

**Francis Allard**  
 Centro de Estudios Térmicos  
 del Instituto Nacional de  
 Ciencias Aplicadas de Lyon

**María Elena Hobaica**  
 Investigadora  
 del IDEC, FAU, UCV.

## CONCEPTO DE CONFORT TERMICO Y PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO EOLICO DE EDIFICACIONES

### RESUMEN

El presente artículo abarca dos aspectos de vital importancia en el comportamiento térmico de Edificaciones en el Trópico Húmedo: a) El balance energético del cuerpo humano, fundamental para comprender la noción de "comfort" en la cual se conjugan aspectos subjetivos sensoriales y fisiológicos. b) La ventilación natural, factor esencial de "comfort" en clima tropical húmedo.

En este trabajo se hace un análisis del balance energético a fin de deducir vías de mejoramiento de la calidad térmica de las Edificaciones.

El conocimiento de los conceptos básicos de dicho balance nos conduce a profundizar el rol de la ventilación natural; resaltándose finalmente algunos modelos predictivos de las transferencias de aire al interior de edificaciones.

### ABSTRACT

This paper covers two fundamental aspects of the thermic behavior of buildings in the humid tropic: • The energetic balance of the human body, which is fundamental in order to understand the concept of "comfort", including subjective, sensorial and physiological aspects. • Natural ventilation, the essential factor in order to obtain "comfort" in the humid tropic.

An analysis of energetic balance is made, in order to deduce ways of improving the thermic quality of buildings.

The knowledge of basic concepts of the energetic balance will lead us to explore into the role of natural ventilation. Finally, some predictive models of air transfer to the interior of buildings are presented.

### 1. INTRODUCCION

La apreciación de la calidad de un ambiente por parte del ser humano esta relacionada a parámetros subjetivos y condiciones particulares tales como la edad, el sexo, la morfología o la tradición cultural. No obstante los estudios relacionados al tema han demostrado la fuerte correlación que existe entre la sensación de confort y el balance energético del cuerpo humano.

A partir del análisis de este balance es posible deducir vías para mejorar los ambientes interiores y los edificios mismos.

Al respecto, es importante destacar las particularidades del clima tropical húmedo el cual se caracteriza por temperaturas de aire no demasiadas altas con pocas variaciones a lo largo del día o del año, una tasa de humedad, y una irradiación solar muy importante. Se puede pensar entonces que con un diseño apropiado, protegiéndose del asoleamiento, aprovechando las condiciones del sitio con respecto a la orientación de la edificación y seleccionando materiales adecuados, se limitará el aumento de las temperaturas internas ampliándose los rangos de edificaciones en las cuales es posible obtener condiciones de confort sin recurrir necesariamente a sistemas adicionales de climatización.

En tal sentido, la meta de esta presentación es fijar algunos conceptos básicos relativos al balance térmico del cuerpo humano, enfatizar el papel de la venti

lación sobre este balance y sobre el comportamiento térmico de edificios, y descubrir posteriormente cuales son los modelos que permiten predecir las transferencias de aire al interior de edificios.

## 2. EQUILIBRIO TERMICO DEL CUERPO HUMANO

El confort térmico contribuye al bienestar fisiológico y psicológico del ser humano. Desde hace muchos años, numerosos investigadores han tratado de poner bajo forma determinista la sensación de confort o inconfort térmico para permitir la predicción de la sensación y en consecuencia de la calidad de los ambientes térmicos.

En la evaluación de dicha sensación térmica se distinguen dos etapas distintas, la primera consiste en definir el equilibrio térmico del cuerpo humano. Al respecto, puede considerarse hoy que progresivamente nos acercamos a la escritura literal del balance térmico del cuerpo. La segunda etapa trata de definir, en función de lo obtenido en la primera, el nivel de confort predecible en dichas condiciones.

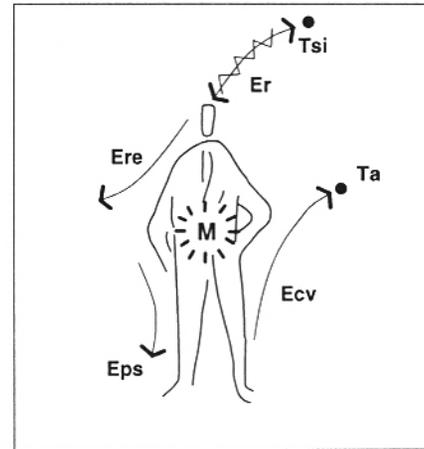
Diversos autores han desarrollado «índices de confort» [1 a 5]. El objetivo aquí no es detallar esos índices sino de evaluar, a nivel físico el efecto de la ventilación sobre el balance energético del cuerpo humano. En tal sentido, describimos a continuación las ecuaciones que permiten escribir este balance.

La figura 1 presenta los distintos intercambios de calor y masa entre el cuerpo humano y el ambiente.

El balance energético del cuerpo se puede escribir de manera sencilla según la ecuación general (1).

$$M_{th} - ( E_{cv} + E_r + E_{ps} + E_{re} ) = S \quad (1)$$

$M_t$  representa la parte térmica del metabolismo. El metabolismo corresponde a la producción interna de energía del cuerpo humano, una parte se transforma en trabajo, la otra en calor. Salvo en caso de trabajo físico muy duro, el rendimiento del cuerpo es casi nulo lo que significa que  $M_t$  representa en la mayoría de los casos la producción energética del cuerpo humano, la cual depende de la actividad.



Ere	= respiración
Eps	= perspiración
Ecv	= convección
Er	= radiación
Ta	= temperatura del aire
Tsi	= temperatura superficial

Figura1: Intercambios de calor y masa entre el cuerpo y el ambiente

**S** es un término fuente el cual representa el desequilibrio térmico del cuerpo que conducirá a un proceso de adaptación del mismo, sudoración en el caso positivo, escalofrío en el caso negativo.

Los demás términos representan los intercambios de calor y masa del cuerpo con el ambiente. Ere (respiración), Ecv (convección), Eps (perspiración), Er (radiación).

### 2.1 Intercambios convectivos:

Los intercambios convectivos representan los intercambios de calor debido al contacto de un cuerpo sólido con un fluido animado por un movimiento. Se representan por la ley general de Newton la cual define la densidad de calor perdida por la superficie sólida.

$$f = h ( T_s - T_a ) \quad (2)$$

Donde **h** representa un parámetro fenomenológico, el coeficiente de película ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ).

