lo componen fueron exportados desde el programa WINDOW 7.7.

De acuerdo al método propuesto por de Gastines et al. (2016), se calculó nuevamente el factor K_m de los perfiles, considerando esta vez coeficientes combinados interior y exterior de 8 y 30 W/m²K respectivamente. Se calcularon además los coeficientes de compacidad de los perfiles y los valores de emisividad reducidos. Se aplicó luego la ecuación (1) para despejar los valores de conductancia de los perfiles de columna y travesaño.

$$\frac{1}{K_m} = \frac{1}{C_m} + \frac{x_i}{8} + \frac{x_o}{30} \quad (1)$$

Donde K_m es la transmitancia térmica del perfil, C_m es la conductancia del perfil, y x_i , x_o son los coeficientes de compacidad interior y exterior (respectivamente), definidos como la relación entre el ancho del perfil proyectado en el plano del vidrio, y la longitud real del perfil interior/exterior.

La carga de los datos de entrada en EnergyPlus se hizo considerando para cada orientación de fachada un gran marco perimetral, 2 divisores horizontales y 14 o 29 divisores verticales (según las dimensiones de la fachada). La figura 4 ilustra estas consideraciones. El “marco” está compuesto por dos medio travesaños y dos media columnas (si bien en la realidad existe un perfil angular específico, se hizo esta simplificación ya que representa apenas el 2% del área total de la retícula metálica), por lo que se calcularon sus propiedades (ancho, valores de compacidad y emisividad reducida) cómo el promedio ponderado de las propiedades de los perfiles de columna y travesaño, dividiendo luego el ancho obtenido por dos. Las propiedades de los divisores se calcularon mediante el promedio ponderado de los datos calculados para las columnas y travesaños.

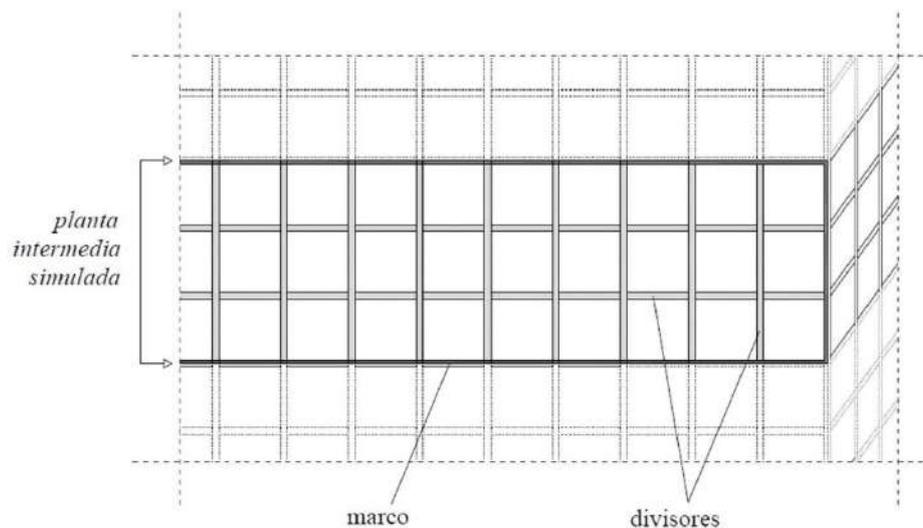


Figura 4: Esquema de la retícula metálica, donde se identifican en diferentes tonos de grises los perfiles considerados como marco y los perfiles considerados como divisores para la carga de datos de entrada en el programa EnergyPlus.

Resultados

Cálculo de los índices térmicos del sistema de fachada integral

La figura 5 representa las distribuciones de temperaturas en los perfiles de columna y travesaño. Se observa que temperatura en la superficie interior de los perfiles es más baja al nivel de las hojas que sostienen los paños vidriados (8°C menor a la temperatura superficial del centro del vidriado), indicando los puntos de menor resistencia térmica de

la fachada. Asimismo, se observan los efectos de borde en la periferia de los paños vidriados (materializados por los gradientes de temperatura observados).

