

EFFECTO DE LA SOMBRA PROVOCADA POR EL ENTORNO CERCANO EN LOS REQUERIMIENTOS TÉRMICOS DE UNA VIVIENDA EN URUGUAY

EFFECT OF SHADING FROM SURROUNDINGS ON THERMAL REQUIREMENTS OF A DWELLING IN URUGUAY

Sofía Gervaz y Federico Favre

*Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial, Facultad de Ingeniería, UdelaR,
Montevideo, Uruguay, sofia@fing.edu.uy, <https://www.fing.edu.uy/es/iimpi>*

Palabras clave: modelado energético de edificios, EnergyPlus, sombra, entorno cercano.

Resumen. La sombra provocada por árboles y edificaciones cercanas puede tener un efecto significativo en la radiación solar que incide sobre un edificio y, en consecuencia, en su consumo de energía. Por lo tanto, podría ser importante considerar este entorno cercano a la hora de realizar un modelo de un edificio. Sin embargo, conocer detalles sobre el entorno en el que está inserto un edificio puede no ser sencillo e implicar un esfuerzo adicional en la generación del modelo y en el cálculo de resultados. Por ende, en la búsqueda de generar modelos energéticos de edificios que sean confiables y a su vez dirigir los esfuerzos de recolección de datos de entrada a parámetros relevantes, es importante conocer en qué grado el entorno cercano afecta a los resultados del modelo. Este trabajo busca evaluar el impacto de considerar la sombra provocada por vegetación y edificaciones cercanas sobre los resultados de demanda de energía para acondicionamiento térmico en un modelo de una vivienda en Uruguay. Para eso, se realiza un modelo en EnergyPlus de la tipología a estudiar y se determinan las cargas de calefacción y refrigeración para tres configuraciones de entorno diferentes que buscan abarcar el rango de posibles locaciones de una vivienda en Uruguay, así como para distintas orientaciones.

Keywords: building energy modelling, EnergyPlus, shading, nearby environment.

Abstract. Shading caused by nearby trees and buildings can have a significant effect on incident solar radiation on a building and, consequently, on its energy consumption. Therefore, it could be important to consider this surrounding environment when developing an energy model of a building. However, knowing the details about the environment in which a building is situated might not be straightforward and could involve additional effort in model generation and results calculation. Hence, in the pursuit of generating building energy models that are reliable and simultaneously directing input data collection efforts toward relevant parameters, it is important to understand to what extent the environment affects the model results. This study aims to assess the impact of considering the shading caused by vegetation and nearby buildings on the energy demand for thermal conditioning in a model of a dwelling in Uruguay. To achieve this, an EnergyPlus model of the typology under study is developed, and heating and cooling loads are determined for three different configurations that aim to represent the range of possible locations for a residence in Uruguay, as well as for various orientations.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de herramientas de modelado energético de edificios se ha expandido como consecuencia del creciente interés en comprender y cuantificar su desempeño energético (Menberg et al. (2016); Pisello et al. (2012)). Estas herramientas suelen ser muy intensivas en datos de entrada que muchas veces son difíciles de obtener y están sujetos a incertidumbres significativas (Neale et al. (2022)). Entonces, en la búsqueda de generar modelos confiables, que sean capaces de aportar resultados relevantes, pero cuyo desarrollo no se vuelva inabordable, es importante conocer qué parámetros de los edificios son los más importantes en cuanto a su impacto en la demanda de energía; para concentrar los esfuerzos en caracterizar dichos parámetros lo mejor posible.

Una de las características de un edificio que podría tener un impacto significativo en su demanda de energía es su entorno cercano. Pisello et al. (2012) analizaron este impacto en una vivienda unifamiliar para distintas condiciones climáticas en Estados Unidos y concluyeron que no considerar el entorno sobreestima la demanda de refrigeración un 42 % para la vivienda ubicada en Miami y subestima a la demanda de calefacción un 22 % para la vivienda ubicada en Minneapolis. Yu y Pan (2023) estudiaron el efecto de la presencia de otros edificios en el entorno cercano en un edificio de oficinas en Hong Kong y obtuvieron demandas de -11,8 % a 18,8 % para las distintas configuraciones de entorno propuestas respecto del caso del edificio aislado. Nikoofard et al. (2011) vieron que para una vivienda en Canadá, la presencia de árboles y otras viviendas en las proximidades afectan hasta un 10 % a la demanda de calefacción y hasta un 90 % a la de refrigeración.

En este sentido, este trabajo busca evaluar la importancia de incorporar el entorno cercano en el modelo al estudiar la demanda de energía para acondicionamiento térmico de una vivienda en Uruguay. En la sección 2, se describe el abordaje utilizado para el análisis así como los detalles del caso de estudio y las hipótesis consideradas en el modelado. En la sección 3 se presentan y discuten los principales resultados y, por último, en la sección 4 se comentan las conclusiones del estudio.

