

## INFILTRACIÓN EN UN EDIFICIO COMPLEJO

### INFILTRATION IN A COMPLEX BUILDING

N. Muñoz<sup>1</sup>, L. P. Thomas<sup>\*1</sup> y B. M. Marino<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Prov. Buenos Aires (CIFICEN), UNCPBA – CONICET, Pinto 399 – (7000) Tandil – Argentina.

Recibido: 15/10/21; Aceptado: 18/11/21

La infiltración de aire en un edificio depende fundamentalmente de la hermeticidad de las puertas y ventanas considerada mediante las correspondientes áreas efectivas de fuga, y de la diferencia de presión entre el interior y exterior del edificio. Si bien las normas técnicas proporcionan métodos simples para estimar los parámetros que regulan el movimiento de aire, el cálculo del caudal de aire renovado siguiendo métodos estandarizados presenta diferencias apreciables con respecto a los más precisos, aunque complejos, que usan los principios de la fluido-dinámica tradicional. Nuestro objetivo es evaluar la infiltración en un edificio de dos plantas con atrio central importante durante el día típico de enero teniendo en cuenta todos los parámetros relevantes. El resultado analítico se incorpora a la simulación numérica con el programa *EnergyPlus* para obtener la evolución de la temperatura interna del edificio, sensible al ingreso de aire. Los resultados de la simulación se comparan con las mediciones *in-situ*. Se encuentra que el caudal de infiltración estimado por las normas permite reproducir la evolución de la temperatura interna sólo si se ajusta considerablemente el caudal de diseño de la infiltración. La metodología implementada brinda una estimación de la infiltración en edificios bajo condiciones reales de uso y permite evaluar los efectos de las fugas de aire cuando no se cuenta con mediciones directas.

*Palabras Clave:* infiltración, caudal de diseño, temperatura interior.

The air infiltration through building envelope mainly depends on the doors and windows tightness considered by means of the corresponding effective leakage areas and the pressure difference between the building exterior and interior. Although the standards provide simple methods to estimate the parameters that control the air movement, significant differences in the volumetric flow of fresh air are observed between the standardized and the most accurate traditional methods. Our aim is to evaluate the infiltration in a two-storey building with a large central atrium during the typical day in January by considering all the relevant parameters. The analytical result is incorporated to the numerical simulation with *EnergyPlus* to determine the internal temperature evolution that is sensitive to the air intake. Simulation results are compared with *in-situ* measurements. It is found that the air infiltration rate calculated from the standardized procedure only enables the internal temperature evolution to be reproduced with a substantial adjustment of the design air infiltration rate. The methodology developed is useful to calculate the infiltration in buildings under actual use conditions and assess the air leakage when measurements are not available.

*Keywords:* infiltration, design flow, internal temperature.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2022.fluidos.71>



ISSN 1850-1168 (online)

## I. INTRODUCCIÓN

La infiltración es el intercambio no controlado de aire a través de la envolvente edilicia debido a la diferencia de presión entre el interior y el exterior. Permite la renovación del aire manteniendo la calidad del mismo, aún con el edificio cerrado, y evita la condensación indeseada [1]. No obstante, las cargas de calefacción y refrigeración pueden aumentar entre un 15 % y 50 % por el aire infiltrado [2], lo cual debe considerarse en el diseño de los sistemas de termalización y renovación del aire interior bajo las condiciones de temperatura y humedad relativa acordes con el uso del edificio [3-5].

Un efecto acumulativo común encontrado en los atrios de los edificios de altura es la disminución de la densidad del aire en las sucesivas plantas. Esta crea un efecto de chimenea en invierno, provocando que el aire exterior fresco y denso ingrese a los niveles inferiores, suba a través del edificio

y escape por los pisos superiores; el proceso se invierte en verano [4]. Como consecuencia, las plantas inferiores presentan la mayor carga de calefacción en invierno, mientras las superiores presentan la mayor carga de refrigeración en verano.

La distribución de presión en la superficie exterior de los edificios depende de la velocidad y dirección del viento, y de la orientación y altura de cada sector de la envolvente. La capa límite atmosférica genera mayores velocidades del viento en los niveles superiores de los edificios, mientras los obstáculos eólicos (edificios, vegetación, etc.) de los alrededores modifican la presión ejercida sobre la envolvente [6]. Cuanto más expuesto a la acción del viento se encuentra un edificio, mayor es la infiltración de aire.

