

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA PERMEABILIDAD AL AIRE DE EDIFICIOS EN URUGUAY

Recibido: DD/MMM/AAAA y Aceptado: DD/MMM/AAAA

Resumen

Las infiltraciones de aire tienen un impacto significativo en el consumo de energía final de los edificios. Existen diversos métodos para caracterizar este fenómeno, en la norma ISO 9972:2015 se presenta uno de ellos. Si bien este método es ampliamente usado en Europa y Estados Unidos, existe escasa experiencia (documentada) del mismo en Uruguay y la región. En este trabajo se muestran los resultados de siete ensayos realizados en Uruguay de acuerdo al estándar mencionado. Dichos resultados se comparan con los resultados de otros países y a partir de esta comparación se muestra la importancia de continuar realizando ensayos en nuestro país, para lograr un mejor entendimiento del estado del parque edilicio nacional.

PALABRAS CLAVE: *medio ambiente, eficiencia energética, infiltraciones de aire, hermeticidad, envolvente de edificios.*

EXPERIMENTAL STUDY OF THE AIR PERMEABILITY OF BUILDINGS IN URUGUAY

Abstract

Air infiltrations have a significant impact on the final energy consumption of buildings. There are several methods to characterize this phenomenon, one of them is presented in ISO 9972:2015. Although this method is widely used in Europe and the United States, there is little (documented) experience of it in Uruguay and the region. This work shows the results of seven trials carried out in Uruguay according to the mentioned standard. These results are compared with the results of other countries and from this comparison it is shown the importance of continuing to carry out tests in our country, to achieve a better understanding of the state of the national building park.

KEYWORDS: *environment, energy efficiency, air infiltration, air tightness, building envelope.*

1. Introducción

El sector edilicio es responsable del 30 % del consumo final de energía mundial (IEA, 2016), y en Uruguay dicho sector representa aproximadamente 25 % del consumo final de energía (MIEM, 2018). Gran parte de este consumo se debe a los sistemas de calefacción y refrigeración, lo cual depende de varios factores, entre ellos las infiltraciones de aire exterior.

La infiltración de aire en un edificio se define como el ingreso no deseado de aire exterior y normalmente se expresa en renovaciones por hora (rph) del volumen de aire interior del edificio. Dicha tasa depende de diversas variables: la velocidad y dirección del viento, la diferencia de temperatura entre el aire exterior e interior, la tipología del edificio, el tipo de aberturas, la rugosidad del terreno, etc. Evidentemente, dada la variabilidad inherente de la velocidad del viento y la temperatura ambiente, la tasa de infiltración no es constante a lo largo del año. No obstante, por simplicidad, en la práctica se suele considerar una tasa constante (promedio anual) a los efectos de realizar balances térmicos sencillos, y o comparar la permeabilidad al aire de distintos edificios. En diversos estudios se ha podido constatar que las infiltraciones de aire son responsables de entre un 10 % y un 30 % de la demanda de refrigeración y calefacción (Targo, 2007; Feijó-Muñoz, y otros, 2019). Como se sabe, esas proporciones dependen de diversos factores, y en principio, el porcentaje 10%-30% podría no ser aplicable a Uruguay. Pero para establecer una proporción adecuada, primero, dichas infiltraciones deben ser determinadas. A partir de lo expuesto anteriormente, se deduce la importancia de contar con métodos que permitan identificar y cuantificar las fuentes de infiltraciones en la envolvente de los edificios. En la norma ISO 9972:2015 (ISO, 2015) se presenta uno de ellos. Es importante aclarar que este método no mide directamente la tasa de infiltraciones de aire de un edificio, no obstante, en la referencia (ASHRAE, 2009) se propone un modelo para derivar dicha tasa partir de los resultados del ensayo.

La gran cantidad de ensayos realizados en países como Estados Unidos, Canadá, España, en países nórdicos de Europa y en Chile (Targo, 2007; Feijó-Muñoz, y otros, 2019; d'Ambrosio Alfano, Dell'Isola, Ficco, & Tassini, 2012; Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción de la Universidad del Bío-Bío, 2014) por citar algunos, muestra la aceptación que tiene este método en distintas partes del mundo. Sin embargo, a nivel nacional, no existen datos empíricos documentados de infiltraciones de aire en edificios. Por este motivo, cuando se requiere realizar un balance térmico a una edificación, se debe acudir a valores empíricos de otros países. Este hecho plantea la interrogante de si

estos datos son representativos del parque edilicio nacional y, en definitiva, si son adecuados para tal propósito.

Por otra parte, es importante destacar que en Uruguay en los últimos años se ha comenzado a medir la permeabilidad al aire de ventanas en banco de ensayo fijo (Casañas, Pereira, Liston, & Cataldo, 2016). Sin embargo, las aberturas constituyen sólo uno de los elementos de la envolvente de los edificios por donde puede infiltrarse el aire exterior. La incidencia de las aberturas en el total de infiltraciones se estudió en Chile (Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción de la Universidad del Bío-Bío, 2014), y se estimó que está aproximadamente entre 22% y 43% para construcción pesada y, entre 8% y 18% para construcción liviana, en el sector residencial. El método que presenta la ISO 9972:2015 es una metodología complementaria que posee la ventaja de que la medida de infiltraciones de aire incluye todos los componentes en la envolvente de los edificios, y no sólo las aberturas. Por contrapartida, implica hacer mediciones en las edificaciones a estudiar y no en un laboratorio, con las dificultades que ello conlleva.

