

ACONDICIONAMIENTO Y SOSTENIBILIDAD

3. Ahorro energético

O - F.3.3

PAUTAS PARA EL ESTUDIO DE LA EFICIENCIA DE VENTILACIÓN EN ABERTURAS DE ADMISIÓN DE VIVIENDAS

Feijó Muñoz, J.(1), Meiss, A.(1), Camino Olea, M.(1), Vega Amado, S. (1),
Daumal Domènech, F. (2), Díos Viéitez, M.J. (3), Acha Román, C. (4).*

(1) Dep. Construcciones Arquitectónicas, IT y MMC y TE, Universidad de Valladolid

(2) Dep. Construcciones Arquitectónicas, Universitat Politècnica de Catalunya

(3) Dep. Construccions Arquitectòniques, Universidade da Coruña

(4) Dep. Construcción y Tecnología Arquitectónicas, Universidad Politécnica de Madrid

() meiss@arq.uva.es*

Dentro del programa de investigación 'Optimización de las aberturas de admisión del CTE HS 3 Calidad del aire interior - OPABAD' se está trabajando en la influencia de las aberturas de admisión sobre la calidad del aire en las habitaciones a las que sirven. El estudio recoge las pautas en las cuales se desarrolla dicha investigación, en su doble vertiente, numérica y experimental.

En una primera fase se estudia la relación existente entre la ubicación de la admisión en el recinto y la eficiencia del tránsito del aire desde su entrada hasta su salida. Para esto se ha escogido una tipología de local que representa una cocina genérica que, según el modelo del CTE HS 3, se caracteriza no por su mobiliario específico, sino por contar con una admisión de aire procedente de la vivienda y una extracción hacia el exterior.

En el estudio numérico se ha aplicado un software CFD especializado en flujos de gases y el cálculo del concepto de edad del aire. Para la validación del modelo adoptado se ha realizado un exhaustivo procedimiento experimental en laboratorio con técnicas fotoacústicas de gases trazadores.

Validado el estudio CFD, se realizan múltiples variantes de diseño mediante el procedimiento numérico, con el objeto de estudiar el comportamiento de las aberturas de admisión en la ventilación controlada de viviendas y plantear las soluciones más eficientes. Esto significa, en su fin último, que se puedan reducir los caudales de renovación del aire, con el consiguiente ahorro energético.

Los resultados obtenidos han servido para aportar criterios de diseño arquitectónico en este tipo de locales, al objeto de mejorar la calidad de su aire interior. El trabajo desarrollado ha servido al mismo tiempo como investigación básica, puesto que una gran parte del esfuerzo realizado se ha dedicado a perfeccionar los procedimientos numéricos y experimentales, con la intención de que sirvieran para futuras investigaciones.

1. Antecedentes

La presente publicación forma parte del programa de investigación "*Optimización de las aberturas de admisión del CTE HS 3 Calidad del aire interior - OPABAD*" que se viene desarrollando en el Laboratorio de Acondicionamiento de la E.T.S. de Arquitectura de Valladolid, subvencionado por el Ministerio de Educación y Ciencia. En el proyecto anterior, "*Desarrollo de una metodología para la estimación de la eficiencia de la ventilación en locales residenciales – EFIVEN*" se han realizado estudios específicos sobre el documento básico HS-3 Calidad del aire interior del Código Técnico de la Edificación español.

2. Objetivos

Desde el punto de vista científico y como investigación básica, este trabajo pretende contribuir al perfeccionamiento y optimización de los métodos de ensayo experimental y numérico dentro de una habitación residencial convencional. Los primeros a través del sistema del estudio de las concentraciones de gases trazadores, que se actualmente se considera el procedimiento más sensible para evaluar velocidades del aire muy bajas. Los segundos mediante las grandes posibilidades de la simulación por software específico CFD basado en volúmenes finitos que, debiendo ser validados por los ensayos experimentales, dependen extraordinariamente de lo que podríamos llamar complejas y decisivas "condiciones de contorno".

Desde el punto de vista de la práctica arquitectónica el objetivo inmediato es estudiar el comportamiento de las aberturas de admisión en la ventilación controlada de viviendas y aportar al proyectista unos criterios de diseño que sirvan para elegir la mejor disposición de las entradas y salidas de aire de ventilación consiguiendo la máxima eficiencia de su caudal. Todo ello en una habitación tipo cocina, con un cierto tamaño convencional, que se caracteriza, no por su mobiliario específico, sino por contar con una admisión de aire procedente del resto de la vivienda y por una extracción hacia el exterior.

En cualquier caso el objetivo último es colaborar al ahorro energético a través de una hipotética reducción de los caudales de ventilación como consecuencia de una óptima eficiencia de la misma, fruto de un buen diseño arquitectónico.

3. Equipamiento y Proceso

Para conseguir los objetivos propuestos se necesitaron equipos y procesos diferenciados y complementarios entre el modelo el modelo numérico mediante software específico y el modelo experimental de laboratorio.

