

CÁLCULO DEL CAUDAL DE INFILTRACIÓN DE AIRE EN UN EDIFICIO CONSIDERANDO LA DIRECCIÓN DEL VIENTO

Luis P. Thomas¹, Natalia Muñoz¹, Beatriz M. Marino¹

¹Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería (CIFICEN), Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Pinto 399, 7000 Tandil, Argentina
Tel. 0249-4380450 – e-mail: lthomas@exa.unicen.edu.ar

Recibido 08/2023; Aceptado 10/2023

RESUMEN.- Presentamos una nueva metodología que utiliza la ecuación aproximada empleada por las normas técnicas ASHRAE y el programa EnergyPlus en el cálculo del caudal de la infiltración de aire en edificios. La técnica considera la acción del viento sobre cada fachada de la edificación introduciendo su dirección y evita co-simular EnergyPlus con otros programas como es usual. Se emplean coeficientes adimensionales y normalizados en el modelo de regresión lineal múltiple, lo cual permite la adecuada comparación de los caudales de infiltración generados por la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior y por la acción del viento en el edificio analizado. Una aproximación teórica adicional, que es independiente de los programas de simulación numérica, se emplea para mejorar el cálculo del caudal de infiltración siempre que se disponga de la temperatura interna y la información meteorológica local.

Palabras clave: infiltración de aire, dirección del viento, EnergyPlus.

ESTIMATIONS OF THE AIR INFILTRATION FLOW IN A BUILDING CONSIDERING THE WIND DIRECTION

ABSTRACT.- A methodology is introduced to calculate the air infiltration flow in buildings by means of the approximated equation used by the standards ASHRAE and the programme EnergyPlus. The wind action on each facade of the building is considered by introducing the wind direction, and the usual EnergyPlus and other programmes cosimulation is avoided. Non-dimensional and normalized coefficients are used in the multiple linear regression model, which allows us to properly compare the infiltration flows generated by the temperature difference between the inside and outside, and the wind action on the analysed building. An additional theoretical approximation, which does not depend on numerical simulation programmes, is used to improve the calculation of the infiltration flow when the building internal temperature and the local meteorological data are available

Keywords: air infiltration, wind direction, EnergyPlus.

1. INTRODUCCIÓN

Una edificación con bajo consumo energético se caracteriza principalmente por su buen aislamiento térmico y el control de los flujos de aire entrantes y salientes (Sadineni et al., 2011; Cao et al., 2016). La hermeticidad de la envolvente es necesaria para evitar que el calor se escape por las ranuras en invierno e ingrese al interior en verano, provocando la pérdida de eficiencia energética (Sameni et al., 2015). Para minimizar el consumo energético, mejorar la hermeticidad de la envolvente y mantener la calidad del aire interior, el balance entre el flujo de infiltración inducido por la infiltración natural, la ventilación natural y los sistemas mecánicos debe establecerse apropiadamente.

La cuantificación de los caudales de infiltración y ventilación natural en edificios implica la resolución de varios problemas (ASHRAE, 2019) que deben encararse en conjunto. Diferentes modelos físico-matemáticos basados en el balance de masa en la envolvente generado por la diferencia de presión entre el interior

y exterior permiten calcular los flujos entrantes y salientes de aire, y por ende la calidad del aire del ambiente interior, considerando la información meteorológica del lugar de emplazamiento. La resolución de los modelos requiere el uso de programas y toda la información disponible (diseño, geometría, materiales de construcción, etc.) de las edificaciones (Hurel et al., 2016). En particular, el programa EnergyPlus (2023) es una herramienta de simulación de los flujos de energía y aire en edificios, muy usada y gratuita, desarrollada por el Departamento de Energía de Estados Unidos de América (EE.UU.). Para calcular el flujo de la infiltración de aire Q (m^3/s) y/o ventilación natural, EnergyPlus cuenta con la opción *Design Flow Rate* que usa la siguiente expresión aproximada para establecer la dependencia de las variables principales (Coblentz y Achenbach, 1963):

$$Q = Q_d \{A + B|T_i - T_e| + Cu + Du^2\}, \quad (1)$$

donde Q_d es el caudal de diseño del edificio a una presión de referencia, A , B , C y D son constantes dimensionales; T_i y T_e son la

temperatura interna y externa en °C respectivamente, y u es la velocidad del viento en m/s. Notar que no se tiene en cuenta la dirección del viento en la Ec. (1).

Las normas técnicas ASHRAE (2019) y el manual de EnergyPlus proponen valores de los coeficientes de la Ec. (1) basados en algunos casos particulares. Por otra parte, el programa DOE-2 (2023) propone usar $A = B = D = 0$ y $C = 0.224$, comúnmente expresados como (0, 0, 0.224, 0), mientras el programa BLAST (Herron et al., 1981) utiliza (0.606, 0.03636, 0.1177, 0). Para el caso en que dichos valores se desconozcan, la estrategia usual es considerar tasas de infiltración constantes (1, 0, 0, 0), independientes de la diferencia entre T_i y T_e y de u como se propone en la Ec. (1). Para obtener resultados más precisos, es necesario analizar con detalle la infiltración de aire debida a las condiciones externas.

El programa CONTAM (Dols y Polidoro, 2020), desarrollado por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de EE.UU., también es útil para analizar la infiltración, la ventilación y la calidad del aire interior en edificios multi-ambientes o multi-zonas. A diferencia de EnergyPlus, CONTAM considera tanto la velocidad como la dirección del viento para determinar las tasas de infiltración en cada cara del edificio (Haghighat y Megri, 1996; Chung, 1996; Emmerich et al., 2004; Ng et al., 2015). Dols et al. (2021) compararon los resultados de diferentes modelos asociados con el uso de la energía, las tasas de infiltración y la concentración de contaminantes para el caso de una vivienda multifamiliar utilizando únicamente EnergyPlus, simulaciones con EnergyPlus utilizando correlaciones de infiltración, simulaciones únicamente con CONTAM, y co-simulaciones EnergyPlus-CONTAM. El trabajo muestra los beneficios de la co-simulación, especialmente para analizar el ingreso de partículas a través de la envolvente y su remoción por filtración, y para calcular el rendimiento energético del edificio.