Es por todo ello que a través de este trabajo se busca obtener, como objetivo primario, datos empíricos de infiltraciones de aire en edificios en Uruguay: dichos datos son medidos de acuerdo al método que se describe en la norma ISO 9972:2015. En segundo lugar, se busca a través de la comparación con los datos presentados en publicaciones de otros países, responder a la interrogante antes planteada de si es adecuado usar datos empíricos de otros países, o por el contrario, es necesario invertir en continuar realizando medidas para lograr una mejor caracterización y comprensión del parque edilicio nacional. A la vez, a través de la comparación con estándares internacionales, se trata de inferir si es aceptable el nivel de permeabilidad al aire de los casos considerados. Por último, dada la falta de datos en esta materia a nivel regional, se busca difundir el método de ensayo. Por esta razón, a continuación, se pone un énfasis especial en la descripción del método y se explicita el alcance de éste, luego se presentan los casos de estudio, se analizan sus resultados, y por último se comparan los mismos con los obtenidos en otros trabajos a nivel internacional.

2. Método de ensayo

2.1 Fundamentos

En la norma ISO 9972:2015 la permeabilidad al aire del edificio se describe mediante la ecuación:

$$q_{env} = C_{env} \Delta p^n \quad (1)$$

en donde q_{env} (m^3/h) es el caudal de aire a través de la envolvente del edificio y Δp (Pa) es la diferencia de presiones entre el aire exterior e interior, C_{env} ($m^3/h.Pa^n$) se denomina coeficiente de caudal y n coeficiente de presión. El coeficiente de presión está asociado al tipo de flujo y normalmente se encuentra entre los valores $n = 1/2$ (turbulento) y $n = 1$ (laminar). La determinación de la permeabilidad al aire de un edificio se reduce a determinar los coeficientes de caudal y presión.

Dada la no linealidad de la ecuación (1) resulta conveniente realizar el siguiente cambio de variable:

$$Y = \ln q_{env} \quad (2)$$

$$X = \ln \Delta p \quad (3)$$

Entonces la ecuación (1) se puede rescribir:

$$Y = \ln C_{env} + nX \quad (4)$$

Para determinar los coeficientes C_{env} y n se deben tomar diferentes medidas de q_{env} y Δp para luego realizar un ajuste lineal de la ecuación (4). El cálculo de C_{env} y n y sus respectivas incertidumbres se realiza de acuerdo a anexo C de la norma ISO 9972:2015.

El coeficiente de caudal depende de la temperatura del aire durante el ensayo. Para independizarnos de esto se define el coeficiente de fuga de aire C_L , el cual se calcula corrigiendo el coeficiente de caudal C_{env} como se indica en las fórmulas (5) y (6), para despresurización y presurización respectivamente.

$$C_L \cong C_{env}(T_0/T_e)^{1-n} \quad (5)$$

$$C_L \cong C_{env}(T_0/T_{int})^{1-n} \quad (6)$$

en donde T_e y T_{int} son las temperatura exterior e interior durante el ensayo (expresadas en Kelvin) y T_0 la temperatura del aire en condiciones estándar (20 °C).

2.2 Definición de parámetros derivados a usar

Si bien la permeabilidad al aire de un edificio queda dada a través de los coeficientes de fuga y presión (C_L y n), estos no resultan prácticos a la hora establecer comparaciones entre distintos edificios. Por este motivo, se introducen las renovaciones hora a una diferencia de presión exterior-interior de 50 Pascales valor denominado n_{50} . Esta cantidad se utiliza como característica de la permeabilidad al aire de un edificio y es apta para establecer comparaciones. Las exigencias dispuestas en varios países son establecidas en función de este parámetro. Además, esta magnitud es independiente de la implantación del edificio, lo que permite comparar edificios situados en distintos lugares.

A partir del coeficiente de fuga C_L y del coeficiente de presión n , se calcula un caudal normalizado q_{50} (m^3/h):

$$q_{50} = C_L 50^n \quad (7)$$

el cual corresponde al caudal a través de la envolvente a una diferencia de presión exterior-interior de 50 Pa. Al dividir dicho caudal por el volumen interior del edificio $V(m^3)$ se obtiene el parámetro n_{50} :

$$n_{50} = q_{50}/V \quad (8)$$

Dicho parámetro representa las renovaciones por hora a una diferencia de presión exterior-interior de 50 Pa.

Por otra parte, es de interés conocer el caudal de infiltraciones de aire real q de un edificio debido a la diferencia de temperatura y la acción del viento en un momento dado. A partir de dicho valor se puede calcular la tasa de infiltraciones n_0 como q/V . El consumo de energía de los sistemas de calefacción y refrigeración debido a las infiltraciones de aire es proporcional a dicha tasa. En particular, es práctico conocer el promedio anual de n_0 , el cual llamaremos \bar{n}_0 . La norma ISO 9972:2015 no proporciona un método para su cálculo, pero existen varios modelos en la literatura, uno muy sencillo consiste en dividir n_{50} por veinte (d'Ambrosio Alfano et al., 2012; Feijó-Muloz et al., 2019); es decir:

$$\bar{n}_0 = n_{50}/20 \quad (9)$$

Desafortunadamente, en los artículos fuente de la información no se señala el autor.

