

DETERMINACIÓN DE LA EFICACIA DE VENTILACIÓN EN LOCALES RESIDENCIALES

Beatriz. de la Fuente Casado⁽¹⁾, beatriz@cf1.eis.uva.es

(1) Dpto. Ingeniería Energética y Fluidomecánica, E.T.S. de Ingenieros Industriales.
Universidad de Valladolid. Paseo del Cauce s/n, 47011 Valladolid.

Julio. San José Alonso⁽¹⁾, julsan@eis.uva.es

Francisco Castro Ruiz⁽¹⁾, castro@eis.uva.es

José Manuel Villafruela Espina⁽¹⁾, manolo@eis.uva.es

Jesús Feijó Muñoz⁽²⁾, feijo@modulor.arq.uva.es

(1) Dpto. Ingeniería Energética y Fluidomecánica, E.T.S. de Ingenieros Industriales.

(2) Dpto. de Ingeniería de Estructuras, Ingeniería del Terreno y Edificación.

Resumen: Ventilación es el proceso que permite sustituir el aire ambiente interior de un local, aire viciado, suministrando aire fresco, ya sea por medios naturales o mecánicos. Sin tener en cuenta si el aire suministrado se difunde por todo el recinto o si desplaza los contaminantes presentes en todo el local. Para evaluar la calidad de la ventilación se utiliza el concepto de la eficacia de la ventilación, parámetro complicado de cuantificar, debido a la gran cantidad de parámetros de los que depende.

Se pretende crear una herramienta capaz de determinar la eficacia de la ventilación en locales residenciales. Esto se consigue introduciendo el concepto de la edad media local del aire, conociendo si la difusión del aire se produce correctamente, independientemente del número de renovaciones hora, cuyo valor es especificado por normativa.

Se ha creado un modelo, mediante un código numérico CFD que calcula la edad del aire, simulando ventilación natural en un recinto determinado. A continuación, se realizan los experimentos en una cámara, de iguales dimensiones que la del modelo simulado, y mediante técnicas de gases trazadores y espectroscopía fotoacústica se obtiene la edad del aire en los puntos más representativos. Permite de esta manera validar los resultados obtenidos numéricamente.

Palabras clave: Edad del aire, Eficacia, Ventilación, Gases trazadores.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, en los países industrializados, las personas viven en grandes núcleos de población, donde pasan gran parte del día en espacios cerrados, soportando concentraciones de contaminantes superiores a las concentraciones que contiene el aire exterior. Este problema se agrava con la disminución de los caudales de ventilación a medida que se incrementa la hermeticidad de los edificios, buscando una disminución de consumo de energía empleado en climatización

De aquí la gran importancia que tiene la ventilación en edificios. Es un factor determinante para obtener una Calidad de Ambiente Interior adecuada. En ventilación no existe una norma admitida internacionalmente y aún existen multitud de investigadores trabajando en diferentes aspectos de la ventilación [Solé Gómez y Pérez Nicolás, 1998].

La ventilación es el mecanismo por el cual aportamos aire limpio a un recinto, consiguiendo diluir los contaminantes incidentes en el recinto y extraer parte del aire del recinto. Sin embargo, cuantificar el caudal de aire limpio que se debe introducir para lograr una Calidad de aire Interior adecuada, es complicado debido a que intervienen muchos factores, tales como la contaminación incidente, la filtración de los caudales de aire controlados, la cantidad de flujos de aire que intervienen en el proceso, el equipo de ventilación que se instale en el recinto, el tipo de difusión que se emplee, el mobiliario, etc. Para evaluar la calidad o bondad de la ventilación se utiliza el concepto de la eficacia. La eficacia de la ventilación es complicada de cuantificar y determinar, debido a la gran cantidad de factores de los que depende.

2. EFICACIA DE LA VENTILACIÓN

La eficacia de ventilación representa la bondad del sistema de ventilación del recinto. El valor de la eficacia del sistema de ventilación es diferente para cada recinto en función de su geometría, mobiliario interior, configuración del sistema de impulsión y retorno, condiciones higrométricas del aire, temperatura (verano, invierno), etc. La eficacia de ventilación se define utilizando varios conceptos, que dan formas diferentes de expresarla.

