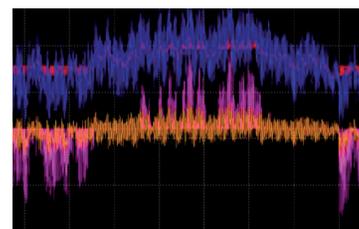


# Influencia del caudal de ventilación e infiltración sobre la demanda energética en edificios residenciales en España



## Influence of ventilation and infiltration flows on energy demand in residential buildings of Spain



Alejandro Rincón-Casado<sup>1</sup>, Francisco José Sánchez de la Flor<sup>2</sup>, Enrique Ángel Rodríguez Jara<sup>2</sup>, Pablo Pavón-Domínguez<sup>1</sup> y José Sánchez Ramos<sup>2</sup>

Universidad de Cádiz. Escuela Superior de Ingeniería. Dpto. Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial<sup>1</sup> y Dpto. Máquina y Motores Térmicos<sup>2</sup>.  
Avda. Universidad de Cádiz, 10 - 11519 Puerto Real (Cádiz). Tfno: + 34 956 48 32 00

DOI: <https://doi.org/10.6036/8332> | Recibido: 02/03/2017 • Evaluado: 06/03/2017 • Aceptado: 25/04/2017

### ABSTRACT

- This work focuses on the study of the influence of ventilation flows on the energy demand of buildings with residential use. Currently, the Technical Building Code (CTE) is the Spanish regulation that regulates the criteria for design, calculation and execution of ventilation installations. The current criteria for the calculation of ventilation flows are conditioned by criteria of health of the air. However, these criteria influence the determinant form on the demands of conditioning, especially in heating. In this work a detailed method is applied for calculating hourly and hourly ventilation and infiltration flows. This method allows to study the influence of variables such as the permeability of the faces (fixed in EN 15242: 2007), the external wind velocity, on the ventilation flows. In addition, we study the influence of these flows on the heating demands. This study is carried out in three Spanish climatic zones (Cadiz, Madrid and Zaragoza), where the external wind velocities and climatic severity change substantially. The result of this work demonstrates the importance of these variables, especially in the heating demands, finding differences of up to 14% depending on the wind zone and the permeability of the building façade.
- **Key Words:** Ventilation, Infiltration, Ventilation flows, Demand of ventilation, Indoor air quality.

### RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo calcular de forma detallada los caudales de ventilación e infiltración y analizar su influencia sobre la demanda energética de edificios con uso residencial en España. Actualmente el Código Técnico de la Edificación (CTE) es la normativa española que regula los criterios de diseño, cálculo y la ejecución de las instalaciones de ventilación. Los actuales criterios para el cálculo de caudales de ventilación están condicionados por criterios de salubridad del aire interior. Sin embargo, no tienen en cuenta la infiltración por permeabilidad de la fachada o la zona geográfica de viento donde se encuentre el edificio. Estos criterios influyen de manera determinante sobre las demandas de acondicionamiento. La metodología empleada tiene en cuenta el cálculo de caudales de ventilación e infiltración hora a hora, permitiendo estudiar la influencia de variables como la permeabilidad de las fachadas (definidas en la EN 15242:2007), y la velocidad del viento exterior, sobre los caudales de ventilación. Además, se estudia de forma cuantitativa la influencia de estos

caudales sobre las demandas de acondicionamiento. El estudio se realiza en tres zonas climáticas españolas (Cádiz, Madrid y Zaragoza), donde cambian sustancialmente las velocidades de viento exterior y la severidad climática. El resultado de este trabajo demuestra la importancia de estas variables sobre las demandas de acondicionamiento, sobre todo en calefacción, encontrando diferencias de hasta un 14% en función de la zona de viento y la permeabilidad de la fachada del edificio.

**Palabras Clave:** Ventilación, Infiltración, Caudal de ventilación, Demanda de ventilación, Calidad de aire interior.

### 1. INTRODUCCIÓN

Una ventilación adecuada es esencial para la salud y la comodidad de los ocupantes del edificio. El cálculo de caudales de ventilación hasta hace relativamente poco tiempo estaba cubierto por normas tecnológicas (NTE), donde los diseñadores de instalaciones se limitaban a seguir las guías tecnológicas para el cálculo de caudales y el diseño de la instalación. Actualmente, las normativas aplicables a instalaciones de ventilación en edificios residenciales, son la norma europea EN 15251:2008[1] y a nivel nacional el CTE HS-3:2013 [2]. En ambas normativas, se exige que los edificios residenciales actuales deban contar con un sistema de ventilación formado por aireadores y extractores, y además se debe asegurar el funcionamiento del sistema sin la intervención del usuario, es decir, que no dependa de la abertura de ventanas o puertas. En el caso del CTE, se ha producido un avance considerable en los caudales mínimos exigidos, sin embargo, responden a criterios de salubridad del aire, no se tiene en cuenta la permeabilidad de la fachada que se recoge en la EN 15251:2008[1], ni tampoco la velocidad del aire exterior del edificio, parámetro que depende de la zona climática donde se encuentre el edificio. Además, el procedimiento de cálculo de caudales se basa en un simple balanceo de caudales, sin posibilidad de tener en cuenta los agentes externos como velocidad de aire exterior ni permeabilidad de fachada.