La ASRHAE (2019) provee de otro método, el cual está basado en el modelo físico de Sherman y Grimsrud (1980). Este modelo fue validado experimentalmente en la referencia (Sherman y Modera, 1986) y da una expresión para el caudal de infiltraciones q (m^3/h) que ingresa a un edificio por causa de la diferencia de temperatura ΔT ($^{\circ}\text{C}$) entre el aire exterior y el interior, y la velocidad del viento v (m/s) a diez metros de altura:

$$q = \frac{A_L}{1000} \sqrt{C_s |\Delta T| + C_w v^2} \quad (10)$$

en donde A_L (cm^2) es el área efectiva de huecos a 4 Pa, C_s y C_w son coeficientes que dependen de la implantación y la altura del edificio. El área efectiva de huecos se calcula de la siguiente forma a partir de los resultados del ensayo:

$$A_L = \frac{10000}{3600} C_L \left(\frac{\rho_0}{2} \right)^{1/2} 4^{n-0,5} \quad (11)$$

en donde ρ_0 (kg/m^3) es la densidad del aire en condiciones estándar. Con la ecuación (10), y haciendo uso del año meteorológico típico del lugar en el que está implantado el edificio, se puede calcular el caudal de infiltración para cada momento del año. Luego, dicho caudal se puede dividir por el volumen interior del edificio para calcular n_0 y promediándolo a nivel anual se puede estimar la tasa \bar{n}_0 . Este último método parece mucho más adecuado dado que tiene en cuenta las características del sitio en el cual está implantado el edificio.

2.3 Equipo Blower Door

Los ensayos que se describen en este trabajo se realizaron con un equipo *Blower Door* modelo *Minneapolis Blower Door System: 2 Fan System* de la empresa estadounidense *The Energy Conservatory*. El equipo fue adquirido nuevo en 2017 y los instrumentos de medidas fueron provistos con certificados de calibración. Los ensayos que se presentan en este trabajo fueron realizados entre fines de 2017 y 2019 por lo que dichas curvas de calibración fueron consideradas válidas.

La diferencia de presiones entre el exterior-interior del edificio se induce de forma mecánica con dos ventiladores en paralelo. Según como se instalen los ventiladores se puede inducir una sobrepresión o depresión en el edificio. El flujo a través de los ventiladores se puede regular de dos formas, con variadores de velocidad y/o reducciones en la entrada de los ventiladores las cuales generan una pérdida de presión adicional. El

equipo cuenta con dos sensores de presión diferencial, uno por cada ventilador. Cada sensor de presión diferencial cuenta con dos canales (canal A y B), en uno de los canales se registra la diferencia de presión exterior-interior del edificio (canal A) y en el otro la diferencia de presión entre la succión e impulsión del ventilador (canal B). Con esta última medida (una por cada ventilador) y las curvas características de los ventiladores se infiere el caudal de aire que circula a través de la envolvente del edificio q_{env} . Dichas curvas son proporcionadas por el fabricante y dependen de la reducción que se utilice en cada caso. La incertidumbre de las medidas de presión es de un 1 % según lo declarado por el fabricante. Todo el equipo antes mencionado se instala sobre un marco de aluminio y una manta de nylon en una puerta exterior como se ilustra en la Figura 1.

Figura 1. Equipo Blower Door



Fuente: *The Energy Conservatory*

2.4 Procedimiento

En la figura 2 se muestra un diagrama de flujo del procedimiento. La norma propone tres métodos de ensayo, la elección de qué método usar depende del propósito del ensayo: (1) ensayo del edificio en uso, (2) ensayo de la envolvente del edificio, y (3) ensayo del edificio para un propósito específico. En la Tabla 1 se brinda mayor detalle sobre cómo deben acondicionarse las aberturas del edificio durante el ensayo según el método escogido. En este trabajo todos los ensayos se realizaron de acuerdo el método 1.

Tabla 1. Condiciones de las aberturas durante el ensayo

Clasificación de las aberturas del edificio	Método 1	Método 2
Aberturas para ventilación natural	Cerradas	Selladas
Aberturas para ventilación mecánica o aire acondicionado (uso continuo)	Selladas	Selladas
Aberturas para ventilación mecánica o aire acondicionado (uso intermitente)	Cerradas	Selladas
Ventanas y puertas exteriores	Cerradas	Cerradas
Aberturas no destinadas a la ventilación	Cerradas	Selladas