1) La Norma UNE [1995] define la eficacia de ventilación como en la prenorma europea [1996]. Utilizando el concepto de concentración de contaminante, definiendo la eficacia de ventilación como una relación entre las concentraciones de una sustancia en un recinto: donde: ε_v eficacia de ventilación.

$$\varepsilon_v = \frac{C_e - C_i}{C_z - C_i} \quad (1)$$

C_e concentración de una sustancia contaminante en el aire de extracción ppm.

C_i concentración de una sustancia contaminante en el aire de impulsión ppm.

C_z concentración de una sustancia contaminante en la zona ocupada ppm.

Las Nuevas Directrices Europeas Sobre Necesidades de Ventilación en Edificios, establece los valores de la eficacia de ventilación, en función de la posición de la entrada y salida de aire y la diferencia de temperatura ΔT entre el aire de entrada y salida.

2) La norma americana ANSI/ASHRAE 62 [1990], considera la eficacia de ventilación como un factor de derivación del aire que se impulsa en la zona ocupada, equivalente a un factor de by-pass del aire impulsado, de forma que, cuando $\varepsilon = 1$ no hay by-pass y todo el aire se difunde en el recinto.

La figura 1 representa cómo influye en un sistema con recirculación de aire y se introducen nuevos conceptos como el concepto de eficacia de utilización del aire exterior

$$\text{Eficacia de utilización del aire exterior} = \frac{\varepsilon}{1 - R \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (2)$$

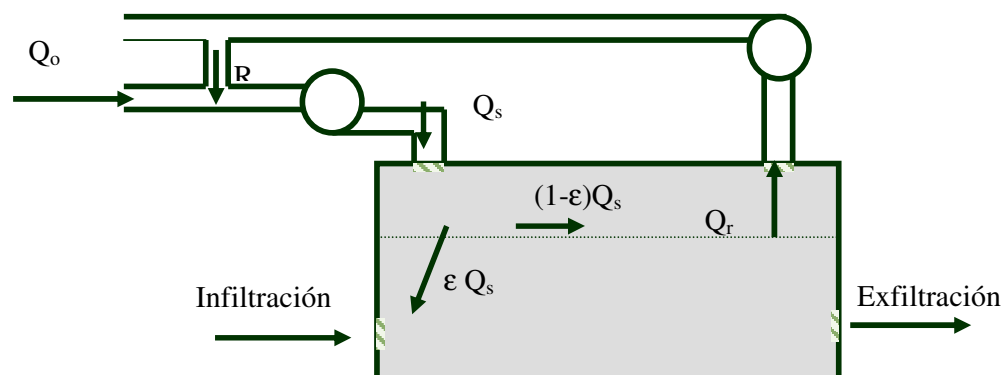


Figura 1: Eficacia de utilización del aire exterior en función de la eficacia del sistema de ventilación y la recirculación de aire.

3) Por último, la eficacia de ventilación se puede definir en función del concepto de edad media del aire [Etheridge y Sandberg, 1996]. La edad media del aire se puede calcular para todo el recinto y se habla de la edad media de la habitación o para un punto del recinto y entonces se habla de la edad media local.

La edad media local representa el tiempo medio de permanencia del aire en el recinto antes de pasar por el punto en consideración y la edad media de la habitación representa el valor medio de todas las edades medias locales.

La eficacia ventilación de un recinto se define como [Meter y Grieve, 1996]:

$$\varepsilon = \frac{\text{La edad del aire media local en la extracción}}{2 \times \text{La edad media de la habitación}} \quad (3)$$

Esta definición de la eficacia del intercambio de aire fue introducida por Skaaret y Matisen [1985] Otros autores la llaman de otra forma o modifican la expresión, como por ejemplo, Persily et Al. [1993], prescinde del factor 2, del denominador de la ecuación, Sandberg and Sjöberg [1993] la renombra como la eficiencia de la difusión del aire.

Las tres ecuaciones representan conceptos similares, incluso el valor numérico coincide cuando se supone: a) una generación de contaminante uniforme en la sala, función del tiempo y b) que el aire de impulsión diluye el contaminante generado en la sala.

Los tres conceptos de eficacia que se han desarrollado son comparables y cada uno de ellos presenta alguna ventaja e inconveniente con respecto a los otros conceptos. Así el concepto de eficacia como coeficiente de by-pass, es sencillo de utilizar para cuantificar caudal de aire a impulsar en el sistema, pero es difícil de evaluar. El concepto de eficacia como evolución de la concentración es simple para casos donde el límite se impone por riesgos para la salud y contaminante químico concreto, pero es muy complicado para confort. Por último el concepto de eficacia a partir de la edad del aire es el menos intuitivo, pero es sin duda alguna el mejor método de evaluación de la eficacia de ventilación de un recinto numéricamente.