Desde el punto de vista de la demanda energética, en el CTE, la ventilación se trata como una carga térmica, siendo esta proporcional al caudal de ventilación [3]. Por tanto, el cálculo preciso de los caudales de ventilación influye directamente sobre las demandas de calefacción y refrigeración. Muchos autores han estudiado la ventilación y su efecto sobre la demanda, así por ejemplo, en la referencia [4], se realiza un estudio de un edificio residencial en distintas ciudades italianas, calculando los caudales de ventilación por un método nodal y la demanda energética en refri-

geración. Se demuestra que la ventilación controlada provoca un ahorro energético medio en la demanda de refrigeración del 40%. Otro estudio desarrollado en la referencia [5], estudia el potencial de ahorro energético y la calidad del aire interior provocada por distintas estrategias de ventilación en edificios residenciales. Las estrategias estudiadas son control de humedad, control de presencia, control de CO<sub>2</sub>, y el control de todas juntas. El ahorro energético alcanzado es de un 25% en el control de cada componente individual. Combinando todas las estrategias con el control del sistema de ventilación, se alcanza un ahorro del 60%. Otro trabajo desarrollado en la referencia [6] muestra un estudio de un edificio residencial donde se desarrolla un modelo mediante métodos nodales para el cálculo de los caudales de aire, y un modelo térmico para el cálculo de demanda energética, con ellos realiza un acoplamiento para su simulación conjunta. Los resultados obtenidos se comparan con las mediciones en un edificio real durante seis días, validándose así el modelo matemático. En la referencia [7] se realiza una revisión en distintos países europeos, entre ellos España, realizando mediciones y encuestas para analizar la influencia de la ventilación sobre la salud humana. En algunos países, la infiltración de aire por la permeabilidad de las fachadas y la apertura de ventanas son los únicos sistemas de ventilación, mientras que en otros, los sistemas de ventilación pasiva son más o menos utilizados. En los países con climas más fríos, se han instalado sistemas mecánicos, que son de extracción o de equilibrado, con o sin unidades de recuperación de calor [8], [9]. Recientemente, se ha realizado un estudio de la combinación de caudales de infiltración con ventilación mecánica para sistemas de ventilación desequilibrados. Estudiando la influencia de los desequilibrios sobre la ventilación natural, aplicado el método hacia adelante y el método inverso para millones de hora de simulación. Sin embargo, no se tiene en cuenta la influencia sobre la demanda energética, solo la metodología de cálculo de caudales [10].

Respecto a los métodos de cálculo, en la literatura científica aparecen tres tipos fundamentales: los métodos empíricos; los métodos nodales; y los métodos CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Los métodos CFD resuelven las ecuaciones de movimiento del fluido, son considerados como métodos detallados y muy precisos, sin embargo no son prácticos a la hora de estudiar la demanda anual. Por otro lado, los métodos empíricos tienen menor precisión que los CFD, ya que se basan en resultados de ensayos experimentales, sin embargo, su coste computacional es mucho menor, y son adecuados para el cálculo de las demandas de acondicionamiento anuales. Entre los métodos empíricos más populares se encuentran: el método de la British Standard [11]; el método de la ASHRAE [12]; el método de Axley [13]; el método de De Gidds y Phaff [14]; y el método de la EN 15242:2007 [15]. Por último se encuentran los métodos nodales, que se basan en el cálculo de caudales nodo a nodo y calculan el caudal en cualquier zona del edificio. Entre ellos encontramos el Bucle de Presiones propuesto por Axley [13] y el Balance Másico [11], estos métodos son más precisos y fácilmente programables que los anteriores. Los programas actuales en España, realizan cálculos bajo criterios normativos, y no permiten flexibilidad para cambiar las condiciones de contorno, o introducir variables nuevas como la permeabilidad de las fachadas o ventanas. En el caso de HULC [16], realiza un cálculo anual de la demanda a partir de caudales medios anuales, sin embargo, no tiene en cuenta la permeabilidad del edificio, ni tampoco tiene flexibilidad para considerarlo como capacidad adicional.

Dada la situación actual de conocimiento, se observa que cada país tiene su normativa e impone sus criterios de ventilación en

edificios residenciales [7]. En el caso de España, la normativa a aplicar es el CTE, que atiende a necesidades de salubridad, sin tener en cuenta las infiltraciones. Por tanto, el objetivo del presente trabajo es realizar un cálculo detallado de los caudales de ventilación e infiltración y analizar la influencia sobre la demanda energética en edificios residenciales. Para ello, se emplea un método de cálculo unizona donde se utiliza un método de cálculo nodal combinando la metodología del bucle de presiones [13] con el balance másico y las ecuaciones de la EN 15242:2007 [15]. Se estudia un caso tipo donde se analizan las variables como permeabilidad del edificio (infiltración) y la velocidad de viento exterior. Estas variables tienen un efecto directo sobre la demanda energética, dependiendo de la localización geográfica donde se encuentre, y de las características constructivas. Tres zonas geográficas del territorio español son analizadas, estudiando el mismo edificio en tres localidades distintas, y comparando la demanda energética en función de los caudales de ventilación.

