



SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO E ANÁLISE DO IMPACTO  
DE SISTEMAS DE VENTILAÇÃO NATURAL SOBRE A QUALIDADE  
E AS CONDIÇÕES PSICROMÉTRICAS DO AR AMBIENTE

C. Melo e Caldeira Filho, H.C.  
NRVA - Núcleo de Refrigeração,  
Ventilação e Condicionamento de Ar  
Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC  
Cx. Postal 476 - 88049 - Florianópolis - SC

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar, de uma maneira resumida, um modelo matemático capaz de simular trocas de ar por infiltração/ventilação em edificações. A ênfase maior dada análise das potencialidades do programa, notadamente para edificações com zonas múltiplas. São apresentadas também análises do impacto das trocas de ar sobre a concentração de poluentes e sobre as condições psicrométricas do ar no interior de edificações.

ABSTRACT

The objective of this work is to present, in a resumed way, a numerical model to simulate air infiltration/ventilation rates in buildings. The main emphasis is given to the analysis of the potentialities of the program, mainly to multi-zone buildings. Analyses of the impact of the air exchanges rates on the internal psychometrics conditions and pollutant concentration are also presented.

INTRODUÇÃO

As condições psicrométricas assim como também o teor de poluentes do ar, no interior de edificações, são fatores determinantes ao estabelecimento de condições apropriadas ao desenvolvimento de qualquer atividade que envolva a participação de seres humanos. Tais parâmetros são afetados pela presença de uma vazão maior ou menor de ar, proveniente do meio ambiente externo à edificação.

Tal vazão pode ser induzida por um processo, denominado infiltração, onde o ar move-se de uma maneira não controlada, através de orifícios e frestas, induzido por um diferencial de pressão, resultante da ação combinada do vento e da diferença de temperatura, entre o meio ambiente interno e externo. Um outro processo, denominado ventilação natural, consiste em utilizar o mesmo diferencial de pressão, em conjunto com aberturas, estrategicamente colocadas. Obviamente tais processos podem ocorrer simultaneamente e ainda sob a presença de um sistema de ventilação mecânica.

Atualmente, encontram-se disponíveis técnicas experimentais, tais como a utilização de gases traçadores e de pressurização, que permitem a medição da vazão de ar induzida e a identificação das características de vazamento da edificação.

A utilização de tais técnicas, contudo, oferece uma série de inconvenientes. Por exemplo, a utilização da técnica dos gases traçadores exige a realização de medições durante um período de tempo relativamente longo, para estabelecer-se a relação entre a infiltração de ar e os parâmetros climáticos. Além disto, as técnicas experimentais podem, obviamente, apenas serem empregadas em edificações já existentes sendo, portanto, de pouca valia na fase inicial de projeto.

Dentro deste contexto as técnicas de modelação matemática, quando convenientemente validadas, vem a se constituir num forte instrumento para a avaliação e análise dos processos de trocas de ar por infiltração/ventilação.

Assim sendo, procurar-se-á, neste trabalho, explorar

as potencialidades da estrutura computacional, denominada FLOW2, desenvolvida por Caldeira Filho (1989).

MODELAÇÃO MATEMÁTICA

Os fundamentos matemáticos do modelo em questão, são apresentados, em detalhes, por Caldeira Filho (1989). Desta forma apresentar-se-á a modelação matemática, de uma maneira resumida, procurando-se dar maior ênfase à análise das potencialidades da estrutura computacional desenvolvida.

Equação da vazão. A equação que rege o fenômeno é a equação clássica para escoamento através de orifícios:

$$Q = C \cdot \Delta P^n \quad (1)$$

onde Q corresponde a vazão de ar induzida, C ao coeficiente de vazão e  $\Delta P$  ao diferencial de pressão.

O expoente n é relacionado com o regime do escoamento, variando entre os limites de 0,5 para regime turbulento e 1,0 para fluxo laminar.

A equação (1) é adequada, principalmente, para estimativas da vazão de ar através de pequenas aberturas, tais como orifícios e fendas. Para aberturas do tipo comumente encontrado em instalações de ventilação natural, o escoamento tende a ser turbulento e pode ser melhor representado pela equação apresentada por Lidament (1986),

$$Q = K.A.(2 \Delta P/\rho)^{0,5} \quad (2)$$

onde K refere-se ao coeficiente de descarga, A a área da abertura e  $\rho$  a densidade do ar.