En el caso del cuerpo humano se pueden distinguir tres partes distintas con respecto a su comportamiento relativo a los intercambios de calor, la parte cubierta, la cabeza y las manos. El intercambio con-

vectivo total se escribirá entonces como la sumatoria de los intercambios convectivos de cada una de las partes.

$$E_{cv} = \sum e_{cvi} \quad (3)$$

$$\text{con } e_{cvi} = a_i F_i h_i (T_{si} - T_a) \quad (4)$$

En ecuación (4),  $a_i$  representa la rata de área de cada parte del cuerpo para:

$$\text{la parte cubierta } a_v = 0.94$$

$$\text{la cabeza: } a_c = 0.02$$

$$\text{las manos: } a_m = 0.04$$

$F$  representa un coeficiente de reducción de los intercambios debido a la ropa, y  $h$  representa el coeficiente de película de la parte considerada para:  
 la parte cubierta:  $h_v = \sup (2.38 [T_v - T_a]^{0.25}; 12.06 \sqrt{V_a})$   
 la cabeza:  $h_c = \sup (2.38 [T_c - T_a]^{0.25}; 10. \sqrt{V_a})$  (5)  
 las manos:  $h_m = \sup (2.38 [T_m - T_a]^{0.25}; 10. \sqrt{V_a})$

Donde  $T_a$  y  $V_a$  son la temperatura y velocidad del aire,  $T_v$  representa la temperatura superficial del vestido y  $T_c$  y  $T_m$  las temperaturas superficiales de la cabeza y de las manos:

$$T_c \# T_m = 35.7 - 0.0275 M_t \quad (6)$$

## 2.2 Intercambios radiativos de gran longitud de onda:

La densidad de flujo radiativo perdido por el cuerpo humano en sus intercambios con el ambiente se define como la sumatoria de las densidades de flujo radiativo perdido por cada una de las partes definidas previamente.

$$E_r = \sum e_{ri} \quad \text{con } e_{ri} = F_p a_i F_{vi} h_{ri} (T_{si} - T_r) \quad (7)$$

Donde  $F_p$  representa el factor «postural» el cual depende del factor de forma entre el cuerpo humano y el ambiente (en general se toma  $F_p = 0.71$ )

$h_{ri}$  representa el coeficiente linealizado de intercambio radiativo entre cada parte del cuerpo y el ambiente, para:

$$\text{la parte cubierta: } h_{rv} = \varepsilon_v 22.7 \cdot 10^{-8} [0.5 (T_v + T_r) + 273]^3 \quad (8)$$

$$\text{la cabeza: } h_{rc} = 22 \cdot 10^{-8} [0.5 (T_c + T_r) + 273]^3$$

$$\text{las manos: } h_{rm} = 22 \cdot 10^{-8} [0.5 (T_m + T_r) + 273]^3$$

$\varepsilon_v$  es la emisividad de la superficie de la ropa, siendo 0.97 la de la piel. En primera aproximación se puede también escoger un valor promedio de  $h_r = 5.8 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$T_r$  representa la temperatura radiante del recinto. Es la temperatura que tendría un recinto negro e isotermo cuyos intercambios radiativos con un cuerpo negro localizado en el centro del local serían los mismo que los de las verdaderas superficies a distintas temperaturas.

$$T_r = (F_{csi} T_{si}^4)^{1/4} \quad (9)$$

En esta expresión,  $F_{csi}$  representa el factor de forma entre el cuerpo negro y cada una de las superficies  $S$ .

## 2.3 Intercambios por perspiración:

La perspiración representa la parte insensible de la sudoración. Se puede definir el caudal de vapor de agua a través de la piel por la Ley de Fick.

$$Q_{ps} = K_p (P_{vs}(T_p) - P_v(T_a)) \quad (10)$$

En esta expresión,  $P_{vs}(T_p)$  representa la presión de vapor saturante del aire a la temperatura de la piel,  $P_v(T_a)$  es la presión de vapor del aire ambiente, y  $K_p$  es la permeancia de la piel. Cuando se multiplica por al calor latente de vaporización del agua se llega a una fórmula de tipo Ley de Newton definiéndose el intercambio de calor debido a la perspiración.

$$E_{ps} = h_p (P_{vs}(T_p) - P_v(T_a)) \quad (11)$$

En nuestro caso se suele tomar  $h_p = 0.41 \text{ W/m}^2 \text{ mm Hg}$ .

$P_{vs}(T_p)$  se calcula en función de la temperatura de la piel, en primera aproximación se puede tomar  $P_{vs}(T_p) = (256 T_p - 3373) / 133$ .  $P_v(T_a)$  se encuentra sobre un diagrama psicométrico.

## 2.4 Intercambios por respiración:

Durante el proceso de respiración, ocurren intercambios convectivos entre el aire ambiente y el cuerpo e intercambios latentes por expiración de vapor de agua.

#### 2.4.1 Intercambios convectivos:

Los intercambios convectivos debidos a la respiración dependen de la capacidad del aire, del caudal de respiración relacionado con el metabolismo y de la diferencia de temperatura entre el aire expirado y el aire ambiente, si se consideran como los demás intercambios por unidad de área de piel, se puede tomar en primera aproximación.

$$E_{cr} = .0014 M_t (34 - T_a) \quad (12)$$

#### 2.4.2 Intercambios Latentes:

De la misma manera, los intercambios latentes se relacionan con el caudal de aire expirado, la diferencia de presión parcial entre el aire expirado y el aire ambiente, y el calor latente del agua. En primera aproximación, se toma:

$$E_{hr} = .0023 M_t (44 - P_v(T_a)) \quad (13)$$

### 2.5 Nivel de «stress térmico» y sudoración:

El nivel de stress térmico se relaciona directamente con el balance térmico del cuerpo ecuación 1:

$$M_t - (E_{cv} + E_r + E_{ps} + E_{re}) = S$$

Cuando S es positivo, caso general de los ambientes cálidos, el cuerpo tiende a adaptarse al calor aumentando las pérdidas de calor hacia el ambiente. El proceso mas significativo es un aumento sensible del caudal de sudor. Sin embargo, el hecho de que aumente el caudal de sudor no basta para asegurar un mejoramiento de la sensación térmica, se necesita también que el sudor se evapore lo que depende de las condiciones del aire ambiental representadas por su presión parcial en agua.

Givoni [2] define un poder evaporativo máximo del aire  $E_{max}$

$$E_{m\acute{a}x} = p V^{0.3} (42 - VP_v(T_a)) \quad (14)$$

En esta expresión, p representa la transmisión del sudor a través de la ropa

$p = 19.7$  para un cuerpo semi desnudo.