## 2. METODOLOGÍA

El método de cálculo empleado en este trabajo para el cálculo de los caudales de ventilación se encuentra dentro de los clasificados como métodos nodales. Estos métodos presentan mayores ventajas a la hora de calcular las demandas energéticas anuales, debido a su bajo coste computacional. Concretamente se ha empleado una combinación de los tres métodos de cálculo nodales: Bucle de Presiones, Balance Másico y el método de la EN 15242:2007 [15]. El Bucle de Presiones consiste en la aplicación de la ecuación de Bernoulli Ec. (1) entre dos puntos de una línea de corriente que va desde el exterior al interior, y en todos los puntos debe cumplir la ecuación de continuidad. Es un método sistemático en el que se toman lazos de presiones desde el exterior al interior, para relacionar las presiones interiores con las exteriores. Desarrollando y agrupando la ecuación de Bernoulli se obtiene la Ec. (2), donde la diferencia de presión que provocan las fuerzas impulsoras del movimiento del aire (viento y temperatura) es igual a la caída de presión que se produce en cada uno de los componentes de ventilación que atraviesa la línea de corriente. El método nodal de Balance Másico [11], sirve para alcanzar las condiciones de equilibrio másico en cada recinto del edificio. El equilibrio se alcanza cuando el flujo de aire que entra en un recinto es igual al que sale, por tanto se cumple la Ec. (3). Aplicando la aproximación de Boussinesq se despreja la variación de densidad del aire, simplificando la Ec.(3) a la Ec.(4). La formulación propuesta por la EN 15242:2007 [15] proporciona la caída de presión en los distintos componentes del sistema de ventilación Ec.(5)-(10).

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho_1 v_1 + \rho_1 g z_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho_2 v_2 + \rho_2 g z_2 \quad (1)$$

$$\sum \Delta P_{Fuerzas\ Impulsoras} = \sum \Delta P_{Elementos\ Ventilación} \quad (2)$$

$$\sum_n^1 \rho_i Q_i = 0 \quad (3)$$

$$\sum_n^1 Q_i = 0 \quad (4)$$

El sistema de ventilación residencial, según el CTE-HS3:2013 [2], el aire para la ventilación de los espacios, debe entrar por los

recintos secos (dormitorio y salón), y salir por los recintos húmedos (baños y cocina), para evitar la transmisión de olores y contaminantes. Además, los caudales de ventilación exigidos en cada recinto, deben asegurarse con independencia de la actuación del usuario. Por tanto, en los recintos secos deben instalarse aireadores de ventilación que aseguren el caudal mínimo de entrada, y en los recintos húmedos deben instalarse extractores mecánicos que aseguren un caudal mínimo extraído. Sin embargo, el CTE no tiene en cuenta el caudal de aire de infiltración, es decir, el aire que entra por la permeabilidad de las ventanas, y por la permeabilidad de los cerramientos de fachada. Además, tampoco se tienen en cuenta el efecto del viento exterior, ni la flotación causada por la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior del edificio. Esta información, se encuentra disponible en la norma Europea EN 15242:2007[15]. Por tanto, para realizar un cálculo detallado, estas variables deben ser tenidas en cuenta en el cálculo de los caudales de ventilación e infiltración, ya que influyen directamente sobre la demanda energética.

Una de las fuerzas motoras más importantes en ventilación, es el viento exterior, que provoca una diferencia de presión entre el exterior y el interior del edificio (Ec. 5). Esta diferencia de presión depende del coeficiente de presión en la fachada ( $C_p$ ), de la densidad del aire ( $\rho_{ext}$ ), la velocidad del viento ( $V_{ref}$ ) y de la presión interior ( $p_{ref}$ ). Otra causa de movimiento del aire es el fenómeno de flotación (o efecto chimenea), provocado por la diferencia de temperaturas del aire, que provoca a su vez diferencia de densidades, influenciado por la altura donde se encuentre (Ec. 6). La diferencia de presión provocada por el viento se combina con la provocada por la temperatura para obtener la diferencia de presión total en las fachadas (Ec. 7). Otra fuerza motora importante es la realizada por los extractores mecánicos, que aseguran una diferencia de presión y un caudal constante de extracción. Por otra parte, los aireadores de ventilación o rejillas están instalados normalmente en la parte superior de las ventanas, y trabajan por diferencia de presiones, es decir, el caudal que pasa a través de este elemento, depende de la diferencia de presión entre el exterior y el interior del edificio. En la Ec. (8) se muestra la ecuación de comportamiento estándar para un aireador, donde  $n$  y  $C$  dependen de las características del aireador. Estos aireadores deben proporcionar el caudal de diseño cuando trabajan a una diferencia de presión de 20Pa. Por último, aunque no son elementos de ventilación, existe entrada o salida de aire (infiltración o exfiltración) a través de las ventanas y la fachada, debido a su permeabilidad, estos caudales son considerados como fugas, pero participan directamente en los caudales de ventilación del edificio. En la Ec.(9) y Ec.(10), se muestran la ecuaciones para calcular el caudal de fuga por ventanas y por fachada, respectivamente. Al igual que el resto de elementos del sistema de ventilación, el caudal de fugas depende de la diferencia de presión entre el exterior y el interior, y de los coeficientes de permeabilidad definidos en la EN 15242:2007[15]. Por último, para cumplir la ecuación del balance másico, todos los caudales de entrada debe ser igual a los caudales de salida, Ec.(11).