Una forma de cuantificar la cantidad de aire que ingresa a un edificio por infiltración es realizando *in-situ* pruebas de presurización [7]. Así se obtiene una curva caudal de aire-diferencia de presión que da cuenta de la permeabilidad de la envolvente cuando la presión en el interior se incrementa

\* lthomas@exa.unicen.edu.ar

(o reduce) paulatinamente. Esta metodología permite determinar el flujo de aire total a través de las fisuras en paredes, techo, piso y juntas de las ventanas y el producido por el funcionamiento normal de las puertas en un rango de presión 10 – 75 Pa [3, 7].

En la etapa de diseño de una construcción, el cálculo teórico de la infiltración requiere una gran cantidad de detalles del edificio y su entorno. En consecuencia, la infiltración de aire a través de aberturas se estima por medio de modelos o aproximaciones establecidos en normas técnicas. En Argentina, se utiliza la norma IRAM 11523 [8] mientras que la norma IRAM 11507-1 [9] establece 3 niveles de infiltración en función del caudal de aire intercambiado por metro lineal de junta medido a 100 Pa, y la norma IRAM 11900 [10] establece valores típicos del área efectiva de fuga por metro lineal de junta de acuerdo con el tipo de abertura y nivel de hermeticidad. El caudal de aire infiltrado total corresponde a la suma de las infiltraciones de las diferentes carpinterías de una construcción, mientras que el número de renovaciones de aire es el cociente entre el volumen del edificio y el caudal total. La información obtenida se utiliza en planillas simplificadas y programas numéricos para evaluar la infiltración, el intercambio de calor con el exterior, la calidad del aire en interiores, etc. considerando la meteorología local, aunque los resultados no suelen ser verificados.

El objetivo de este trabajo es evaluar teórica y numéricamente la infiltración en un edificio complejo preexistente, siguiendo los estándares argentinos y de ASHRAE [11], y verificando los resultados con la medición *in-situ* de la temperatura interna. La metodología empleada permite validar y generalizar los resultados en condiciones reales de uso del edificio.

## II. MARCO CONCEPTUAL

El cálculo del caudal de diseño del aire infiltrado en un edificio,  $Q_d$  (m<sup>3</sup>/s), correspondiente a una diferencia de presión de referencia  $\Delta p_r$  (Pa) entre el interior y el exterior, se basa en suponer que un dado caudal infiltrado  $Q$  se relaciona con la diferencia de presión  $\Delta p$  en el lugar de la construcción mediante la ley de potencia [12]

$$Q(t) = c [\Delta p(t)]^x \quad (1)$$

donde  $c = Q_d / \Delta p_r^x$  es el coeficiente de estanqueidad del edificio y  $0.65 < x < 0.67$  [4, 11]. Alternativamente,  $Q(t)$  puede hallarse a partir de  $Q_d$  por medio de [13]

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

donde  $A$  es un parámetro adimensional y  $B$  (1/°C),  $C$  (s/m) y  $D$  (s<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>) son factores de corrección.

Notar que la Ec. (2) es una relación lineal entre la variable dependiente  $Q$  y las variables  $\Delta T$ ,  $u$  y  $u^2$ . Los valores de  $u$  y  $u^2$  no guardan una relación lineal entre si y podrían considerarse variables independientes.

Según ASHRAE [11], el uso de la Ec. (1) implica calcularla diferencia de presión total  $\Delta p_t$  debida a las contribuciones de la presión del viento  $\Delta p_u$  y a la del efecto chimenea  $\Delta p_c$ :

$$\Delta p_t = S^2 C_p \Delta p_u + \Delta p_c + \Delta p_e \quad (3)$$

donde  $\Delta p_e$  es la  $\Delta p$  de equilibrio de modo que  $\Delta p_t = 0$  cuando no hay viento y  $\Delta T = T_e - T_i = 0$ ,  $S$  es el factor de protección del viento, y  $C_p$  es el coeficiente de presión del viento.