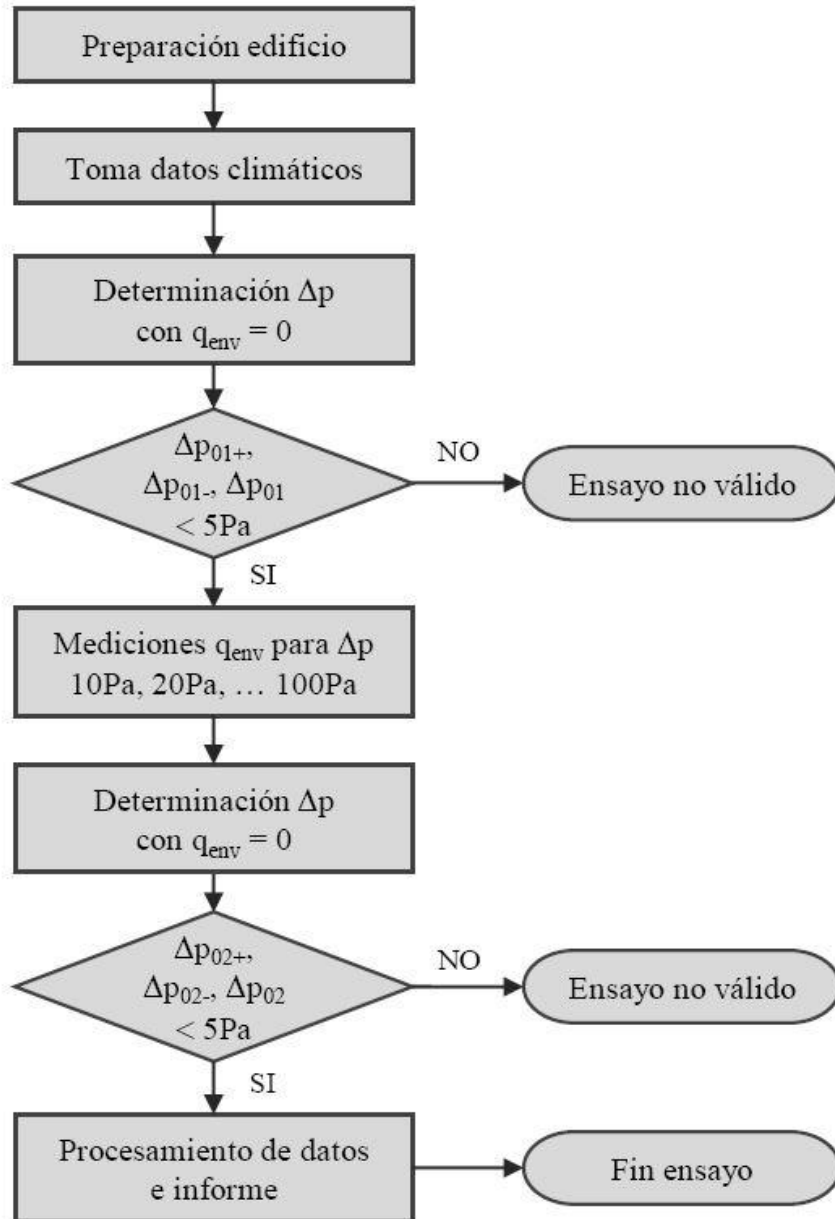
En primer lugar, se debe preparar el edificio según el método de ensayos escogido. Posteriormente, se hace un relevamiento de las condiciones climáticas: temperatura y velocidad del viento. Luego, se procede a determinar la diferencia de presión a caudal cero. Para este paso se deben apagar y tapar los ventiladores. Luego se debe registrar la diferencia de presión exterior-interior durante un periodo de al menos 30 segundos. El promedio de los valores positivos Δp_{01+} , el de los valores negativos Δp_{01-} y el de todos los valores Δp_{01} sobre este periodo no deben superar los 5 Pa, en caso contrario el ensayo se declara no válido. Para alcanzar una diferencia de presión exterior-interior a caudal cero aceptable (menor a 5 Pa) se recomienda que la velocidad del viento durante el ensayo no alcance 3 en la escala Beaufort y que la diferencia de temperatura exterior-interior multiplicada por la altura del edificio sea menor a 250 m.K.

Una vez determinada la diferencia de presión exterior-interior a flujo cero, se destapan y se encienden los ventiladores y se procede a medir diferentes caudales de aire a distintas diferencias de presión exterior-interior. Las medidas de diferencia de presión exterior-interior deben estar espaciadas 10 Pa máximo, el valor mínimo inicial debe ser de 10 Pa y el valor máximo debe ser de al menos 50 Pa, pero se recomienda extender el rango hasta 100 Pa. La norma recomienda realizar dos series de mediciones, una para presurización y otra para despresurización, sin embargo, se admite que se realice solo una serie de medidas.

Al final de estas series de medidas se debe determinar nuevamente la diferencia de presión a caudal cero. Y nuevamente, el promedio de los valores positivos Δp_{02+} , el de los valores negativos Δp_{02-} y el de todos los valores Δp_{02} sobre este periodo no deben superar los 5 Pa, en caso contrario el ensayo se declara no válido. Las medidas de presión en la ecuación (1) son corregidas con la diferencia de presión a flujo cero, es decir, a todas las medidas de Δp se les resta el promedio entre Δp_{01} y Δp_{02} .

Finalmente, los datos son procesados de acuerdo a la sección 2 y son determinados: el coeficiente de fuga C_L , el coeficiente de presión n , las renovaciones horas a una diferencia de 50 Pa n_{50} y el promedio anual de la tasa de infiltraciones del edificio $\overline{n_0}$.

Figura 2. Diagrama de flujo del procedimiento.



Fuente: Elaboración propia.

3. Casos de estudio

Se ensayó un total de siete edificios con diversas características. En las tablas 2 y 3 se presentan los casos de estudio ordenados en forma creciente por el año de construcción, y en ellas se resumen las principales características de los edificios, las cuales se describen en los párrafos siguientes.

Tabla 2. Características de los casos de estudio

Caso	Sector	Año de construcción	Volumen (m ³)	Área de envolvente (m ²)	Área de piso (m ²)	Cantidad de plantas
1	Servicios	1964	318,2	271,4	103,4	1
2	Servicios	1968	436,0	292,2	184,4	2
3	Servicios	1972	335,4	301,5	112,2	1
4	Servicios	1975	265,6	313,0	99,3	1
5	Servicios	2015	238,6	227,5	88,4	1
6	Residencial	2018	83,0	59,4	34,6	1
7	Residencial	2019	120,6	138,2	51,0	1

Tabla 3. Características de los casos de estudio (continuación)

Caso	Altura planta sobre terreno (m)	Tipo de implantación	Ventanas exteriores		
			Área (m ²)	Apertura ¹	Material ²
1	0,2	Rural	28,8	C, B	A, M
2	-2,6	Urbana	53,3	C, B	A, H, M, P
3	0,2	Rural	24,1	O, B	H, M
4	4,6	Rural	44,3	C, P	A
5	0,2	Rural	27,1	C, B	A, H
6	2,5	Urbana	9,3	C	A
7	18,2	Urbana	8,7	C	A

1 - C – Corrediza, B – Batiente, O – Oscilante, P – Proyectante

2 - A – Aluminio, H – Hierro, M – Madera, P – PVC

De acuerdo a sus funciones, los casos de estudio se dividen en dos grupos: servicios y residencial (colectivo). Los edificios 1 al 5 pertenecen al sector público, estando relacionados a funciones educativas los casos 1, 2 y 3. El edificio del caso 4 tiene como función principal los servicios, pero el módulo ensayado pertenece al grupo residencial, dado que es un edificio de uso mixto. El caso 5 es un edificio público destinado a la investigación científica. Dentro del grupo residencial, los casos 6 y 7 son unidades de edificios de apartamentos en altura.