$p = 12.8$  para ropa ligera

$p = 8$  para ropa de trabajo industrial

Si se considera que todo el control se hace por sudoración, se determina entonces un término representando el promedio de piel mojada:

$$W = S/E_{m\acute{a}x}. \quad (15)$$

Este último término constituye un criterio de caracterización del confort en los ambientes cálidos.

### 3. EQUILIBRIO CONVECTIVO DE UNA ZONA DE EDIFICIO

Uno de los parámetros importantes que aparecen en la predicción del balance térmico del cuerpo humano es la temperatura del aire ambiente. A nivel de una zona de edificio se puede definir esta temperatura en un sentido termodinámico como la temperatura de equilibrio del aire contenido en dicha zona.

El balance de la masa de aire contenida en el volumen de la zona se relaciona con los intercambios convectivos con las paredes, las fuentes internas de calor debida a la iluminación, la ocupación o los sistemas activos de acondicionamiento, y el caudal de aire debido a la ventilación. La Figura 2 describe esos fenómenos.

Bajo esta forma general este balance se puede escribir en régimen variable:

$$\rho c V \partial T_a / \partial t = \sum (T_{si}(t) - T_a(t)) h_i S_i + Q v \rho c (T_e(t) - T_a(t)) + P \quad (16)$$

En esta expresión:

$\partial T_a / \partial t$  representa la variación temporal de la temperatura del aire

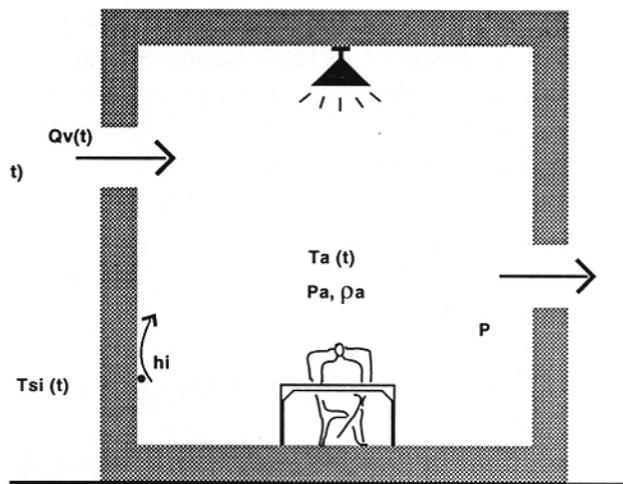
$\sum (T_{si}(t) - T_a(t)) h_i S_i$  son los intercambios convectivos con las paredes

$Q v \rho c (T_e(t) - T_a(t))$  es la potencia debida al caudal de ventilación

P representa las cargas convectivas internas

En caso de régimen permanente, se define de manera explícita la temperatura de equilibrio del aire interno y se puede determinar de manera sencilla el efecto de la ventilación.

$$T_a = (\sum T_{si} h_i S_i + Q v \rho c T_e + P) / (\sum (h_i S_i) + Q v \rho c) \quad (17)$$



Ta = temperatura del aire  
 Te = temperatura exterior  
 Tsi = temperatura superficial  
 hi = coeficiente de intercambio superficial

Figura 2: Equilibrio convectivo de una zona

4. EJEMPLO ILUSTRATIVO

Para ilustrar los distintos efectos de la ventilación sobre el confort térmico de un ser humano, desarrollamos a continuación un ejemplo sencillo de una casa de 100 m<sup>2</sup> de piso con una altura de 2.5 m, la temperatura exterior es de 25 °C, la temperatura media de las superficies internas de las paredes (no afectadas por la ventilación en este caso) es de 30 °C, la presión parcial de vapor de agua se considera la misma que la exterior y es de 16.5 mm Hg, el coeficiente de película para los intercambios convectivos con las paredes es fijo y es de 4 W/m<sup>2</sup> °C. Se supone además una carga interna de 400 W y un hombre en descanso M<sub>th</sub>=60 W/m<sup>2</sup>

La tabla 1 muestra las variaciones de temperatura interna y de velocidad del aire en función del caudal de

Qv (V/h)	Vi (cm/s)	Ta (°C)
0	0	30,33
10	2,7	28,15
20	5,5	27,24
40	10,1	26,42
100	27,5	25,67
200	55,5	25,36

Tabla 1: Variación de la velocidad del aire y de la temperatura interna con el caudal de ventilación

ventilación. Se nota aquí por ejemplo que con una velocidad promedio en la zona de 27.5 cm/s se llega ya a menos de un grado de la temperatura exterior para una tasa de ventilación de 100 volúmenes por hora.

La tabla 2 presenta los efectos de ventilación sobre los intercambios convectivos entre el cuerpo humano y el ambiente cuando el caudal de ventilación varía de 0 a 200 volúmenes por hora.

Qv (V/h)	hcv (W/m <sup>2</sup> °C)	hc (W/m <sup>2</sup> °C)	Ecv (W/m <sup>2</sup> )
0	2,7	3,3	4,6
10	3,3	3,7	12,1
20	3,5	3,8	15,8
40	3,7	3,7	19,3
100	6,3	5,2	22,3
200	8,9	7,4	53,5

Tabla 2: Variación de los intercambios convectivos con el caudal de ventilación

Con respecto a los coeficientes de película, el mejoramiento es del orden de 3 para la parte cubierta y 2 para la cabeza y las manos, pero la densidad de flujo intercambiado aumenta en un orden 10 veces mayor.

Finalmente presentamos en la tabla 3 las variaciones de los distintos intercambios de calor entre el cuerpo humano y el ambiente así como el balance del cuerpo. Es de notar entonces el efecto determinante de la ventilación sobre el balance térmico global del cuerpo. Además, no tomamos en cuenta aquí la reac-

Qv (V/h)	E <sub>CV</sub> (W/m <sup>2</sup> )	E <sub>R</sub> (W/m <sup>2</sup> )	E <sub>RE</sub> (W/m <sup>2</sup> )	E <sub>PS</sub> (W/m <sup>2</sup> )	S=MΣE (W/m <sup>2</sup> )
0	4,6	16,5	4,1	12	22,8
10	12,2	16,5	4,3	12	15
20	15,8	16,5	4,4	12	11,3
40	19,3	16,5	4,4	12	7,75
100	22,3	16,5	4,5	12	4,7
200	53,5	16,5	4,5	12	-26,5

Tabla 3: Evolución del balance térmico del cuerpo humano con el caudal de ventilación

ción del cuerpo a la sollicitación térmica, es decir la sudoración ni la evaporación del sudor que se va a facilitar por el movimiento del aire.