La distribución de presión sobre la superficie exterior de los edificios depende de la velocidad y dirección del viento, la densidad del aire, la orientación de las fachadas y los obstáculos eólicos. La misma se estima como sigue:

$$\Delta p_u = \rho_e \left( \frac{U_H^2}{2} \right), \quad (4)$$

donde  $U_H$  (m/s) es la velocidad efectiva del viento a la altura del techo y  $\rho_e$  es la densidad del aire exterior.

Por otra parte,  $U_H$  a la altura efectiva  $H_e$  es

$$U_H = U_{met} \left( \frac{\delta_{met}}{H_{met}} \right)^{a_{met}} \left( \frac{H_e}{\delta} \right)^a \quad (5)$$

donde  $\delta$  es el espesor de la capa límite del viento sobre el suelo. La velocidad del viento  $U_{met}$  (m/s) es la reportada por los servicios meteorológicos, en general, a la altura  $H_{met} = 10$  m, sin obstáculos cercanos, por lo cual se usan los valores estandarizados  $\delta_{met}$  y  $a_{met}$ . Los valores de  $\delta$  y  $a$  según el terreno donde se localiza la construcción son reportados por ASHRAE [11].

$S$  se relaciona con los obstáculos eólicos circundantes de la construcción y se obtiene de tablas [11].  $C_p$  se relaciona con la orientación del edificio y se calcula mediante la siguiente relación:

$$C_p = 0.5 [0.3(\cos^2 \varphi)^{1/4} + \text{sing}(\cos \varphi) \text{abs}\{0.9(\cos \varphi)^{3/4}\} - 1.3(\sin^2 \varphi)^2]. \quad (6)$$

La Ec. (6) define a  $C_p$  en función del ángulo  $\varphi = \varphi_w - \varphi_v$  entre los ángulos  $\varphi_w$ , entre la normal a la pared considerada y la dirección norte (0°), y  $\varphi_v$ , entre la dirección del viento y la dirección norte.

Para obtener un único valor de  $C_p S^2$  para el edificio, se calculan los promedios de los valores positivos de  $C_p S^2(\varphi)$  (relacionados con el caudal del aire que ingresa al edificio) y negativos (relacionados con el aire que sale) de cada sector de la envolvente. Luego, el promedio de ambos (en valor absoluto) es el  $C_p S^2$  para todo el edificio. Este cálculo se realiza para cada valor de  $\varphi_v$ .

El efecto chimenea genera una diferencia de presión hidrostática debida a  $\Delta T$ . En el caso de un edificio con  $T_i$  aproximadamente constante, resulta

$$\Delta p_c = g \rho_e \left( \frac{T_e - T_i}{T_i} \right) H, \quad (7)$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $H$  es la diferencia de altura entre las aberturas inferiores y superiores.

Para el cálculo de la infiltración por aberturas, la norma IRAM 11900 [10] establece los valores del área efectiva de

fuga por metro lineal de junta,  $a_v$ . Por lo tanto,

$$Q_d = 2.5 \left( \sum_{n=1}^x a_{v,i} l_i \right) 10^{-4} \quad (8)$$

donde  $l_i$  (m) es la longitud de la junta de la  $i$ -ésima abertura (o su perímetro). El factor de conversión  $10^{-4}$  de  $\text{cm}^2$  a  $\text{m}^2$  se usa para calcular  $Q_d$  en  $\text{m}^3/\text{s}$  cuando  $a_{v,i}$  se expresa en  $\text{cm}^2$ .

### III. MEDICIONES EXPERIMENTALES

El edificio de dos plantas evaluado es el 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 un terreno con pendiente en la zona semi-rural de Tandil caracterizada por su clima templado y húmedo (subhúmedo serrano), con veranos suaves y poca amplitud térmica anual. Los muros de la envolvente son de 0.30 m de espesor y tienen aislante interno y abundantes ventanas y paneles de vidrio DVH con carpintería de aluminio distribuidos tanto en planta alta (PA) como baja (PB). La cúpula del atrio central es una lucarna vidriada cerrada a 10 m de altura.

Las variables meteorológicas locales presentan variaciones periódicas, estacionales y aleatorias. Los registros horarios de  $T_e$ , presión atmosférica  $P_a$ ,  $\phi_w$  y  $U_{met}$  son proporcionados por la estación del *Servicio Meteorológico Nacional* localizada a 15 km del Campus en un terreno con similares características al del Campus.