$$\Delta P_v = C_p \rho_{ext} \frac{V_{ref}^2}{2} - p_{ref} \quad (5)$$

$$\Delta P_T = (\rho_{ext} - \rho_{int}) g \Delta z \quad (6)$$

$$\Delta P = \Delta P_v + \Delta P_T \quad (7)$$

$$Q_{rej} = C \Delta P^n \quad (8)$$

$$Q_{fvent-i} = Q_{100} A_i \text{sing}(\Delta P) \left( \frac{|\Delta P|}{100} \right)^{0.667} \quad (9)$$

$$Q_{ffach-i} = Q_{4Pa} A_{exp} \left( \frac{1}{4} \right)^{0.667} \text{sing}(\Delta P) (|\Delta P|)^{0.667} \quad (10)$$

$$\sum Q_{rej-i} + \sum Q_{fvent-i} + \sum Q_{ffach-i} + Q_{ext} = 0 \quad (11)$$

El método utilizado para calcular un edificio puede ser unizona o multizona. El método unizona considera al edificio como una única zona, donde entran y salen caudales de ventilación a través de sus componentes. Por el contrario, el modelo multizona, el edificio se divide en zonas, como por ejemplo viviendas, y entre cada zona se intercambian caudales de ventilación. El modelo empleado en este trabajo es unizona, ya que el objetivo de este trabajo es ver la influencia de los caudales de ventilación que intercambia el edificio con el exterior, y su influencia sobre la demanda.

Para analizar el efecto de los caudales de ventilación sobre la demanda energética, se emplea el software de simulación dinámica TRNSYS 17 [17], donde se crea el modelo del edificio a partir de su geometría, los materiales, y cargas térmicas de la localidad donde esté situado el edificio. De esta forma, a partir de la variación de las velocidades de viento, temperatura exterior y permeabilidad de fachadas y ventanas, se obtiene valores de demanda energética horarios. A través de esta herramienta se pueden comparar las demandas energéticas anuales entre distintos casos y ver la influencia sobre la demanda de las variables a estudiar.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el propósito de simplificar los cálculos y detectar de manera sencilla la influencia de los caudales sobre la demanda, el caso de estudio será una vivienda unifamiliar compuesta por tres dormitorios, baño, salón, cocina y pasillo distribuidor (Fig. 1). La superficie útil de la vivienda es de 90m<sup>2</sup> distribuidos en una planta y una altura de 4m. Todas las dependencias, exceptuando el baño, cuentan con una ventana exterior. Las ventanas de los dormitorios y el salón cuentan con aireadores de ventilación, y en el baño y la cocina existe un extractor que funciona continuamente. Con esta configuración se consigue que el aire se dirija desde los espacios secos hacia los espacios húmedos, donde es expulsado hacia el exterior a través de los extractores mecánicos.

Los caudales mínimos exigidos por criterios de salubridad; vienen fijados por el CTE-HS3:2013 [2], así por ejemplo, en los dormitorios se exige un caudal de entrada de 5 l/s/pers., y en el salón de 3 l/s/pers. Sin embargo, en el baño exige una extracción mínima de 15l/s, y en la cocina 2 l/s/m<sup>2</sup>. A partir de estos valores mínimos, se realiza un balanceo de caudales con el propósito de equilibrar el caudal de extracción con el caudal de admisión. Para este caso es necesario aumentar la extracción por el baño de 15 a 24 l/s (ver tabla 1) equilibrándose así el sistema. Por tanto, el caudal resultante de extracción es de 48 l/s, cumpliéndose con los requisitos mínimos exigidos en la norma [2]. Según la normativa, seleccionando los aireadores y extractores que cumplan este caudal mínimo, ya estaría diseñada y justificada la instalación de ventilación. Sin embargo, este procedimiento, no calcula de manera detallada los caudales de ventilación hora a hora, y no tiene en cuenta la velocidad de viento exterior, y la diferencia de temperatura. Además,

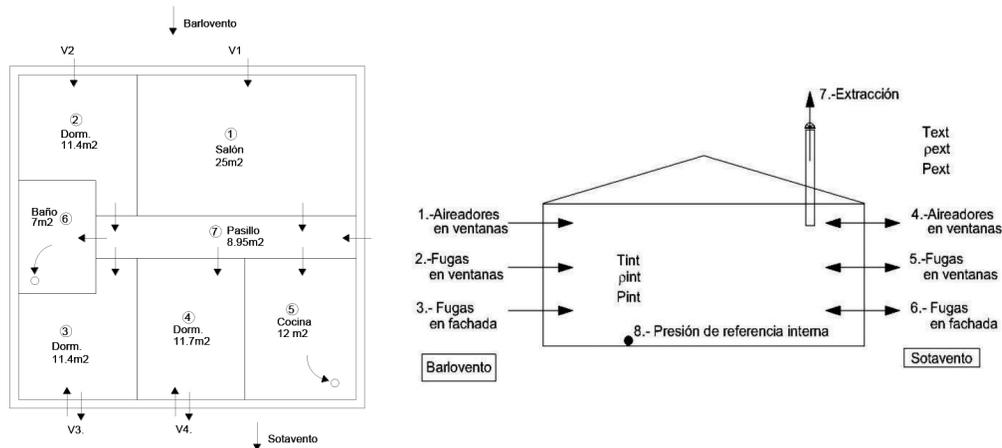


Figura 1: Esquema caso de estudio. Panta (izq.), alzado (dcha.)