3. EDAD DEL AIRE

3.1 Concepto

Se define la edad de una partícula de aire en una habitación como el periodo de tiempo que la partícula del aire ha permanecido en dicho recinto [Etheridge y Sandberg, 1996] y se representa por “ τ ”.

Esta caracterización del flujo en términos de edad o de tiempo de permanencia, permite un tratamiento elegante y unificado de sistemas de flujo continuo, que es independiente del mecanismo de mezcla.

Esta forma de caracterizar el flujo es conveniente para ser utilizado en el flujo de ventilación en habitaciones. Se puede con la ayuda de esto conceptos dar una definición precisa del tiempo que tarda en renovarse el aire presente en un local. Otra ventaja de utilizar el concepto de la edad del aire en la ventilación es que permite conocer el estado de mezcla de aire “viejo” y “joven” y de contaminantes.

El aire “más joven” se encuentra en el lugar por donde el aire exterior entra en la habitación, el “más viejo” se puede encontrar en cualquier otro punto de la habitación, no necesariamente en la salida.

La edad del aire se puede considerar desde dos escalas diferentes, como la edad del aire media local o como la edad del aire media de la habitación.

La edad media del aire local se refiere a la edad del aire media en un punto individual localizado, de esta forma, se pueden localizar áreas de aire estancado, se puede valorar, por ejemplo, el suministro de aire de ventilación a la altura de las cabezas de los individuos

en sus puestos de trabajo. Se utiliza para valorar la ventilación de puestos individuales, o la distribución de aire en edificios ventilados naturalmente.

La edad media del aire de la habitación es un parámetro que cuantifica el rendimiento de un sistema de ventilación. Este parámetro permite conocer la cantidad de aire de ventilación suministrado a la habitación y la eficacia con la que se distribuye el aire por la habitación [Meter y Grieve, 1992].

3.2 Determinación de la edad del aire

Algunos autores [Ross, 1999] definen unas poblaciones de aire para facilitar la definición de la edad del aire. Estas poblaciones incluyen el conjunto de moléculas que constituyen la habitación.

De tal forma que la edad del aire de una población está definida como la media aritmética de la edad de las moléculas que componen la población. Se define por la función de distribución acumulativa de la edad $\Phi(\tau)$ o igualmente por su función de distribución de frecuencia de edad $\phi(\tau)$, fig. 2 y 3.

$$\Phi(\tau) = \int_0^{\tau} \phi(\tau) d\tau \quad \text{o} \quad \phi(\tau) = \frac{d\Phi}{d\tau} \quad (4)$$

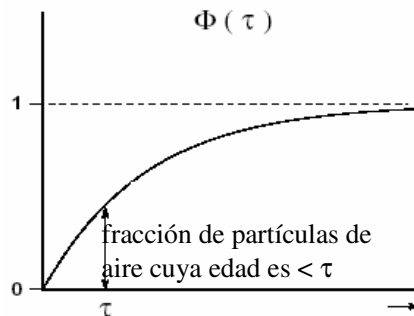


Figura 2. Función de distribución acumulativa, $\Phi(\tau)$.

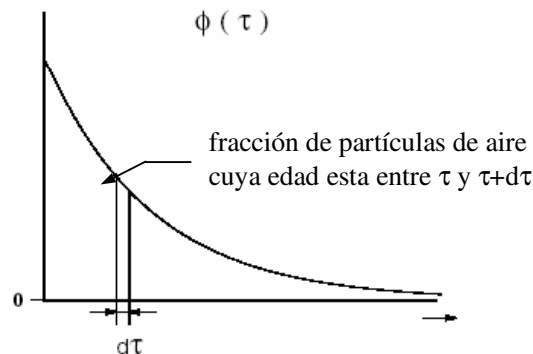


Figura 3. Función de distribución de frecuencia, $\phi(\tau)$.

3.3 Ecuación de transporte para la edad media local del aire en un modelo de flujo

Un modelo de flujo de aire estacionario, en una habitación ventilada está caracterizado por un cierto campo de velocidad de aire $u(r)$ y una cierta distribución espacial de coeficiente

de difusión $D(r)$, siendo una difusión efectiva constante, que contiene los efectos de turbulencia en la mezcla del aire.

