

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL NIVEL DE INFILTRACIONES DE AIRE EN UN EDIFICIO COMO PARTE DE UNA AUDITORIA ENERGÉTICA EN SISTEMAS HVAC/R.

Experimental estimation of air leakage level in a building as commissioning tool of HVAC/R systems.

RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados de un estudio experimental realizado para estimar las infiltraciones de aire en un edificio comercial en Bruselas durante el periodo de invierno. El problema se origina por que los ocupantes perciben corrientes de aire molestas durante el periodo de ocupación del edificio. El estudio se realizó siguiendo dos métodos diferentes para la estimación del nivel de infiltración de aire exterior de acuerdo a normas internacionales: “tracer gas” y “blowing door”. Esta información y los procedimientos utilizados son de gran utilidad en el cálculo de la carga térmica en sistemas HVAC/R como parte de un proceso de auditoria energética del edificio.

PALABRAS CLAVES: Infiltraciones, Auditoria, Estudio experimental.

ABSTRACT

This article presents the results of the experimental study performed to estimate the air leakage in a commercial building in Brussels during winter time. The problem: During wintertime, the occupants of the building consider to feel uncomfortable air flow during the building occupancy period. The infiltration flow rate was measured using two techniques “tracer gas” and “blowing door” according to international standards. This information is very useful for thermal load estimation during the building commissioning process.

KEYWORDS: Infiltrations, Commissioning, Experimental study.

1. INTRODUCCIÓN

La reducción del consumo de energía en edificios es un tema de creciente interés en vista del aumento del costo de la energía y el deterioro del medio ambiente generado por el uso de combustibles fósiles. En el campo de la calefacción, la ventilación, el acondicionamiento de aire y la refrigeración (HVAC/R) se desarrollan continuamente nuevas herramientas y metodologías que contribuyen al uso racional de la energía. El proceso de auditoria energética en edificios ó “Commissioning” es una de estas herramientas. Según la Agencia Internacional de la Energía [1] “Commissioning” es el proceso que permite asegurar que un sistema ha sido diseñado, instalado y funcionalmente evaluado para que opere conforme con sus condiciones de diseño. El “Commissioning” comienza con la fase de planeación e incluye el diseño, construcción, puesta a punto y vida útil del edificio.

En un proceso de “Commissioning” las guías funcionales de rendimiento (FTP) permiten la detección de un posible mal funcionamiento del sistema HVAC/R o sus componentes y su diagnóstico. Los tipos de ensayos mas usados pueden ser “activos” o “pasivos”, dependiendo de la forma del análisis del comportamiento del sistema o

componente evaluado: con o sin una perturbación artificial. Un ensayo de tipo “activo” es mas usado en “Commissioning” inicial, por ejemplo al final de la fase de construcción. Durante la vida útil del edificio un ensayo de tipo “pasivo” es mas recomendado para preservar la salud y confort de los ocupantes en las diferentes zonas del edificio [2].

Las FTP son solo una parte del proceso de “Commissioning”. Deben partir de la base del conocimiento estricto de las condiciones iniciales de diseño del edificio. Los procesos de ensayo e información de cada componente deben ser evaluados desde la perspectiva del funcionamiento global del edificio mas que sobre la perspectiva de funcionamiento individual de cada componente. El rendimiento global del sistema depende de tres áreas de interacción:

- Componentes individuales dentro del sistema.
- Componentes entre sí como parte de un subsistema.
- Subsistemas entre sí en el edificio.

Como parte del proceso de “Commissioning” de un edificio, la estimación del nivel de infiltraciones de aire juega un papel importante en el cálculo de la carga

NÉSTOR FONSECA DÍAZ

Ingeniero Mecánico, M. Sc.
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira,
Colombia
nfonseca@utp.edu.co

JULES HANNAY

Ingeniero de Investigación
Laboratorio de Termodinámica
Aplicada.
Universidad de Lieja, Bélgica.

térmica real del sistema HVAC. En este artículo se presenta la metodología (FTP) y los resultados experimentales en la estimación del nivel de infiltración de aire de un edificio, como parte fundamental del proceso de “Commissioning” del edificio.

2. DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

En este trabajo el nivel de infiltraciones de aire exterior se estima como parte de un estudio de caso de “Commissioning” en un edificio comercial en la ciudad de Bruselas durante el periodo de invierno. El flujo de aire de infiltración se mide mediante dos técnicas diferentes:

- Medición de la concentración del gas (SF₆) “tracer gas”.
- Inyección de un flujo de aire mediante ventiladores instalados en la puerta “blowing door” y medición de la diferencia de presiones entre el interior y el exterior del local.