2. METODOLOGÍA

Para evaluar el impacto de la sombra provocada por el entorno cercano en el desempeño térmico de una vivienda en Uruguay, se genera el modelo de una vivienda con el *software EnergyPlus v. 8.7.0* al que se le incorporan distintas situaciones de entorno. La generación y ejecución de los modelos y el procesamiento de los resultados se automatiza mediante funciones en *Python*. Como resultado de las simulaciones se obtienen los requerimientos de calefacción y refrigeración de la vivienda en cada condición de entorno, así como la radiación solar incidente sobre las distintas superficies de la vivienda. Finalmente, se analiza la relación entre los requerimientos térmicos y la situación de entorno a través de la definición de índices de sombreado, calculados en base a la radiación solar que incide sobre la vivienda en cada caso.

2.1. Vivienda seleccionada

La tipología que se estudia es una vivienda de interés social de Mevir que ha sido objeto de estudio en el trabajo de Pena et al. (2023). Se desarrolla en una planta de 66 m² y cuenta con un ambiente destinado a sala de estar con cocina integrada, tres dormitorios y un baño (ver Fig. 1a). En cuanto a la materialidad, se trata de una vivienda de construcción tradicional con techo liviano. Tiene fundación de hormigón armado de 12 cm, cerramientos verticales exteriores de 22 cm de espesor compuestos por dos capas de ladrillo de campo (una de 12 y otra de 5,5

cm) separadas por aislación térmica de poliestireno expandido (3 cm) y cámara de aire (1 cm) y cerramiento superior liviano de chapa galvanizada con aislación térmica de lana de vidrio (5 cm) y cielorraso de fenólico OSB (1,5 cm).

Tiene 8 m² de ventanas distribuidas en las fachadas frontal y trasera resultando en una proporción ventana-muro (WWR, por sus siglas en inglés) de 10 %. Las ventanas de los dormitorios tienen cortina de enrollar de PVC, las de la sala de estar tienen cortinas de tela y, además, se cuenta con aleros sobre las fachadas frontal y trasera (ver Fig. 1b).

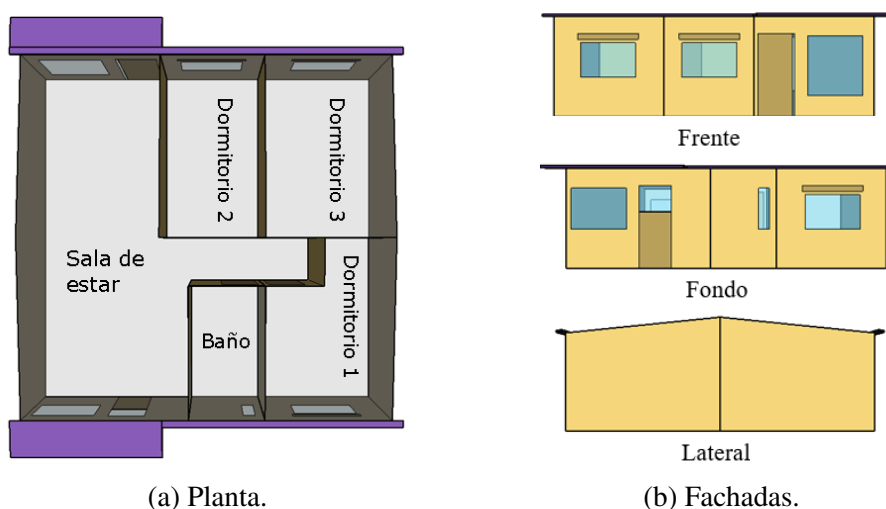


Figura 1: Vivienda objeto de estudio.

2.2. Entornos

Al definir las configuraciones a estudiar, se tiene por objetivo abarcar de la mejor manera posible el universo de entornos cercanos a los que puede estar expuesta una vivienda en Uruguay, pero buscando que su modelado en *EnergyPlus* sea relativamente sencillo y automatizable para poder generar una gran cantidad de casos. Atendiendo a estos requerimientos, se definen tres configuraciones de entorno de base (baja, media y alta densidad de edificaciones en el entorno cercano) sobre las que se realizan variaciones. Además, cada caso generado se modela para ocho orientaciones posibles (empezando con la fachada principal de la vivienda orientada al N y luego variando de a 45°).

Por un lado, se estudia a la vivienda en una zona rural o de baja densidad de habitantes donde no se tiene edificaciones en el entorno cercano y donde la única sombra que alcanza a la vivienda es la provocada por vegetación. Concretamente, en esta primera configuración de entorno se modela la vivienda exenta y rodeada de árboles pequeños cercanos a la vivienda. Se generan varios casos donde se varía la cantidad de árboles que somborean a la vivienda para contemplar las distintas posibilidades dentro de esta configuración (ver Fig. 2).

La segunda configuración de base es la de la vivienda ubicada en una zona donde está rodeada por edificaciones bajas (de una o dos plantas) en el entorno cercano. En este caso, lo que se va variando para generar los distintos casos es la cantidad de edificaciones cercanas a la vivienda así como la distancia a la que se ubican (ver Fig. 3).