Todos los edificios ensayados tienen en común el sistema constructivo tradicional pesado en mampostería de cerámica cocida, donde los casos 6 y 7 presentan además estructura independiente en hormigón armado. Las cubiertas son de hormigón armado en los casos 2, 4, 5, 6 y 7. Los casos 1 y 3 cuentan con cubierta de cerámica armada abovedada con directriz catenaria. Las aberturas del grupo de edificios más antiguos son de diversa materialidad, encontrándose de hierro, madera, aluminio, y PVC. La forma de apertura más frecuente es corrediza para ventanas y batiente para puertas, aunque en el caso 3 las ventanas principales cuentan con un sector oscilante y el resto de la abertura con vidrio fijo. En el caso 4 hay banderolas proyectantes en los servicios sanitarios. En la Tabla 3 se indica el material y la forma de apertura de las aberturas de cada caso. El caso 2 cuenta con una chimenea como parte del equipamiento de calefacción la cual no fue sellada durante el ensayo. El caso 5 tiene cañerías de salida de conductores eléctricos por su cubierta, necesarias para el equipamiento de medición ubicado sobre la misma. Estos elementos influyen en la hermeticidad de los edificios considerados.

Los casos 1 y 3 tienen una particularidad importante: originalmente eran construcciones similares, pero posteriormente el caso 1 fue modificado reemplazando las ventanas por otras de diferente material y mejor calidad. Esto permitió comparar dos edificios esencialmente iguales, casos 1 y 3, con aberturas de distinta calidad.

Para el caso 4 se realizó una serie de medidas de despresurización y otra de presurización. Para el resto de los casos, las series de medidas fueron siempre de despresurización.

En todos los casos la velocidad del viento durante el ensayo fue menor a 3 en la escala Beaufort. Además, en todos ellos la diferencia de temperatura exterior-interior multiplicada por la altura del edificio fue menor a 250 K.m, a excepción del caso 6 donde no se midió temperatura. Sin embargo, en todos casos se logró una diferencia de presión exterior-interior a caudal cero aceptable (< 5 Pa).

4. Resultados y análisis

Para comparar los resultados entre sí y a su vez también con los resultados de otras publicaciones, se determinó el valor de n_{50} para cada caso. Los resultados se exponen en la Tabla 4 y se presentan de forma gráfica en la Figura 3 solo los de despresurización.

Tabla 4. Resultados

Caso	Método ¹	r ²	C _L (m ³ /(h.Pa ⁿ))	n	n ₅₀ (h ⁻¹)	$\overline{n_0}$ (h ⁻¹)	n ₅₀ / $\overline{n_0}$
1	D	0,996	67,8±5	0,774±0,013	4,3	0,18	24,1
2	D	0,999	1562±56	0,577±0,007	31,9	1,57	20,3
3	D	0,995	109±11	0,830±0,018	8,5	0,30	28,3
4	D	0,992	594±75	0,564±0,023	18,6	1,08	17,2
4	P	0,998	450±31	0,649±0,013	19,7	1,27	15,5
5	D	0,999	101,8±2,8	0,613±0,005	4,7	0,25	18,8
6	D	0,999	52,0±3,9	0,541±0,013	5,2	0,33	15,8
7	D	0,985	20,3±2,7	0,775±0,026	3,5	0,12	29,2

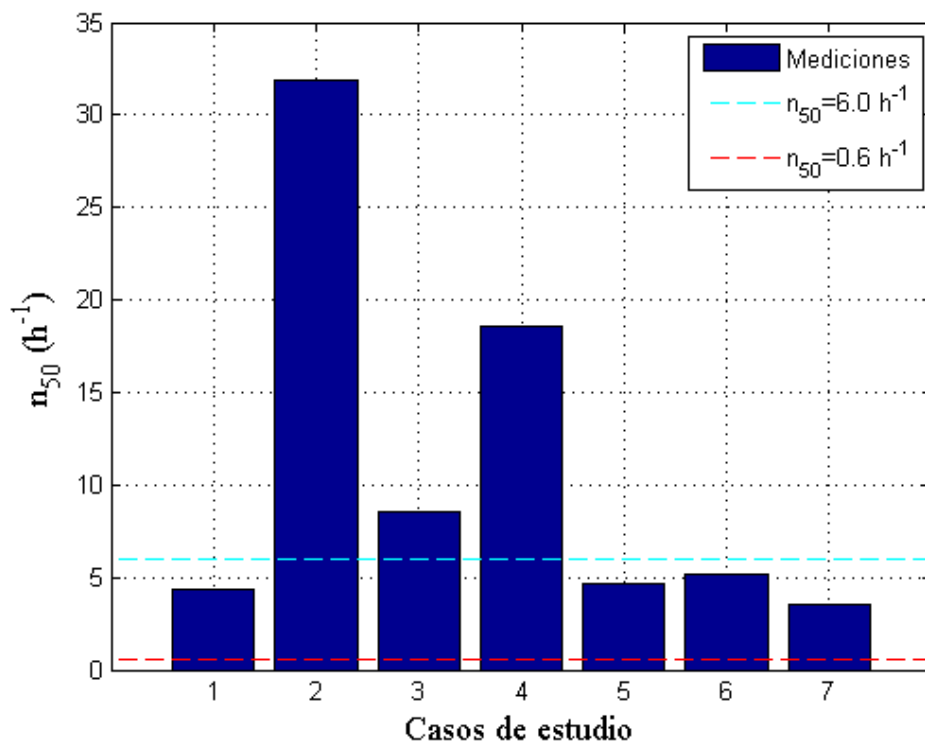
1 - D – Despresurización, P – Presurización