Este sencillo ejemplo evidencia el beneficio que se puede esperar de una ventilación eficaz sobre el confort térmico tanto a nivel del acondicionamiento interior por reducción de la temperatura interna del aire como a nivel de mejoramiento de los intercambios de calor entre ese mismo aire y el cuerpo humano.

La segunda etapa para poder realmente evaluar y aprovechar esos efectos es la predicción de los caudales de ventilación y de las velocidades del mismo aire al interior de un edificio, lo cual es una tarea bastante difícil por la complejidad de los fenómenos acoplados que van a participar en la definición del comportamiento eólico de un edificio.

## 5. PREDICCIÓN DE LAS TRANSFERENCIAS DE AIRE POR MODELOS DE PRESIÓN:

Hemos visto en la primera parte de esta exposición que la ventilación juega un papel muy importante a nivel de las condiciones interiores, siendo el primer efecto una modificación de la temperatura del aire debida a la variación del caudal de ventilación, el segundo es el efecto de la velocidad del aire a nivel local sobre los intercambios convectivos y de masa entre el cuerpo y el ambiente.

Se trata ahora de lograr una predicción de los caudales y de las velocidades locales para establecer una evaluación cualitativa y cuantitativa de los ambientes interiores. En primer lugar nos interesamos en la predicción de los caudales.

### 5.1 Los Modelos de Presión [6 a 9]:

#### 5.1.1 Base física:

Para un fluido incompresible, no viscoso y en régimen permanente, la integración de las ecuaciones de Navier Stokes conduce a una forma sencilla cual la combina el efecto de inercia debido al transporte, el efecto de la presión y el de la gravedad sobre un campo de masa volúmica.

$$1/2 \rho V^2 + P + \rho g z = C_{ste} \quad (18)$$

Esta ecuación es conocida bajo el nombre de ecuación de Bernoulli y es la ecuación fundamental para predecir el comportamiento aeróbico de edificios sometidos a los efectos conjugados del ambiente exterior (viento, temperatura externa, presión y humedad), y del ambiente interior (temperatura, humedad y ventilación mecánica). La etapa siguiente consiste en definir precisamente los efectos de cada uno de esos fenómenos.

#### 5.1.2 Efecto del viento y coeficiente de presión:

Los efectos motores de la ventilación natural son los campos de velocidad y de presión debidos al viento frente a un obstáculo y combinación con el efecto de tiraje térmico.

Cuando un flujo de fluido encuentra a un obstáculo, la velocidad del flujo induce una sobrepresión. Esta presión dinámica es dada por el teorema de Bernoulli.

$$P_{dyn} = 1/2 \rho V^2 \quad (19)$$

En la ecuación 18, V representa la velocidad instantánea del viento. Utilizar directamente esta ecuación es entonces imposible en caso de edificios donde la velocidad varía demasiado en dirección e intensidad. En general se utilizan presiones media sobre intervalo de tiempo del orden de 10 minutos. Como los valores medios obedecen también al teorema de Bernoulli, se puede escribir:

$$P_V = 1/2 \rho V_H^2 \quad (20)$$

En la ecuación 20,  $V_H$  representa un valor medio de la velocidad del viento a la altura H, y  $\rho$  es la masa volúmica del aire exterior. La definición de la diferencia de presión entre la presión efectiva del viento sobre el edificio y la presión atmosférica introduce un parámetro empírico  $C_p$ , el coeficiente de presión.

$$P_S = C_p P_V \quad (21)$$

Los valores de  $C_p$  para varios tipos de edificios se encuentran en la literatura o se obtienen con ensayos en túneles de viento [10 a 12].

**5.1.3 Efecto del Tiraje Térmico:**

Otro fenómeno físico que influencia a las infiltraciones y a la ventilación natural es el de tiraje térmico debido a la diferencia demasa volúmica entre el aire interior y exterior. La figura 3 presenta una descripción de este fenómeno.

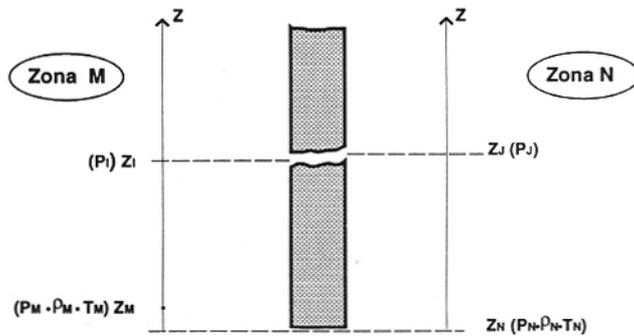


Figura 3: Tiraje Térmico.

El efecto motor es la diferencia local de presión (Pi - Pj) que se puede escribir en función de las presiones de referencia de cada zona.

$$P_i - P_j = P_M - P_N + P_{si} \quad (22)$$

Donde P<sub>si</sub> representa el efecto de tiraje térmico:

$$P_{si} = \rho_M g (Z_M - Z_i) - \rho_N g (Z_N - Z_j) \quad (23)$$

En la ecuación 23, ρ<sub>M</sub> y ρ<sub>N</sub> son las masas volúmicas del aire en cada una de las zonas.

**5.1.4. Ecuaciones de Flujo:**

Si se aplicara directamente la ecuación de Bernoulli, el caudal másico de un fluido de masa volúmica a través de una abertura de sección A sería:

$$m_t = \rho A (2 \Delta P / \rho)^{1/2} \quad (24)$$

De hecho el flujo es afectado por las características geométricas de la abertura. En caso de una geometría sencilla se puede definir un coeficiente de descarga Cd y se da entonces el caudal másico real:

$$M_a = C_d \rho A (2 \Delta P / \rho)^{1/2} \quad (25)$$

En casos de estructuras aún mas complejas, por analogía, se define una ley general de flujo bajo la forma:

$$m_r = K \Delta P^n \quad (26)$$

K y n son características propias de la sección de infiltración de aire.