Por último, se modela a la vivienda en una zona céntrica de alta densidad de edificios. En esta configuración, la vivienda está en una manzana de una ciudad rodeada por varias edificaciones



Figura 2: Configuración de entorno 1 - sombras por vegetación.

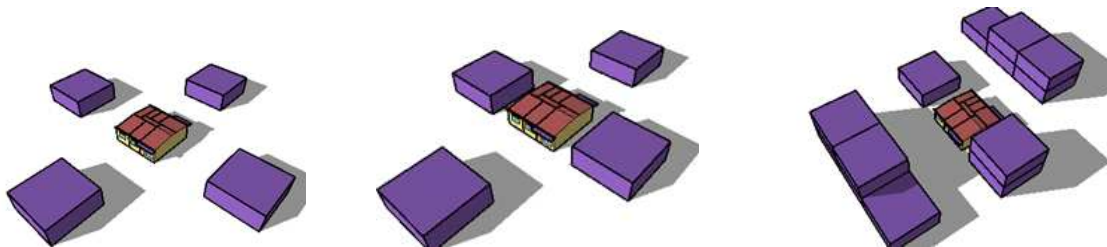


Figura 3: Configuración de entorno 2 - sombras por edificios de baja altura.

de distintas alturas (viviendas de una planta hasta edificios de diez pisos). Las variaciones consideradas son la cantidad y las alturas de los edificios que se encuentran al lado, en frente y al fondo de la vivienda (ver Fig. 4). Para esta configuración de entorno también se modelaron casos en las que las viviendas vecinas se encuentran apareadas a la vivienda a estudiar, implicando que las fachadas laterales sean adiabáticas.

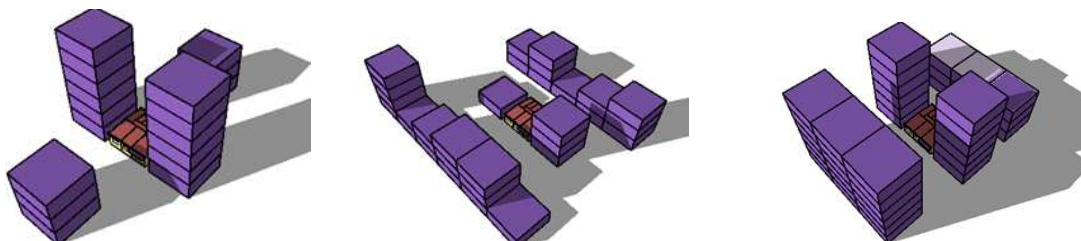


Figura 4: Configuración de entorno 3 - sombras por edificios de distintas alturas.

Las 3 configuraciones de entorno con sus variaciones para las 8 orientaciones a estudiar, resultan en un total de 680 casos a modelar. 536 casos corresponden a la vivienda sin aparear, donde 136 son variaciones de la configuración 1, 200 de la configuración 2 y también 200 de la configuración 3. Los 144 casos restantes son variaciones de la configuración 3, pero de la vivienda apareada.

2.3. Demanda de energía

Se contabiliza la energía anual que requiere la vivienda para ser acondicionada térmicamente mediante el modelo *IdealLoadsAirSystem* de *EnergyPlus*. Las temperaturas de consigna consideradas son 20°C para calefacción y 25°C para refrigeración. Se asume que la sala de estar y los tres dormitorios cuentan con sistema de acondicionamiento que asegura estas condiciones durante el período en que las zonas se encuentran ocupadas (de 14 a 22 hs la sala de estar, y de 22 a 8 hs los dormitorios), cuando no están ocupadas el sistema de acondicionamiento está inactivo.

Se considera que la vivienda está habitada por 5 personas. Las cargas térmicas asociadas a las personas, la iluminación y los equipos son las establecidas en la norma técnica brasilera NBR 15575 ([Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2013\)](#)). Además, los usuarios de la vivienda actúan sobre las ventanas y cortinas buscando reducir los requerimientos térmicos. Las ventanas se abren cuando la temperatura en la zona es más alta que la de consigna para refrigeración y el ambiente exterior está más fresco. Por otro lado, las cortinas se cierran durante la noche y en el día cuando está activa la refrigeración y la irradiación solar sobre la ventana supera 300 W/m^2 . Esta operación de ventanas y cortinas se realiza siempre y cuando haya algún ocupante en la vivienda (entre las 14 y las 8 hs). Para resolver la ventilación se utiliza el modelo *AirFlowNetwork*.

El paso temporal usado en la simulación es de 15 minutos. Para el cálculo de los coeficientes de convección interior y exterior sobre las superficies se utilizan los modelos que propone el programa por defecto: *TARP* y *DOE-2*, respectivamente. Se utiliza el modelo *FullExterior* para resolver la distribución de radiación solar que ingresa a la vivienda y las sombras se determinan con el método *AverageOverDaysInFrequency* con una frecuencia de 5 días.