Con el fin de comparar el caudal de infiltración para varios edificios con y sin barreras de aire interiores, ubicados en diferentes regiones climáticas, Ng et al. (2018) normalizaron los valores de la hermeticidad de los mismos con el área de la superficie exterior. Consideraron la velocidad del viento en función de la altura sobre el suelo para cada región ejecutando EnergyPlus, y utilizaron CONTAM para dar cuenta de la velocidad y dirección del viento promediando el caudal de infiltración en toda la envolvente antes de usarse en EnergyPlus. Encontraron que los valores de las tasas de infiltración son significativamente menores para edificios con barreras de aire respecto a los edificios sin barreras, y que la aproximación utilizada es menos importante para estimar el caudal de infiltración en edificios con envolventes más herméticas. De los resultados es también posible inferir que los valores de A están asociados al funcionamiento de los sistemas de ventilación, calefacción y aire acondicionado (HVAC).

Aunque usualmente se descarta, la dirección del viento influye en los valores de los coeficientes de infiltración A , B , C y D . Bastos y Fernández (2023) midieron la concentración de CO_2 en la sala de estar del departamento más elevado de un edificio de siete pisos en Pamplona (España) durante algunos días de verano, invierno y primavera, y utilizaron sus resultados para calibrar los valores de A , B , C , D con EnergyPlus considerando la intensidad del viento medida in situ. Ellos encontraron que la infiltración calculada explica la medición de CO_2 cuando los datos del viento se desagregan según dos direcciones, este y oeste. Por su parte, Gutiérrez y Fernández (2022) implementaron una metodología para encontrar el mejor ajuste entre las mediciones in situ y los resultados de simulaciones usando simultáneamente los programas JePLUS y Ener-

gyPlus para determinar las capacitancias, los flujos de infiltración, puentes térmicos y los coeficientes A , B , C , D de dos viviendas idénticas cercanas y con la misma orientación pero con diferente entorno construido. Encontraron que las habitaciones similares de ambas viviendas tienen flujos de infiltración diferentes que podrían estar asociados, entre otros factores, a la distinta distribución de las construcciones cercanas.

De lo hasta aquí expuesto podemos inferir que, para tener resultados confiables del flujo de infiltración usando el programa EnergyPlus u otros similares, es necesario calibrar los coeficientes de la Ec. (1) correlacionando el caudal de infiltración medido o el estimado de una dada edificación con la intensidad y la dirección del viento. El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología para calcular el caudal de infiltración en un edificio modelo usando la Ec. (1) con los valores de u modificados según la dirección del viento ϑ y los efectos de la elevación del terreno. Los efectos del entorno próximo (arboledas, otros edificios, paredones, ...) se consideran a través del perfil de u . Para ello, consideramos la velocidad del viento a la altura efectiva del edificio modificada por un coeficiente $U_H(\vartheta)$. En este caso, la Ec. (1) toma la forma

$$Q = Q_d \{A + B|T_i - T_e| + C(U_H u) + D(U_H u)^2\} \quad (2)$$

Algunos autores (Dols et al. 2020; Ng et al. 2021) sugieren que Q depende sólo de u^2 y suponen que $C = 0$. Entonces, las Ecs. (1) y (2) toman, respectivamente, la forma

$$Q = Q_d \{A + B|T_i - T_e| + D u^2\} \quad (3)$$

$$Q = Q_d \{A + B|T_i - T_e| + D(U_H u)^2\} \quad (4)$$

El aspecto novedoso del presente estudio es la inclusión directa de los efectos de la dirección del viento (y la altura del edificio) en el cálculo del caudal de infiltración en las Ecs. (1) y (3) al introducir la *velocidad efectiva del viento* uU_H , evitando recurrir a la co-simulación de programas. El trabajo se organiza como sigue. En la siguiente sección se describe la metodología para obtener los coeficientes A , B , C , D que mejor ajustan las ecuaciones (1-4), y se la aplica a un edificio complejo que presenta como desafío una protección del viento diferente para cada una de sus fachadas. Luego, tras comparar los valores del caudal de infiltración obtenidos, se discuten los resultados. Finalmente se presentan las discusiones.

2. METODOLOGÍA

El caso de estudio es el edificio de dos plantas de la Biblioteca Central de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, diseñado y construido según las normas técnicas provinciales vigentes. Se encuentra en la zona semi-rural de Tandil caracterizada por su clima templado y húmedo (subhúmedo serrano), con veranos suaves y poca amplitud térmica anual. Construido sobre una pendiente natural, las caras SE y NE encuentran una depresión del terreno (más acentuada para la primera) mientras las caras SO y NO están sobre un terraplén (figura 1). Una arboleda con follaje de hojas perennes cercana a la fachada SE de la construcción agrega protección adicional contra los vientos provenientes de esa dirección durante todo el año. En consecuencia, es de esperar una marcada diferencia del efecto de la dirección del viento sobre el flujo de infiltración a través de cada fachada. El edificio no cuenta con sistema de aire acondicionado central y la calefacción consiste en varias calderas y un sistema de ductos y difusores que distribuyen el aire caliente en ambas plantas. Esto implica una presurización positiva del edificio cuando la calefacción está encendida. [Mayo-

res detalles de la construcción pueden encontrarse en Muñoz et al. (2014)].

Los registros horarios de T_e , u y ϑ son proporcionados por la estación del Servicio Meteorológico Nacional localizada a 15 km del Campus en terreno abierto. Las medidas obtenidas en esta estación son prácticamente iguales a las proporcionadas por una estación meteorológica ubicada en el mismo Campus, como evidencian Muñoz et al. (2014). No obstante, para el presente estudio, no fue posible contar con todos los registros correspondientes al periodo de análisis de la más cercana al edificio. T_i se midió en el amplio atrio central del edificio con dos sensores HOBO por nivel colocados a 1 m (planta baja, PB), 4.6 m (planta alta, PA) y 6.6 m (cielo raso) sobre un plano vertical diagonal N-S. Los valores registrados de la temperatura interna difieren muy poco entre sí por lo que se considera T_i como el promedio de los valores medidos. Para aplicar la metodología propuesta se utilizan los valores horarios de T_e , T_i , ϑ , u obtenidos entre el 1 de enero de 2016 y el 31 de diciembre de 2018 en el cálculo de la diferencia de temperatura $\Delta T = T_e - T_i$ y del coeficiente adimensional $U_H(\vartheta)$ a la altura H_e con la expresión

$$U_H = \left(\frac{e_{met}}{H_{met}} \right)^{a_{met}} \left(\frac{H_e}{e} \right)^a, \quad (5)$$