**5.1.4 Conservación de masa:**

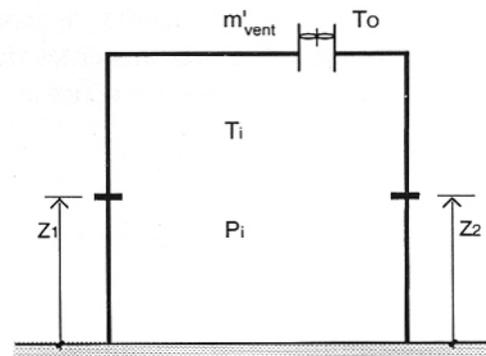
Al final se tiene que verificar la conservación de masa dentro de cada zona considerada, haciendo la sumatoria de todos los caudales másicos entrantes en la zona considerada.

$$m_{vent} + \sum m_k = 0 \quad (27)$$

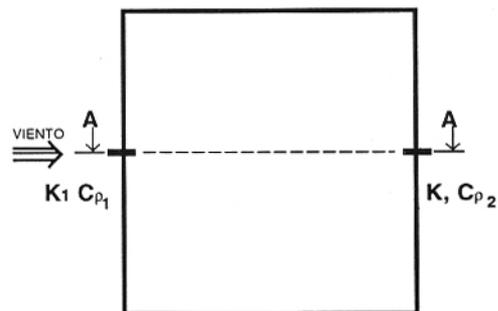
m<sub>vent</sub> representa el caudal debido a un sistema mecánico de ventilación, ∑ m<sub>k</sub> es la sumatoria de los flujos de infiltración hacia la zona.

**5.2 Estudio de caso:**

A continuación se desarrolla un ejemplo sencillo para ilustrar los efectos de los distintos fenómenos físicos desarrollados anteriormente sobre la transfe-



SECCION A-A



PLANTA

Figura 4: Definición general del caso estudiado:

rencia de aire adentro de un edificio. La figura 4 representa un esquema del caso estudiado, es un volumen sencillo con dos aberturas opuestas sobre cada una de las fachadas.

**5.2.1 Efecto del viento y de los coeficientes de flujo de las aberturas:**

En este primer caso se considera unicamente el efecto del viento y de las características de las aberturas, no existen diferencias de temperatura o humedad entre el aire interior y exterior.

La diferencia de presión debida al viento sobre cada una de las fachadas se pueden escribir:

$$PS1 = 1/2 C_{p1} \rho V^2 \quad \text{y} \quad PS2 = 1/2 C_{p2} \rho V^2 \quad (28)$$

Los coeficientes  $C_{p1}$  y  $C_{p2}$  se encuentran en tablas, las diferencias de presión entre cada fachada y el interior se encuentran directamente,

con  $\Delta P1 > 0$  y  $\Delta P2 < 0$  se llega a: (29)

$$m1 = K1 \Delta P1^n \quad \text{y} \quad m2 = K2 \Delta P2^n \quad (30)$$

Los coeficientes K se determinan por ensayos de presión o se pueden sacar de características generales de la permeabilidad de los componentes de una pared. La conservación de la masa conduce a:

$$m1 + m2 = 0 \quad (31)$$

Si se consideran dos aberturas idénticas, se llega entonces a:

$$\Delta P1 + \Delta P2 = 0 \quad (32)$$

La presión interior se define entonces directamente, así como el caudal de aire:

$$Pi = 1/4 \rho V^2 [C_{p1} + C_{p2}] \quad (33)$$

$$\text{y} \quad m = K [1/4 \rho V^2 [C_{p1} + C_{p2}]]^n \quad (34)$$

La figura 5 muestra evolución del caudal de ventilación con la velocidad del viento y las características de las aberturas.

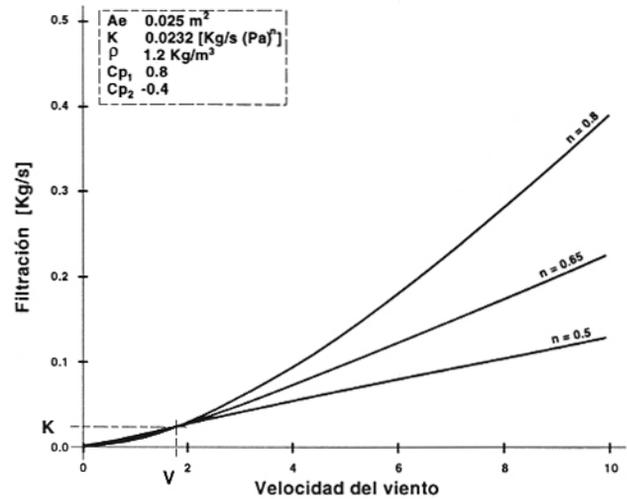


Figura 5: Caudal de ventilación en función de la velocidad del viento y de las características de las aberturas.

La ecuación 34 muestra igualmente que el caudal es directamente proporcional al coeficiente K, la influencia del exponente n es mas difícil de entender, para altas diferencias de presión,  $1/4 \rho V^2 [C_{p1} + C_{p2}] > 1$ , el caudal aumenta cuando n es mayor, es decir cuando el flujo se acerca al de un flujo laminar. Al contrario para bajas diferencias de presión,  $1/4 \rho V^2 [C_{p1} + C_{p2}] < 1$ , el flujo es ligeramente superior a n.

**5.2.2 Acoplamiento con un sistema mecánico de ventilación:**

Supongamos un sistema de ventilación mecánico con un caudal de referencia  $m_{vent}$ , el balance de masa a dentro del edificio se puede escribir:

$$m1 + m2 = m_{vent} \quad (35)$$

Se puede definir el nivel de protección de nuestro sistema de extraacción como el valor máximo de la velocidad que se puede soportar sin que haya ventilación cruzada al interior del edificio, todo el caudal de ventilación pasa por el sistema de extraacción, lo cual se traduce en que  $\Delta P2$  es siempre positivo.

La figura 6 presenta los resultados obtenidos cuando se calcula el nivel de protección en función del caudal de extraacción y de las características de las aberturas.

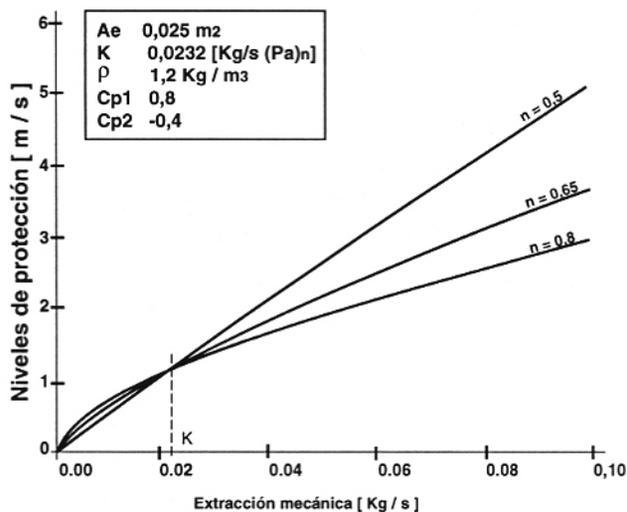


Figura 6: Nivel de protección de un sistema mecánico de ventilación

**5.2.3. Acoplamiento con el tiraje térmico**

Se considera ahora un edificio sin sistema de ventilación, pero con una diferencia de temperatura entre el aire exterior e interior, consideramos una temperatura interior de 20 °C y tres distintos casos de localización de las aberturas con una temperatura exterior de 0 °C. La figura 7 presenta el esquema general de los casos estudiados.