3.1. Modelo experimental

El modelo experimental se ha materializado dentro de una cámara de ensayos de 4,80 x 6,00 x 3,60 m (ancho, largo, alto), ejecutada con una estructura portante de perfiles de chapa plegada galvanizada, suelo de tablero de madera (DM) con pavimento de linóleo, paredes de placas de yeso laminado y vidrio de seguridad, y techo móvil de placa de yeso laminado con la mecanización correspondiente. En su interior se ha delimitado una subcámara de 3,50 x 4,60 x 2,50 m que reproduce la supuesta cocina a estudiar.

La admisión se realiza por abertura inferior en la virtual hoja de la puerta de acceso y la extracción por abertura fija en la parte superior de uno de los paramentos (acorde al HS3 del CTE). El proceso seguido y la instrumentación utilizada se resumen a continuación.

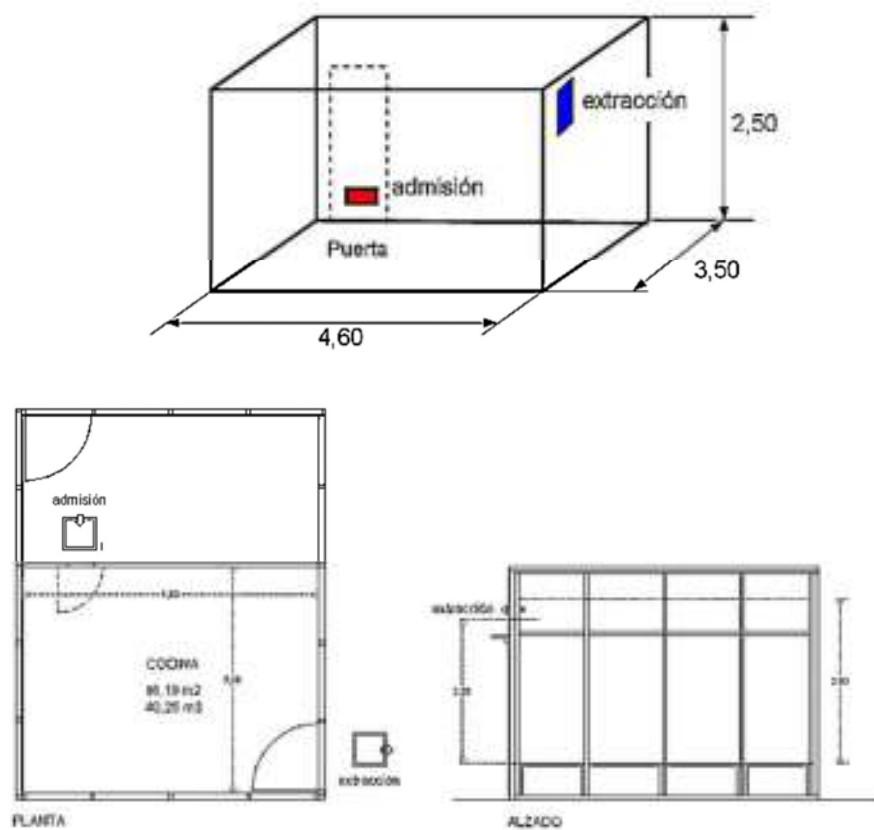


Figura 1. Axonometría, planta y alzados de la cámara



Figura 2 Cámara de ensayos

3.1.1. Medida de las edades del aire

Para medir las edades del aire se utilizó un equipo compuesto por un analizador de gases modelo 1302 de Brüel & Kjær, un dosificador-muestreador modelo 1303 de Innova y una botella de hexafluoruro de azufre SF₆ de 5 kg como gas trazador, gestionados por el software 7620 de Innova sobre un PC compatible Pentium 4 de 3,06 GHz con 2 Gb de RAM.

El método de medición utilizado es el de caída de concentración precedida de una fase de estabilización a concentración constante, ayudada por un ventilador independiente y giratorio dentro de la subcámara modelo BSH-PAE C_VT01 de 30 W que mantiene la mezcla gas trazador homogénea hasta que se alcanza la concentración deseada. La figura 6 muestra parte del equipo utilizado y la 7 la gráfica típica de la evolución de la caída de concentración del gas trazador, obtenida en uno de los múltiples ensayos realizados.