(ASHRAE, 2019), donde e es el espesor de la capa límite atmosférica, a es el exponente asociado al perfil de velocidad y H_e es la altura externa efectiva sobre el nivel del terreno. Estos tres parámetros varían de acuerdo al entorno del edificio. La velocidad u se mide a la altura $H_{met} = 10$ m sin obstáculos eólicos cercanos, por lo que pueden usarse los valores estandarizados $e_{met} = 270$ m y $a_{met} = 0.14$. Dada la pendiente del terreno sobre el que se encuentra el edificio analizado, los muros orientados al NO y SO tienen 7 m de altura, y están elevados respecto del nivel del terreno sobre un terraplén de 2 m. Por lo tanto, $H_e = 9$ m para estos muros. Para la cara que enfrenta el SE es $H_e = 5$ m. Los valores de e y a dependen del perfil de velocidad del viento y se toman de la norma ASHRAE (2019), esto es $e = 270$ m y $a = 0.14$ para vientos provenientes del NO y SO, $e = 370$ m y $a = 0.22$ para vientos procedentes del NE y $e = 460$ m y $a = 0.33$ para vientos desde el SE. Así se obtiene U_H para vientos provenientes del NE ($\vartheta = 45^\circ$), SO ($\vartheta = 135^\circ$), SO ($\vartheta = 225^\circ$) y NE ($\vartheta = 315^\circ$). El valor del coeficiente $U_H(\vartheta)$ en las direcciones ϑ intermedias se obtiene por interpolación lineal entre dichos valores.

Luego, con los valores horarios de ΔT , u y ϑ , y $Q(t)$ calculado como lo hacen Muñoz et al. (2022) a partir del *área efectiva de fuga*, se calculan los coeficientes A , B , C , D mediante la aplicación del modelo de regresión lineal múltiple (RLM) a las Ecs. (1-4) para el

periodo de tiempo indicado. El caudal de infiltración depende de ΔT , de la gestión de las aberturas para refrescar en el estío y de la eventual presurización por calefacción en invierno. Por lo tanto, los coeficientes se calculan para periodos de seis meses por cada año correspondientes a periodos cálidos (noviembre-abril) y fríos (mayo-octubre) con el fin de detectar eventualmente diferentes caudales de infiltración durante dichos esos espacios de tiempo.

En particular, $Q(t)$ en la Ec. (1) cumple el rol de variable dependiente mientras $|T_i - T_e|(t)$, $u(t)$ y $u^2(t)$ son las variables independientes. Los valores de $Q(t)$ se determinan para cada hora del día mientras los valores horarios de las variables independientes son los reportados por la estación meteorológica del SMN. Primero se realiza la normalización estándar recurriendo a la expresión

$$X_{ad} = \frac{X(t) - \bar{X}}{\sigma_X}, \quad (6)$$

donde \bar{X} indica el valor promedio de la variable X y σ_X es su desviación estándar. El modelo RLM se aplica a las *ecuaciones normalizadas*. Así, la Ec. (1) normalizada toma la forma

$$Q_{ad} = \frac{Q(t) - \bar{Q}}{\sigma_Q} = \alpha_1 + \beta_1 \left[\frac{\Delta T(t) - \bar{\Delta T}}{\sigma_{\Delta T}} \right] + \gamma_1 \left[\frac{u(t) - \bar{u}}{\sigma_u} \right] + \delta_1 \left[\frac{u^2(t) - \bar{u}^2}{\sigma_{u^2}} \right] \quad (7)$$

donde α_1 , β_1 , γ_1 y δ_1 son los coeficientes adimensionales. Despejando $Q(t)$ de la Ec. (7) se obtiene

$$Q(t) = \left[\bar{Q} + \sigma_Q \left(\alpha_1 - \beta_1 \frac{\bar{\Delta T}}{\sigma_{\Delta T}} - \gamma_1 \frac{\bar{u}}{\sigma_u} - \delta_1 \frac{\bar{u}^2}{\sigma_{u^2}} \right) \right] + \left[\beta_1 \frac{\sigma_Q}{\sigma_{\Delta T}} \Delta T(t) + \left[\gamma_1 \frac{\sigma_Q}{\sigma_u} u(t) + \left[\delta_1 \frac{\sigma_Q}{\sigma_{u^2}} u^2(t) \right] \right] \right] \quad (8)$$

Usando la Ec. (1) con $Q_d = 1$ m³/s, se encuentran

$$A = \bar{Q} + \sigma_Q \left(\alpha_1 - \beta_1 \frac{\bar{\Delta T}}{\sigma_{\Delta T}} - \gamma_1 \frac{\bar{u}}{\sigma_u} - \delta_1 \frac{\bar{u}^2}{\sigma_{u^2}} \right) \quad (9)$$

$$B = \beta_1 \frac{\sigma_Q}{\sigma_{\Delta T}}, \quad C = \gamma_1 \frac{\sigma_Q}{\sigma_u}, \quad D = \delta_1 \frac{\sigma_Q}{\sigma_{u^2}}. \quad (10)$$

El subíndice 1 indica que α_1 , β_1 , γ_1 , δ_1 están asociados con la Ec. (1) normalizada. Tomando $\gamma = 0$ y/o cambiando u por $U_H u$ en la Ec. (7), se obtienen las formas normalizadas de las Ecs. (2), (3) y (4) que permiten obtener α_i , β_i , γ_i , δ_i con $i = 2, 3, 4$ respectivamente. Los coeficientes dimensionales A_i , B_i , C_i , D_i se obtienen recurriendo a las Ecs. (9-10) sustituyendo el subíndice 1 por el correspondiente i .