Utilizando las ecuaciones básicas que desarrollamos al principio, se puede definir de manera sencilla las nuevas diferencias de presión.

$$\Delta P_1 = 1/2 C_{p1} \rho V^2 - P_i - Z_1 (\rho_0 - \rho_{20}) \quad (36)$$

$$y \Delta P_2 = 1/2 C_{p2} \rho_0 V^2 - P_i - Z_2 (\rho_0 - \rho_{20})$$

Si se asume que las características de las ecuaciones de flujo (K y n) no cambian con la temperatura, la presión interna  $P_i$  se define entonces por:

$$P_i = 1/4 \rho_0 V^2 [C_{p1} + C_{p2}] - 1/2 (Z_1 + Z_2) (\rho_0 - \rho_{20}) \quad (37)$$

La figura 8 presenta los resultados obtenidos para las tres configuraciones estudiadas. Se nota aquí el efecto del tiraje térmico entre las configuraciones 1 y 2 o también 1 y 3. Para bajas velocidades del aire, este efecto aparece como el primer efecto motor, después, su influencia disminuye con la velocidad del viento.

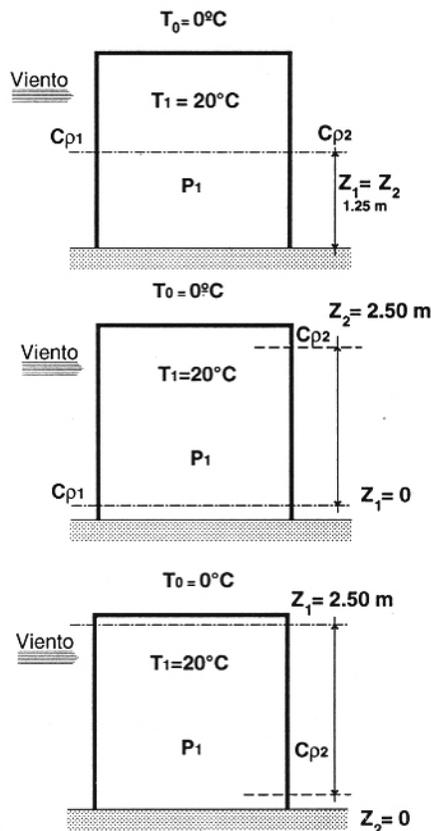


Figura 7: Esquema general de las tres configuraciones estudiadas.

A nivel de una aplicación en clima tropical húmedo, la influencia del tiraje térmico se puede despreciar en la mayoría de los casos dado que las diferencias de temperaturas entre el interior de los edificios y el ambiente exterior suelen ser pequeñas. Sin embargo, este efecto es conservador dado que va a favorecer la ventilación cuando baja la velocidad del viento subiendo en consecuencia las temperaturas internas.

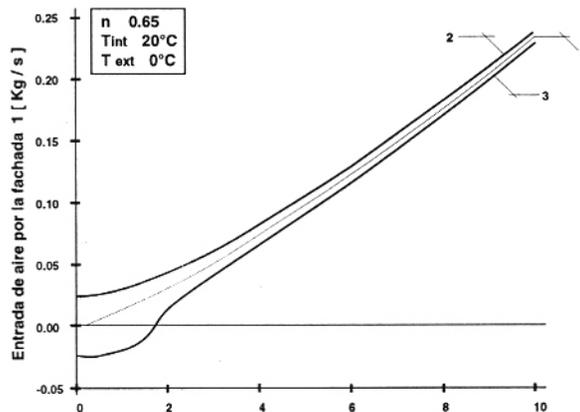


Figura 8: Influencias acopladas del tiraje térmico y de la velocidad del viento sobre el caudal de ventilación.

Este ejemplo sencillo nos enseña, los efectos de los fenómenos físicos dominantes sobre la ventilación de un edificio de características muy simples. Sin embargo, para edificios mas complejos, se pueden utilizar el mismo tipo de modelos de presión para predecir su comportamiento eólico.

**5.2.4. Caso particular de las grandes aberturas:**

a) Caso de las aberturas internas.

El problema adicional que se puede encontrar en grandes aberturas [13] es que ciertas condiciones y debido al campo de presión existente adentro de un edificio, podemos tener un flujo de aire en ambos sentidos a través de una gran abertura conectando dos zonas. La figura 9 representa un caso básico de grandes aberturas.

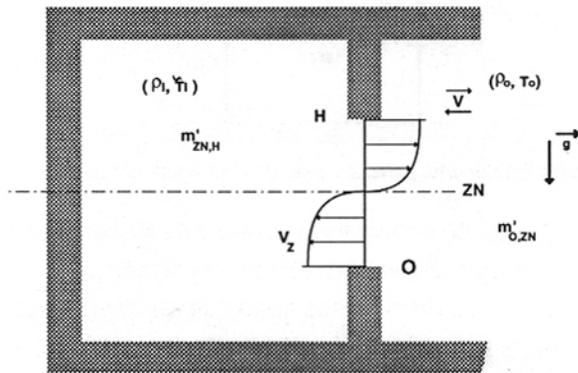


Figura 9: Caso básico de flujo de aire a través de una gran abertura.

Utilizando directamente el teorema de Bernoulli, se puede resolver este problema calculando la posición del eje neutro, y el caudal intercambiado entre cada zona.

$$ZN / (H - ZN) = (\rho_i - \rho_o)^{1/3} \quad (38)$$

$$y \quad m_{0,ZN} = C_d W/3 (8 g H^3 \rho' i \Delta P)^{1/2} \quad (39)$$

$$\text{con} \quad \rho \Pi i = \rho_i / [1 + (\rho_i / \rho_o)^{1/3}]^3 \quad (40)$$

Donde W representa el ancho de la abertura y  $C_d$  el coeficiente de descarga de la misma.

La figura 10 presenta la evolución del caudal intercambiado entre dos habitaciones debido a diferencias de temperatura o de humedad.