La medición de la concentración del gas se efectúa en tres posiciones [3], [4], [5]: cerca de la ventana, en el centro del local (a 1.2 m del suelo y 0.1 m del techo) y en el exterior del local en la ranuras de ventilación. Detalles sobre las dimensiones del local y la posición de los sensores y de los ventiladores se muestran en las Figuras 1 a la 5.

Las mediciones cerca de la ventana y del centro se efectúan para verificar la homogeneidad de las condiciones del local.

El objetivo principal de las mediciones cerca del techo es detectar un posible efecto de estratificación sobre el nivel de concentración del gas. En el interior del local se instala un ventilador de mezcla para evitar la estratificación del gas.

Para determinar el comportamiento del flujo de aire de infiltración mediante la técnica “blowing door”, se utilizan durante la campaña de mediciones tres configuraciones del ventilador: un solo ventilador (superior e inferior) y los dos ventiladores en paralelo. En todos los casos se efectúan pruebas con la puerta interior cerrada o abierta en diferentes posiciones.

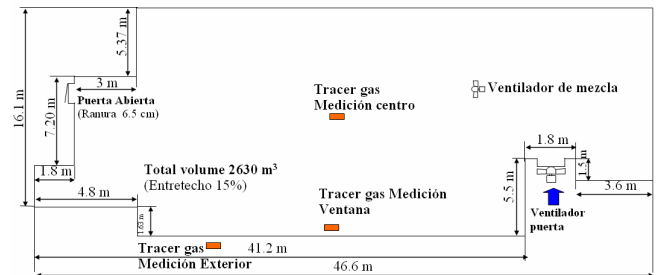


Figura 1. Dimensiones y posición de los sensores.



Figura 2. Detalles “blowing door” y sensor “Tracer gas”.



Figura 3. Posición de sensores en el local.



Figura 4. Detalles de la posición de los sensores.

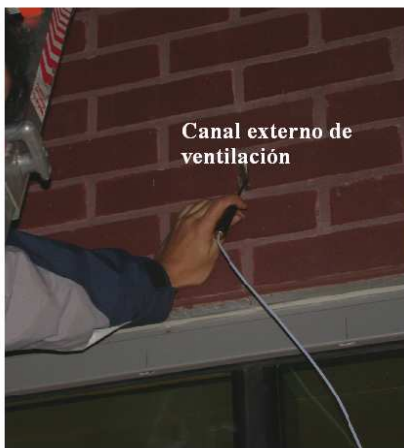


Figura 5. Posición del sensor para medición en el exterior del local.

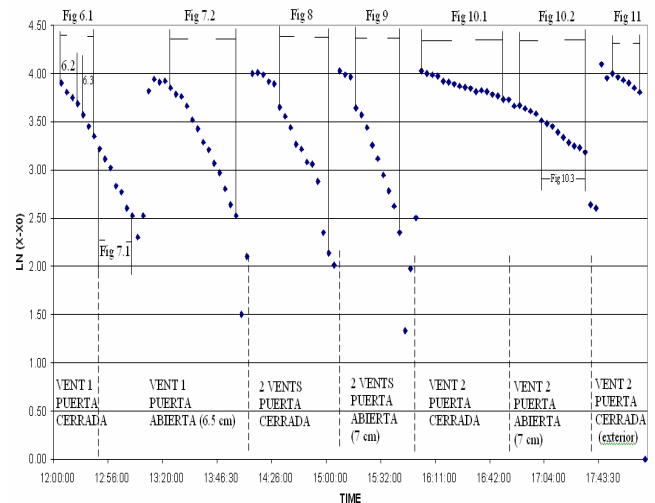


Figura 6. Variación de $\ln(X-X_0)$ en el tiempo para diferentes condiciones de prueba.

Cada periodo fue dividido en varias zonas con el objetivo de calcular valores representativos de n [6], [7]. Los resultados de este procedimiento sobre el conjunto de mediciones se muestran en la Tabla 1.

3. RESULTADOS

3.1 Cálculo de las infiltraciones mediante el uso del Tracer gas

Cálculo de la renovación de aire (n)

Considerando X y X_0 como la concentración final e inicial del gas SF6 respectivamente, en la Figura 6 se muestra el cálculo del valor $\ln(X-X_0)$ para todos los valores medidos de concentración durante la campaña de medición. Adicionalmente se indica sobre la Figura 6 los diferentes periodos de prueba considerados.