Al considerar un modelo de flujo en una habitación ventilada. La función de distribución acumulativa de la edad del aire en cualquier coordenada espacial se denota como $\Phi(r, \tau)$. El balance o la conservación de la ecuación para $\Phi(r, \tau)$ es matemáticamente análogo a toda ecuación de conservación, que toma la forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V'} \Phi dV + \iint_S \Phi \cdot \bar{u} \cdot \bar{n} \cdot dS = \iint_S D \cdot \nabla \Phi \cdot \bar{n} \cdot dS - \iiint_{V'} \phi \cdot dV \quad (5)$$

En este balance, el primer término representa el término transitorio.

El segundo término representa la tasa de flujo neto de aire entrante de edad $\leq \tau$, debido a convección.

El tercer término, representa la tasa de flujo neto de aire entrante neto de edad $\leq \tau$, debido a difusión.

Por último, el cuarto término, representa el flujo neto de aire que envejece.

Las integrales de superficie al ser una superficie cerrada, aplicando el teorema de Gauss se transforman en integrales de volumen. Entonces:

$$\iiint_{V'} \left[\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u} \cdot \Phi - D \cdot \nabla \Phi) + \phi \right] dV = 0 \quad (6)$$

La integración de la ec (6) se realiza para un volumen V' diferencial, lo que permite suponer:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u} \cdot \Phi - D \cdot \nabla \Phi) = -\phi \quad (7)$$

Esta expresión representa la fracción de aire joven para edades de aire $< \tau$.

Análogamente se puede escribir la ecuación para la función $(1-\Phi)$, resultando la ec (8):

$$\frac{\partial(1-\Phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u} \cdot (1-\Phi) - D \cdot \nabla(1-\Phi)) = \phi \quad (8)$$

Esta expresión representa la fracción de aire viejo para edades de aire $> \tau$.

Integrando respecto a τ entre 0 y ∞ la ec (8), resulta

$$\frac{\partial \bar{\tau}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u} \cdot \bar{\tau} - D \cdot \nabla \bar{\tau}) = 1 \quad (9)$$

Como es un flujo estacionario, la ecuación se reduce a:

$$\nabla \cdot (\bar{u} \cdot \bar{\tau} - D \cdot \nabla \bar{\tau}) = 1 \quad (10)$$

Esta ecuación obtenida, es la que se utiliza en los programas de mecánica de fluidos computacional, para determinar la distribución espacial de la edad media local del aire.

4. TÉCNICAS CFD

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es la técnica que se utiliza en este trabajo para determinar la eficacia de ventilación. La CFD es una técnica que permite resolver

numéricamente las ecuaciones que gobiernan el movimiento de los fluidos. Por tanto permite un conocimiento detallado de las propiedades de los fluidos tales como velocidad, presión, temperatura.

La utilización de la simulación numérica permite reducir el número de ensayos experimentales necesarios y el tiempo empleado en ello. Sin embargo cualquier modelo requiere una validación experimental, para poder confiar en los resultados de dicho modelo. El código utilizado en este trabajo es Fluent V6 que utiliza el método de los volúmenes finitos. Éste permite transformar las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas.

Los pasos a seguir para una simulación son:

a) Especificar la geometría del problema.
b) Elaborar un mallado del volumen geométrico donde se desea calcular todas las variables.

c) Imponer las condiciones de contorno.

d) Introducir las condiciones iniciales.

e) Especificar las propiedades del fluido.

f) Control de los parámetros que afectan a la resolución numérica.

La geometría utilizada en este trabajo es un recinto que podría ser un baño de cualquier vivienda, según se representa en la fig. 4.

Para calcular la edad media local del aire se ha introducido la ecuación del transporte para la edad media e_c (13):

Como se supone que el aire es incompresible, número de Mach $< 0,3$ en todo el recinto y que el flujo es isoterma, sólo se han resuelto las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento. Se ha utilizado el modelo de turbulencia K- ϵ .

Se ha realizado un mallado con $135 \cdot 10^3$ celdas con una densificación de $635 \cdot 10^3$.