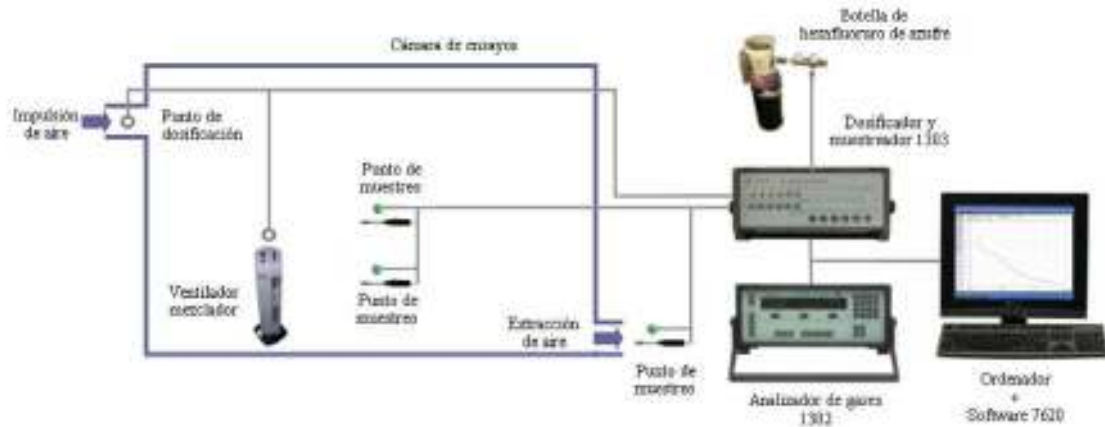


Figura 3. Equipo del ensayo con gas trazador

El caudal de extracción de 40 l/s se obtiene del mismo CTE al aplicar los 2 l/s.m² más una aportación fija por posible calentador o caldera de combustión atmosférica. Dicho caudal lo proporciona el mismo conjunto de ventilador, variador de frecuencia y equipo de control mencionados anteriormente, al que habría que añadir un segundo anemómetro para controlar también el caudal de la admisión.

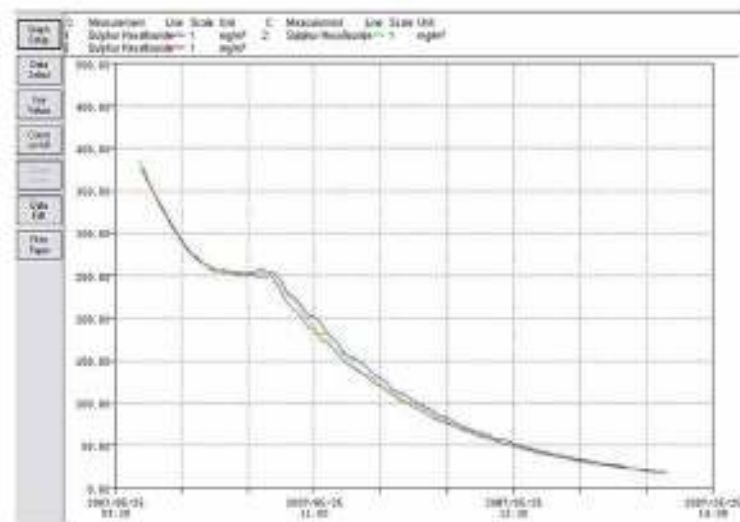


Figura 4. Gráfica de la caída de concentración del gas trazador

El paso de concentraciones de gas trazador a edades del aire se realiza a partir de la resolución de las ecuaciones (1) y (2). Estos valores, incluso con sus eficiencias, también los proporciona directamente del programa 7620 en su ventana gráfica de resultados.

Edad media puntual

$$\bar{\tau}_p = \int_0^{\infty} \frac{C_p(r_o, t)}{C(0)} d\tau \quad (1)$$

$$\text{Edad media de la habitación} \quad \langle \tau \rangle = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot C_e(t) dt}{\int_0^{\infty} C_e(t) dt} \quad (2)$$

Siendo:

$C_p(r_o, t)$ concentración de gas trazador en la coordenada r_o en el instante de tiempo t .

$C(0)$ concentración de gas trazador en el instante de tiempo 0, a partir de cuando se empieza a medir la caída de la concentración.

$C_e(t)$ concentración de gas trazador en la extracción.

τ_p edad media puntual del aire.

$\langle \tau \rangle$ edad media del aire de la habitación.

3.1.2. Puntos para la validación

Los puntos analizados experimentalmente son, además de el fijo de la salida, los nueve que aparecen en la planta y en la tabla adjunta, tomados a unas alturas de 100 y 200 cm sobre el pavimento y en la salida. El tamaño de las aberturas se ha dimensionado conforme al mínimo planteado por el HS-3, resultando 320 cm² (40x8 cm) para la admisión en la parte baja de la hoja de la puerta de la cocina y de 300 cm² (25x12 cm) para la extracción en la parte superior del paramento según plano adjunto.

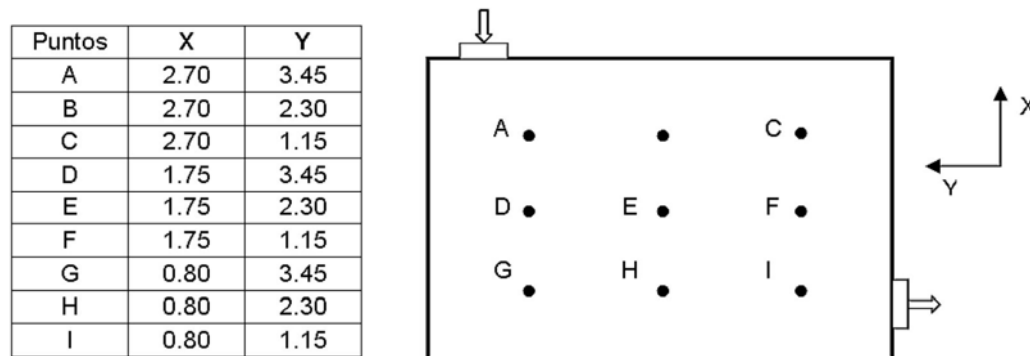


Figura 5. Localización de los puntos de validación.