En la Tabla 4 se muestra además el coeficiente de fuga de aire C_L, el coeficiente de presión *n* y el coeficiente de correlación r². El coeficiente de correlación fue mayor a 0,99 en todos los casos excepto en el 7. El coeficiente de presión *n* varía entre 0,541 y 0,830 y el de fuga de aire entre 20,3 y 1562 m³/(h.Paⁿ). El error relativo promedio del coeficiente de presión es del 2 % y del de fuga de aire 8 %. El promedio general de n₅₀ (tomando en cuenta para el caso 4 solo el valor de despresurización) fue de 11,0 h⁻¹ con una gran variabilidad, que se traduce en una alta desviación estándar, la cual es de 10,6 h⁻¹.

En el caso 4, como fue mencionado anteriormente, se realizó una serie de medidas de despresurización y otra de presurización. Como se puede ver en la Tabla 4 los resultados de ambos ensayos son muy parecidos, difiriendo menos de un 6 %, lo cual coincide con lo visto en otras publicaciones (Targo, 2007) y valida lo sugerido por la norma de realizar únicamente una serie de medidas (presurización o despresurización).

Resulta interesante notar que, como se dijo antes, los casos 1 y 3 consisten en edificios esencialmente iguales, pero con aberturas de diferente calidad. Se puede ver en la Tabla 4 que a través del cambio de aberturas en este caso se logra una mejora de casi el 50 % en el valor de n₅₀.

Figura 3. Valores de n_{50} para los casos de estudio y niveles de referencia internacional



Fuente: Elaboración propia

Para concluir si la permeabilidad al aire de los casos considerados es aceptable, es necesario fijar una referencia, es decir, fijar un nivel de n_{50} por debajo del cual la permeabilidad al aire de un edificio se considera aceptable. A nivel nacional no existe una normativa al respecto, es por ello que se acudió a estándares internacionales, concretamente se consideraron dos niveles de referencia distintos. Dichos niveles de referencia se graficaron junto a las medidas en la Figura 3. El primero corresponde al Código Técnico de la Edificación de España (Ministerio de Fomento, 2019) se establece que las construcciones nuevas con compacidades menores a 2 (razón entre volumen interior y área de envolvente) deben poseer un valor de n_{50} menor a 6 h^{-1} . Todos los casos de estudio en este trabajo presentan una compacidad menor a 2, lo cual se puede deducir a partir de los datos de la Tabla 2. En la Figura 2 se puede ver que los casos 1, 5, 6 y 7 satisfacen la exigencia española, mientras que los casos 2, 3 y 4 no lo hacen. Vale destacar que los casos 5, 6 y 7 son de reciente construcción, y el caso 1 corresponde a un edificio antiguo pero reacondicionado. El promedio de estos (1, 5, 6 y 7) fue de $4,4 \text{ h}^{-1}$ con una desviación estándar de $0,72 \text{ h}^{-1}$, y el promedio de los edificios de construcción antigua sin reacondicionar fue de $19,7 \text{ h}^{-1}$ con una desviación estándar de $11,7 \text{ h}^{-1}$. Los resultados de

este último grupo presentan una mayor variabilidad. Además, se destaca, que el promedio de los edificios de construcción antigua sin reacondicionar más que cuadruplica el promedio de los de construcción reciente y antiguo reacondicionado. Se puede concluir que a la hora de presentar los resultados es importante discriminar no solo por la antigüedad de la construcción, sino también tomar en cuenta si el edificio fue reacondicionado o no.

El segundo estándar utilizado es el Passivhaus (Passive House, s.f.) el cual considera aceptable un valor de n_{50} por debajo de $0,6 \text{ h}^{-1}$. Se eligió este estándar debido a que es muy conocido a nivel internacional. En nuestro estudio, ninguno de los casos considerados cumple con dicho estándar. Sin embargo, si bien es un estándar ampliamente utilizado en países nórdicos con climas fríos, al ser el mismo mucho más restrictivo, su utilización en climas templados como el de Uruguay no parece apropiada.

Por otra parte, utilizando el modelo de Sherman (1980) y el año meteorológico típico de la ciudad de Salto (Alonso-Suárez, Bidegain, Abal, G., & Modernell, 2019), para cada uno de los casos se calculó la tasa de infiltración promedio anual \bar{n}_0 , para lo cual se utilizó una temperatura interior constante de $24 \text{ }^\circ\text{C}$. Los resultados se presentan en la Tabla 4. El valor promedio general de \bar{n}_0 fue de $0,55 \text{ h}^{-1}$, el de los edificios de construcción nueva más el caso reacondicionado $0,22 \text{ h}^{-1}$, y el de construcción antigua sin reacondicionar $0,98 \text{ h}^{-1}$, el cual es más del cuádruple que el primero. El promedio de los cocientes entre n_{50} y \bar{n}_0 fue de 22,0, mayor que el valor dado por el método empírico de la ecuación (9). El valor mínimo de este cociente fue de 15,5 y el máximo de 29,2: la variabilidad de este cociente se debe a las diferencias en la implantación de los edificios y la altura de estos. Esta variabilidad muestra que el método de cálculo de \bar{n}_0 dado por la ecuación (9) no es recomendable.