Dependencia		Dormitorio 1	Dormitorio 2	Dormitorio 3	Salón	Baño	Cocina
Numero de ocupantes (N)		2	2	2	6	-	-
Area (m <sup>2</sup> )		11,4	11,7	11,4	25	7	12
Caudales (l/s)	Unitario q <sub>i</sub>	5	5	5	3	-15	-2
	Mínimo (q <sub>i</sub> N)	10	10	10	18	-15	-24
Equilibrado		10	10	10	18	-24	-24

Tabla 1: Caudales mínimos y equilibrado de caudales según CTE-HS3:2013[2]

tampoco se tiene en cuenta el caudal de infiltración o exfiltración por la permeabilidad de fachada y las ventanas.

Aplicando la metodología de la sección 2, se puede calcular el caudal real de los aireadores, el caudal por infiltración de fachada y ventanas, y la diferencia de presiones provocada por el viento exterior. Para los aireadores, se han seleccionado el modelo S13 4000 del fabricante Titon [18], que cumple con los ensayos exigidos por EN-13141-1:2004 [19] con un coeficiente  $C=2.226$  y un  $n=0.5113$  para la Ec. (8). Para la fugas por fachada (Ec. 10), se ha considerado un nivel de fugas bajo de  $0.5\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$  a 4Pa según EN 15242:2007[15]. Y para la fugas por ventanas (Ec. 9), se selecciona una clase de ventana 3, con permeabilidad de  $9\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$  a 100Pa según EN 12207:2000[20]. Respecto a las fuerzas motoras (viento, temperatura y extractores), para calcular la diferencia de presión provocada por el viento (Ec. 5), el coeficiente de presión en las fachadas se obtiene según la EN 15242:2007[15], donde 0.25 es a Barlovento y -0.5 es a Sotavento. En el caso de la diferencia de presión provocada por la flotación [21] causada por la diferencia de temperatura (Ec. 6), no es determinante dado la poca altura de la vivienda (4 m). Por último, respecto al caudal de extracción se emplea como dato de entrada 48 l/s en la Ec.(11).

Al estudiar este caso como unizona, la presión interior es común a todas las dependencias ( $p_{ref}$ ), por tanto, el caudal que entra o sale por las aberturas (aireadores o fugas) dependen de la diferencia de presión entre el exterior y el interior ( $\Delta P$ ), pero siempre se debe cumplir el balance másico de la Ec.(11). Todas las ecuaciones definidas en la sección 2, han sido programadas en el programa EES Solver [22], de esta forma se pueden calcular los caudales de ventilación que atraviesa cada componente, variando por ejemplo, la velocidad del viento o las permeabilidades de fachada o ventanas.

Para analizar la influencia de la velocidad del viento sobre los caudales de ventilación, se resuelven las ecuaciones variando la velocidad de 0 a 10m/s, en incrementos de 0.25m/s. La dirección de viento considerada es de barlovento a sotavento, y los parámetros de permeabilidad de ventanas y fachada se mantienen cons-

tantes en todos los casos estudiados. En la Fig. 2 se muestran los caudales en aireadores ( $Q_{rej}$ ), fugas por fachada ( $Q_{ffach}$ ) y fugas por ventanas ( $Q_{fvent}$ ) y el caudal de extracción ( $Q_{ext}$ ), diferenciando entre fachada a barlovento (B) y fachadas a sotavento (S). Lo más destacado de la Fig. 2, sucede para velocidades de viento próximas a 7m/s, donde el caudal de entrada en la fachada a sotavento se anula debido al efecto de succión del viento. Para velocidades de viento exterior superior a 7 m/s, incluso se produce una inversión del flujo de ventilación en aireadores, fugas por fachada y ventanas a sotavento.

De manera similar a la influencia del viento, se puede analizar la influencia de los parámetros de permeabilidad de fachada y ventanas sobre los caudales de ventilación. Los parámetros de permeabilidad vienen determinados por el diseño arquitectónico; el sistema constructivo; y los materiales utilizados. Para el nivel de permeabilidad del edificio se ha considerado la permeabilidad conjunta de ventanas y cerramientos de fachada. Considerando

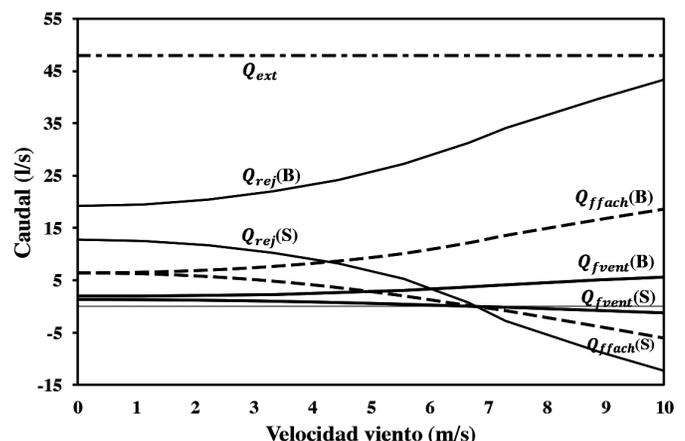


Figura 2: Variación de los caudales de ventilación en aireadores ( $Q_{rej}$ ), extractores ( $Q_{ext}$ ), fuga por fachadas ( $Q_{ffach}$ ) y fuga por ventanas ( $Q_{fvent}$ ), en función de la velocidad de viento exterior, para fachada a Barlovento (B) y Sotavento (S)