3.1.3. Tolerancia de las edades del aire experimentales

A la vista de los datos de los últimos cuarenta muestreos realizados sobre los nueve puntos de análisis más el de la salida, es decir, con una repetición cuádruple en las mismas condiciones ambientales, se ha constatado que de dispersión o tolerancia de los resultados de las edades del aire fluctúan en $\pm 3,5\%$, valor que denota un error máximo del 7% que se considera bastante satisfactorio para pruebas experimentales de estas características.

3.2. Modelo numérico

El modelo numérico se ha realizado con el programa Airpak 3.0.16 de Ansys (Fluent) que es un software CFD especializado en fluidos gaseosos, que se basa en la resolución de las ecuaciones matemáticas en derivadas parciales que describen el flujo del aire (las ecuaciones de Navier-Stokes). Se ha instalado en un PC Pentium a 3 GHz con 4 Gb de RAM, y se han impuesto las siguientes condiciones de cálculo:

- Dado que se trata de un aire procedente de otras habitaciones de la vivienda se supone que es un proceso isotermo.
- En las aberturas de admisión y extracción se presupone que el desplazamiento del aire es perpendicular al plano de las mismas, con velocidad uniforme y cuyo valor es el obtenido según el caudal impuesto por la norma.
- La discretización del espacio se ha realizado con tres densidades distintas en el mallado, con dimensiones máximas de las celdas de 10, 5 y 4 cm respectivamente.
- El número de iteraciones se ha basado en alcanzar el criterio de convergencia.

El modelo de turbulencia utilizado ha sido el *Indoor Zero Equation* por ser el que proporcionaba unas imágenes de las trayectorias del flujo de aire más ajustadas a las obtenidas realmente en la subcámara mediante la inyección de humos en el caudal de admisión. La máquina de humos utilizada para esta experiencia ha sido el modelo Fz-1200 con una potencia de 1,2 kW.

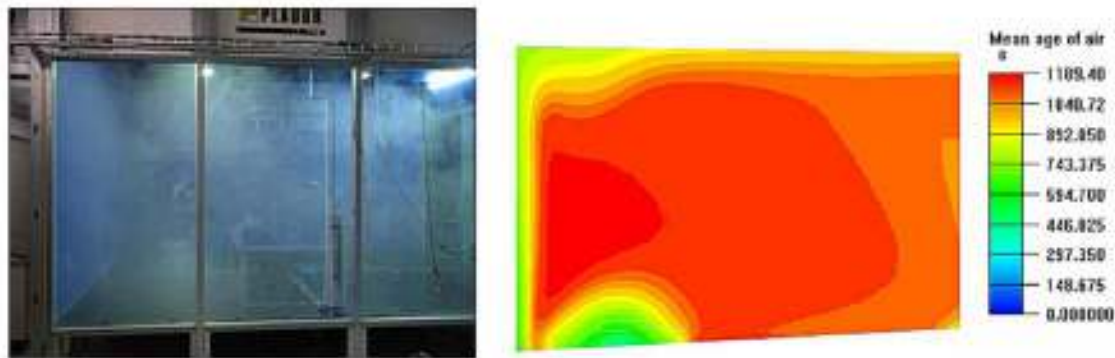


Figura 6. Vista del desplazamiento de los humos y su representación de edades

3.2.1. Tolerancia de las edades del aire numéricas

Como el programa Airpak permite definir el tamaño del mallado, es decir, la densidad de puntos de cálculo, es conveniente comprobar su incidencia en los resultados. En principio se constata que una mayor resolución y por tanto un mayor número de puntos a calcular, no es sinónimo de mayor exactitud en las eficiencias globales, si se compara con los valores experimentales que tomamos como patrón. Los cálculos realizados con los tres tipos de mallado ofrecen una tolerancia de $\pm 1\%$, o dicho de otro modo, el error máximo obtenido en las eficiencias de ventilación numéricas no sobrepasan el 2% de error, lo cual se puede considerar bastante satisfactorio.

3.2.2. Cálculo de las eficiencias de la ventilación

Las eficiencias de la ventilación las vamos a obtener como cociente de la edad media del aire en la extracción entre el doble de la edad media del aire de la habitación, es decir, tomando como eficiencia ideal o del 100% la del modelo llamado pistón:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\tau_e}{2 \cdot \langle \tau \rangle} \times 100(\%) \quad (3)$$

siendo:

$\langle \varepsilon \rangle$ eficiencia de la ventilación del recinto

$\langle \tau \rangle$ edad media del aire de la habitación

τ_e edad media del aire en la extracción

4. Resultados

4.1. Validación del modelo numérico

Los resultados más trascendentales por condicionar el resto de la investigación, son los comparativos entre las edades experimentales y numéricas obtenidas de los nueve puntos elegidos.

Para ello se confecciona la Figura 07 en la que el eje de abscisas representa la posición de cada uno de los puntos y en el eje de ordenadas se representa la edad media local en cada uno de los puntos de medida. Todos ellos adimensionalizados con la edad a la salida para eliminar los errores sistemáticos del propio aparato de medida y la influencia de las variaciones del caudal debidas a las condiciones ambientales.