Infiltração de ar induzida pela ação do vento. A pressão, exercida sobre as paredes de uma edificação, pela ação do vento, varia de um modo complexo, devido principalmente ao perfil da camada limite atmosférica, a presença de corpos vizinhos e as características aerodinâmicas do fluxo de ar ao redor da edificação.

Tal pressão,  $P_v$ , pode ser expressa matematicamente pela equação a seguir:

$$P_v = C_p \cdot \rho V^2 / 2 \quad (3)$$

onde  $C_p$  corresponde ao coeficiente de pressão e  $V$  a velocidade do vento.

Infiltração de ar induzida pela ação do efeito chaminé. O efeito chaminé surge como resultado de um diferencial de temperatura e, conseqüentemente, de um diferencial de densidade entre o interior e o exterior da edificação. Isto cria uma diferença entre os gradientes de pressão de ar interno e externo, fazendo com que surja um diferencial de pressão vertical.

Quando a temperatura do ar interno é maior do que a do ar externo, o fluxo de ar entra através das aberturas situadas na parte mais baixa da edificação e sai através das aberturas situadas na parte mais alta. A direção do fluxo é reversa quando a temperatura do ar interno é menor do que a do ar externo. O nível, sobre o eixo vertical, onde a pressão interior se iguala com a pressão exterior é chamado de plano neutro.

Assim, para um ambiente com temperatura interna,  $T_i$ , uniforme a equação que estabelece o diferencial de pressão, devido ao efeito chaminé,  $P_c$ , entre duas aberturas situadas nas alturas  $h_1$  e  $h_2$ , tal que  $h_1 < h_2$ , pode ser dada pela equação a seguir

$$P_c = -0,0342 P_b (h_2 - h_1) [1/T_e - 1/T_i] \quad (4)$$

onde  $P_b$  corresponde a pressão atmosférica e  $T_e$  a temperatura absoluta do ar externo.

Ação combinada do vento e do efeito chaminé. Apesar dos efeitos do vento e do efeito chaminé terem sido apresentados separadamente, as edificações estão sujeitas simultaneamente a ambos efeitos. Isto se expressa, calculando-se a diferença de pressão total,  $P_t$ , sobre uma abertura, através da soma algébrica das diferenças de pressão criadas pela ação do vento, e pelo efeito chaminé, ou seja:

$$P_t = P_v + P_c \quad (5)$$

Determinação das pressões internas. A pressão do ar interno, em um determinado ambiente, é determinada através da equação da continuidade. Ou seja, para um ambiente com "N" passagens de ar, tem-se:

$$\sum_{i=1}^N \rho_i Q_i = 0 \quad (6)$$

onde  $Q_i$  e  $\rho_i$  referem-se, respectivamente, a vazão e a densidade do ar através da i-ésima passagem.

Para diferenças de temperatura, entre o ar interno e externo, inferiores a 20°C, o primeiro termo da equação (6) pode ser desprezado, já que a diferença de densidade resultante é desprezível em relação ao valor absoluto da densidade do ar. Assim,

$$\sum_{i=1}^N Q_i = 0 \quad (7)$$

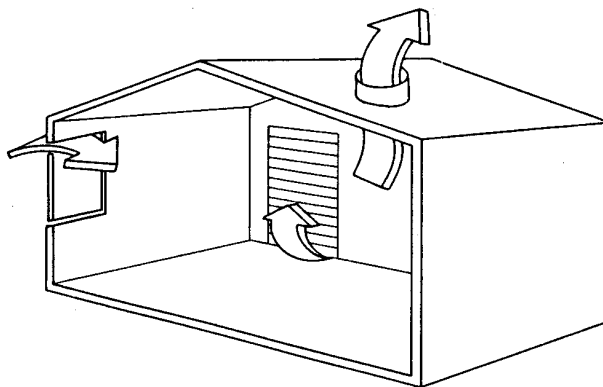
No caso de existir um sistema de ventilação mecânica adiciona-se/subtrai-se, na equação (7), a vazão de ar fornecida/extraída mecanicamente.