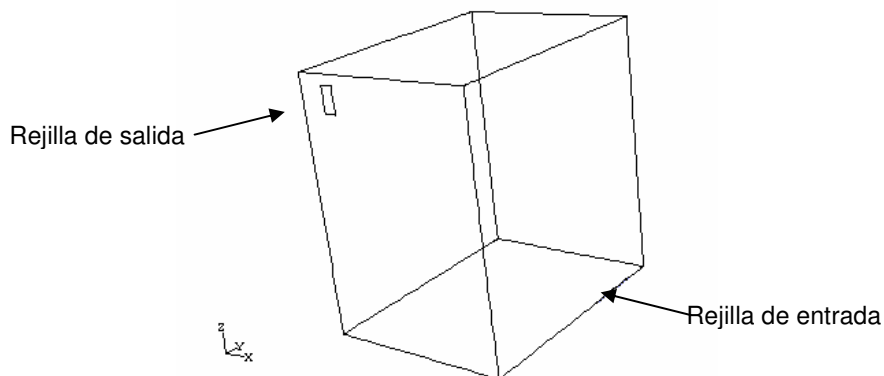


Figura 4. Geometría introducida en *Fluent*, con sola entrada y una salida

5. TÉCNICAS EXPERIMENTALES

5.1 Espectroscopía fotoacústica (PAS)

Alexander Graham Bell, físico escocés establecido en USA e inventor del teléfono, fue el descubridor del fenómeno en el que se basa la espectroscopía fotoacústica. El efecto fotoacústico consiste en la emisión de sonido por una muestra de gas al absorber ésta una luz de destellos. Esto es debido a que el gas irradiado absorbe parte de la energía de la luz incidente proporcionalmente a su concentración, esta energía se libera inmediatamente produciendo un aumento de calor que a su vez, da lugar a un aumento de presión, que debido a un *chopper*, será periódica dando lugar a ondas sonoras medibles fácilmente con un micrófono y audibles si éstas se encuentran entre 20 Hz y 20 kHz [Brüel & Kjaer, 1990]. Al ser la luz una energía en forma de onda, cada molécula absorbe la energía correspondiente a la longitud de onda que coincida con la frecuencia de resonancia,

mientras que el resto de la energía, al no ser absorbida, sencillamente atravesará la molécula sin afectarla.

Las principales ventajas de la espectroscopía fotoacústica estriban en su sensibilidad, selectividad, rápido tiempo de respuesta, alta inmunidad a los interferentes y el hecho de que no utilicen materiales consumibles, lo que disminuye los costes de mantenimiento y vigilancia necesaria.

5.2 Metodología para determinar la eficacia mediante gases trazadores

La utilización de las técnicas de medida PAS para la evaluación de eficacia de la ventilación requiere de la utilización de gases trazadores. Existen varios gases trazadores que pueden emplearse, el gas utilizado en este trabajo fue el hexafluoruro de azufre.

Dentro de las técnicas de gases trazadores existen diferentes métodos para medir la edad media local del aire, en función de cómo se realiza la inyección de gas:

1. Método de inyección pulsada: una pequeña cantidad de gas trazador es introducida en el conducto de entrada.

2. Método de aumento de la concentración: se introduce un flujo constante y continuo de gas trazador.

3. Método de la caída de la concentración: se introduce gas trazador hasta conseguir una concentración constante, entonces se detiene la dosificación de gas trazador y se mide la caída de la concentración.

Este último método fue el utilizado en este trabajo y según en investigaciones anteriores [Sandberg & Sojberg, 1993] la edad del aire se calcula, según la ec (11):

$$\tau_p = \frac{\int_0^{\infty} C_p(\tau) d\tau}{C_p(0)} \quad (11)$$

donde τ_p es la edad del aire en un punto arbitrario, $C_p(\tau)$ es la concentración del gas trazador en el punto cuando el tiempo es τ .

6. VALIDACIÓN

Para poder validar los resultados obtenidos por el modelo CFD, se ha diseñado y construido una cámara de 6 x 4,8 m y provista de un techo móvil que permite variar la altura entre 2 m y 3 m. La cámara de ensayo cuenta con dos paredes de cristal y el resto con paneles de Pladur, sellando las juntas, en su interior se realizan las subcámaras de ensayo. La impulsión y la extracción de aire se realiza con un ventilador centrífugo, modelo UPE 145/200 cm de 37 W conectado a un variador de frecuencia, Micromaster Siemens modelo 6SE64440-2AB11-2AA0. Todos los conductos de aire están contruidos en PVC. Para medir y controlar los caudales de impulsión y aspiración se utilizan dos caudalímetros de tipo turbina con una resolución de $\pm 1,8 \text{ m}^3/\text{h}$.