El comportamiento de valor $\ln(X-X_0)$ para cada periodo fue correlacionado linealmente mediante:

$$Y = a + b \cdot X$$

Donde la renovación de aire corresponde a:

$$n = \left| \frac{b}{a} \right|$$

Tabla 1. Resultados de la linealización de resultados experimentales.

| Fig. | a | b [min ⁻¹] | R ² | Evento | Nº Med |
|------|------|------------------------|----------------|---|--------|
| 6.1 | 5.03 | -0.0335 | 0.997 | Ventilador 1, puerta cerrada | 7 |
| 6.2 | 5.20 | -0.0381 | 0.978 | Ventilador 1, puerta cerrada | 3 |
| 6.3 | 5.18 | -0.0366 | 0.997 | Ventilador 1, puerta cerrada | 3 |
| 7.1 | 6.04 | -0.0544 | 0.988 | Ventilador 1, puerta abierta (6.5cm) | 7 |
| 7.2 | 7.72 | -0.0451 | 0.988 | Ventilador 1, puerta abierta (6.5cm) | 13 |
| 8 | 11.7 | -0.0525 | 0.989 | 2 Ventiladores puerta cerrada | 10 |
| 9 | 18.5 | -0.0738 | 0.983 | 2 Ventiladores puerta abierta (7 cm) | 9 |
| 10.1 | 5.61 | -0.0065 | 0.990 | Ventilador 2, puerta cerrada | 16 |
| 10.2 | 8.74 | -0.0174 | 0.996 | Ventilador 2, puerta abierta (5.3 cm) | 13 |
| 10.3 | 8.97 | -0.0181 | 0.994 | Ventilador 2, puerta abierta (5.3 cm) | 9 |
| 11 | 10.5 | -0.0189 | 0.989 | Ventilador 2, puerta cerrada (exterior) | 6 |

La infiltración de aire puede por lo tanto ser calculada como [8]:

$$\dot{V}^* = n \dot{V}_{total} \quad [m^3 / s]$$

El valor n seleccionado, corresponde al del promedio para cada periodo. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados del flujo de aire de infiltración.

| Evento | n [sec ⁻¹] | V _{total} [m ³] | \dot{V}^* [m ³ /s] |
|---------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| Ventilador 1, puerta cerrada | 0.000601 | 2630 | 1.58 |
| Ventilador 1, puerta abierta (6.5cm) | 0.000829 | 2630 | 2.18 |
| 2 Ventiladores puerta cerrada | 0.000875 | 2630 | 2.30 |
| 2 Ventiladores puerta abierta (7 cm) | 0.001230 | 2630 | 3.23 |
| Ventilador 2, puerta cerrada | 0.000108 | 2630 | 0.28 |
| Ventilador 2, puerta abierta (5.3 cm) | 0.0002958 | 2630 | 0.77 |

El volumen total (V_{total}) considera el volumen de aire en el entretecho del local. Se observa que el flujo de aire de infiltración del local siguiendo esta metodología varía entre 0.28 y 3.23 m³/s.

En la Figura 7 se puede observar el comportamiento de la diferencia de concentraciones inicial y final del gas en cada periodo estudiado.

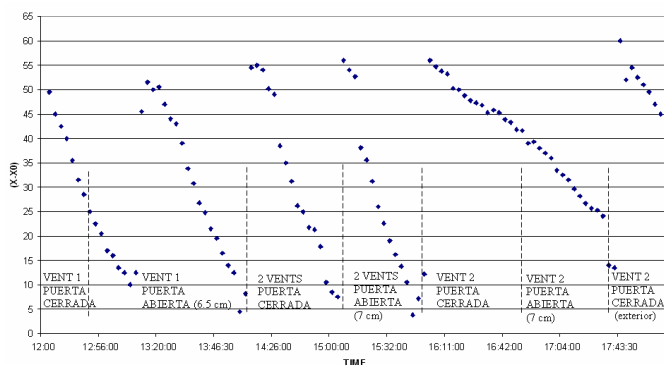


Figura 7. Diferencia de concentraciones inicial y final del gas en cada periodo de medición.