De acuerdo a la Ec. (7), α_i , β_i , γ_i , δ_i se calculan mediante las diferencias entre los valores de las variables y sus respectivos valores



Fig. 1: Imagen del edificio analizado. La fachada de entrada enfrenta el NO.

medios. Por ejemplo, un cambio del valor medio del caudal extra causado por la presión interna generada por un sistema HVAC cambia sólo A_i de acuerdo a la Ec. (9) sin alterar $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i, B_i, C_i, D_i$. En consecuencia, $A_i \neq 0$ implica la influencia de los sistemas HVAC sobre la infiltración.

Por otra parte, la normalización de las variables permite su adimensionalización con valores en un rango comparable. Así, la comparación de los coeficientes β_i con γ_i y δ_i que resultan de aplicar el modelo RLM a cada ecuación deriva en la cuantificación relativa de los efectos de las variaciones de temperatura e intensidad del viento sobre el caudal de infiltración.

Con los valores de $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i$ determinados usando el modelo RLM se obtienen los caudales de infiltración adimensionales aproximados

$$Q_{lad} = \alpha_1 + \beta_1 \left[\frac{\Delta T(t) - \overline{\Delta T}}{\sigma_{\Delta T}} \right] + \gamma_1 \left[\frac{u(t) - \bar{u}}{\sigma_u} \right] + \delta_1 \left[\frac{u^2 - \bar{u}^2}{\sigma_{u^2}} \right] \quad (11)$$

$$Q_{2ad} = \alpha_2 + \beta_2 \left[\frac{\Delta T(t) - \overline{\Delta T}}{\sigma_{\Delta T}} \right] + \gamma_2 \left[\frac{U_H u(t) - \overline{U_H u}}{\sigma_{(U_H u)}} \right] + \delta_2 \left[\frac{(U_H u)^2(t) - \overline{(U_H u)^2}}{\sigma_{(U_H u)^2}} \right] \quad (12)$$

$$Q_{3ad} = \alpha_3 + \beta_3 \left[\frac{\Delta T(t) - \overline{\Delta T}}{\sigma_{\Delta T}} \right] + \delta_3 \left[\frac{u^2 - \bar{u}^2}{\sigma_{u^2}} \right] \quad (13)$$

$$Q_{4ad} = \alpha_4 + \beta_4 \left[\frac{\Delta T(t) - \overline{\Delta T}}{\sigma_{\Delta T}} \right] + \delta_4 \left[\frac{(U_H u)^2(t) - \overline{(U_H u)^2}}{\sigma_{(U_H u)^2}} \right] \quad (14)$$

En resumen, con las cuatro ecuaciones propuestas (1-4) normalizadas, $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i$ se calculan mediante el modelo RLM correspondiente para cada caso. Estos coeficientes permiten hallar los caudales adimensionales aproximados Q_{lad} por medio de las Ecs. (11-14).

3. RESULTADOS

La figura 2 muestra los resultados del modelo RLM usando las formas normalizadas de las Ecs. (1-4) agrupados en períodos cálidos y

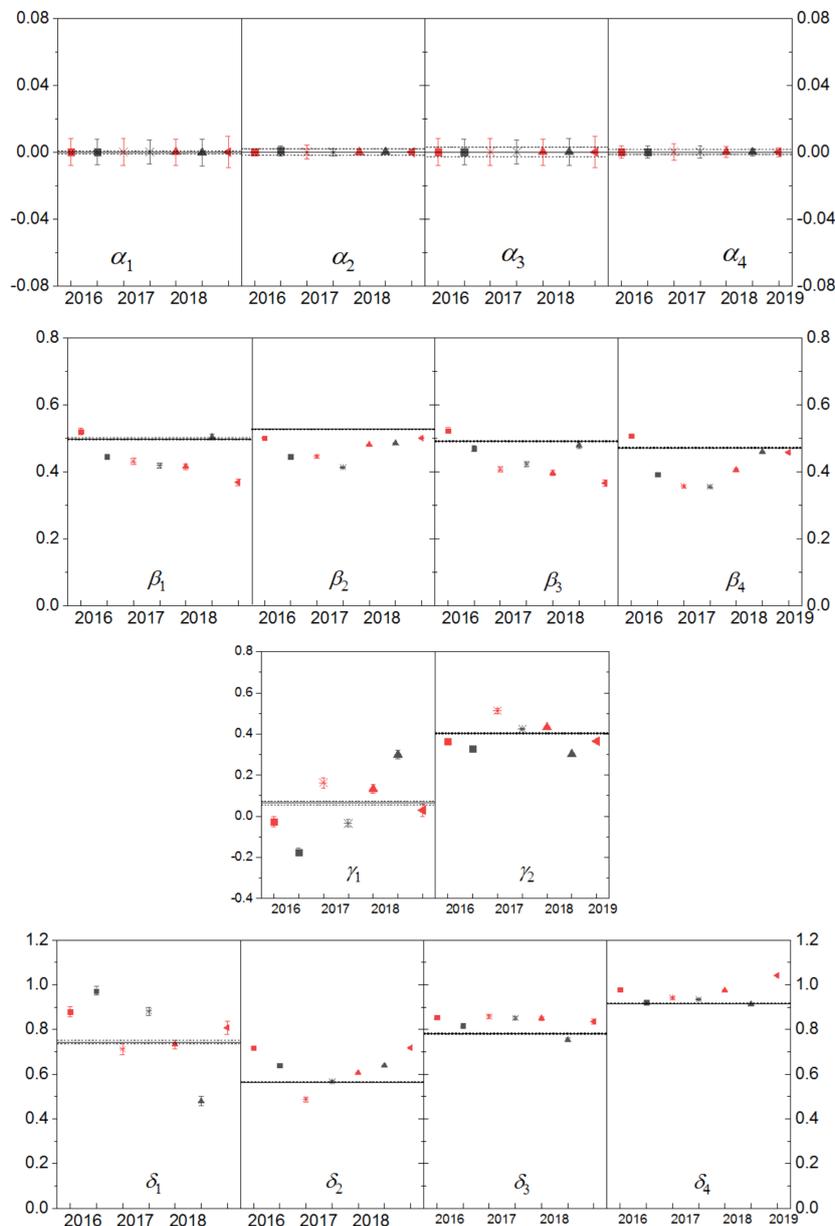


Fig. 2. Coeficientes adimensionales $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i$ (símbolos) y sus respectivas desviaciones estándar (barras) para los períodos cálidos (rojos) y fríos (negros) en 2016 (■, ■), 2017 (*, *), 2018 (▲, ▲) y 2019 (◄, ◄).