La subcámara construida simula un cuarto de baño de dimensiones 1.80 x 2.40m, y 2.50m de altura. Se ha considerado una configuración en la que la entrada de aire se realiza a través de una rejilla (700x10mm) equivalente a la holgura inferior existente entre una puerta y el suelo. La extracción se realiza a través de una rejilla (120x250) situada en una pared en la proximidad del techo. Las dos rejillas están situadas en paredes consecutivas. El caudal de aire impulsado es de $54 \text{ m}^3/\text{h}$ que corresponde a 5 renovaciones hora.

Se han tomado 13 puntos de medida, 12 en el interior de la habitación y uno en la salida. Los puntos de medida están contenidos en planos horizontales a 0.07, 0.50 y 2.00 m del suelo, y en cuatro posiciones, a 0.50m de cada pared, ver fig. 5. En cada uno de los puntos se ha determinado experimentalmente, mediante el método de la caída de la concentración, la edad local de aire.

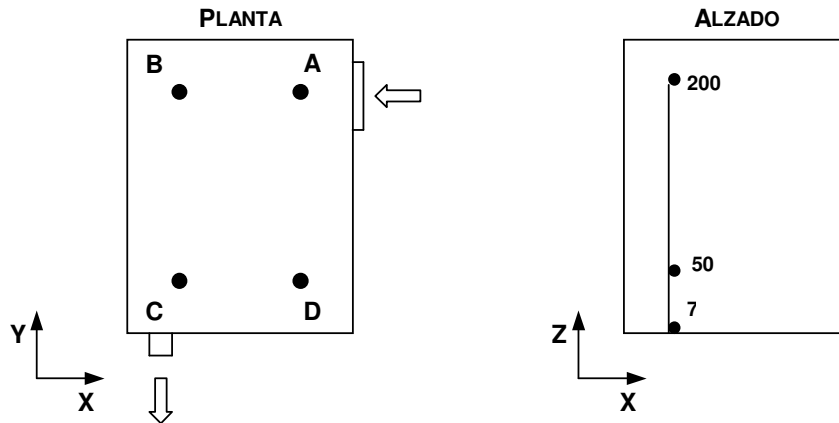


Figura 5. Esquema de la situación de los puntos de medida en la cámara.

La notación empleada para la presentación de los resultados es la siguiente: las letras de la A-D, según la posición en planta en la subcámara, según la figura 5, y el número que acompaña se refiere a la altura, 7 para una altura de 0.07m, 50 para 0.50m y 200 para 2.00m.

En la figura 6 se comparan los valores de la edad media local para cada uno de los puntos obtenidos experimentalmente y numéricamente. El acuerdo entre los dos tipos de resultados se puede considerar bueno.

La precisión del equipo de espectroscopia fotoacústica es de $\pm 10\%$ del umbral de detección, el equipo para el gas trazador utilizado Hexafluoruro de azufre presenta un umbral de detección de 0,05 ppm. Aunque el sistema de medida es de elevada precisión, hay que considerar en la determinación de la edad media del aire local el tiempo entre medida y medida, que es de 2 minutos, la toma de muestra y el proceso de cálculo utilizado, por lo que el error sobre la determinación de la edad está en $\pm 10\%$