2.4. Índices de sombreado

Se definen distintos índices de sombreado (IS) con el objetivo de estudiar si presentan alguna correlación con la demanda de energía. En cada índice se compara la irradiación solar que recibe la vivienda con su configuración de entorno respecto a la que recibe la vivienda con la misma orientación pero sin objetos cercanos sombreándola (situación de referencia). Los índices se diferencian entre sí según si la irradiación considerada es sobre toda la vivienda, sobre todas las superficies opacas, sobre el techo, las paredes o las ventanas. También se distingue en irradiación total anual, irradiación en los meses calurosos (diciembre, enero y febrero) e irradiación en los meses fríos (junio, julio y agosto).

Así, considerando las combinaciones posibles se llega a la definición de 15 IS. En las Ecs. 1 a 5 se presentan los IS_1 a IS_5 . H refiere a la radiación solar incidente acumulada (en Wh), el primer subíndice refiere a las superficies consideradas, el segundo al período en el que se acumula la energía y ref indica la irradiación de referencia definida antes.

$$IS_1 = 1 - \frac{H_{total,anual}}{H_{total,anual,ref}} \quad (1)$$

$$IS_2 = 1 - \frac{H_{opacos,anual}}{H_{opacos,anual,ref}} \quad (2)$$

$$IS_3 = 1 - \frac{H_{techo,anual}}{H_{techo,anual,ref}} \quad (3)$$

$$IS_4 = 1 - \frac{H_{paredes,anual}}{H_{paredes,anual,ref}} \quad (4)$$

$$IS_5 = 1 - \frac{H_{ventanas,anual}}{H_{ventanas,anual,ref}} \quad (5)$$

Los IS_6 a IS_{10} son análogos pero en lugar de considerar la irradiación anual consideran la irradiación sólo en los meses calurosos, y los IS_{11} a IS_{15} la irradiación en los meses fríos.

Los IS toman valores entre 0 y 1, donde un valor de 0 indica que la vivienda (o al menos las superficies contabilizadas en el IS) no es sombreada por el entorno en el periodo considerado y un valor de 1 indica que la vivienda está completamente sombreada (ver Ecs. 1 a 5).

3. RESULTADOS

Como resultado de las simulaciones se obtienen la demanda de energía anual para refrigeración y para calefacción, así como la irradiación solar sobre cada superficie exterior de la vivienda (techo, paredes, puertas exteriores y ventanas). Con la irradiación se determinan los IS y luego se estudia su relación con la demanda de energía.

Debido a la metodología seguida, donde primero se establecieron las configuraciones de entorno y luego se determinaron los IS como resultado de las simulaciones, la distribución de los IS estudiados no es uniforme entre 0 y 1. A modo de ejemplo se presentan los histogramas de los IS más relevantes que, como se verá más adelante, son los que presentaron mejores correlaciones con las demandas de energía (ver Fig. 5). En los histogramas se incluyen todos los casos de vivienda exenta (no apareada).