fríos de seis meses durante los tres años de medición. Las líneas horizontales de trazo continuo corresponden al valor de los coeficientes obtenidos considerando los datos de los tres años, mientras que las líneas de trazos indican las respectivas desviaciones estándar. Se observa que α_i y sus desviaciones estándar son prácticamente nulas. Por el contrario, $\beta_i \approx 0.5$ con escasa fluctuación durante cada período (manifestadas por las insignificantes desviaciones estándar de cada punto). Sin embargo, las variaciones de β_i entre períodos parecen no estar correlacionadas con los períodos cálidos o fríos, o años particulares. Los valores medios obtenidos con datos mensuales (no mostrados), de 6 meses (puntos) y de tres años (líneas horizontales) muestran valores cercanos, pero las incertezas disminuyen a medida que aumenta el número de datos, como es de esperar. El coeficiente γ_1 .

≈ 0.1 presenta fluctuaciones de ± 0.2 entre períodos. Por el contrario, $\gamma_2 \approx 0.4$ y entonces el resultado del modelo RLM aplicado a la Ec. (2) normalizada difiere apreciablemente del aplicado a la Ec. (4) normalizada con $C = \gamma = 0$. Por otra parte, el coeficiente δ_i se encuentra en el rango 0.56 - 0.92 según la ecuación empleada en el modelo RLM. Como $\delta_i \gg \gamma_i$, el término asociado con u^2 es más importante que el término lineal en u para determinar Q , situación que no se verifica con la Ec. (2) normalizada ya que $\delta_2 \sim \gamma_2$. Las fluctuaciones de δ_1 y δ_2 entre períodos guardan relación con las respectivas de γ_1 y γ_2 ya que ambas están relacionadas con u y ϑ . En contraste, los coeficientes δ_3 y δ_4 presentan menores fluctuaciones.

La figura 3 y la Tabla 1 muestran los valores del *coeficiente de determinación corregido (o ajustado)* R^2_{adj} obtenido con las Ecs. (1-4). Se observa que $R^2_{1adj} \approx R^2_{3adj} \approx 0.74$, mientras que $R^2_{2adj} \approx R^2_{4adj} > 0.94$. Esto revela la ventaja de ajustar los términos asociados con u según su dirección y características del terreno sobre el que está erigida la edificación como se hace con las Ecs. (2) y (4). El mayor número de coeficientes ($\alpha_3, \beta_2, \gamma_2, \delta_2$) de la Ec. (2) normalizada respecto de los de la Ec. (4) normalizada ($\alpha_4, \beta_4, \delta_4$) genera un mejor ajuste ($R^2_{2adj} \approx 0.97$ frente a $R^2_{4adj} \approx 0.94$) a costa de fluctuaciones

algo mayores entre períodos, como muestra la figura 2.

Los resultados de los caudales de infiltración aproximados Q_{iad} obtenidos con las Ecs. (11-14) en función de $Q_{ad} = (Q - \bar{Q})/\sigma_Q$ se muestran en la figura 4. Q_{1ad} y Q_{3ad} presentan gran dispersión causada por los efectos de las diferentes direcciones del viento. En cambio, para Q_{2ad} y Q_{4ad} los resultados se agrupan en nubes de puntos próximas a la recta $Q_{iad} = Q_{ad}$, confirmando que las Ecs. (2) y (4) son una buena aproximación de la diferente infiltración del edificio de acuerdo a los obstáculos eólicos en las inmediaciones a diferencia de lo que ocurre usando las Ecs. (1) y (3).

4. DISCUSIÓN

Los resultados sugieren que la Ec. (2) permite alcanzar el mayor coeficiente de correlación, lo que la hace la aproximación más adecuada para dar cuenta de la infiltración. Alternativamente, la Ec. (4) es más simple y también permite obtener un alto coeficiente de correlación. De acuerdo a la Tabla 1, los coeficientes de la Ec. (4) normalizada revelan que $\delta = (0.916/0.471)\beta \approx 1.95\beta$, es decir, el viento genera un 95% más de infiltración que ΔT . A modo de comparación, los coeficientes obtenidos en este trabajo y los empleados por otros programas se listan en la Tabla 2. Si bien son del mismo orden, los mismos presentan diferencias razonables considerando las diferentes formas de los edificios, obstáculos eólicos del entorno, clima y tipo de cálculo realizado.

La figura 5 muestra las nubes de puntos obtenidas usando los coeficientes propuestos por BLAST y DOE-2 en las Ecs. (1) y (2). Se observa una importante dispersión de puntos según la dirección del viento con respecto a la Ec. (1); esta dispersión disminuye, pero no se anula, si se usa la Ec. (2) (es decir, se cambia u por UHu). En consecuencia, para una buena estimación del caudal de aire infiltrado en el edificio son necesario tanto (a) el uso de los coeficientes adecuados como (b) el uso de los valores efectivos de u para distintas ϑ mediante Hu .

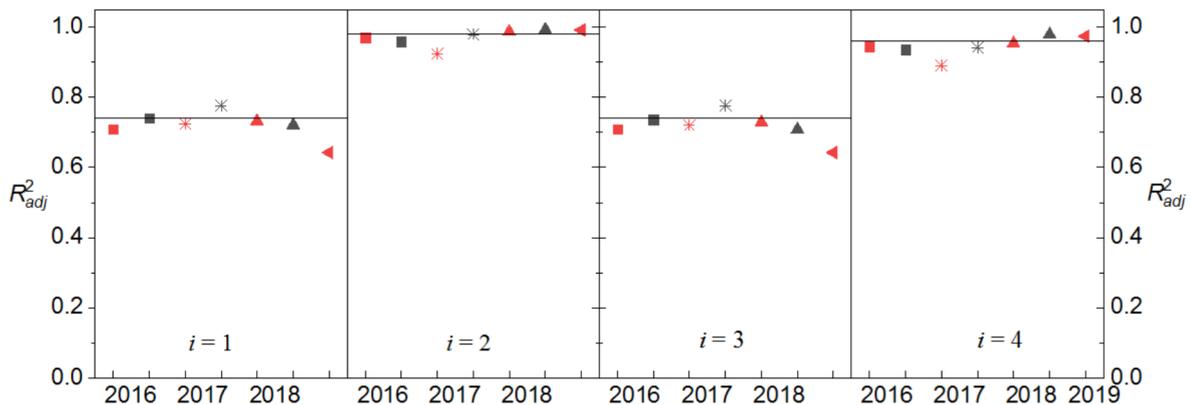


Fig. 3. Coeficientes de determinación. Los puntos y líneas horizontales representan lo mismo que en la Fig. 1.