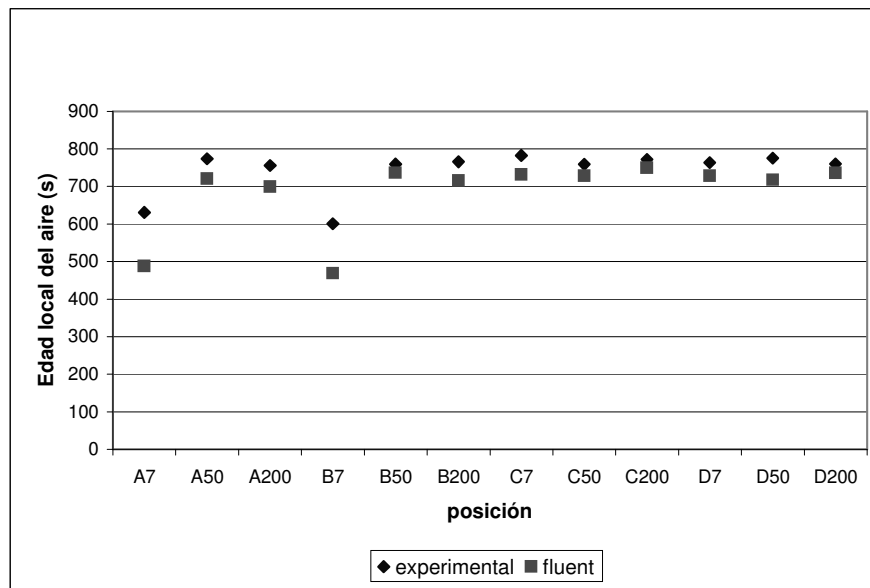


Figura 6. Comparación entre los valores de edad media local obtenida de las medidas experimentales y de las simulaciones numéricas

Según los resultados que se presentan en la fig. 6, se observa que los resultados numéricos se asemejan bastante a los experimentales, con errores inferiores al 20%. Existen dos puntos de medida, A7 y B7, donde las diferencias son mayores, esto es debido a que son puntos situados en el propio chorro de entrada de aire, donde el flujo es más complicado, y el programa comete ciertos errores en su cálculo.

7. CONCLUSIONES

En vista a la validación del modelo podemos concluir:

- a) La dinámica de fluidos computacional permite obtener unos valores de edad del aire muy próximos a los medidos experimentalmente, por lo que la herramienta es útil en el estudio de diferentes geometrías sin necesidad de realizar ensayos.
- b) Los errores entre las medidas experimentales y numéricas no superan en 20%.
- c) La utilización de esta herramienta ahorra costes de ensayo experimental de nuevas configuraciones y soluciones en ventilación y lo que es más importante, permite ajustar el caudal de aire a aportar con mucha más precisión que en la actualidad.

REFERENCIAS

- AENOR, "UNE100000:1995. Climatización Terminología", Madrid, 1995.
- ANSI/ASHRAE 62a-1990, "An American National Standard, Ventilation For Acceptable Indoor Air Quality" Atlanta 1990.
- Brüel & Kjær, Fotoacústica en la detección de gases, Brüel & Kjær Ibérica S.A., Madrid 1990.
- Etheridge, D. y Sandberg, M. Building Ventilation Theory and Measurement, Jhon wiley & Sons, 1996.
- Meter, W. y Grieve, M.Sc. La medida de la ventilación utilizando gases trazadores, Brüel & Kjær Ibérica, S.A. Madrid 1995.
- Persily, A.K., Dols, W.S. and Nabinger, S.J.. Ventilation effectiveness measurements in two modern office buildings, Proceeding of Indoor Air 93, 6th International conference on indoor air quality and climate, 195-200 (1993).
- prENV 1752/96 Ventilación de edificios. Criterios diseño de ambiente de interiores, Bruselas 1996.
- Ross, A., On the effectiveness of ventilation, Technische Universiteit Eindhoven, 1999.
- Sandberg, M. and Sjöberg, M. The use os moments for assessing air quality in ventilated rooms, Building and environment 18, 181-197 (1993).
- Skaaret, E. and Mathisen, H.M. Test procedures for ventilation field measurements, Proceedings of CIB Symposium on Recent Advances in Control and Operation of Building HVAC Systems, Trondheim, Norway, 64-75 (1985).
- Solé Gómez, M.D. y Pérez Nicolás, J. NTP 290: El síndrome del edificio enfermo: Cuestionario para su detección, Instituto Nacional de Seguridad E Higiene en el Trabajo, Madrid 1998.

DERIVATION OF VENTILATION EFFECTIVENESS IN RESIDENTIAL BUILDING ROOMS

Abstract: Ventilation is the process to provide fresh and clean air, and remove the polluted air. That is possible with mechanic or natural ventilation. To evaluate the ventilation quality is used the ventilation effectiveness concept, difficult parameter to be quantified, due to its dependence on several factors.

The objective is create a method to determinate the ventilation effectiveness in residential building rooms. For this is necessary introduce the concept of air local mean age, and knowing if the air diffusion is correct, whatever is the value of the air change rate, specified by regulation.

A model has been created with a numeric code CFD (Computational Fluids Dynamics) to calculate the air age simulating natural ventilation in a room. Afterwards, these results were validated with experimental measurements, by means of tracer gas and photoacoustic spectroscopy techniques.

Keywords: *air age, efficiency, ventilation, tracer gas.*