Como se puede observar para mayor certeza, se ha realizado el cálculo con tres alternativas de resolución de mallado correspondientes a 4, 5 y 10 cm respectivamente, ofreciendo resultados muy similares.

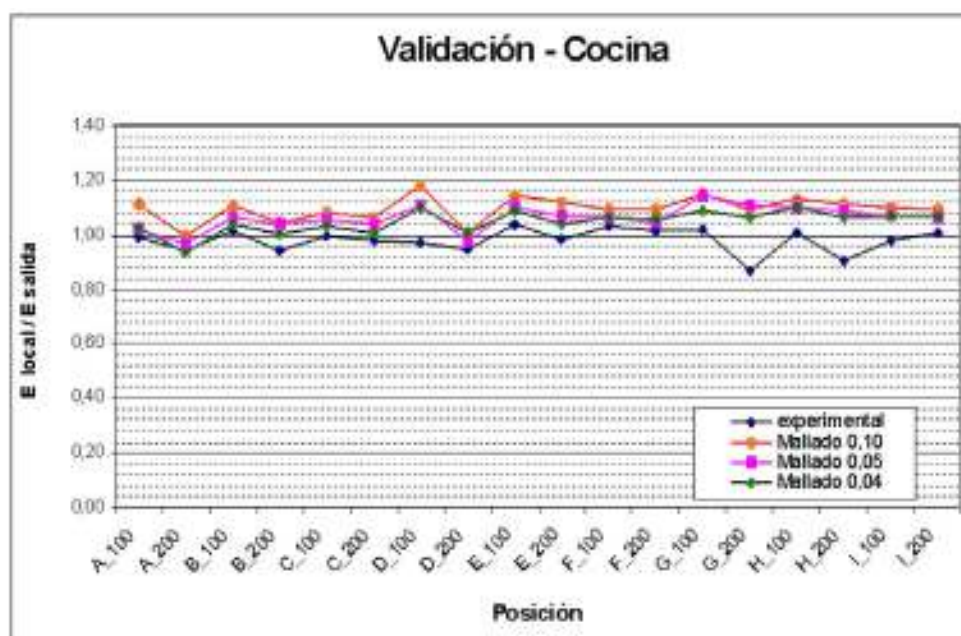


Figura 7. Gráfico comparativo de resultados experimentales y numéricos adimensionalizados

La validación de los resultados numéricos mediante los datos experimentales nos permite aceptar como buena la hipótesis de turbulencia adoptada, lo que facilita la realización de múltiples variaciones sobre el modelo original para estudiar otras alternativas de diseño.

4.2. Eficiencias numéricas alternativas

En una primera fase del trabajo numérico se han estudiado diez variantes, correspondientes a otros tantos emplazamientos de la abertura de extracción en las distintas paredes del recinto, con la admisión siempre fija en la parte baja de la puerta. El primer caso estudiado ha sido lógicamente el real de la cámara que nos ha servido para validar los resultados que ahora se exponen. En dicho caso se ha obtenido con los datos experimentales una eficiencia del 49,53% que redunda en lo acertado del modelo numérico con el que se ha obtenido un 49,54% en ese mismo concepto. En la tabla siguiente se pormenorizan las edades y las eficiencias de los casos propuestos.

Situación	Edad media salida (s)	Edad media del local (s)	Eficiencia
Caso 01	998,54	1007,82	49,54%
Caso 02	1002,94	1001,85	50,05%
Caso 03	1004,50	1002,04	50,12%
Caso 04	989,59	1011,48	48,92%
Caso 05	1009,93	1070,93	47,15%
Caso 06	982,39	1033,63	47,52%
Caso 07	1006,36	1019,58	49,35%
Caso 08	984,28	1145,10	42,98%
Caso 09	993,78	1175,23	42,28%
Caso 10	1001,25	1013,99	49,37%

Tabla 1. Eficiencias con admisión en el rincón del paramento largo

Con los resultados obtenidos y pensando fundamentalmente en las aplicaciones prácticas, se clasifican las eficiencias en cuatro grupos según sus valores: el primero es el menos eficiente y comprende valores iguales o menores de 0,45 tendentes al modelo de cortocircuito; el segundo es para mayores de 0,45 y menores o iguales a 0,50 como eficacia media que se puede considerar próxima al modelo de mezcla perfecta; el tercero para valores iguales o mayores de 0,50 como los más eficientes en la práctica tendientes al modelo de desplazamiento; y el cuarto y último para valores superiores a 0,60 muy difíciles de conseguir en espacios convencionales y tendentes al modelo teórico de flujo pistón.

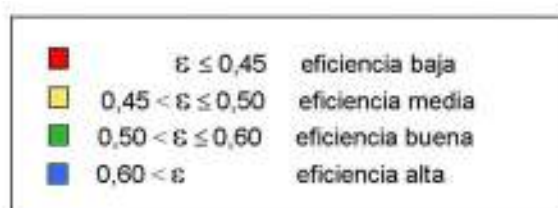


Figura 8. Clasificación de la eficiencia

Con una planta muy esquemática y la clasificación mencionada se puede representar la repercusión de la ubicación de la abertura de extracción en el recinto, para los casos que nos ocupan. Repercusión que tiene una traducción fácilmente interpretable para aplicar en el diseño arquitectónico.