Tabla 1. Coeficientes adimensionales y sus respectivas desviaciones estándar correspondientes al edificio analizado con datos de tres años.

	$\alpha \times 10^{-5}$	$\sigma_\alpha \times 10^{-3}$	β	$\sigma_\beta \times 10^{-3}$	γ	$\sigma_\gamma \times 10^{-3}$	δ	$\sigma_\delta \times 10^{-3}$	R
Ec. (1)	-1.03	2.95	0.498	3.14	0.06453	8.12	0.743	7.93	0.737
Ec. (2)	-1.01	1.00	0.526	1.06	0.40297	2.34	0.564	2.28	0.970
Ec. (3)	-1.03	2.95	0.491	3.00			0.801	3.00	0.737
Ec. (4)	-1.05	1.41	0.471	1.42			0.916	1.42	0.940

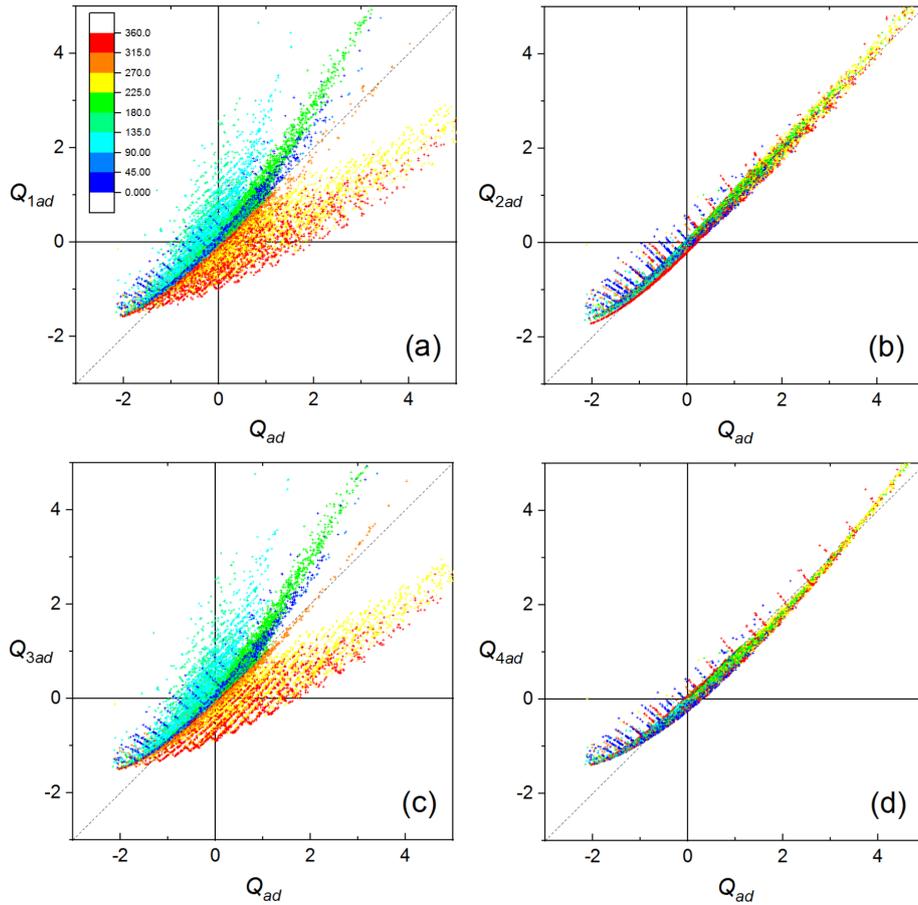


Fig. 4 (a - d). Relación entre los Q_{iad} calculados con las Ecs. (11 – 14) y el caudal Q_{ad} horario con datos de los tres años. La escala de colores corresponde a las direcciones del viento en grados sexagesimales.

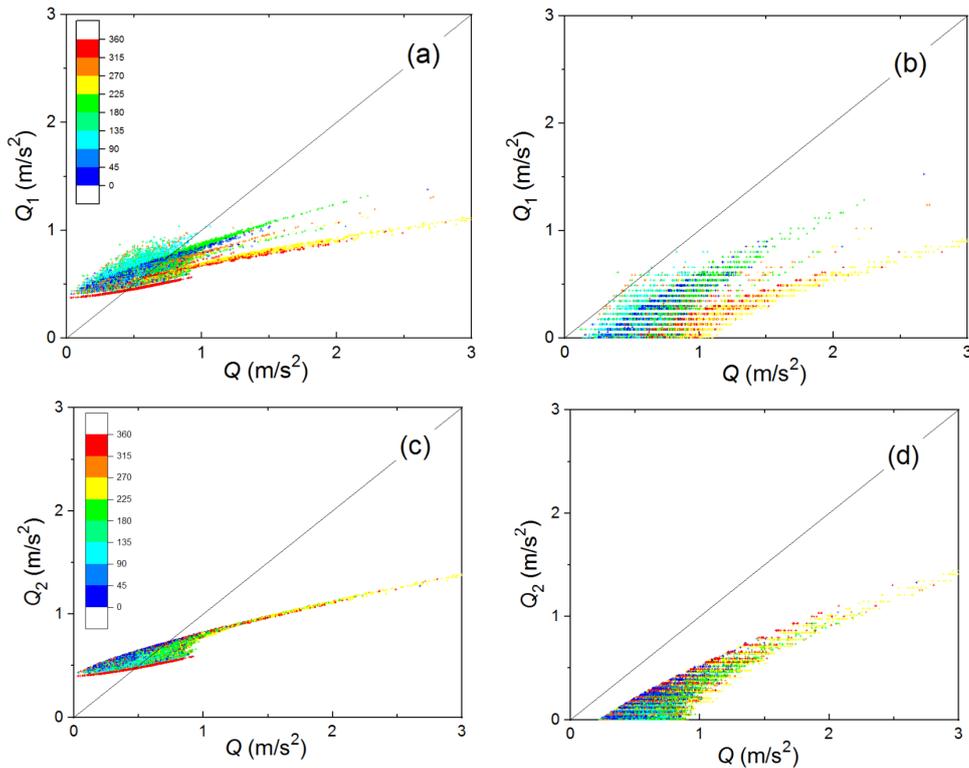


Fig. 5. Relación entre $Q(t)$ y el caudal horario calculado con las Ecs. (1) y (2) y los coeficientes propuestos por (a, c) BLAST y (b, d) DOE-2.