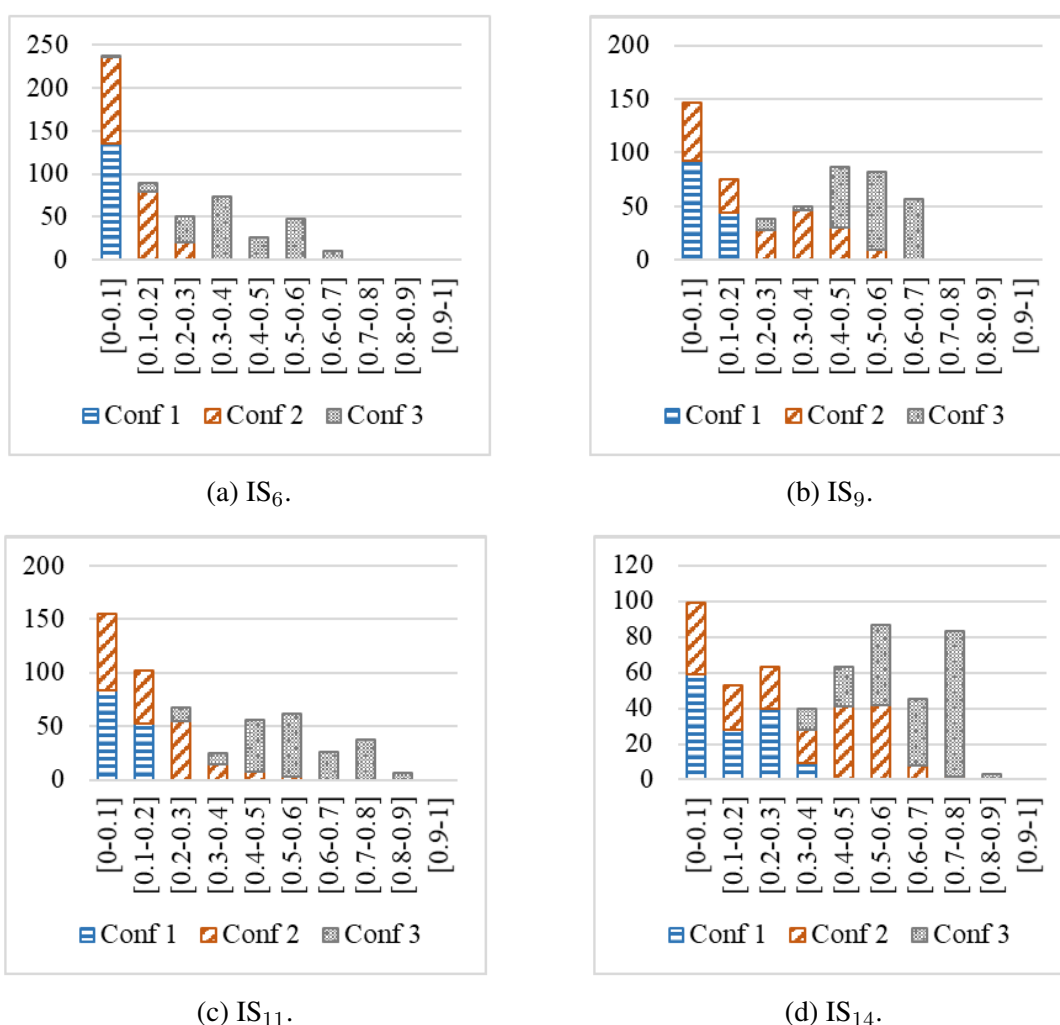


Figura 5: Histogramas de índices de sombreado más relevantes.

Se observa como con la configuración de entorno 1 se tienen los IS más bajos y con la configuración 3 los más altos. Además, y como era de esperar, en los meses calurosos (Figs. 5a y 5b) se tienen menores valores de IS que en los meses fríos (Figs. 5c y 5d). En particular, el IS₆ se concentra fundamentalmente en valores pequeños. Esto debido a que este índice considera la irradiación solar sobre toda la vivienda y a que en los meses calurosos gran parte de dicha

irradiación es sobre el techo, que es difícil de sombrear en verano.

Razonablemente, los mejores coeficientes de correlación para la demanda de refrigeración se obtienen con los IS calculados en los meses calurosos (IS_6 a IS_{10}) y para la demanda de calefacción con los calculados en los meses fríos (IS_{11} a IS_{15}). Por lo que esos son los resultados que se presentan (ver Figs. 6 y 7). Además, como tanto para calefacción como para refrigeración, los resultados para los IS sobre todas las superficies (IS_6 e IS_{11}) y los IS sobre las superficies opacas (IS_7 e IS_{12}) son prácticamente idénticos, no se muestran las gráficas de IS en superficies opacas. En todos los casos se proponen ajustes lineales a excepción de los IS que cuantifican la irradiación solar sobre las paredes (IS_9 e IS_{14} para refrigeración y calefacción, respectivamente), para los que se considera ajustar por una función polinómica de 2º orden. Una vez más, los resultados que se presentan son para los casos de vivienda exenta.