En la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU) de la Universidad de la República, se sugieren para cálculos de diseño, valores de \bar{n}_0 entre $0,5 \text{ h}^{-1}$ y $1,5 \text{ h}^{-1}$ (Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, 2002). Se desconoce el origen de este criterio, pero se cree que están basados en datos empíricos de la década de los 80' y 90' aportados por CIBSE (*Chartered Institution of Building Services Engineers*). Al comparar este criterio con los resultados de este trabajo, parecería que el criterio es apropiado para edificios antiguos no reacondicionados, pero no para edificios nuevos o antiguos reacondicionados.

5. Comparación con resultados de otras publicaciones

En la introducción se plantea la interrogante de si es apropiado utilizar datos empíricos de otros países para estudios en Uruguay. En esta sección se comparan los resultados de este

trabajo con los resultados de cuatro publicaciones diferentes. Procurando establecer una comparativa razonable, se buscan estudios cuya muestra bajo análisis sea similar a la analizada en el presente trabajo. Por este motivo, los edificios considerados en todos los trabajos de referencia son de mampostería y exhiben, por razones climáticas, de cercanía o influencia cultural, características arquitectónicas similares. Estos trabajos se describen brevemente a continuación.

El primer trabajo analizado (Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción de la Universidad del Bío-Bío, 2014) se ubica en Chile. En el mismo se presentan los resultados de 216 ensayos realizados sobre edificios del sector residencial y del sector de servicios construidos en 2007 y en 2010. Los resultados se agrupan de acuerdo a la materialidad de los muros, observándose para mampostería de ladrillo un valor medio de n_{50} de $11,8 \text{ h}^{-1}$ con una desviación estándar de $3,6 \text{ h}^{-1}$ para el sector residencial. Los trabajos restantes se ubican en el área del mar Mediterráneo. Feijó-Muñoz et al. (2019) presenta los resultados de 225 ensayos realizados en España sobre edificios residenciales construidos entre 1890 y 2015. El promedio general de los resultados es de $8,43 \text{ h}^{-1}$ y no se reporta desviación estándar. En Italia, d'Ambrosio Alfano et al. (2012) mide la permeabilidad al aire de 20 edificios residenciales construidos entre 1810 y 2010. Los resultados presentan un promedio general de $7,4 \text{ h}^{-1}$ y una desviación estándar de $2,4 \text{ h}^{-1}$. Por último, en Portugal, Ramos et al (2015) mide la permeabilidad al aire de 25 edificios con edades de construcción de entre 90 y 10 años. El promedio de los resultados es $8,9 \text{ h}^{-1}$ y la desviación estándar $3,2 \text{ h}^{-1}$. Todos los datos antes mencionados se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. Datos encontrados en otras publicaciones

País	Autor	# casos	$n_{50} \text{ (h}^{-1}\text{)}$	
			Promedio	Desv. Est.
Uruguay	Trabajo actual	7	11,0	10,6
Chile	CITCUBB ¹ (2014)	216	11,8	3,6
España	Feijó-Muñoz et al. (2019)	225	8,5	-
Italia	d'Ambrosio et al. (2012)	20	7,4	2,4
Portugal	Ramos et al. (2015)	25	8,9	3,2

1 - Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción de la Universidad del Bío-Bío

Al comparar los datos que aquí se presentan, se puede observar que los resultados de los trabajos de los países mediterráneos son bastante similares entre sí. Si bien los tres trabajos evalúan edificios en cada país de diferentes antigüedades, las desviaciones estándar de los promedios presentados son relativamente bajas, mostrando una cierta homogeneidad, lo cual habla del buen estado de conservación y mantenimiento de los edificios evaluados. Por otro lado, el trabajo chileno, si bien es sobre una amplia muestra de edificaciones

relativamente nuevas, muestra un promedio del orden de un 50 % mayor que el de las edificaciones europeas acá presentadas. Respecto a las medidas realizadas en el presente trabajo, una primera mirada muestra una similitud entre el promedio de ellas y el promedio del trabajo chileno. Sin embargo, la alta desviación estándar de nuestros resultados muestra que hay una alta diversidad de resultados entre sí. Por un lado, están los edificios antiguos sin reacondicionados, con un promedio de n_{50} de $19,7 \text{ h}^{-1}$ y desviación estándar de $11,7 \text{ h}^{-1}$, y por otro los edificios nuevos y/o reacondicionados, con un promedio de $4,4 \text{ h}^{-1}$ y desviación estándar de $0,7 \text{ h}^{-1}$. Por ende, los resultados acá medidos muestran una gran diferencia tanto con los resultados de Chile para nuevas construcciones como con los resultados europeos. Se observa entonces que utilizar valores empíricos de infiltraciones de otros países, a la hora de modelar construcciones locales, conlleva a un error. Por lo tanto, será necesario continuar midiendo las infiltraciones de edificaciones en Uruguay, ya sean nuevas, antiguas o recicladas, en cantidad suficiente como para tener valores medios característicos que puedan ser usados de referencia.

6. Conclusiones

Se determinó con éxito la permeabilidad al aire de siete edificios en Uruguay de acuerdo al estándar ISO 9972:2015. Se hallaron los coeficientes C_L y n con un muy buen nivel de incertidumbre (error relativo de 8%). El coeficiente de correlación en 6 casos fue mayor a 0,99. Se deduce que el modelo teórico dado por la ecuación (1) ajusta muy bien los datos experimentales y que la metodología ha sido correctamente implementada. A esto último se suma el hecho de que se utilizaron instrumentos calibrados y que se siguió un método estandarizado.