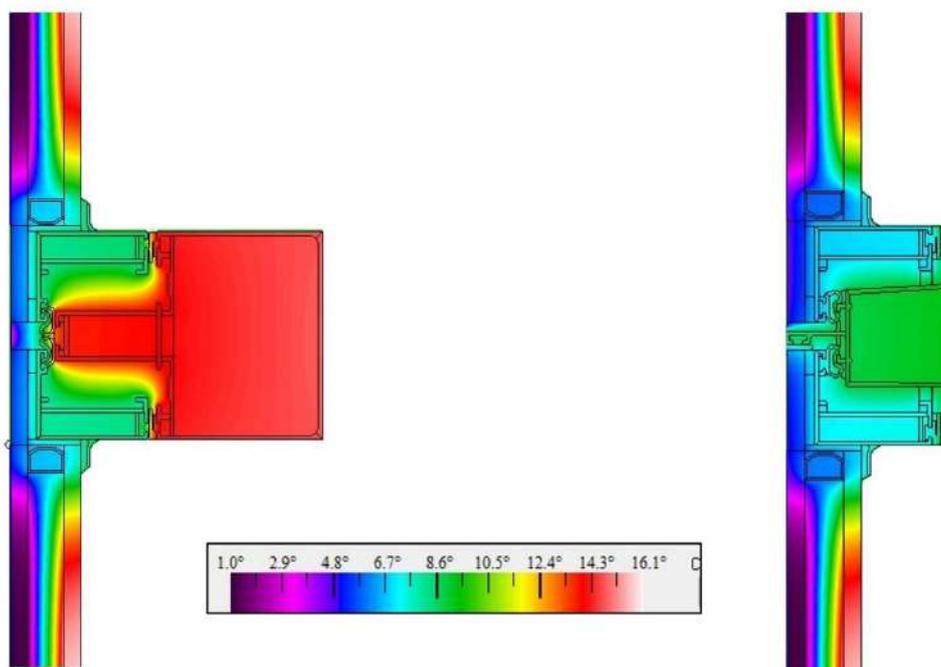


Figura 5: Distribución de temperaturas en los perfiles de columna (perfil izquierdo) y de travesaño (perfil derecho).

La tabla 2 indica los valores de transmitancia térmica y factor solar de las diferentes partes que componen la fachada integral, así como los valores resultantes de K y FS del sistema completo, calculados como el promedio ponderado por el porcentaje de ocupación de fachada. Comparado con el DVH sólo, el sistema completo obtiene una transmitancia térmica un 63% más elevada, lo cual indica que la retícula soporte de la fachada integral influye significativamente sobre el valor del factor K de la fachada. En cuanto a los valores de factor solar, se observa que los perfiles de columna y travesaño tienen índices elevados, a pesar de ser opacos, debido a su elevada transmitancia térmica (gran parte del calor radiante que atraviesa el vidriado es llevada por conducción hacia el interior). En consecuencia, el factor solar del sistema completo es similar al del vidriado.

Tabla 2: Índices K y FS de los diferentes componentes del sistema de fachada integral y del sistema completo.

	Vidriado (centro)	Borde del vidriado	Columna	Travesaño	Sistema completo
Porcentaje de ocupación de fachada	60%	21%	10%	9%	-
Transmitancia térmica (W/m^2K)	1.43	2.22	5.49	5.07	2.33
Factor solar (-)	0.499	0.499	0.547	0.505	0.504

Impacto de la modelización de la fachada integral sobre las cargas térmicas edilicias

La tabla 3 detalla los datos de entrada calculados para la modelización detallada del sistema de fachada integral.

Tabla 3: Datos de entrada detallados de la retícula portante.

	Fachada Norte/Sur		Fachada Este/Oeste	
	MARCO	DIVISOR	MARCO	DIVISOR
Número de divisores horizontales	2		2	
Número de divisores verticales	29		14	
Ancho (m)	0.049	0.1	0.049	0.1
Proyección exterior (m)	0	0	0	0
Proyección interior (m)	0.37	0.65	0.41	0.64
Conductancia (W/m ² K)	33.19	23.90	31.37	24.02
Ratio entre la conductancia del borde y la conductancia del vidrio	2.41	2.32	2.40	2.32
Absortancia solar	0.929	0.929	0.929	0.929
Absortancia visible	0	0	0	0
Emisividad	0.9	0.9	0.9	0.9
Compacidad exterior	1	1	1	1
Compacidad interior	0.608	0.477	0.588	0.479
Emisividad reducida exterior	0.9	0.9	0.9	0.9
Emisividad reducida interior	0.569	0.451	0.551	0.453

La figura 6 representa las cargas de calefacción y refrigeración anuales por unidad de superficie, obtenidas para los modelos simplificado y detallado, diferenciadas por zona térmica. Se observa que la demanda de calefacción es menor en la orientación norte y mayor en la orientación sur, debido a la trayectoria solar en el período invernal. Asimismo, las demandas de refrigeración varían significativamente de acuerdo a la orientación de la fachada, siendo tres a cuatro veces más elevadas en las orientaciones este, norte y oeste, que en la orientación sur (donde menos incide la radiación solar). El caso de la zona central es particular, ya que las cargas de refrigeración se deben principalmente a las renovaciones de aire (zona térmica independiente sin ventanas), por lo que son más reducidas. Globalmente, se observa que la demanda de refrigeración anual del edificio es significativamente más elevada que la demanda de calefacción (4 a 8 veces mayor según la modelización utilizada). Esto se debe a las elevadas ganancias solares a través de los vidriados, y este resultado demuestra que el vidrio de control solar considerado en el estudio no es suficiente para bloquear las ganancias indeseadas de calor.