$T_i$  se mide en el atrio con sensores HOBO a 1 m (PB), 4.6 m (PA) y 6.6 m (justo debajo de la lucarna) desde el piso de PB, dos en cada nivel sobre un plano vertical diagonal N-S. Los valores horarios de  $T_e$ ,  $T_i$ ,  $\phi_w$  y  $U_{met}$  obtenidos durante un año se promedian para cada mes agrupados por hora, obteniéndose así 24 valores diarios para cada variable correspondientes al “día típico” o “día representativo” del mes. Así se obtiene la evolución diaria media de las variables y no sólo los valores medios mensuales usualmente reportados. La Fig. 1 muestra la evolución de los valores medios de  $T_e$  y  $T_i$  de enero a partir de los datos registrados en el periodo 20/02/2016 - 20/02/2017. Puesto que las diferencias de  $T_i$  entre los diferentes niveles son pequeñas comparadas con  $\Delta T$ , el atrio central constituye una única zona térmica.

### IV. METODOLOGÍA

El cálculo de la infiltración en el edificio evaluado se realiza siguiendo la metodología esquematizada en la Fig. 2. Primero se determina  $a_v$  de las aberturas para determinar  $C_d$  y el coeficiente  $c$ . Estos valores junto con las características del edificio y del clima local pueden ingresarse en programas para estimar la infiltración.

Para obtener información detallada y/o verificar los resultados y el funcionamiento del programa se procede como sigue. Con la información meteorológica local y las mediciones de  $T_i$  se determinan los valores correspondientes al día típico de cada mes. Esto permite calcular  $\Delta T$  para las 24 h del día típico, y así obtener  $\Delta p_c(t)$ . También se calculan los valores de los parámetros necesarios para determinar  $\Delta p_u(t)$  para los diferentes sectores de la envolvente y  $\Delta p_t(t)$ . Así se obtiene analíticamente  $Q(t)$  para  $\Delta p_t(t)$  du-

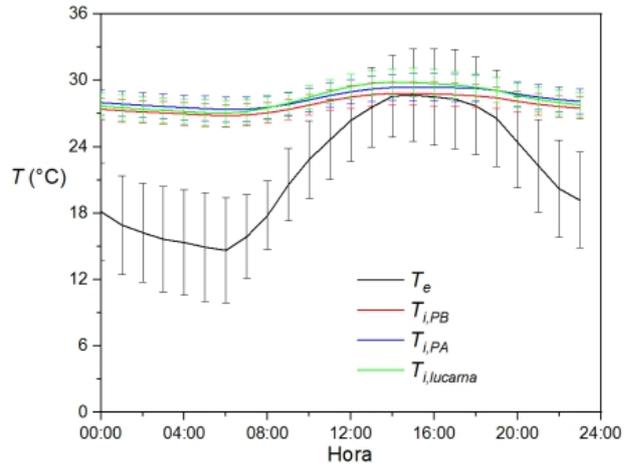


FIG. 1: Evolución de la temperatura interna medida en el atrio central del edificio evaluado durante el día típico de enero. Las barras de error corresponden a las desviaciones estándar horarias.

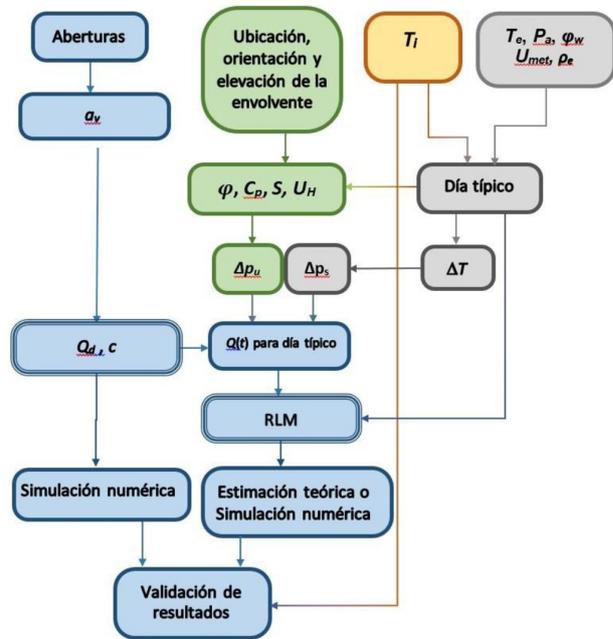


FIG. 2: Diagrama de flujo para la metodología empleada.