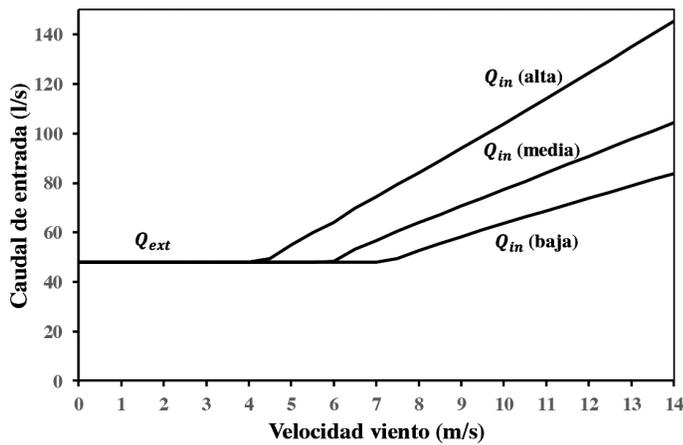


Figura 3: Caudales de ventilación de entrada ( $Q_{in}$ ) para permeabilidad del edificio alta, media y baja, en función de la velocidad de viento exterior

tres niveles de permeabilidad (alto, medio y bajo). Para el caso de las ventanas según la EN 12207:2000[20] se consideran los valores de 50, 27 y 9  $m^3/h \cdot m^2$ , para permeabilidades alta, media y baja, respectivamente. Y para el caso de fachadas, según la EN 15242:2007[15] se consideran los valores de 2, 1 y 0.5  $m^3/h \cdot m^2$ , para permeabilidades alta, media y baja, respectivamente. Resolviendo las ecuaciones para cada nivel de permeabilidad y variando la velocidad entre 0 y 14 m/s, se obtienen los caudales de ventilación totales de entrada ( $Q_{in}$ ) para cada nivel de permeabilidad. En la Fig. 3 se muestran los caudales de ventilación de entrada para los tres niveles de fuga estudiados, apreciándose que, con un nivel de permeabilidad alto, la inversión del caudal de ventilación se produce a menor velocidad de viento exterior.

Analizados la influencia del viento y la permeabilidad sobre los caudales de ventilación, es interesante estudiar cómo influyen estas variables sobre la demanda energética, sobre todo en modo calefacción. Para ello es necesario tener en cuenta el clima donde esté situado el edificio. Tres localidades son estudiadas: Cádiz, Madrid y Zaragoza, diferenciándose entre ellas en la severidad climática y en la zona de viento. Para considerar el efecto del viento, se toma como referencia la norma CTE-Acciones: 2006 [23]. Como se muestra en la Fig. 4, las localidades seleccionadas corresponden a las zonas de viento A, B, y C. Los datos de velocidades y frecuencias se obtienen del programa Meteonorm[24] para cada localidad, en la Fig. 4 dcha. se representan las tres localidades estudiadas.



Figura 4: Mapa de velocidad de viento según CTE-Acciones (izq.). Distribución de frecuencias de velocidades de viento de localidades estudiadas (dcha.)

Elemento	Espesor(m)	U (W/K·m <sup>2</sup> )
Cubierta	0.5	0.495
Cerramiento	0.2	0.669
Suelo	0.5	0.578
Ventanas	-	2.48

Tabla 2: Valores de transmitancia térmica de la envuelta del edificio

Para ver la influencia que tiene el caudal de ventilación sobre la demanda, se han realizado simulaciones dinámicas anuales usando el software TRNSYS 17[17], donde las variables de entrada son: caudales de ventilación horarios; datos meteorológicos de la localidad; temperatura de consigna de 24°C; y las transmitancias térmicas de los materiales de la envuelta (tabla 2) [3]. Para realizar una comparativa, cada localidad se simula para tres grados de permeabilidad (alto, medio y bajo), y se calcula la demanda de calefacción anual. A modo de ejemplo en la Fig. 5 se muestra una simulación dinámica anual de uno de los casos estudiados. La comparación entre todos los casos se muestra en la Fig. 6, donde se representa la demanda anual de calefacción para tres niveles de permeabilidad, situando el edificio en tres localidades distintas. A la vista de los resultados, se aprecian diferencias significativas en las demandas de calefacción. La Fig. 6 representa la demanda energética en modo calefacción para el edificio estudiado variando la permeabilidad de la fachada, y la zona de viento donde se encuentra (Zona A, B y C). Como resultados destacados se observa que la Zona C precisa una demanda del 5% superior a la Zona A para una permeabilidad baja, sin embargo en el caso de permeabilidad alta esta diferencia aumenta hasta 14%. Por tanto, a la vista de estos resultados es esperable que utilizando estos valores de consumo para la clasificación energética, modifique la letra de clasificación del edificio.