El valor promedio de n_{50} de los casos estudiados fue de $11,0 \text{ h}^{-1}$ con una desviación estándar de $10,6 \text{ h}^{-1}$. Al comparar los resultados con la exigencia del del Código Técnico de la Edificación de España ($n_{50} < 6 \text{ h}^{-1}$) se encontró que los edificios nuevos y/o reacondicionados satisfacen dicha exigencia en tanto que, los antiguos sin reacondicionar, no lo hacen. Además, el valor de n_{50} de los edificios del primer grupo casi cuadruplica el valor del primer grupo.

Partiendo del modelo de Sherman (1980) se pudo calcular la tasa de infiltraciones promedio anual \bar{n}_0 , el valor el valor promedio general de \bar{n}_0 fue de $0,55 \text{ h}^{-1}$, el de los edificios de construcción nueva más el caso reacondicionado $0,22 \text{ h}^{-1}$, y el de construcción antigua sin reacondicionar $0,98 \text{ h}^{-1}$, el cual es más del cuádruple que el primero. La comparación de

estos resultados con el criterio utilizado en FADU deja en evidencia que este criterio debe ser revisado y actualizado, fundamentalmente para los edificios de reciente construcción.

Finalmente, al comparar los valores de n_{50} obtenidos con los resultados de otras publicaciones, se encuentran diferencias importantes en los promedios y en la variabilidad de los resultados (desviación estándar). A partir de esto, y de lo expuesto en el párrafo anterior, se concluye que es importante que se sigan realizando ensayos en Uruguay que permitan tener valores más acordes al momento de modelar térmicamente los edificios locales. A futuro, sería deseable ensayar una cantidad significativa de edificios, con diversas características, como para inferir conclusiones más generales de la situación actual del parque edilicio nacional. Ello podría servir como insumo para diseñar normativas adecuadas a nuestro país con el objetivo de limitar el consumo de energía de los edificios.

Referencias

Alonso-Suárez, R., Bidegain, M., Abal, G., & Modernell, P. (2019). *Año Meteorológico Típico para aplicaciones de Energía Solar (AMTUes): series horarias típicas para 5 sitios del Uruguay*. Montevideo, Uruguay: Ediciones Universitarias (UCUR) de la Universidad de la República (Udelar).

ASHRAE. (2009). *2009 ASHRAE Handbook Fundamentals*. Atlanta.

Casañas, V., Pereira, L., Liston, M., & Cataldo, J. (2016). Caracterización y valoración energética de infiltraciones por aberturas en el paque habitacional uruguayo. *XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*, 4, págs. 07.11-07.18. Argentina.

Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción de la Universidad del Bío-Bío. (2014). *Manual de hermeticidad al aire de edificaciones*. Obtenido de http://construccionsustentable.uc.cl/images/Documentos/Manual_de_hermeticidad_al_aire_de_edificacion.es.pdf

d'Ambrosio Alfano, F., Dell'Isola, M., Ficco, G., & Tassini, F. (2012). Experimental analysis of air tightness in Mediterranean buildings using the fan pressurisation method. *Building and Environment*, 53, 16-25.

Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. (2002). AT02 Repartido. Cátedra de Acondicionamiento Térmico. Montevideo, Uruguay. Obtenido de <http://www.fadu.edu.uy/acondicionamiento-termico/files/2012/02/repartido-02.pdf>

Feijó-Muñoz, J., González-Lezcano, R. A., Poza-Casado, I., Padilla-Marcos, M. Á., & Meiss, A. (2019). Airtightness of residential buildings in the Continental area of Spain. *Building & Environment*, 148, 299-308.

Feijó-Muñoz, J., Pardal, C., Echarri, V., Fernández-Agüera, J., Assiego de Larriva, R., Montesdeoca Calderín, M., . . . Meiss, A. (2019). Energy impact of the air infiltration in residential buildings in the Mediterranean area of Spain and the Canary inslans. *Energy & Buildings*, 226-238.

IEA. (2016). *Final Energy Consumption in the World*. Obtenido de <https://www.iea.org/Sankey/#?c=World&s=Final%20consumption>

ISO. (2015). ISO 9972. *Thermal performance of buildings – determination of the air permeability of buildings – fan pressurization method*. Geneva, Switzerland.

MIEM. (2018). *Balance Energético Nacional de Uruguay*. Obtenido de <https://ben.miem.gub.uy/index.html>

Ministerio de Fomento. (2019). Código Técnico de la Edificación de España. Obtenido de <https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DBHE.pdf>

Passive House. (s.f.). *Passive House Institute*. Obtenido de <https://passivehouse.com/>

Ramos, N. M., Almeida, R. M., Curado, A., Pereira, P. F., Manuel, S., & Maia, J. (2015). Airtightness and ventilation in mild climate country rehabilitated social housing buildings - What users want and what they get. *Building and Environment*(92), 97-110.

Sherman, M.H. and Modera, M.P. (1986). *Comparison of Measured and Predicted infiltration Using the LBL Infiltration Model*. Measured Air Leakage of Buildings, ASTM STP 904, H.R. Trechsel and P.L. Lagus, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 325-347.

Sherman, M.H., Grimsrud, D.T. (1980). *Infiltration-presurization correlation: Simplify physical modeling*. ASHRAE Transactions, 86(2), 778

Targo, K. (2007). Air tightness and air leakages of new lightweigh single-family detached houses in Estonia. *Building and Environment*, 42, 2369-2377.