rante las 24 horas del día típico. A continuación se aplica el modelo de regresión lineal múltiple (RLM) para encontrar los coeficientes  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  de la Ec. (2) para el edificio evaluado en el mes típico, y establecer la infiltración para las condiciones climáticas locales.

La norma IRAM 11900 [10] establece el cálculo del caudal de infiltración total utilizando las Ecs. (8). La hermeticidad se establece usando  $a_{v,i} = 2.54$  ( $\text{cm}^2/\text{m}$ ) para ventanas tipo batiente y puertas tipo oscilante, y  $a_{v,i} = 0$  ( $\text{cm}^2/\text{m}$ ) para paños fijos. Finalmente, se obtiene  $Q_d = 0.479$   $\text{m}^3/\text{s}$  y  $c = 0.19$  ( $\text{Pa m}^3/\text{s}$ ) para todo el edificio, valores que concuerdan bien con los establecidos por la norma CEN 15242:2006 [14] para edificios con escasa infiltración.

$\Delta p_c$  se calcula con la Ec. (7).  $T_i$  puede considerarse constante,  $\Delta T$  se obtiene a partir de la Fig. 1, y la diferencia de altura entre la lucarna y las aberturas de PB es  $H \approx 8.5$  m. El cálculo de  $\Delta p_u$  con Ec. (3) es más complejo porque

depende de la dirección del viento y las barreras eólicas circundantes.  $S$  y  $C_p$  modifican el término que contiene a  $\Delta p_u$ . El valor de  $S$  es proporcionado por la norma considerando los obstáculos del entorno:  $S = 1$  para las caras NO y SO del edificio ya que no hay obstáculos en esas direcciones,  $S = 0.9$  para la cara NE y  $S = 0.7$  para la cara SE enfrentada a un conjunto de árboles.  $C_p$  se calcula con Ec. (6) alcanzando su valor máximo en la cara enfrentada al viento.

La Fig. 3 muestra los valores de  $C_p S^2(\varphi_v)$  para los muros perimetrales del edificio. Se observa que, por ejemplo,  $C_p S^2$  alcanza su valor máximo sobre la cara SO cuando el viento proviene del SO, y es negativo para  $\varphi_v < 170^\circ$  o  $> 278^\circ$ . La forma de las curvas  $C_p S^2$  es la misma para todos los muros aunque las curvas están desplazadas de modo que el valor máximo se alcanza cuando el muro enfrenta al viento. Este valor máximo es mayor para los muros NO y SO que para los NE y SE.

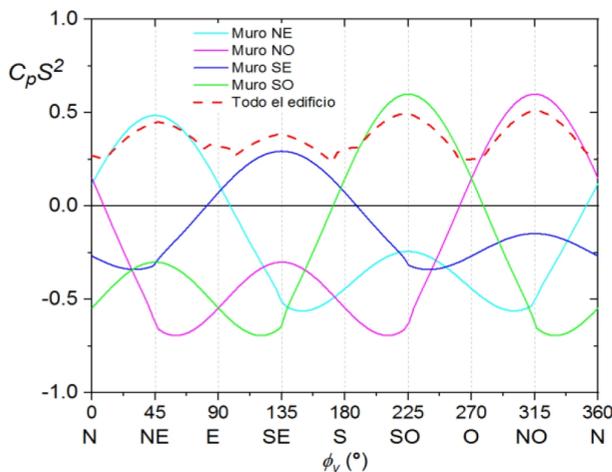


FIG. 3: Valores de  $C_p S^2$  para los muros perimetrales del edificio evaluado en función de la dirección del viento.