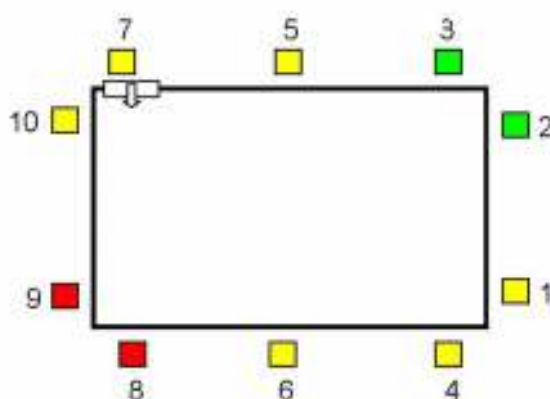


Figura 9. Esquema de eficiencias con admisión en el rincón del paramento largo

Para completar el estudio de la cocina propuesta se han calculado las eficiencias alternando el emplazamiento de la admisión en las tres ubicaciones posibles de la planta, cada una a su vez con cada una de las diez posibles extracciones. De modo que se pueden cubrir todas las posibilidades con un total de cuarenta variantes, que se obtienen de aplicar los diez casos de

extracción a cada uno de los cuatro emplazamientos de la admisión, ya que el resto de opciones son meras simetrías de los anteriores.

<i>Situación</i>	<i>Edad media salida (s)</i>	<i>Edad media del local (s)</i>	<i>Eficiencia</i>
Casos 01 y 09	990,60	996,73	49,69%
Casos 02 y 10	1010,49	997,05	50,67%
Casos 03 y 07	1008,94	992,81	50,81%
Casos 04 y 08	986,41	1012,99	48,69%
Caso 05	1013,99	983,46	51,55%
Caso 06	965,28	1030,03	46,86%

Tabla 2. Eficiencias con admisión en el centro del paramento largo

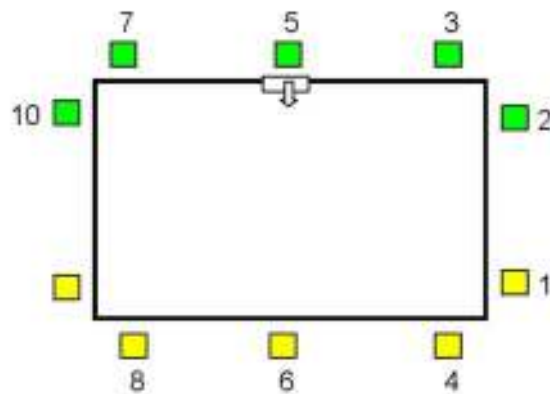


Figura 10. Esquema de eficiencias con admisión en el centro del paramento largo

<i>Situación</i>	<i>Edad media salida (s)</i>	<i>Edad media del local (s)</i>	<i>Eficiencia</i>
Caso 01	1004,77	941,53	53,36%
Caso 02	1005,16	904,06	55,59%
Caso 03	1004,45	931,26	53,93%
Caso 04	1007,55	987,37	51,02%
Caso 05	996,87	974,88	51,13%
Caso 06	1004,51	1008,29	49,81%
Caso 07	996,71	1083,30	46,00%
Caso 08	999,70	1014,13	49,29%
Caso 09	995,07	1036,65	47,99%
Caso 10	990,21	1077,53	45,95%

Tabla 03. Eficiencias con admisión en el rincón del paramento corto

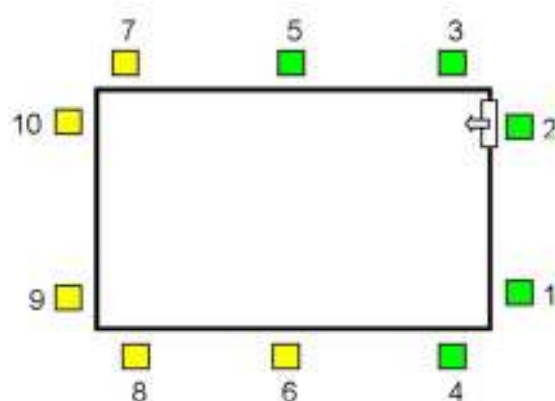


Figura 11. Esquema de eficiencias con admisión en el rincón del paramento corto

Situación	Edad media salida (s)	Edad media del local (s)	Eficiencia
Casos 01 y 02	1007,29	948,57	53,10%
Casos 03 y 04	1006,62	952,53	52,84%
Casos 05 y 06	1001,77	1027,56	48,75%
Casos 07 y 08	998,28	1055,38	47,29%
Casos 09 y 10	991,61	1081,72	45,83%