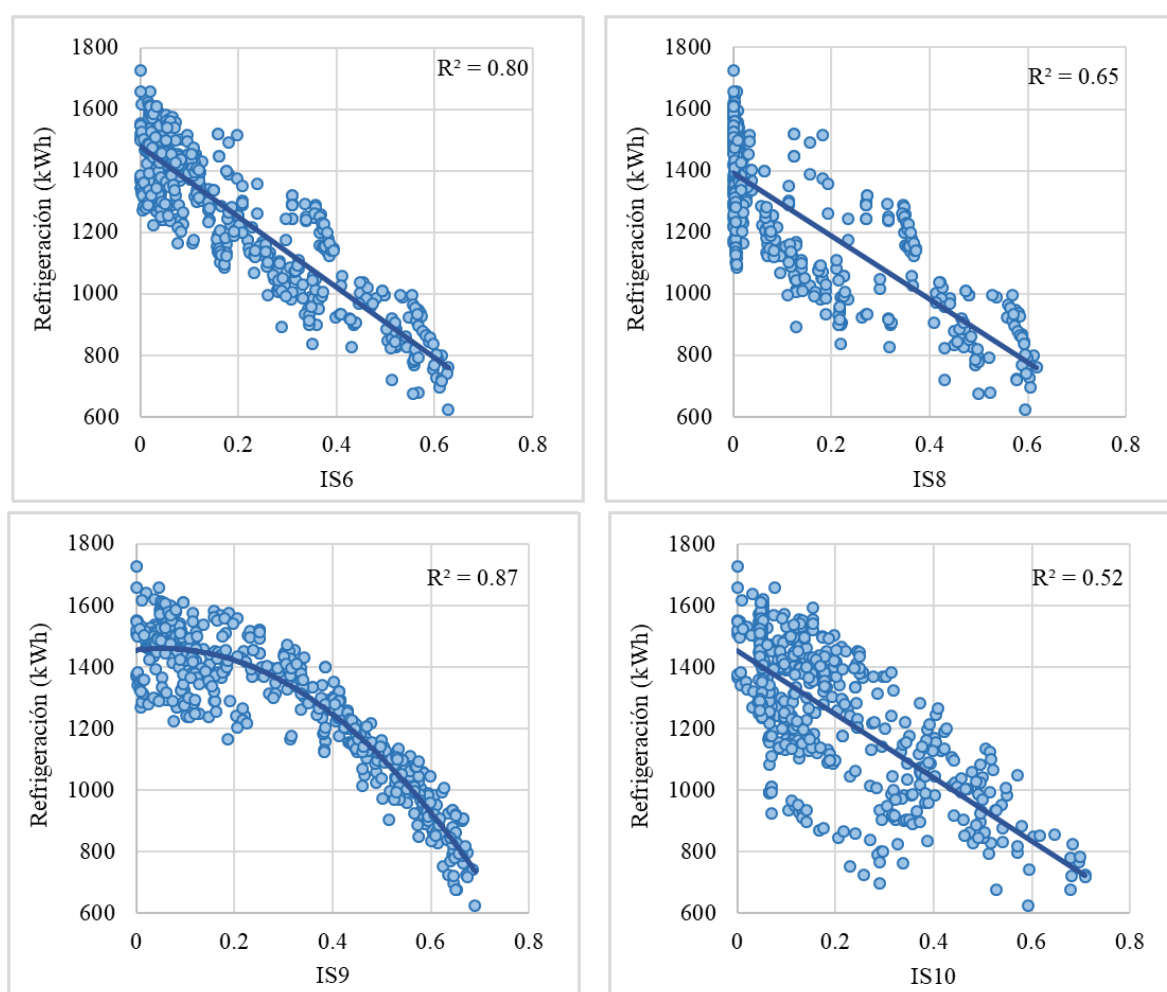


Figura 6: Demanda anual de refrigeración para los IS en meses calurosos.

A partir de los resultados se destaca la importancia de tener en consideración el entorno cercano a la hora de realizar el modelo energético de una vivienda. Para el caso de estudio, la demanda de refrigeración anual toma valores que van desde 620 a 1730 kWh y la de calefacción desde 130 a 560 kWh.

Por otro lado, y ya haciendo foco en la relación entre los IS y la demanda de energía, el IS sobre las paredes (IS_9 en meses calurosos e IS_{14} en meses fríos) es el que correlaciona mejor tanto para refrigeración como para calefacción. El segundo mejor ajuste se obtiene para el IS