$C_p S^2 > 0$  ( $< 0$ ) corresponde a  $\Delta p_t > 0$  ( $< 0$ ), dando lugar a un flujo de aire hacia el interior (exterior). Así, para un viento soplando desde el SO, la cara SO experimenta una  $\Delta p_t > 0$  mientras que  $\Delta p_t < 0$  en el resto de las fachadas. Por tanto, un flujo de aire ingresa por la fachada SO y sale por el resto de la envolvente. En el caso que el viento provenga del N, S, O o E, una esquina del edificio enfrenta al viento por lo que habrá dos caras con  $C_p S^2 > 0$  y dos con  $C_p S^2 < 0$ .

El valor total de  $C_p S^2$  para el edificio para un dado  $\varphi_v$  (línea de trazos en Fig. 3) es intermedio a los valores absolutos de  $C_p S^2$  en todos los muros, de modo de incluir la resistencia al flujo del aire entrante y saliente del edificio según las orientaciones de los muros y los tipos de terreno cercanos (Sección II). Aquí adoptamos el valor promedio del promedio de los valores positivos por una parte y del valor absoluto del promedio de los valores negativos por otra, y es indicado con una línea de trazos en la Fig. 3. Para el edificio evaluado,  $C_p S^2$  fluctúa entre 0.25 (para vientos provenientes del O y S) y 0.5 (para vientos soplando desde el NO).

El valor de  $\Delta p_u$  depende del perfil de velocidad del viento. La categoría del terreno se elige consistentemente con el cálculo de  $S$ : categoría 3 para vientos provenientes del NO

y SO, categoría 2 para vientos procedentes del NE y categoría 1 para vientos desde el SE. También debe considerarse que el edificio de 7 m de altura está construido en un terreno con pendiente. En consecuencia, los muros NO y SO están elevados respecto del nivel del terreno sobre un terraplén de unos 2 m. La altura externa efectiva en estas direcciones es  $H_e = 9$  m. Por el contrario,  $H_e = 5$  m para la cara enfrentada al SE.

El perfil de velocidad del viento y  $H_e$  del edificio determinan  $U_H/U_{met}$  (Ec. (5)) en las direcciones NO, SO, SE y NE, empleándose una interpolación lineal para las direcciones intermedias. Multiplicando este factor por  $C_p S^2$  ya calculado (Fig. 3), se tiene el factor direccional de la presión del viento  $C_p S^2 U_H/U_{met}$  que depende de  $\varphi_v$ . Como resultado se obtiene una fuerte reducción de este factor para un viento procedente del SE con respecto a vientos desde el NO y SO, direcciones de las que el edificio se encuentra menos protegido.

La evolución de  $\Delta p_t$  para el edificio evaluado en un día típico de enero se muestra en la Fig. 4.  $\Delta p_c$  y  $\Delta p_u$  presentan amplitudes comparables todo el año pero en enero estas son mayores por la mañana y notoriamente menores por la tarde. Así, la situación típica de las tardes de enero corresponde a un interior con alta temperatura y pequeña diferencia térmica con el exterior, con el agravante de que no hay viento significativo para refrescar los ambientes.  $Q(t)$  para el día típico de enero mostrado en Fig. 5 (símbolos) se calcula con la Ec. (1) usando el valor de  $c$  hallado en Sección 4b y  $\Delta p_t$  representado en la Fig. 4. La línea en Fig. 5 corresponde a una función que contiene los coeficientes hallados con el modelo RLM.

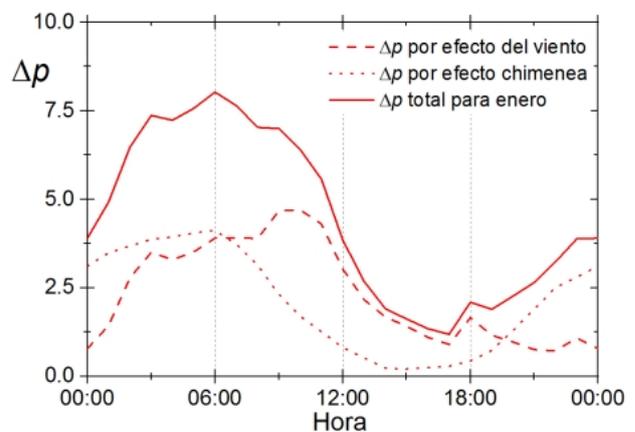


FIG. 4: Diferencias de presión en el edificio evaluado para el día típico de enero.