Tabla 04. Eficiencias con admisión en el centro del paramento corto

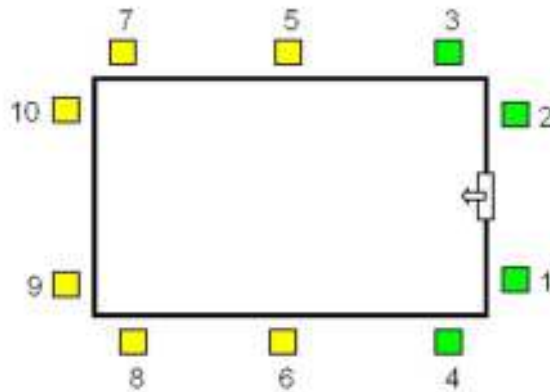


Figura 12. Esquema de eficiencias con admisión en el centro del paramento corto

A continuación se plasman las representaciones gráficas axonométricas más significativas, con las trayectorias de los flujos obtenidos y sus respectivas velocidades en m/s. Las diferencias entre ellas se traducen en variaciones de sus eficiencias.

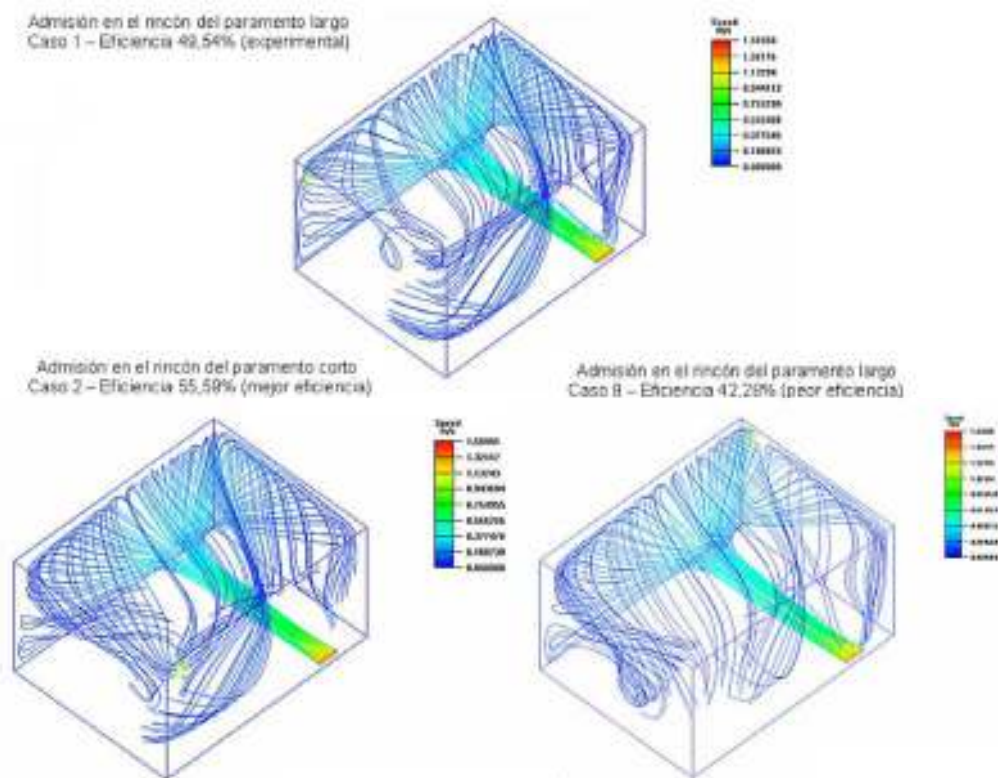


Figura 13. Patrones de flujo del aire en los casos de estudio más significativos.

5. Conclusiones

A la vista del proceso y de sus resultados se podrían diferenciar dos tipos de conclusiones: las de procedimiento o de investigación básica, y las de aplicación práctica en el diseño arquitectónico.

Dentro del grupo de conclusiones de procedimiento o investigación básica:

- Se ha conseguido mejorar el procedimiento de los ensayos experimentales en la cámara mediante protocolos basados en el método de caída de la concentración del gas trazador.

El proceso hace hincapié en alcanzar una fase de estabilización de la concentración uniforme (al menos treinta minutos) del gas trazador contenido en el recinto, previo a la interrupción del suministro de gas y el comienzo de la medición. Esto se consigue mediante la programación conjunta del analizador y el dosificador-muestreador de gases.

La medición se realiza durante un lapso de tiempo lo suficientemente largo que permita asegurar que se está dentro de la fase de caída exponencial de la concentración, para que se alcancen unos valores finales bajos que minimicen los márgenes de error en los cálculos de la edad del aire. Se procede a completar dicho valor, añadiendo mediante cálculo analítico, la edad del área no medida de la parábola.

- Se ha llegado a acotar de la tolerancia de los resultados experimentales en unos márgenes muy bajos, del orden del $\pm 3,5\%$.

Mediante el monitorizado constante de las condiciones de contorno actuantes durante el ensayo (caudales de aire en las aberturas, temperatura, humedad, presión), se procede a sincronizar el instrumental de manera que reaccione inmediatamente y reajuste cualquier cambio que pudiera variar las condiciones de las mismas.

Se ha estudiado la influencia de las distintas concentraciones de gas trazador en los márgenes de tolerancia de los resultados, determinándose una concentración de trabajo que minimiza al mínimo dichos valores.

