



## artículo técnico

# Estrategias para la integración de la eficiencia energética y la calidad de aire interior

**Manuel Ruiz de Adana Santiago**

Profesor Titular de la Universidad de Córdoba

*En la actualidad, el diseño de instalaciones está sometido a unos requerimientos normativos que requieren hacer compatibles las exigencias de calidad de aire interior con las exigencias de eficiencia energética. En este trabajo se presenta una visión general de este escenario desde el punto de vista de la normativa relacionada con la calidad de aire interior y la eficiencia energética, estableciendo algunas estrategias que permiten integrar ambos requerimientos.*

Según ASHRAE [2011], el término calidad de aire interior, CAI, representa las concentraciones de contaminantes del aire interior que afectan al confort de los ocupantes, al medioambiente, a la salud o al rendimiento en el trabajo o en la escuela.

En el ámbito de la CAI se consideran una serie de contaminantes que pueden agruparse en cinco categorías:

- ▶ Los contaminantes inorgánicos entre los que se encuentran gases como el CO, CO<sub>2</sub> o los óxidos de nitrógeno, además de las partículas.
- ▶ Los contaminantes orgánicos, más conocidos como compuestos orgánicos volátiles o COVs.
- ▶ Los contaminantes de origen biológico tales como virus, bacterias.
- ▶ Las mezclas y los alérgenos.

Todos estos contaminantes pueden estar presentes en el aire interior y proceden en su mayor parte de fuentes de contaminantes localizadas en el interior de los edificios. Las fuentes primarias de contaminantes son:

- ▶ Las fuentes de combustión, como las que podemos encontrar en garajes y chimeneas.
- ▶ Los gases inorgánicos como el CO<sub>2</sub> procedente de la exhalación de las personas.
- ▶ Los volátiles orgánicos procedentes de fotocopiadoras, impresoras y materiales de la vivienda como pinturas y melaminas.
- ▶ Los contaminantes de origen biológico procedentes de personas o mascotas domésticas.
- ▶ El polvo procedente de alfombras, fibras sintéticas y otras fuentes de contaminantes como los productos de limpieza.

Por tanto, los materiales empleados en un edificio, el uso del edificio y sus ocupantes son fuentes de contaminantes y pueden alterar la CAI. Sin embargo, las fuentes de contaminantes representan sólo una parte del conjunto de parámetros que determinan la CAI, figura 1.

La CAI de un edificio depende de tres tipos de parámetros:

- ▶ Parámetros físicos, correspondientes a las condiciones de temperatura y humedad relativa del aire interior que tienen una dependencia significativa con el sistema de ventilación.
- ▶ Parámetros de tipo químico y biológico, que proceden de las fuentes primarias de contaminantes, de la reactividad que pueda existir entre ellos y de las características propias del edificio en cuanto a materiales, contenidos, ocupantes y condiciones de mantenimiento y limpieza.
- ▶ Parámetros “estresores” cuya presencia puede favorecer la incidencia de los contaminantes en las personas, como por ejemplo el propio estrés físico, pero también el ruido o la iluminación.

Estos parámetros están interrelacionados y forman la base para establecer estrategias para controlar y mejorar la CAI.

### Estrategias básicas para la mejora de la calidad de aire interior

La variación de contaminantes en el tiempo para un local con un volumen, V, con una concentración de contaminantes, C, figura 2, viene dada por la expresión:

$$V \frac{dC}{dt} = R(t) - Q(t)[C(t) - C_s(t)] - F(t)$$

Tasa de acumulación de contaminante	=	Tasa de emisión de contaminante	-	Tasa de dilución por ventilación	-	Tasa de reducción por purificación
--	---	--	---	---	---	---