### Verificación de los resultados

La evolución de  $T_i$  en el atrio central se determina con la simulación numérica usando el programa *EnergyPlus* (validado previamente [15]) para diferentes valores de infiltración. Se probaron diferentes valores de la conductividad térmica de la envolvente y de las características del piso, ya que estos cambian la temperatura promedio, la amplitud de la oscilación y la fase de la evolución diaria de  $T_i(t)$ . También se simuló el comportamiento térmico ingresando sólo  $Q_d$  o  $c$ . El mejor resultado se obtiene incorporando los valores de  $A, B, C, D$  hallados con el modelo de RLM. En Fig.

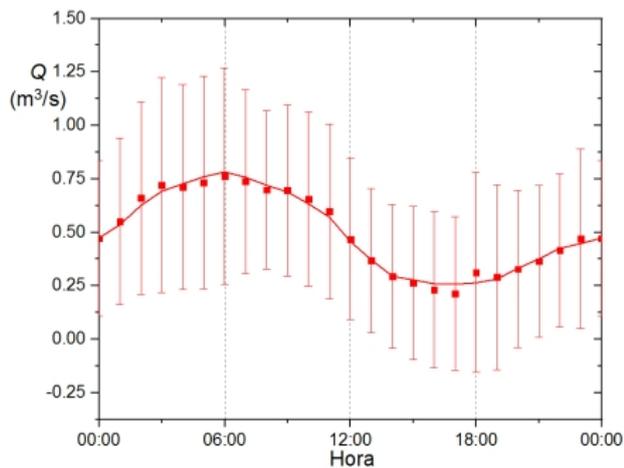


FIG. 5: Evolución del caudal de aire en el edificio evaluado durante el día típico de enero. Las barras representan las desviaciones estándar calculadas a partir de las fluctuaciones de la temperatura y el viento durante todo el mes de enero.

6 la  $T_i$  medida se representa con símbolos acompañados de sus correspondientes desviaciones estándar, mientras que la línea magenta indica la evolución de  $T_i$  cuando la infiltración es estimada siguiendo la norma IRAM 11900. Esto conduce a una mayor oscilación de  $T_i$  y una baja considerable de su promedio, muy alejada de  $T_i$  medida. En este caso, el ingreso de aire desde un exterior a  $T_e$  es excesivo por lo que el valor de la infiltración debe reducirse al 10% para obtener la evolución de  $T_i$  medida (línea negra).

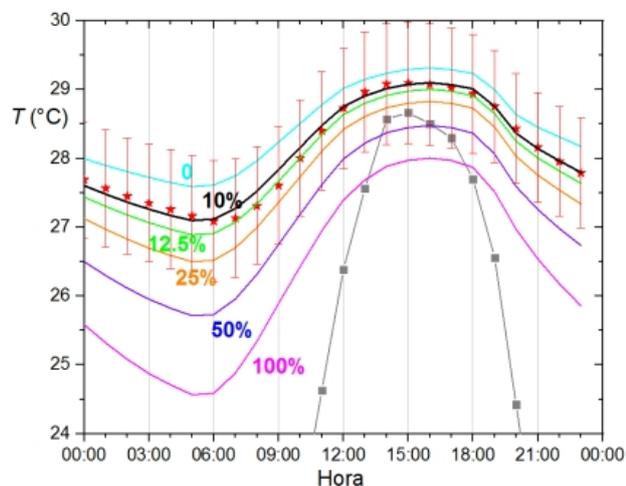


FIG. 6: Evolución de la temperatura interna durante el día típico de enero para diferentes % de la infiltración determinada con EnergyPlus siguiendo el procedimiento indicado por la norma IRAM 11900 (línea magenta) y sin infiltración (línea celeste).

## V. CONCLUSIONES

Se analizó la infiltración en un edificio en condiciones reales de uso empleando los valores del caudal de aire ingresado por las aberturas siguiendo las normas. Sumando las contribuciones de todas las aberturas se estableció el caudal total a la presión de referencia y el correspondiente coeficiente de flujo de aire del edificio. Con este resultado y la ley de potencia dada por la Ec. (1), se determinó la relación entre la cantidad de aire que ingresa a un edificio

para cualquier diferencia de presión total entre el interior y el exterior. Luego, empleando los valores promedio de la temperatura exterior y la velocidad del viento, se calculó teóricamente la infiltración durante el día típico de enero, y se introdujo explícitamente la influencia del viento y de las diferencias de temperatura por medio de la Ec. (2) obteniendo resultados concordantes con los medidos.