- Se han perfeccionado los resultados numéricos a través del estudio del modelo de turbulencia, con la selección del más apropiado tras una doble validación experimental: la comparación con los resultados obtenidos en los puntos de medida de la edad del aire y la analogía con el modelo de flujo registrado en la cámara por el uso de una máquina de humos.
- Se ha acotado la tolerancia o error de resultados numéricos a márgenes muy estrechos, estudiando distintas discretizaciones del modelo y tratando de alcanzar un equilibrio entre éstas y el costo computacional que requería su cálculo.

Dentro del grupo de conclusiones de aplicación al diseño arquitectónico:

- Globalmente llama la atención el estrecho margen de eficiencias obtenido: entre el 42,28 y el 55,99%, que aproximadamente es un 13,7% de variación. Esto indica que con todas las combinaciones que posibilitan las aberturas convencionales no se producen excesivas diferencias y que en la mejor de las disposiciones no se alcanzan eficiencias altas.
- Los esquemas revelan situaciones indeseables de flujo en cortocircuito. También desechan claramente erróneas concepciones cuando se piensa que la mejor ventilación se consigue enfrentando las aberturas de admisión con las de extracción.
- En todo caso los esquemas planteados se constituyen como una poderosa herramienta que transmite al proyectista unos criterios de aplicación inmediata.

Por último, este trabajo anima a seguir estudiando para proponer nuevas soluciones que mejoren las eficiencias y seguir profundizando en los métodos para minimizar los márgenes de error.

6. Referencias

- AN AMERICAN NATIONAL STANDARD ASTM E 741-00. 2006. *Standard test method for determining air change in a single zone by means of a tracer gas dilution*.
- BARTAK, M; CERMAK, M; CLARKE, J.A; DENEV, J; DRKAL, F; LAIN, M; MACDONALD, I.A; MAJER, M; STANKOV, P. Experimental and Numerical Study of Local Mean Age of Air. *Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil*. 2001.
- ETHERIDGE, D; SANDBERG, M. *Building ventilation. Theory and Measurement*. Chichester: John Wiley & Sons, 1996. ISBN 0-471-96097-X.
- FEIJO, J; CAMINO-OLEA, M; MEISS, A. Hybrid ventilation tests in houses following the Spanish Technical Building Code (CTE). REHVA World Congress. *Clima 2007 WellBeing Indoors, Helsinki, Finland, 10-14 June 2007*. Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors, 2007. p. 288.
- GONZÁLEZ-GARCÍA, MJ; GONZÁLEZ-SÁIZ, A; DE LA FUENTE, B; MORILLA-GRASA, A; MAYO-ISCAR, A; SAN-JOSE, J; FEIJO, J; STERN, ME; CALONGE, M. Exposure to a controlled adverse environment impairs the ocular surface of subjects with minimally symptomatic dry eye. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 2007, 48 (9), p. 4026-4032.
- INSTITUTT FOR ENERGI- OG PROSESSTEKNIKK. Energy and Indoor Environment Laboratory. *Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet NTNU*.
- JUNG, A; ZELLER, M. 1994. Analysis and testing of methods to determine indoor air quality and air change effectiveness. *Rheinisch-Westfälische Technical University of Aachen. Germany*.
- LI, X; WANG, X; LI, X; LI, Y. Investigation on the Relationship Between Flow Pattern and Air Age. *Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China*.
- LIA, X; LIA, D; YANGB, X; YANGA, J. 2003. Total air age: an extension of the air age concept. *Department of Building Science, School of Architecture, Tsinghua University, Beijing, China; Department of Civil, Architectural, Environmental Engineering, University of Miami, Coral Gables, USA*.
- MARCHAL, D. 1999. Influence des conditions de fonctionnement d'un système de ventilation sur son efficacité. *Centre de techniques des industries aerauliques et thermiques (CETIAT), 69603 Villeurbanne, Cedex, France*.
- McWILLIAMS, J. 2002. Review of Airflow Measurement Techniques. *Energy Performance of Buildings Group, Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA*.
- METER, W; GRIEVE, M.S. 1991. Ventilation measurements and other tracer-gas applications. *Brüel & Kjaer, Denmark*.
- MINISTERIO DE VIVIENDA. 2005. *Código Técnico de la Edificación, Documento Básico HS3 Calidad del Aire Interior*.
- NIELSEN, PV; HYLDGÅRD, CE. Laboratories – Indoor Environmental Engineering. *Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark*. 2002.
- ROOS, A. 1999. On the effectiveness of ventilation. *Thesis Technische Universiteit Eindhoven*.
- SANDBERG, M. What is ventilation efficiency?. *Building and Environment*. 1981, Vol.16, Nº 2, p. 123-135.
- SANTAMOURIS, M; WOUTERS, P. 2006. Building ventilation – The state of the art. *AIVC – Air Infiltration and Ventilation Centre. Sint-Stevens-Woluwe, Belgium*.
- TAYLOR, CJ. Environmental test chamber for the support of learning and teaching in intelligent control. *International Journal of Electrical Engineering Education*. 2004.