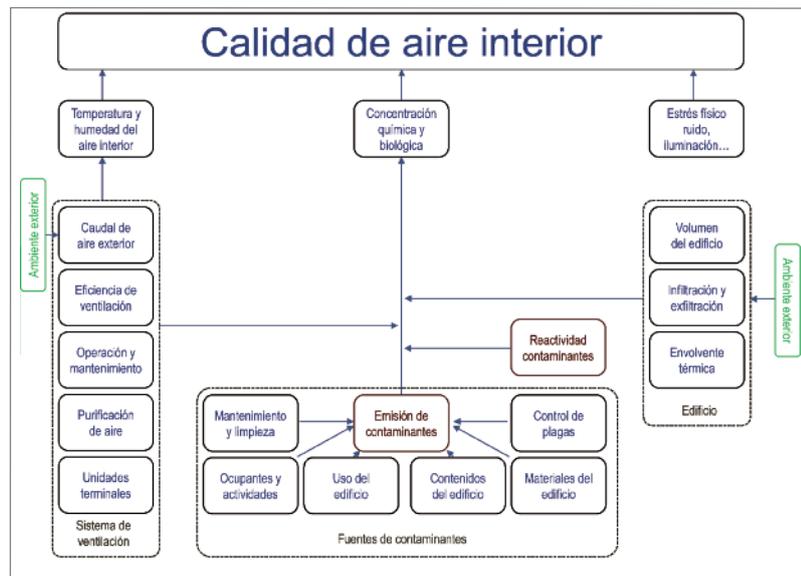


Figura 1. Relación entre parámetros que afectan a la calidad de aire interior.

La variación de contaminantes en el tiempo depende de la tasa de emisión de contaminantes R; de la tasa de dilución por ventilación, resultado de multiplicar el caudal de aire ventilación, Q, por la diferencia entre la concentración interior, C, y la del aire de impulsión, Cs; y de la tasa de reducción de contaminantes por purificación.

Esta ecuación conservativa indica que para mantener una concentración, C, de contaminantes por debajo de un determinado valor, es necesario actuar:

- ▶ Reduciendo la tasa de emisión de contaminantes, es decir, controlando las fuentes de contaminantes, tales como materiales de construcción, pinturas o aglomerados de madera, y otros materiales existentes en el edificio.

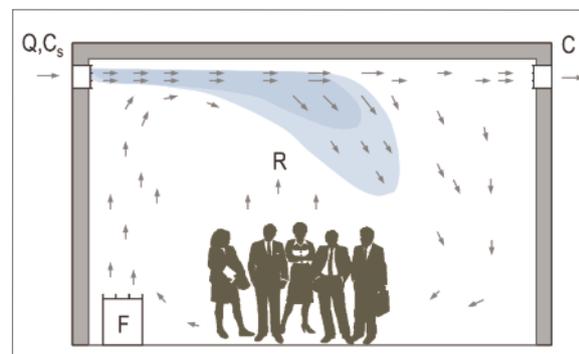


Figura 2. Balance de contaminantes en un local. Cs, concentración de contaminantes en el aire de impulsión; C, concentración de contaminantes en el local; R, tasa de emisión de contaminantes; F, tasa de reducción de contaminante por purificación.



► Aumentando la dilución de contaminantes con aporte de aire de ventilación, considerando:

- El caudal de aire exterior.
- La calidad de aire exterior, que debe garantizar que la concentración de contaminante en el aire exterior sea menor que la concentración de contaminante en el interior.
- El tipo de difusión de aire en el local, ya que la entrega de aire limpio a los ocupantes depende del sistema de difusión de aire empleado y depende por tanto de la eficiencia de ventilación.

► Aumentando la tasa de reducción de contaminantes, mediante el uso de distintas tecnologías de purificación del aire, que varían según el tipo de contaminante que se vaya a tratar:

- Filtros de partículas y precipitadores electrostáticos para tratar partículas en el aire.
- Ultravioleta y filtros HEPA para microorganismos.
- Equipos de sorción, oxidación catalítica ultravioleta y oxidación con ozono para COVs.
- Plasma para ionización del aire.
- Plantas naturales en el interior, que permiten una purificación del aire por biofiltración.

En definitiva, esta sencilla ecuación conservativa establece las estrategias básicas que permiten mejorar la CAI.

### Marco normativo de eficiencia energética

Es perfectamente conocida la legislación Europea sobre eficiencia energética, en concreto la Directiva Europea de Eficiencia Energética en Edificios 2002/91, que ha sido transpuesta a España en los R.D. 47/2007 C.E.E.E. y 314/2006 RITE (Figura 3).