3.2 Cálculo de infiltraciones usando el método “blowing door”.

Las correlaciones empíricas utilizadas para calcular el flujo de aire de infiltración en cada etapa de prueba siguiendo el método “blowing door” (definidas en función de la diferencia de presiones DP [Pa] y las condiciones geométricas de cada configuración de ventilador) son las siguientes:

Flujo de aire para la condición en la cual se activa solo el ventilador 1:

$$\dot{V} = \frac{10800 - 51.3DP}{3600} \text{ m}^3/\text{s}$$

Si se activa solo el ventilador 2:

$$\dot{V} = \frac{6250 - 28.3DP}{3600} \text{ m}^3/\text{s}$$

Con los dos ventiladores activos:

$$\dot{V} = \frac{10800 - 51.3DP + 6250 - 28.3DP}{3600} \text{ m}^3/\text{s}$$

Cálculo del área de infiltración:

El área mínima equivalente de infiltraciones del edificio bajo ensayo puede ser calculada como:

$$A_{Edif, min} = A_{Edif, total} - A_{puerta}$$

Donde:

$$A_{puerta} : 2.5L \text{ m}^2$$

El valor L es el valor de la dimensión de la ranura equivalente de la puerta.

El área equivalente de infiltración del edificio puede ser calculada como:

$$A_{Edif, total} = \frac{\dot{V}}{U} \text{ m}^2$$

Donde la velocidad del aire puede ser calculada en función de la diferencia de presiones (DP) y la densidad del aire (ρ) mediante:

$$U = \sqrt{2 \frac{DP}{\rho}} \text{ m/s.}$$

Los resultados para cada evento y los valores DP registrados durante los ensayos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de las mediciones por el método “blowing door” DP y el cálculo de áreas.

| Evento | DP [Pa] | \dot{V}^* [m ³ /s] | A _{Edif, total} [m ²] | A _{puerta} [m ²] | A _{Edif, min} [m ²] |
|---------------------------------------|---------|---------------------------------|--|---------------------------------------|--|
| Ventilador 1, puerta cerrada | 67 | 2.045 | 0.193 | 0 | 0.193 |
| Ventilador 1, puerta abierta (6.5cm) | 49 | 2.302 | 0.255 | 0.162 | 0.092 |
| Ventilador 1, puerta abierta (6.5cm) | 45 | 2.359 | 0.272 | 0.162 | 0.109 |
| 2 Ventiladores puerta cerrada | 80 | 2.967 | 0.257 | 0 | 0.257 |
| 2 Ventiladores puerta abierta (7 cm) | 65 | 3.299 | 0.317 | 0.175 | 0.142 |
| 2 Ventiladores puerta abierta (7.3cm) | 63 | 3.343 | 0.326 | 0.182 | 0.144 |
| 2 Ventiladores puerta abierta (7.3cm) | 62 | 3.365 | 0.331 | 0.182 | 0.148 |
| Ventilador 2, puerta cerrada | 16 | 1.61 | 0.312 | 0 | 0.312 |
| Ventilador 2, puerta cerrada | 20 | 1.579 | 0.273 | 0 | 0.273 |
| Ventilador 2, puerta cerrada | 17 | 1.602 | 0.301 | 0 | 0.301 |
| Ventilador 2, puerta abierta (5.3 cm) | 10 | 1.658 | 0.4061 | 0.132 | 0.274 |

Se observa que el flujo de aire de infiltración del local siguiendo esta metodología varía entre 1.5 y 3.3 m³/s.

4. ANÁLISIS

La comparación entre los resultados de los dos métodos utilizados se efectúa mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{V} = \dot{V}^* * f$$

Los resultados de la comparación se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Comparación entre las dos metodologías propuestas

| Evento | Blowing door \dot{V} [m ³ /s] | Tracer gas \dot{V}^* [m ³ /s] | f |
|---------------------------------------|---|---|------|
| Ventilador 1, puerta cerrada | 2.04 | 1.58 | 1.29 |
| Ventilador 1, puerta abierta (6.5cm) | 2.33 | 2.18 | 1.06 |
| Ventilador 2, puerta cerrada | 2.96 | 2.30 | 1.28 |
| 2 Ventiladores puerta abierta (7 cm) | 3.33 | 3.23 | 1.03 |
| Ventilador 2, puerta cerrada | 1.59 | 0.28 | 5.67 |
| Ventilador 2, puerta abierta (5.3 cm) | 1.65 | 0.77 | 2.14 |

En todos los casos, la diferencia máxima entre los dos métodos se alcanza cuando la puerta se mantiene cerrada (bajo flujo de infiltraciones). Adicionalmente la máxima diferencia se alcanza cuando solo el ventilador 2 es usado (ventilador mas pequeño), lo que puede deberse a una deficiente mezcla del gas con el aire dentro del local.