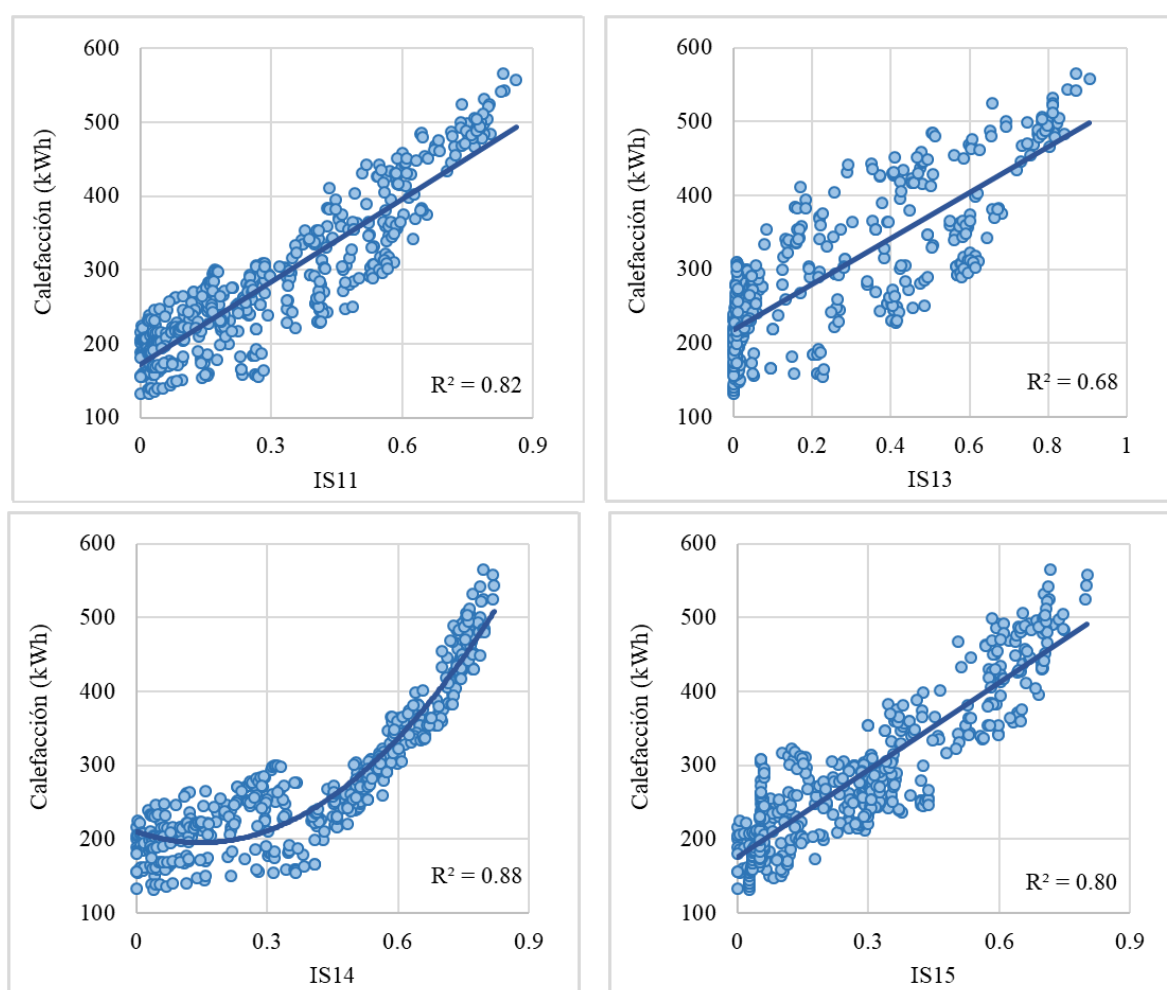


Figura 7: Demanda anual de calefacción para los IS en meses fríos.

que considera toda la vivienda (IS₆ en meses calurosos e IS₁₁ en meses fríos), aunque es muy similar al IS sobre las superficies opacas (IS₇ e IS₁₂). Las ecuaciones de las funciones con mejor ajuste se presentan en las Tablas 1 y 2.

Índice	Función	R ²
IS ₆	$y = -1150x + 1481$	0,80
IS ₉	$y = -1795x^2 + 197x + 1454$	0,87

Tabla 1: Mejores ajustes para la demanda de refrigeración.

En todos los casos, y particularmente en los de mejor ajuste, hay mayor dispersión para los IS más pequeños. Esto se debe, en primer lugar, a que hay mayor cantidad de casos para los IS más pequeños (ver Fig. 5) y, en segundo lugar, a que para los IS más pequeños las variaciones consideradas para la orientación de la vivienda tienen mayor impacto sobre la demanda de energía. Por el contrario, si la vivienda está muy sombreada por el entorno (IS altos), su orientación no va a incidir en la demanda de energía. La gran diferencia que se observa al comparar los resultados de refrigeración y calefacción es la correlación con el IS sobre las ventanas (IS₁₀ e IS₁₅, respectivamente). Mientras que el ajuste es bueno para calefacción, para refrigeración los resultados muestran mucha dispersión. Para explicar esta diferencia se requiere mayor análisis,

Índice	Función	R ²
IS ₁₁	$y=375x+172$	0,82
IS ₁₄	$y=694x^2-205x+210$	0,88

Tabla 2: Mejores ajustes para la demanda de calefacción.

aunque un factor que podría incidir es el criterio definido para la operación de las cortinas, que se activan cuando hay demanda de refrigeración y una irradiación alta sobre las ventanas.

Por último, se estudia el impacto de modelar a la vivienda apareada a sus vecinas en términos de la demanda de energía y su relación con los IS. El análisis se hace para los IS sobre las paredes donde se agregan los casos de vivienda apareada a los gráficos presentados para la vivienda exenta (ver Fig. 8). Además, se indican cuáles casos de la vivienda exenta tienen la misma configuración de entorno que los de la vivienda apareada (puntos grises en la Fig. 8).

Para los casos de vivienda apareada, la relación entre las demandas de energía y los IS sobre las paredes tiene el mismo andamio que para los casos de vivienda exenta, pero las curvas se desplazan. Para refrigeración, la curva se desplaza hacia IS mayores pero con poco cambio en la demanda de energía mientras que para calefacción ocurre lo contrario, poco cambio en los IS pero sí una disminución importante en la demanda de energía.