Tabla 2. Coeficientes dimensionales obtenidos para el edificio analizado en este trabajo y los empleados por otros autores para edificios similares.

		A	B (°C ⁻¹)	C (s/m)	D (s ² /m ²)
Ec. (1)		0.1563	0.0253	0.0094	0.0080
Ec. (2)		-0.0289	0.0298	0.0015	0.0517
Ec. (3)		0.1790	0.0249	---	0.0089
Ec. (4)		-0.0542	0.0327	---	0.0509
BLAST		0.606	0.03636	0.1177	0
DOE-2		0	0	0.224	0
EnergyPlus (primera aproximación)		1	0	0	0
Dols et al. (2021)		0.4688	0.0166	---	0.0174
Ng (2021)	Escuela secundaria	0.1019	0.0077	---	0.0877
		0	0.0156	---	0.1050
	Comercio minorista	-0.0441	0.0066	---	0.0376
		0	0.0100	---	0.0493
Im et al. (2020)		0.77004	0.00645	0.10840	0.02483

Un análisis detallado de las Figs. 4b y 4d indica que hay acuerdo general entre los valores de $Q_{i\text{ad}}$ y Q_{ad} para rangos intermedios de Q_{ad} , y que esta concordancia disminuye para los valores más grandes ($Q_{\text{ad}} \geq 2$) y más pequeños ($Q_{\text{ad}} \leq 0.2$) del caudal. Esto se debe a que Q_{ad} no guarda una relación estrictamente lineal con ΔT y u^2 como se supone en las Ecs. (1-4). Para mejorar la aproximación conviene recordar que $Q \sim \Delta p^n$, donde Δp es la diferencia de presión entre el interior y exterior de la construcción y $n \sim 0.65 - 0.67$ (ASHRAE, 2019; Liu et al., 2020). Como $\Delta p \propto u^2$ y también $\Delta p \propto \Delta T$, una dependencia lineal se obtendría aplicando el modelo RLM con $Q^{1/n}$ en vez de con Q . En este caso la Ec. (2) normalizada, por ejemplo, queda

$$Q_{\text{ad}}^{1/n} = \alpha + \beta \left[\frac{\Delta T(t) - \overline{\Delta T}}{\sigma_{\Delta T}} \right] + \gamma \left[\frac{(U_H u)(t) - \overline{U_H u}}{\sigma_{(U_H u)}} \right] + \delta \left[\frac{(U_H u)^2(t) - \overline{(U_H u)^2}}{\sigma_{(U_H u)^2}} \right] \quad (15)$$

Calculando los coeficientes con la Ec. (15) se obtienen valores del caudal adimensional $Q_{5\text{ad}}$ más cercano a Q_{ad} en todo el rango incluso para valores pequeños y grandes de Q_{ad} , como muestra la figura 6. La Ec. (15) no está disponible en EnergyPlus pero es la mejor

opción cuando se desea cuantificar el caudal de infiltración en forma teórica independientemente de programas numéricos.

5. CONCLUSIONES

Se propone una mejor forma de cuantificar el caudal de infiltración de un edificio cuya protección eólica depende de las características del terreno y de los obstáculos próximos usando fórmulas aproximadas disponibles como, por ejemplo, las integradas al programa EnergyPlus. La aplicación directa de estas expresiones considera sólo la intensidad del viento y conduce a la obtención de resultados insatisfactorios. En este estudio se propone introducir el efecto direccional de la acción del viento en el cálculo de la infiltración usando EnergyPlus sin cambiar la aproximación [o sea, la Ec. (1)] usada para el cálculo de Q , pero empleando la intensidad efectiva del viento afectada por un factor asociado con su dirección que es específico del edificio y zona climática.

Se obtienen coeficientes A, B, C, D del mismo orden que los propuestos en la bibliografía (ver Tabla 2) que son característicos

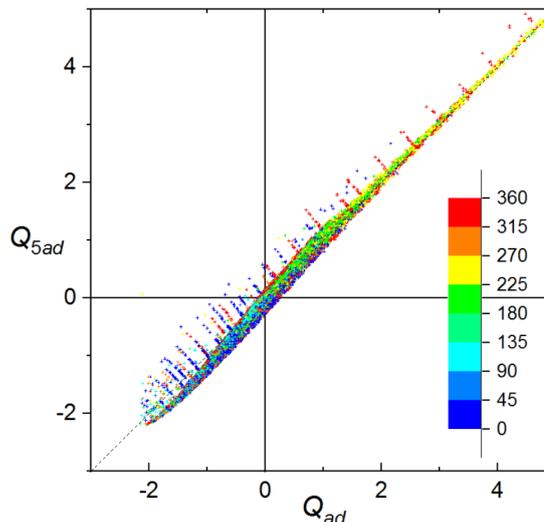


Fig. 6. Relación entre $Q_{5\text{ad}}$ con los coeficientes dados por las RLM en los tres años y Q_{ad} . La escala de colores corresponde a las direcciones del viento.

de cada construcción y zona climática por lo que es necesario particularizar el estudio para optimizar el cálculo de la infiltración. Dicho estudio requiere estimar el caudal de infiltración y calcular los coeficientes del polinomio de mejor ajuste usando el modelo RLM. Se calcularon los coeficientes, previamente normalizados, que permiten comparar los efectos de variables con diferentes unidades (i.e., temperatura e intensidad del viento). Para el edificio analizado, se encuentra que $\beta < \delta$, lo cual indica que la infiltración debida a la acción del viento es más importante que la generada por las variaciones de temperatura.