Se puede notar aquí que no se puede despreciar siempre el efecto de la humedad, en el caso presente mostramos que una diferencia de 5 gramos de vapor de agua por kilogramo de aire entre dos zonas produce el mismo efecto que 5 grados.

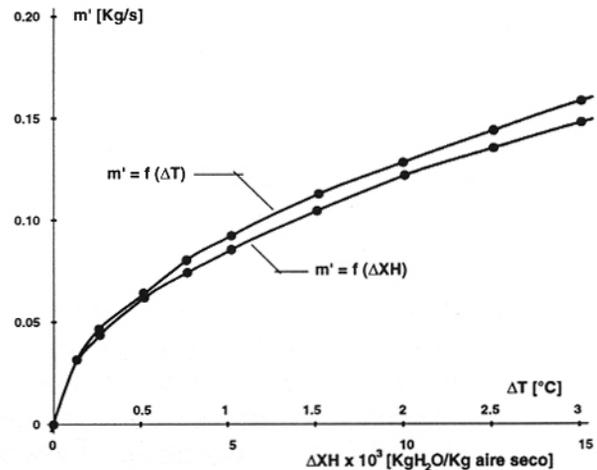


Figura 10: Flujo gravitacional de aire debido a diferencias de temperatura o humedad entre dos zonas de edificio.

b) Caso de las aberturas externas:

El caso de las aberturas externas es mucho mas complicado debido a la dificultad de caracterizar al viento llegando sobre la misma abertura. Sin embargo, se puede considerar que los efectos del viento se pueden descomponer en una presión fija mas un gradiente de presión que simula el efecto de los términos fluctuantes sobre la misma ventilación. Se llega entonces a una representación mas general bajo la forma definida por la figura 11.

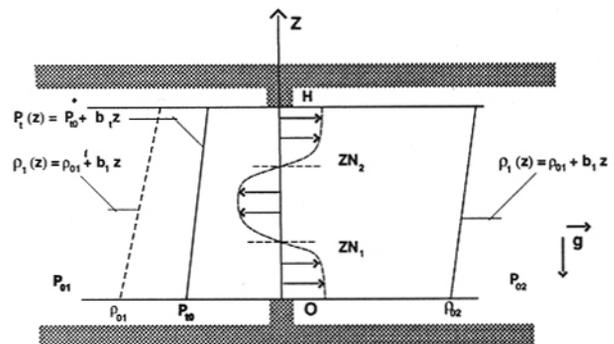


Figura 11: Problema general de transferencia de aire a través de una gran abertura.

El problema general tiene que resolverse numéricamente y la figura 12 describe por ejemplo el efecto de los términos fluctuantes (turbulencia) sobre el caudal de ventilación obtenido a través de una gran abertura por distintas hipótesis de representación de esos mismos términos.

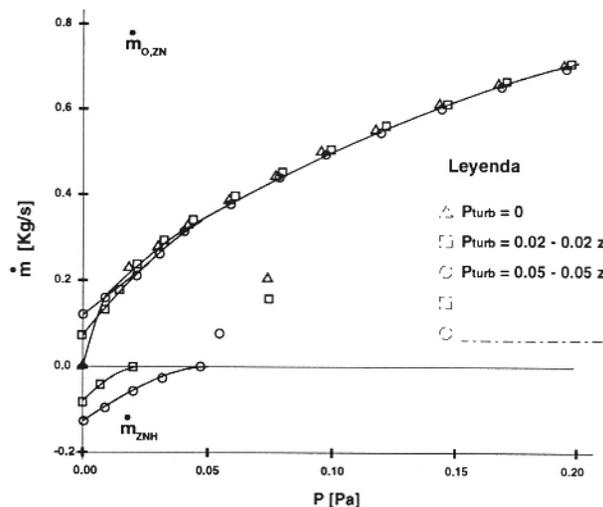


Figura 12: Efecto de la turbulencia sobre el caudal de ventilación.

Este último ejemplo muestra el límite de la predicción de los flujos de aire por modelos de presión. En caso de edificios con muchas aberturas grandes, es cierto que el efecto dominante sobre la ventilación interna es el viento, el problema que queda por resolver es como modelizar el viento que llega a una gran abertura. De hecho los coeficientes de presión que utilizamos para definir el efecto del viento sobre edificios tienen una validez limitada a aberturas pequeñas, el efecto medio ya no es muy bien representado, y además, se necesitan mas trabajos para validar los modelos propuestos para tomar en cuenta los efectos fluctuantes.

Por otro lado, los modelos de presión son modelos energéticos, es decir que permiten la predicción de caudales de aire pero no bastan para definir velocidades locales internas. La única posibilidad es definir una velocidad de caudal que corresponda a la velocidad de un flujo uniforme a través de una habitación de sección dada. En tal sentido se ha acometido en los últimos años el desarrollo de modelos de base empírica que buscan el conocimiento de las velocidades al interior de locales.

## 6. MODELOS EMPÍRICOS PARA LA PREDICCIÓN DE VELOCIDADES INTERNAS DE AIRE EN EDIFICIOS.

La idea es definir parámetros empíricos que nos permitan llegar al conocimiento de las velocidades internas del aire dentro de un edificio sin elaborar modelos muy complejos de mecánica de fluidos.

Esta idea fue utilizada por Aynsley [14] desarrollada luego por Gouin [15] y Celestine [16], quienes definieron los coeficientes de velocidad  $C_v$  como definimos al principio el coeficiente de presión.

$$V_i = C_v V \quad (41)$$

Donde  $V_i$  representa la velocidad del aire en un punto dado de una zona y  $V$  la velocidad característica del viento. La determinación de  $C_v$  se hace de manera experimental con modelos en túneles de viento.

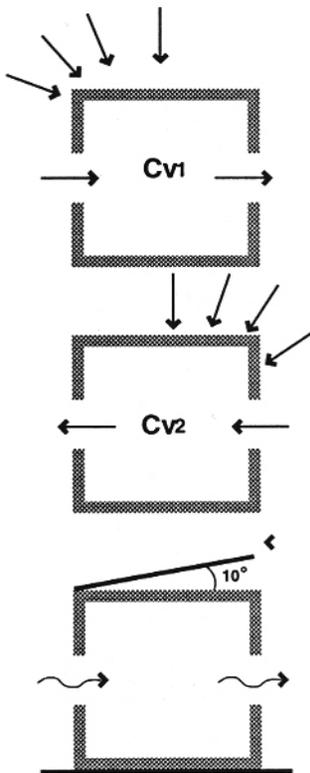
La figura 13 presenta un ejemplo de correlación obtenida por Sargentadi [17], para evaluar el coeficiente de velocidad en función de la dirección del viento.