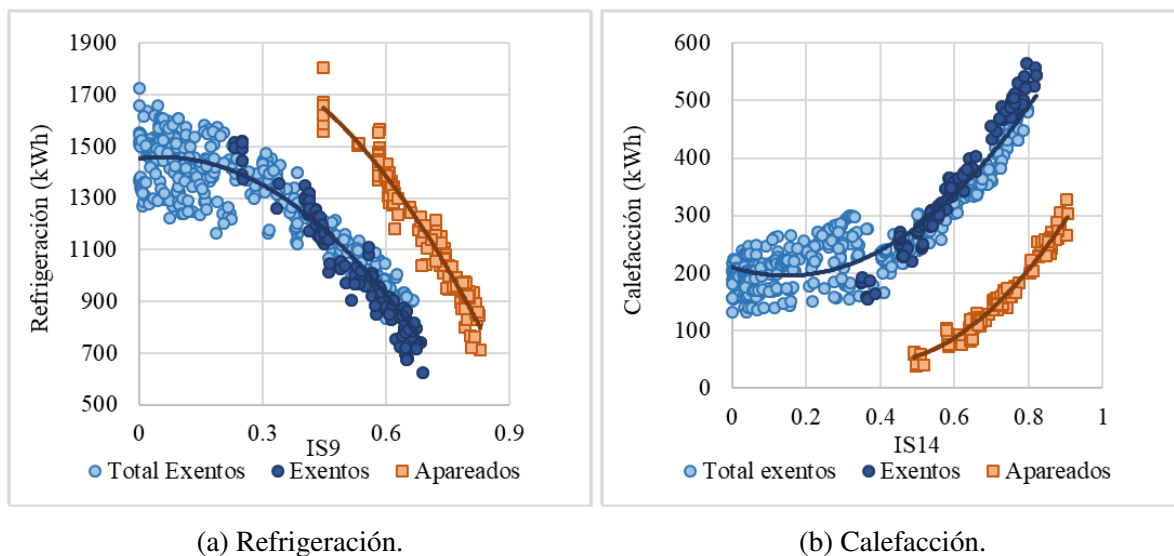


Figura 8: Análisis de casos de vivienda apareada.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se analiza la importancia de considerar las sombras provocadas por el entorno cercano en el modelado energético de una vivienda en Uruguay. Para eso, se modela la vivienda de estudio en *EnergyPlus* y se le incorporan distintas configuraciones de entorno generando un total de 680 casos a simular. Los resultados muestran que, para los entornos considerados, la demanda de refrigeración puede ser hasta 2,8 veces más chica y la de calefacción hasta 4,3 veces más grande que en el caso de la vivienda aislada. Por lo tanto, en la búsqueda de desarrollar modelos energéticos de viviendas que sean confiables, parece mandatorio tener en consideración al entorno próximo al caso de estudio.

Como parte del estudio se definen distintos índices de sombreado con el objetivo de estudiar la relación entre estos y la demanda de energía de la vivienda. Los índices de sombreado toman valores entre 0 y 1 y comparan la irradiación incidente en distintas superficies de la vivienda respecto a la incidente en las mismas superficies pero de la vivienda aislada (sin entorno cercano). Entonces, un valor de 0 indica que las superficies no reciben sombras mientras que un valor de 1 indica que las superficies están completamente sombreadas en el periodo considerado. Tanto para refrigeración como para calefacción, la mejor correlación se observa con los índices que describen las sombras sobre las paredes de la vivienda en los períodos caluroso y frío, respectivamente. Obteniéndose coeficientes de correlación de 0,87 para refrigeración y 0,88 para calefacción.

Finalmente, se analizan casos en los que las edificaciones vecinas están apareadas a la vivienda de estudio, implicando que las fachadas laterales (además de estar sombreadas) sean adiabáticas. En estos casos, los resultados muestran comportamientos bien distintos para las demandas de refrigeración y de calefacción. Mientras que la primera varía relativamente poco, la segunda disminuye a prácticamente la mitad.

Los resultados obtenidos al correlacionar la demanda con los índices de sombreado, aunque preliminares, son auspiciosos. Por un lado, pensando en incorporar la configuración de entorno a un análisis de sensibilidad global para identificar los parámetros más relevantes para el modelado energético de una vivienda. Por otro lado, considerando la posibilidad de desarrollar funciones que a partir de datos que describan el entorno de la vivienda, den como resultado algún factor de corrección que permita obtener la demanda de energía aproximada conociendo la demanda del caso de referencia (sin entorno). Esto sería de gran utilidad cuando se busca analizar el desempeño térmico de una gran cantidad de viviendas, donde modelar cada entorno lo volvería inabordable.

REFERENCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Nbr15575. edificações habitacionais - desempenho. parte 1. Informe Técnico, Comitê Brasileiro da Construção Civil, 2013.
- Menberg K., Heo Y., y Choudhary R. Sensitivity analysis methods for building energy models: Comparing computational costs and extractable information. *Energy and Buildings*, 2016.
- Neale J., Haris M., Mangina E., Finn D., y O' Donnell J. Accurate identification of influential building parameters through an integration of global sensitivity and feature selection techniques. *Applied Energy*, 2022.
- Nikoofard S., Ugursal V.I., y Beausoleil-Morrison I. Effect of external shading on household energy requirement for heating and cooling in canada. *Energy and Buildings*, 2011.
- Pena G., Favre F., Galione P., Gervaz S., Romero J., López M., Pereira L., Camacho M., Picción A., Scavino S., Wilkins A., Rodríguez J., y Gil G. Evaluación de desempeño térmico y energético de viviendas mevir. análisis comparativo de la tipología "cardal" en dos sistemas constructivos. Informe Técnico, MIEM-MEVIR-UDELAR, 2023.
- Pisello A.L., Taylor J.E., Xu X., y Cotana F. Inter-building effect : Simulating the impact of a network of buildings on the accuracy of building energy performance predictions. *Building and Environment*, 2012.
- Yu C. y Pan W. Inter-building effect on building energy consumption in high-density city contexts. *Energy and Buildings*, 2023.