En el 2010 se aprobó la Directiva 2010/31, una refundición más restrictiva que la anterior, que debería haberse transpuesto a España antes del 9 de julio de 2012. Actualmente existe un borrador de Real Decreto, pendiente de aprobación. Esta nueva directiva establece prestaciones energéticas mínimas para los sistemas de ventilación, refrigeración y

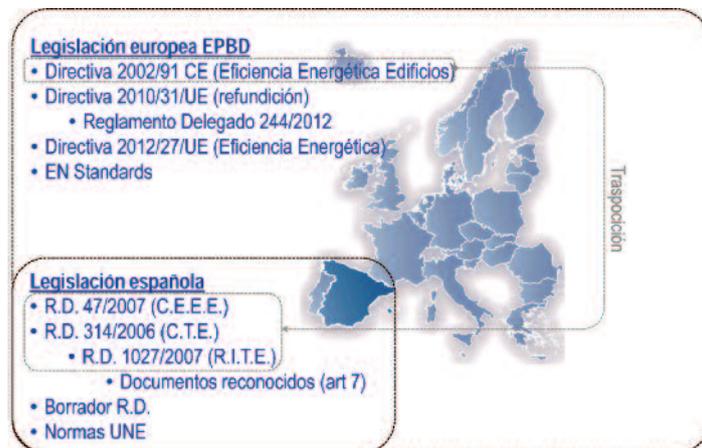


Figura 3. Marco normativo sobre eficiencia energética.

calefacción de los edificios, y establece que todos los nuevos edificios en la UE deben ser edificios de consumo energético casi cero en el 2020.

Debido a la desviación del objetivo de mejora de la eficiencia energética en la UE, respecto a los objetivos 20-20-20, en octubre de 2012 se aprobó la Directiva 2012/27 sobre eficiencia energética. Esta Directiva, que debería transponerse en España antes del 5 de junio de 2014 establece, entre otras directrices, la renovación anual del 3% de la superficie de edificios públicos.

Estas Directivas están soportadas por las normas europeas o EN standards que en España se editan por AENOR como normas UNE EN. En concreto, las normas EN que acompañan a la Directiva Europea de Eficiencia Energética en Edificios pueden verse en la figura 4, entre las que cabe destacar la norma UNE-EN 15251:2008 [Aenor, 2008].

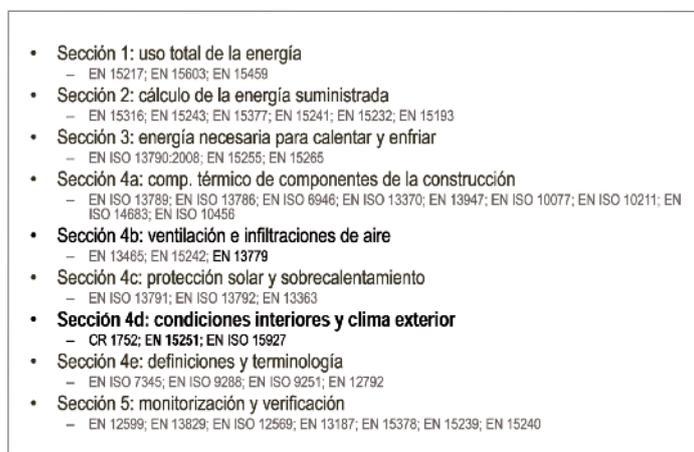


Figura 4. Normas relacionadas con la Directiva Europea de Eficiencia Energética en Edificios.



## Norma UNE-EN 15251:2008

La norma UNE-EN 15251:2008 [Aenor, 2008] establece los parámetros de aire interior para el diseño y evaluación de la eficiencia energética en edificios, incluyendo la calidad de aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido. La norma establece 4 categorías de ambiente interior, tabla 1, correspondiente a niveles alto o categoría I, nivel normal o categoría II, aceptable o categoría III y fuera de criterio o categoría IV.

Los requerimientos para cada categoría en los apartados de confort térmico, temperatura operativa y ventilación se resumen en la tabla 2. Obsérvese que los valores que se recogen corresponden también con los establecidos en la norma UNE-EN ISO 7730:2006, [AENOR, 2006] para confort térmico y en la norma UNE-EN 13779:2008 [Aenor, 2008], para ventilación. Se establece también para cada categoría, el incremento del nivel de CO<sub>2</sub> sobre el aire exterior. Por ejemplo, para una categoría II el límite se sitúa en 500 ppm de CO<sub>2</sub> por encima de la concentración del aire exterior.

La norma UNE-EN 13779:2008 [Aenor, 2008], establece distintos tipos de edificios, en función de las tasas de emisión de contaminantes: edificio no contaminado, edificio muy poco contaminado y edificio poco contaminado. En cada caso, se definen los caudales de aire de ventilación necesarios para mantener una determinada categoría de ambiente interior. La tabla 3 recoge los valores límites extraídos del Anexo informativo C de la norma para contaminantes orgánicos volátiles totales, formaldehído, amoníaco, compuestos carcinogénicos y material no oloroso, este último expresado en porcentaje de insatisfechos.