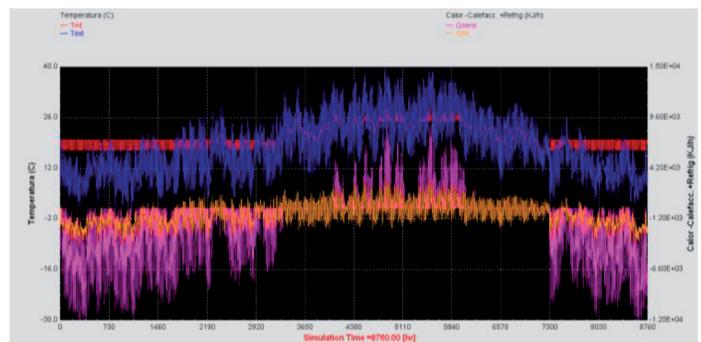
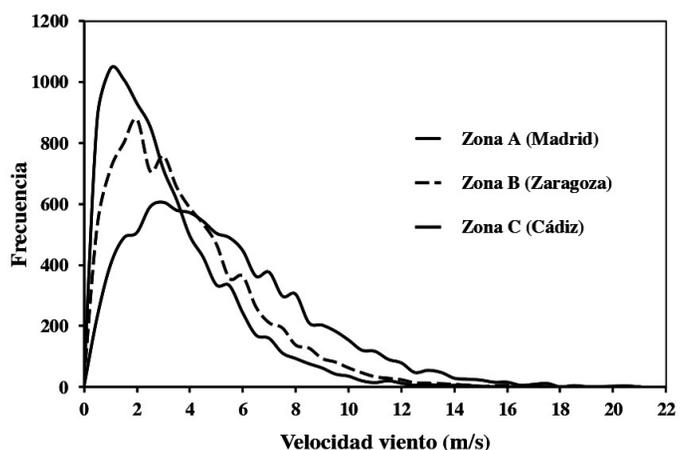


Figura 5: Simulación dinámica caso ejemplo TRNSYS 17[18]



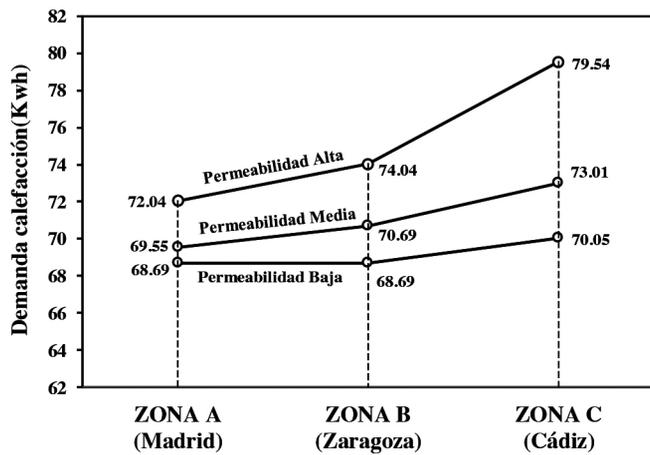


Figura 6: Influencia de la zona de viento y la permeabilidad del edificio sobre la demanda de calefacción

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un método detallado para el cálculo de los caudales de ventilación e infiltración de un edificio residencial. Para el cálculo de los caudales mínimos normativos se utiliza el CTE-HS3:2013[2], y para el cálculo de los caudales de infiltración por fachadas y ventanas, se emplean las ecuaciones de la 15242:2007 [15]. A partir de los caudales calculados en base anual, se estiman la influencia sobre las demandas energéticas de calefacción, para distintas permeabilidades de fachada y localidades.

Respecto al método de cálculo detallado de caudales de ventilación, se muestra el procedimiento para el cálculo de la ventilación hora a hora en función de la velocidad del viento exterior y la permeabilidad de la fachada. Dentro de los métodos de cálculo existentes, se emplea un método de cálculo zonal, que aporta simplicidad y ahorro en coste computacional en edificios grandes. En este método se tienen en cuenta las acciones que provocan el movimiento del aire en el edificio: el viento, la diferencia de temperatura y los extractores. Este método de cálculo es útil para los diseñadores de instalaciones de edificios nuevos o para edificios existentes, consiguiendo mayor precisión que los métodos que actualmente propone el CTE-HS3:2013[2].

Los resultados muestran que los caudales de ventilación están influenciados por la velocidad de viento exterior, así como por la dirección, dado que en las fachadas a sotavento existe una velocidad de viento a partir del cual se invierte el flujo de ventilación. Este fenómeno provoca que exista un exceso de ventilación, provocando una disminución del confort, y aumento la carga térmica asociada. Para combatir este exceso de carga, es necesario aumentar la demanda energética en modo calefacción. Este fenómeno es inevitable por parte del usuario, ya que, según el CTE, la ventilación se debe producir sin actuación del usuario. Sin embargo, para evitar este reflujo en los aireadores, deberían instalarse aireadores de compuerta, donde el usuario pueda actuar en casos de exceso de viento exterior. Además del viento exterior, se ha analizado la influencia de la permeabilidad de fachada y ventanas sobre el caudal de ventilación. Se concluye que, a mayor permeabilidad del edificio, mayor es el caudal de ventilación, y como consecuencia, la inversión del flujo se produce a menor velocidad del viento exterior.

Para cuantificar el impacto sobre la demanda de la permeabilidad y de la zona de viento donde se situó el edificio, se han realizado simulaciones dinámica hora a hora en tres ciudades diferentes, variando los caudales de ventilación en función del viento y de tres niveles de permeabilidad estudiados. Los resultados de simulación para las tres zonas geográficas muestran que la influencia sobre las demandas varía desde un 5% hasta un 14% en los casos más des-

favorables. Por tanto, queda demostrada y cuantificada la influencia de los caudales de ventilación sobre la demanda energética.