La metodología propuesta permite analizar la influencia de los parámetros involucrados sobre la infiltración. Los resultados revelan que la temperatura interna evolucionaría como la medida si se considerara sólo el 10% de la infiltración calculada. Esto destaca la importancia de validar los resultados numéricos con los experimentales, ya que una estimación incorrecta en la etapa de diseño cambiaría las condiciones de confort y los requerimientos de calefacción y/o enfriamiento. Luego, los valores de la infiltración por aberturas determinados siguiendo las normas [10, 12, 14] son excesivos para el edificio evaluado.

También se propone usar el modelo RLM para establecer los efectos del viento y  $\Delta T$  sobre la infiltración total. Los cuatro coeficientes característicos permiten generalizar la respuesta del edificio (i.e.,  $Q(t)$ ) en función de la velocidad del viento y  $\Delta T$ , y determinar su importancia relativa. Así es posible estimar la infiltración durante eventos meteorológicos específicos (e.g., olas de calor) durante el mes analizado. En un próximo trabajo se evaluarán tales eventos y los resultados se extenderán a otros meses energéticamente exigentes del año.

## REFERENCIAS

- [1] G. Guyot, M. H. Sherman e I. S. Walker. Smart ventilation energy and indoor air quality performance in residential buildings: A review. *Energy and Buildings* **165**, 416-430 (2018).
- [2] W. R. Chan, J. Joh y M. H. Sherman. Analysis of air leakage measurements of US houses. *Energy and Buildings* **66**, 616-625 (2013).
- [3] Y. Ji, L. Duanmu, Y. Liu y H. Dong. Air infiltration rate of typical zones of public buildings under natural conditions. *Sustainable Cities and Society* **61**, 102290 (2020).
- [4] X. Liu, X. Liu y T. Zhang. Theoretical model of buoyancy-driven air infiltration during heating/cooling seasons in large space buildings. *Energy and Buildings* **173**, 106735 (2020).
- [5] S. Goubran, D. Qi, W. F. Saleh y L. L. Wang. Comparing methods of modeling air infiltration through building entrances and their impact on building energy simulations. *Energy and Buildings* **138**, 579-590 (2017).
- [6] M. Hadavi y H. Pasharshahri. Quantifying impacts of wind speed and urban neighborhood layout on the infiltration rate of residential buildings. *Sustainable Cities and Society* **53**, 101887 (2020).
- [7] ISO 9972.15. *Prestaciones térmicas de los edificios. Determinación de la permeabilidad al aire de los edificios. Método de presurización con ventilador*. 2015.
- [8] IRAM 11523. *Carpintería de obra. Ventanas exteriores. Método de ensayo de infiltración de aire*. 2001.
- [9] IRAM 11507-1. *Carpintería de obra. Ventanas exteriores. Parte 1 - Requisitos básicos y clasificación*. 2001.

- [10] IRAM 11900. *Prestaciones energéticas en viviendas. Método de cálculo y etiquetado de eficiencia energética*. 2017.
- [11] ASHRAE. Handbook - Fundamentals: Ventilation and Infiltration. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (2017).
- [12] IRAM 11507-6. *Carpintería de obra. Ventanas exteriores. Parte 6 – Etiquetado de eficiencia energética*. 2018.
- [13] P. R. Achenbach y C. Coblenz. Field measurements of air infiltration in ten electrically heated houses. *Ashrae Transactions* **69**, 358-365 (1963).
- [14] CEN 15242. *Ventilation for buildings-calculation methods for the determination of air flow rates in buildings including infiltration*. European Committee for Standardization, Bruselas. 2007.
- [15] B. M. Marino, N. Muñoz y L. P. Thomas. Análisis del comportamiento térmico de un edificio complejo del centro bonaerense a partir de simulaciones con energyplus. *Energías Renovables y Medio Ambiente* **44**, 29-38 (2019).