Categoría	Comentario
I	Alto nivel de expectativa, recomendado para espacios ocupados por personas débiles y sensibles con requisitos especiales, como disminuidos, enfermos, niños pequeños y ancianos
II	Nivel normal de expectativa; debería utilizarse para edificios nuevos y renovados
III	Aceptable y moderado nivel de expectativa; puede utilizarse en edificios existentes
IV	Valores fuera de los criterios anteriores. Esta categoría sólo debería aceptarse durante una parte limitada del año

Tabla 1. Categorías establecidas en la norma UNE-EN 15251:2008 [Aenor, 2008].

Categoría	Confort térmico		Rango de temperatura operativa		Ventilación CO <sub>2</sub> sobre ext. [ppm]
	PPD [%]	PMV [-]	Invierno 1 clo/1,2 met [°C]	Verano 0,5 clo/1,2 met [°C]	
I	<6	-0,2 < PMV < +0,2	21,0 ÷ 23,0	23,5 ÷ 25,5	350
II	<10	-0,5 < PMV < +0,5	20,0 ÷ 24,0	23,0 ÷ 26,0	500
III	<15	-0,7 < PMV < +0,7	19,0 ÷ 25,0	22,0 ÷ 27,0	800
IV	>15	PMV > +0,7	< 19,0 ÷ 25,0 <	< 22,0 ÷ 27,0 <	800 <

Tabla 2. Rangos para las diferentes categorías establecidas en la norma UNE EN 15251-2008 [Aenor, 2008].

Categoría		Edificio poco contaminado	Edificio muy poco contaminado
		TVOC	[mg/m <sup>2</sup> h]
Formaldehído	[mg/m <sup>2</sup> h]	< 0,05	<0,02
Amoníaco	[mg/m <sup>2</sup> h]	< 0,03	<0,01
IARC	[mg/m <sup>2</sup> h]	<0,005	<0,002
Material no oloroso	[%]	<15	<10

Tabla 3. Valores límite para edificios poco y muy poco contaminados, según el anexo informativo C de la norma UNE EN 15251-2008 [Aenor, 2008].

En el Anexo B.1.2 de la norma UNE-EN 15251 [Aenor, 2008] se establecen los caudales mínimos de ventilación para distintas categorías de ambiente interior, determinando los ratios por persona, R<sub>p</sub>, y por metro cuadrado, R<sub>a</sub>. En la tabla 4 se recogen los ratios que establece la norma UNE-EN



Tipo de edificio	Ocupación [personas/m <sup>2</sup> ]	Categoría	R <sub>p</sub> , caudal de ventilación mínimo por ocupante [l/s persona]		R <sub>a</sub> , caudal de ventilación adicional (añadir sólo uno) [l/s m <sup>2</sup> ]				Caudal total [l/s m <sup>2</sup> ]	
			Ashrae	UNE-EN	UNE-EN Edificio muy poco contaminado	UNE-EN Edificio poco contaminado	UNE-EN Edificio no contaminado	Ashrae	UNE-EN Edificio poco contaminado	Ashrae
Oficina	0,1	I		10	0,5	1,0	2,0		<b>2,0</b>	
		II	2,5	7	0,3	0,7	1,4	0,3	<b>1,4</b>	0,55
		III		4	0,2	0,4	0,8		<b>0,8</b>	
Aula	0,5	I		10	0,5	1,0	2,0		<b>6,0</b>	
		II	3,8	7	0,3	0,7	1,4	0,3	<b>4,2</b>	2,2
		III		4	0,2	0,4	0,8		<b>2,4</b>	

Tabla 4. Caudales de ventilación para distintas categorías de ambiente interior en el caso de oficinas y aulas, según la norma UNE EN 15251-2008 [Aenor, 2008] y la norma ASHRAE 62.1 [Ashrae, 2007].

15251:2008 [Aenor, 2008] y se comparan con los del estándar 62.1 de ASHRAE [Ashrae, 2007].

En el caso de una oficina en un edificio poco contaminado, se observa que los caudales de ventilación mínimos establecidos por la norma UNE-EN 15251:2008 [Aenor, 2008] son de 2, 1,4 y 0,8 l/s m<sup>2</sup> para cada las categorías de ambiente interior I, II y III respectivamente. También se observa que los requerimientos de ventilación de la UNE-EN 15251:2008 [Aenor, 2008] son superiores a los establecidos por el estándar de ASHRAE 62.1 [Ashrae, 2007].