Tomando como referencia los resultados obtenidos mediante la modelización detallada de la estructura portante de la fachada integral, se calculan para el modelo simplificado errores del -41% y +9% en las estimaciones de las cargas de calefacción y refrigeración totales respectivamente. El modelo simplificado subestima las pérdidas térmicas por la fachada al no considerar los puentes térmicos producidos por la estructura metálica. Este resultado se relaciona directamente con el error del -39% obtenido en el cálculo de la transmitancia térmica de la fachada integral (1.43 W/m²K para el DVH sólo, en lugar de 2.33 W/m²K). Como consecuencia, la demanda de refrigeración está sobrestimada, ya que, al no considerar adecuadamente las pérdidas de calor a través de la fachada, toman más peso las ganancias solares en el balance de energía.

**Cargas térmicas
anuales (kWh/m²)**


Figura 6: Demandas de calefacción y refrigeración por unidad de superficie, diferenciadas por zona térmica y para el edificio completo, en función de la modelización elegida para el sistema de fachada integral (modelo simplificado o detallado).

Conclusiones

El sistema de fachada integral estudiado tiene una transmitancia térmica significativamente más elevada que el vidriado que la compone, debido a los perfiles de aluminio sin ruptura de puente térmico que sostienen la fachada. En consecuencia, sería de gran utilidad disponer de datos de transmitancia térmica de todos los sistemas de fachadas integrales producidos a nivel nacional, para poder anticipar y evaluar adecuadamente el comportamiento energético de los edificios con fachada vidriada.

Aunque las modelizaciones simplificada y detallada de la fachada integral conduzcan a cargas térmicas totales similares para el caso de estudio analizado, no coinciden en las estimaciones individuales de demanda de calefacción ni de refrigeración, las cuales suelen involucrar distintos equipos de acondicionamiento térmico y fuentes de energía. Por lo tanto, para una simulación más acertada y precisa, es relevante modelizar el sistema de fachada integral de manera detallada, teniendo en cuenta la estructura metálica (de alta transmitancia térmica) que lo sostiene.

Agradecimientos

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, Argentina – Proyecto PICT 2016-1487.

Referencias

- Aste, N., Buzzetti, M., Del Pero, C., & Leonforte, F. (2018). Glazing's techno-economic performance: A comparison of window features in office buildings in different climates. *Energy and Buildings*, 159, 123–135.
- Bronwyn, B. (2018). Energy and Design Criticism: Is It Time for a New Measure of Beauty? *Architectural Design*, 88(1), 116–121.
- Cordero, B., García-Santos, A., & Overend, M. (2015). Thermal performance of novel frame-integrated unitised curtain wall. *Revista de La Construcción. Journal of Construction*, 14(1), 23–31.

- De Gastines, M., Correa, É., & Pattini, A. (2019). Heat transfer through window frames in EnergyPlus: model evaluation and improvement. *Advances in Building Energy Research*, 13(1), 138–155. <http://doi.org/10.1080/17512549.2017.1421098>
- De Gastines, M., & Pattini, A. E. (2019). Propiedades energéticas de tecnologías de ventanas en Argentina. *Hábitat Sustentable*, 46–57.
- De Gastines, M., Villalba, A., & Pattini, A. (2016). Improved model for the thermal performance calculation of non-planar window frames for building simulation programs. *Journal of Building Performance Simulation*, 9(6), 633–647. <http://doi.org/10.1080/19401493.2016.1177117>
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2002). IRAM 11601. Aislamiento térmico de edificios. Método de cálculo-- Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 11603: Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina (2012).
- International Organization for Standardization. (2003). ISO 15099. Thermal performance of windows, doors and shading devices-- detailed calculations.
- Lee, J. W., Jung, H. J., Park, J. Y., Lee, J. B., & Yoon, Y. (2013). Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements. *Renewable Energy*, 50, 522–531.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394–398.
- Tsikaloudaki, K., Laskos, K., Theodosiou, T., & Bikas, D. (2015). The energy performance of windows in Mediterranean regions. *Energy and Buildings*, 92, 180–187.