Los resultados se comparan para los casos que incluyen o no el efecto direccional del viento. Se aplica el modelo RLM con los datos meteorológicos correspondientes a cada mes, a seis meses y a tres años. Las diferencias entre los valores de los coeficientes calculados para cada caso pueden deberse a la variabilidad climática de la zona en la que suelen aparecer frentes que cambian las condiciones meteorológicas durante un buen número de días. Sin embargo, no se encuentran diferencias significativas al diferenciar los meses cálidos de los fríos. La diferencia más importante radica en la desviación estándar de los resultados que es menor cuanto mayor es el periodo analizado. Los coeficientes obtenidos para periodos del orden o mayores a seis meses son razonables y pueden usarse para estimar la infiltración durante todo el año. Si la zona presentase una variabilidad climática importante, como en el presente caso, o se sospechase que hay efectos de presurización debidos a sistemas HVAC, el periodo mínimo debería ser un año para aumentar el número de datos a procesar incluyendo meses de verano e invierno.

Los mejores resultados del cálculo del caudal de infiltración se obtienen al ajustar los coeficientes A, B, C, D . Si se toma $C = 0$, se obtienen buenos resultados también en acuerdo con trabajos de otros autores. Por otra parte, se sugiere una forma de mejorar los resultados del modelo RLM al establecer una relación lineal entre $Q^{1/3}$ y el polinomio de la Ec. (1).

NOMENCLATURA

a	exponente del perfil de velocidad del viento
A, B, C, D	coeficientes de infiltración adimensionales
H_e	altura efectiva del edificio (m)
Q	caudal de infiltración de aire (m^3/s)
Q_{ad}	caudal de infiltración adimensional aproximado
Q_d	caudal de diseño (m^3/s)
R^2_{adj}	coeficiente de determinación corregido
T_i	temperatura interna ($^{\circ}C$)
T_e	temperatura externa ($^{\circ}C$)
u	velocidad del viento (m/s)
U_H	coeficiente de corrección de u
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	coeficientes adimensionales
e	espesor de la capa límite atmosférica (m)
ϑ	dirección del viento ($^{\circ}$)
σ	desviación estándar

REFERENCIAS

- ASHRAE Handbook - Fundamentals (2019). American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.
- Bastos P.G., Fernández B. C. (2023). A case of study of empirical validation of EnergyPlus infiltration models based on different wind data. *Buildings* 13, 511, <https://doi.org/10.3390/buildings13020511>.
- DOE-2 (en línea) Building Energy Use and Cost Analysis Tool. Dirección URL: <https://doe2.com/> [consulta: 5 de agosto de 2023]
- Cao X., Dai X., Liu J. (2016). Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy and buildings* 128, 198-213.
- Chung K.C. (1996). Development and validation of a multizone model for overall indoor air environment prediction. *HVAC & R Research* 2, 4, 376-375.
- Coblentz C.W., Achenbach P.R. (1963). Field Measurement of Ten Electrically-Heated Houses. *ASHRAE Transactions* 69, 1, 358-365
- Dols W.S., Polidoro B.J. (2020). CONTAM User Guide and Program Documentation Version 3.4, NIST Technical Note 1887 Revision 1. 2020, National Institute of Standards and Technology.
- Dols W.S., Milando C.W., Ng L., Emmerich S.J., Teo J. (2021). On the Benefits of Whole-building IAQ, Ventilation, Infiltration, and Energy Analysis Using Co-simulation between CONTAM and EnergyPlus. In *Journal of Physics: Conference Series* 2069, 1, 012183). IOP Publishing.
- Emmerich S.J., Howard-Reed C., Nabinger S.J. (2004). Validation of multizone IAQ model predictions for tracer gas in a townhouse. *Building Services Engineering Research and Technology* 25, 4, 305-316.
- EnergyPlus Documentation (en línea) Input Output Reference Version 22.1.0 Dirección URL: <https://energyplus.net/documentation/> [consulta: 5 de agosto de 2023]
- Gutiérrez G.V., Fernández B.C. (2022). A building models calibration methodology based on inverse modelling approach. *Building Simulation* 15, 1833-1898.
- Haghighat F., Megri A.C. (1996). A comprehensive validation of two airflow models. COMIS and CONTAM. *Indoor Air* 6, 4, 278-288.
- Herron D., Walton G., Lawrie L. (1981). Building loads analysis and system thermodynamics (BLAST) program users manual. Construction Engineering Research Lab. Champaign (IL), Vol. 1, Supplement (Version 3.0). Dirección URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA099054.pdf> [consulta: 5 de agosto de 2023]
- Hurel N., Sherman M.H., Walker I.S. (2016). Sub-additivity in combining infiltration with mechanical ventilation for single zone buildings. *Building and Environment* 98, 89-97.

- Im P., Joe J., Y., New J.R. (2020). Empirical validation of building energy modeling for multi-zones commercial buildings in cooling season. *Applied Energy* 261, 4, 114374.
- Muñoz N., Marino B.M., Thomas L.P. (2014). Caracterización térmica de un edificio del centro bonaerense mediante mediciones y modelado analítico. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 18, 05.55-64.
- Muñoz N., Thomas L.P., Marino B.M. (2022). Infiltración en un edificio complejo. *Anales AFA* 33, 71-76.
- Ng L.C., Persily A.K., Emmerich S.J. (2015). Improving modeling in commercial building energy models. *Energy and Buildings* 88, 316-323.
- Ng L.C., Quiles N.O., Dols W.S., Emmerich S.J. (2018). Weather correlations to calculate infiltration rates for US commercial building energy models. *Building and environment* 127, 47-57.
- Ng L.C., Dols W.S., Emmerich S.J. (2021). Evaluating potential benefits of air barriers in commercial buildings using NIST infiltration correlations in EnergyPlus. *Building and environment* 196: 107783.
- Sadineni S.B., Madala S., Boehm R.F. (2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and sustainable energy reviews* 15, 8, 3617-3631.
- Sameni S.M.T., Gaterell M., Montazami A., Ahmed A. (2015). Overheating investigation in UK social housing flats built to the Passivhaus standard. *Building and Environment* 92, 222-235.