En la Tabla 5 se muestran los valores del área de infiltraciones equivalente promedio del edificio para la campaña de mediciones analizada previamente y los resultados de una campaña de medición precedente.

Tabla 5. Resultados de DP para dos campañas de medición diferentes.

| Evento | Actual | | Precedente | |
|-------------------------------|---------|--------------------------------------|------------|--------------------------------------|
| | DP [Pa] | A _{E,air} [m ²] | DP [Pa] | A _{E,air} [m ²] |
| Ventilador 1 puerta cerrada | 67 | 0.19 | 79 | 0.17 |
| 2 Ventiladores puerta cerrada | 80 | 0.25 | 90 | 0.23 |
| Ventilador 2 Puerta cerrada | 18 | 0.29 | 19 | 0.28 |

A partir de esta información, en la Figura 8 se muestra la relación lineal equivalente de A_{E,dif} que caracteriza el nivel de infiltraciones del edificio.

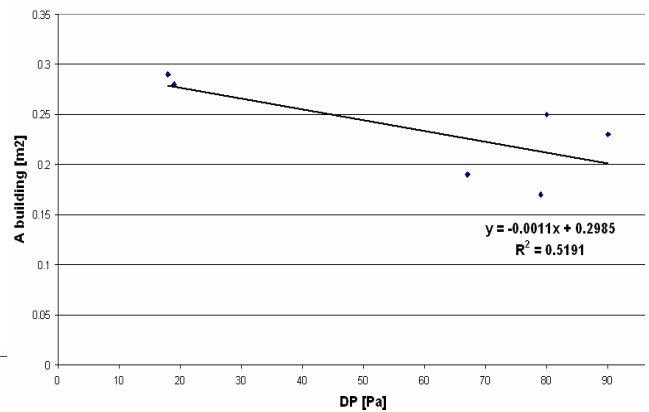


Figura 8. Área equivalente de infiltración en función de la diferencia de presiones DP.

La correlación que permite estimar el área equivalente de infiltraciones del edificio es:

$$A_{Edif-cal} = -0.0011DP + 0.2985$$

5. CONCLUSIONES

Se presentan en este artículo las metodología y los resultados experimentales para la determinación del nivel de infiltración de aire exterior en un edificio como parte del un estudio de caso de “Commissioning” de un sistema HVAC. Dos guías funcionales de rendimiento (FTP) son propuestas para este tipo de pruebas.

Los resultados experimentales obtenidos siguiendo las metodologías propuestas en este trabajo indican que el nivel de infiltraciones del edificio varía entre 0.2 y 3.5 m³/h. Este valor permite estimar el efecto de la infiltración de aire en el balance térmico del edificio, niveles de confort y condiciones de operación del sistema HVAC como parte del proceso de “Commissioning” del edificio.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] AuditAC 2006. Successful case Studies in AuditAC. Technical Guides for owner/manager of HVAC systems. Vol 10.

[2] International Energy Agency (IEA). 2003. “Commissioning of Building and HVAC systems for improve energy performance”. Annex 40 Final report.

[3] Ernest O. Doebelin. 1990. Measurement systems application and design, Mc.Graw Hill. Boston.

[4] James W. Dally. 1984. Instrumentation Engineering measurement, Wiley, New York.

[5] Fonseca, Néstor. Estudio experimental del balance térmico de una ventana, Tesis de Maestría, Universidad de Concepción Chile, 2002.

[6] Saavedra, C y Fissore, A. Mottard, J. 2000. “Diseño de un banco de ensayos para la validación de un modelo de diseño térmico de ventanas”, Congreso de ar condicionado, refrigeracao aquecimento e ventilacao do mercosul, Brasil, Mercofrio 2000.

[7] Fissore, A. 2000. “Simulación térmica detallada de una ventana”, Congreso de ar condicionado, refrigeracao aquecimento e ventilacao do mercosul, Brasil, Mercofrio 2000.

[8] Guyon, G., Palomo, E. 1999. “Validation of two french builging programs, part 1 –2” ASHRAE Trans. Vol .105 part 2, pp 695-735.