El caudal de ventilación obtenido con la tabla anterior se refiere al caudal de aire en la zona de respiración, Q<sub>r</sub>, de la zona ocupada. El caudal de aire de impulsión, Q<sub>i</sub>, a impulsar al local se determina mediante la expresión:

$$Q_i = \frac{Q_r}{\varepsilon} \quad [2]$$

Por tanto, la eficiencia de ventilación, ε, afecta de forma significativa al caudal de aire de ventilación establecido por esta norma, independientemente de la categoría de edificio.

Los elevados caudales de aire resultantes en las categorías de ambiente interior establecidas en la norma UNE-EN 15251:2008 [Aenor, 2008], tienen una incidencia notable en los niveles de productividad en el trabajo debido a la mejora en la calidad

del ambiente interior. Sin embargo, los elevados caudales de aire pueden tener un impacto significativo en el consumo energético del edificio.

### Categorías de ambiente interior, productividad y consumo energético

#### Productividad

La categoría de ambiente interior afecta de forma notable a la productividad de los ocupantes. Distintos estudios [Berglund, 1990], [Seppänen, 2006] y [Lan, 2011], establecen una relación directa entre categorías de ambiente térmico y productividad en el trabajo.

Los resultados de productividad se expresan en porcentaje de caída del rendimiento de la actividad de los ocupantes respecto al 100%. Aunque los resultados varían de un estudio a otro se observa un mayor decremento del porcentaje de productividad al pasar de categoría de mayor nivel I a otras de menor nivel II, III o IV. Por ejemplo, los resultados del estudio de Seppänen [2006], indican que al pasar de categoría II a III se observa un decremento en productividad del 2,93 al 4,21 % en verano y de 0,98 a 1,84% en invierno.

#### Consumo energético

Las categorías de ambiente interior del edificio tienen un impacto significativo en el consumo energético del edificio. En el marco de un proyecto



de investigación europeo [Santamouris, 2009] se analizaron los requerimientos energéticos de la norma UNE-EN 15251:2008 [Aenor, 2008] en distintas tipologías de edificios, 7 residenciales, 7 escuelas, 6 hospitales, 7 oficinas y 1 restaurante, en distintos climas europeos, correspondientes a Portugal, Reino Unido, Italia, Austria y Grecia. En cada caso, se determinó la reducción del consumo energético para pasar de una categoría a la siguiente. Los resultados, de este estudio muestran que el cambio de categoría de ambiente interior, de III a II, conlleva un incremento medio del orden del 10% en la energía consumida para calefacción y un incremento energético medio del orden de un 20% para el caso de refrigeración. Resultados similares en el incremento del consumo energético se obtienen al pasar de categoría II a I tanto en invierno como en verano.

Estos resultados evidencian la necesidad de establecer estrategias para reducir el consumo energético debido a ventilación. Entre estas estrategias, el uso de ventilación controlada bajo demanda, VD, y las técnicas de enfriamiento gratuito, EG, pueden resultar especialmente útiles para reducir el incremento del consumo energético asociado a las diferentes categorías de ambiente interior de los edificios.

El impacto energético de las diferentes categorías de ambiente interior en tipologías de edificios unifamiliar, apartamento, oficina y escuela y en diferentes zonas climáticas europeas mediterráneo, atlántico y continental, ha sido estudiado recientemente [Santos, 2012]. En cada caso, se analizó el uso sistemas de ventilación tradicional o de sistemas de ventilación avanzados que emplean VD y EG. Los resultados de este estudio, tomando valores medios, indican que un cambio del 50% en el caudal de ventilación implica un cambio de entre el 20 y el 30% en el consumo energético del edificio en el caso de sistemas de ventilación tradicionales, mientras que el mismo cambio en el caudal de ventilación con sistemas de ventilación que empleen estrategias avanzadas, VD y EG, tiene un impacto de sólo un 10%, lo que introduce un elevado potencial de ahorro energético. Del estudio realizado, se extraen los siguientes valores medios:

- ▶ El cambio en el caudal de ventilación de 1 m<sup>3</sup>/(h persona) en edificios con sistemas tradicionales