El problema que queda por resolver es la clasificación tipológica de los edificios seleccionados, de hecho es el mismo problema que para los coeficientes de presión.

En los momentos actuales este planteamiento sobre coeficientes de velocidad, queda en el ámbito de la investigación. Es importante señalar que esta vía en proceso de desarrollo puede ser de gran utilidad en países tropicales.

## 7. CONCLUSION

En conclusión, podemos decir que la optimización de la ventilación es seguramente una de las vías más sencilla y eficaz para mejorar las condiciones de confort dentro de edificios en clima tropical húmedo, tanto a nivel de la reducción de las temperaturas interiores como a nivel del aumento de los intercambios convectivos y de masa entre el cuerpo humano y el ambiente. Sin embargo, el diseño y la predicción del comportamiento eólico de edificios es una tarea bastante difícil.



**Correlación de las medidas de GOUIN  
Monozona (Tipo 1)**

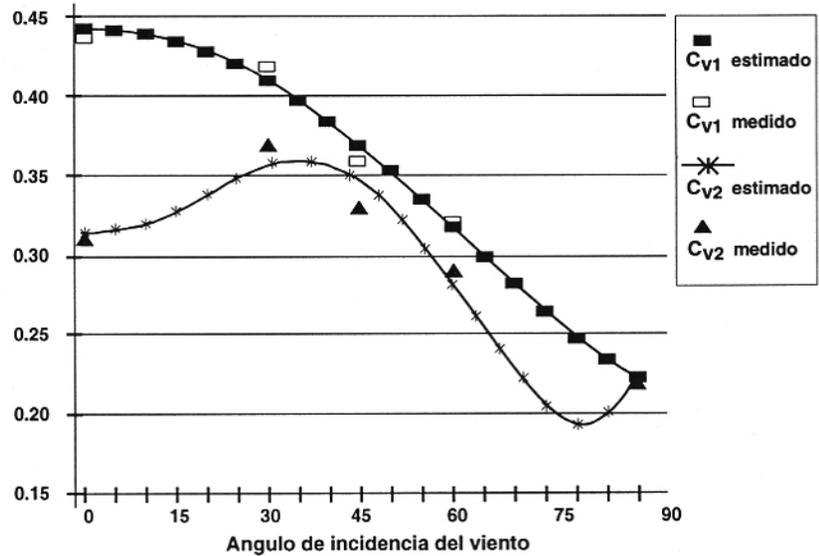


Figura 13: Influencia de la dirección del viento sobre el coeficiente de velocidad al centro de la zona.

Hace algunos años se planteó el desarrollo de modelos numéricos de presión para predecir las transferencias de aire al interior de edificios. Este tipo de modelos permite tomar en cuenta la mayoría de los fenómenos físicos que determinan las transferencias de aire al interior de edificaciones y son muy eficientes para edificios cuya porosidad no sea muy elevada. Para edificios de elevada porosidad, las bajas diferencias de presión puede conducir a caudales de ventilación muy altos lo cual requiere de un mayor nivel de conocimiento sobre el efecto causado por el viento sobre esos edificios.

Recientemente se ha desarrollado una segunda vía que consiste en definir coeficientes empíricos que permitan conocer directamente la velocidad interna del aire en un edificio, en función de sus características arquitectónicas y de las condiciones exteriores del viento. Estos modelos parecen prometedores, pero no se pueden utilizar de manera exhaustiva por falta de datos. En tal sentido se requiere de un número elevado de experimentaciones para definir una clasificación tipológica de los edificios y medir las velocidades internas para así obtener correlaciones que permitan la evaluación de la calidad del diseño térmico de las edificaciones en función a su ventilación.

## NOTAS BIBLIOGRAFICAS

- 1 P. O. FANGER,  
*Thermal confort*, Mac Graw Hill Edit., 1973.
- 2 B. GIVONI,  
*L' homme l' architecture et le climat*, Editions du Moniteur, 1978.
- 3 GAGGE,  
*An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response*, ASHRAE Transactions, part. 1, 1971.
- 4 SHARMA et al.,  
*A thermal stress index for warm humid conditions in India*. Educational Building Report N° 14, UNESCO regional office for education in Asia, Bangkok, 1979.
- 5 J.J. ROUX, P. DEPECKER et J. M. PALLIER,  
*La representation physique des interactions entre le corps et l' ambiance. Comparaison des models élaborés en europe et aux Etats Unis*. Revue de Physique Appliquée, N° 25, 1990, pp. 109-123.
- 6 F. ALLARD et al.  
*Fundamentals of the multizone air flow model COMIS*, AIVC Technical note N° 29, International Energy Agency, May 1990.
- 6' F. ALLARD and M. HERRLIN,  
*Wind induced ventilation*, ASHRAE Transactions, vol. 95, Pt. 2, 1989.
- 7 H. FEUSTEL and V.M. KENDOM,  
*Infiltration models for multicellular structures*. A literature review, Energy and Buildings, N° 8, 2 1985, pp. 123-136.
- 7 A. ROLDAN,  
*Etude thermique et aéraulique des enveloppes de batiment, influence des coupalges intérieurs et du multizonage*, tesis de Doctor Ingeniero, INSA de Lyon, 19485, 310 p.
- 9 M. HERRLIN, MOVECOMP,  
*A multizone infiltration and ventilation simulation program*, Air Infiltration Review, Vol 9, N° 3, 1988.
- 10 ASHRAE,  
*Handbook of Fundamentals*, Chapter 14, 1989.
- 11 A. J. BOWEN,  
*A wind tunnel investigation using simple building models to obtain mean surface wind pressure coefficients for air infiltrartion estimates*, Mational Council of Canadá, Technical report LTR-LA 209, 1976.
- 12 J. GANDEMER,  
*Champ de pression moyenne sur les constructions usuelles. Application a la conception des installations de ventilation*, Cahiers du CSTB, N° 197, 1978.
- 13 F. ALLARD and Y. UTSUMI,  
*Airflow through large openings*, Energy and Buildings, accepted for publication, 1991.
- 14 R.M. AYNSLEY, W. MELBOURNE and B.J. VICKERY,  
*Architectural aerodynamics*, Applied Science Publishers, London, 1977.
- 15 G. GOUIN,  
*Tesis de Doctorado*, Université de Nantes, Francia 1982.
- 16 C. CELESTINE,  
*Tesis de Doctor Ingeniero*. INSA de Lyon, Francia 1985.
- 17 SARGENTADI,  
*Informe de Investigación del CETHIL*, 1991.