Finalmente, se concluye que la influencia de la ventilación e infiltración sobre la demanda energética es significativa. Para disminuir el impacto sobre la demanda, es necesario actuar sobre las causas que la provocan, es decir, sobre el exceso de ventilación. Por tanto, como resultado de este estudio se derivan las siguientes recomendaciones de diseño y uso. Respecto al efecto del viento, es un fenómeno inevitable, sin embargo, su efecto puede minimizarse instalando aireadores con compuertas, así el usuario podrá manipularlos en caso de viento fuertes. Otra forma de minimizar este caudal de ventilación, sería apagando los extractores a partir de la señal procedente de un anemómetro instalado en la cubierta (ventilación híbrida). Respecto a la permeabilidad del edificio, en el caso de la fachada se debe cuidar la estanqueidad, en el caso de edificios nuevos, mediante el diseño del sistema constructivo y el control de su ejecución y, en el caso de edificios existentes, mediante impermeabilización. Respecto a la estanqueidad de las ventanas, se debe recurrir a ventanas con mejor clasificación, especialmente en zonas muy expuestas al viento.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] UNE-EN 15251:2008 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.
- [2] Código Técnico de la Edificación (CTE) HS-3 Calidad del aire interior, 2013. La Ley 38/1999 de 5 de noviembre. España.
- [3] Fernández-Salvador, V. (2012). BUILDING ENERGY SIMULATION OF A ZERO ENERGY CONSUMPTION. DYNA Energía y Sostenibilidad, 1(1). [16 p.]. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES1012>
- [4] N Cardinale, M Micucci, F Ruggiero, Analysis of energy saving using natural ventilation in a traditional Italian building, Energy and Buildings, Volume 35, Issue 2, February 2003, Pages 153-159, ISSN 0378-7788, [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00024-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00024-5)
- [5] J. Laverge, N. Van Den Bossche, N. Heijmans, A. Janssens, Energy saving potential and repercussions on indoor air quality of demand controlled residential ventilation strategies, Building and Environment, Volume 46, Issue 7, July 2011, Pages 1497-1503, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.01.023>.
- [6] Chris J. Koinakis, Combined thermal and natural ventilation modeling for long-term energy assessment: validation with experimental measurements, Energy and Buildings, Volume 37, Issue 4, April 2005, Pages 311-323, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.06.022>.
- [7] C. Dimitroulopoulou, Ventilation in European dwellings: A review, Building and Environment, Volume 47, January 2012, Pages 109-125, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.016>.
- [8] P. Concannon Residential ventilation Technical Note AIVC 57 Air Infiltration and Ventilation Centre (2002) 2 96000355 1 8
- [9] P.G. Schild State-of-the-art of low-energy residential ventilation Contributed Report 07 Air Infiltration and Ventilation Centre (2007)
- [10] Nolwenn Hurel, Max H. Sherman, Iain S. Walker, Sub-additivity in combining infiltration with mechanical ventilation for single zone buildings, Building and Environment, Volume 98, March 2016, Pages 89-97, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.020>
- [11] BS 5925-1991 "Code for practice for Design of Buildings: Ventilation principles and designing for natural ventilation"
- [12] ASHRAE Handbook:2005 Chapter 27 - Fundamentals - SI Units. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers / 2005 / ISBN: 1931862710.
- [13] James W. Axley, Multi-zone dispersal analysis by element assembly, Building and Environment, Volume 24, Issue 2, 1989, Pages 113-130, ISSN 0360-1323, DOI: [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(89\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0360-1323(89)90001-2).
- [14] Gids, W. and Phaff, H. 1982. Ventilation Rates and Energy Consumption due to Open Windows. A Brief Overview of Research in the Netherlands, Proc. of the Third IEA Air Infiltration Center Conference, Vol. 1, pp. 4-5.
- [15] UNE-EN\_15242:2007 Ventilation for buildings. Calculation methods for the determination of air flow rates in buildings including infiltration.
- [16] Herramienta Unificada LIDER CALENER HULC (versión 1.0.1528.1109 de 12 de julio de 2016).
- [17] Transys 17. 2008. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison 1500 Engineering Drive, 1303 Engineering Research Building Madison, WI 53706 - USA.
- [18] Titon UK. S13. <http://www.titon.co.uk/pages/window-door-hardware/ventilators/slot-vents/trimvent-select-s13.php>
- [19] EN 13141-1:2004. Ventilation for buildings. Performance testing of components/ products for residential ventilation.
- [20] EN 12207:2000. Windows and doors. Air permeability. Classification.
- [21] A. Rincón-Casado, F.J. Sánchez de la Flor, E. Chacón Vera Et J. Sánchez Ramos (2017) New natural convection heat transfer correlations in enclosures for building performance simulation, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 11:1, 340-356, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/19942060.2017.1300107>
- [22] EES 2003. Engineering Equation Solver. University of Wisconsin-Madison.
- [23] Código Técnico de la Edificación SE-AE. Seguridad estructural. Acciones. 2006. España
- [24] Meteonorm 6.1 Jan Remund and Stefan Kunz. Meteotest. Fabrikstrasse, 14, CH-3012 Bern. Suiza.