Estrategia	Comentario
Control de fuentes de contaminantes	Reducción del caudal de aire exterior. Igual o mejor CAI.
Uso de purificadores de aire (partículas y gas)	Reducción del caudal de aire exterior. Igual o mejor CAI.
Sistemas dedicados de aire exterior	Potencial elevado para reducir caudal de aire exterior y mejorar CAI. Flexible para adaptarse a estrategias de refrigeración y calefacción.
Ajuste dinámico en sistemas VAV	Reducción de enfriamiento, más aire exterior. No adecuado con aire exterior de baja calidad o muy húmedo.
Incremento de eficiencia de ventilación	Reducción del caudal de aire exterior. Igual o mejor CAI. Ventilación por desplazamiento: no aplicable en todos los espacios.
Recuperación de energía	Mantiene los caudales de aire de ventilación. Obligatorio en estándares de eficiencia energética.
Enfriamiento gratuito	Elevado potencial, dependiendo de la zona climática.
Ventilación controlada bajo demanda	Permite reducir el caudal de ventilación con baja ocupación. Mantener ventilación base para fuentes distintas a ocupantes.
Otras	Filtrado eficiente; ventilación híbrida; estanqueidad del edificio; estanqueidad en conductos; operación y mantenimiento.

Tabla. 5. Resumen de las estrategias para integración de la calidad de aire interior y la eficiencia energética.

de ventilación tiene un impacto sobre el consumo energético anual del edificio de entre 0,2 a 0,6 [kWh/m<sup>2</sup> año]/[m<sup>3</sup>/(h persona)].

- ▶ El uso de estrategias avanzadas, como la VD y EG, en edificio con buena estanqueidad, 0,1 h-1, reducen el consumo energético a valores de entre 0,05 a 0,3 [kWh/m<sup>2</sup> año]/[m<sup>3</sup>/(h persona)].

Por tanto, el uso de estrategias combinadas de VD y EG en edificios de alta estanqueidad en climas europeos permite reducir el consumo energético de refrigeración y calefacción en un 50% en edificios residenciales y oficinas y en un 40% en el caso de escuelas.

### Estrategias para la integración de la eficiencia energética y la CAI

En un escenario europeo de edificios de consumo casi nulo, el impacto de las categorías de ambiente interior en el consumo energético del edificio hace necesario revisar y poner a punto estrategias de mejora de eficiencia energética para conseguir edificios con una elevada CAI. La tabla 5 recoge un resumen de algunas de las estrategias que permiten integrar la eficiencia energética y la CAI.

La elección y combinación de las estrategias adecuadas a cada caso, permitirá encontrar soluciones

que integren la eficiencia energética y la CAI, con una reducción de costes energéticos, en función de la categoría de ambiente interior del edificio.

## Referencias

- ▶ ASHRAE Position Document on indoor air quality, Ashrae, 2011.
- ▶ ASHRAE 62.1 (2007) Ventilation for acceptable indoor air quality, Atlanta, GA, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ▶ Berglund, L. G., Gonzales, R. R. and Gagge, A. P. 1990. Predicted human performance decrement from thermal discomfort and ET\*. Proceedings of the fifth international conference on indoor air quality and climate, Toronto, Canada, 215-220.
- ▶ Lan, L., Wargocki, P. and Lian, Z. W. Quantitative measurement of productivity loss due to thermal discomfort. Energy and Buildings, 2011, 43, 1057-1062.
- ▶ Santamouris M., Sfakianaki K. The energy impact of the EN 15251 comfort categories. Intelligent Energy Europe action, Contract No. EIE-07-190 COMMONCENSE, Comfort monitoring for CEN standard EN15251 linked to EPBD, 2009.
- ▶ Santos H., Leal, V.M.S. Energy vs. ventilation rate in buildings: a comprehensive scenario-based assessment in the European context. Energy and Buildings 2012, 54, 111–121.
- ▶ Seppänen, O. and Fisk W. J. Some quantitative relations between indoor environmental quality and work performance or health. International Journal of HVAC&R Research, 2006, 12(4), 957-973.
- ▶ UNE-EN 15251:2008. Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo la calidad del aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido.
- ▶ UNE-EN ISO 7730:2006. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local.
- ▶ UNE-EN 13779:2008. Ventilación de los edificios no residenciales. Requisitos de prestaciones de sistemas de ventilación y acondicionamiento de recintos..z

---

\*Este artículo corresponde a la ponencia realizada por el autor en la Jornada Técnica "Integración de la Eficiencia Energética y la Calidad de Aire Interior" organizada por el Spain Ashrae Chapter el 11-11-2012.