O modelo matemático sendo apresentado, ao contrário de outros modelos existentes, permite a opção por uma abordagem do tipo zona-única ou de zonas-múltiplas.

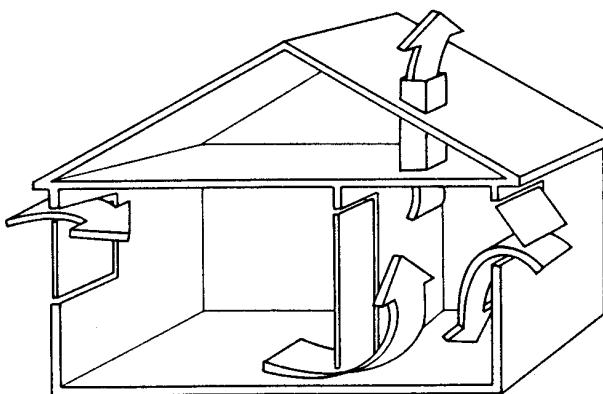
Uma modelação do tipo zona-única é aquela na qual assume-se que o ar interno encontra-se bem misturado e a pressão uniforme. Por outro lado, na modelação do tipo zonas-múltiplas, assume-se que o ar interno é particionado por repartições internas, apresentando assim pressões diferentes em cada zona (Figura 1)

Para edificações com zonas-múltiplas, ter-se-á uma equação da forma da equação (7), para cada zona. Isto

faz com que torne-se necessário a solução simultânea de um sistema de equações não lineares. A solução de tal sistema é obtida, no programa FLOW2, através da utilização do método iterativo de Newton-Raphson, para múltiplas equações e incógnitas, e da técnica da matriz esparsa conforme indicado por Stoecker (1989).



(a)



(b)

Fig.1 - Técnicas de modelação matemática.  
a) zona-única e b) zonas-múltiplas.

#### POTENCIALIDADES DO PROGRAMA

Durante o desenvolvimento do presente modelo Melo (1987) e Melo e Caldeira Filho (1989) tiveram, respectivamente, a oportunidade de apresentar um estudo de validação e uma análise das potencialidades do mesmo. Entretanto, devido as restrições de espaço, Melo e Caldeira Filho (1989), utilizaram-se somente da modelação zona-única, assim como também deixaram de apresentar, outras características do programa. Tal situação deverá ser melhorada com este trabalho.

As análises a seguir serão baseadas em três tipos diferentes de edificações, denominadas A, B e C. Detalhes construtivos destas edificações, assim como também das suas características de vazamento são apresentados por Caldeira Filho (1989). Assim a Figura 2 refere-se a edificação tipo A, a Figura 4 a edificação tipo B e

as Figuras 6,7 e 8 a edificação tipo C.

Estratificação da temperatura do ar interno. Para calcular-se o diferencial de pressão, devido ao efeito chaminé, em ambientes que apresentam uma estratificação térmica vertical, a equação (4) deve ser modificada, pois o gradiente de pressão interno será não linear, em decorrência da variação da densidade com a temperatura. Assim,

$$P_i = P_o - g \int_{h_o}^h \rho dh \quad (8)$$

onde  $P_i$  corresponde a pressão do ar interno e  $P_o$  corresponde a pressão no nível de referência  $h_o$ .

Assumindo uma variação linear para a temperatura do ar interno,  $T_i$ , do tipo

$$T_i = b \cdot h + T_o \quad (9)$$

e considerando-se o ar como um gás perfeito, obtém-se:

$$P_c = -0,0342 P_b \left[ \frac{(h_2 - h_1)}{T_2} - 1/b \ln \left( \frac{bh_2 + T_o}{bh_1 + T_o} \right) \right] \quad (10)$$

A Figura 2 ilustra o efeito da estratificação térmica linear sobre a vazão de ar induzida, na ausência da ação do vento, e sob uma diferença, na zona de ocupação, de  $3^\circ\text{C}$ , entre as temperaturas do ar interno e externo. Verifica-se que a vazão aumenta com o aumento da estratificação térmica linear, assim como também com o aumento da distância entre as aberturas superiores e inferiores.

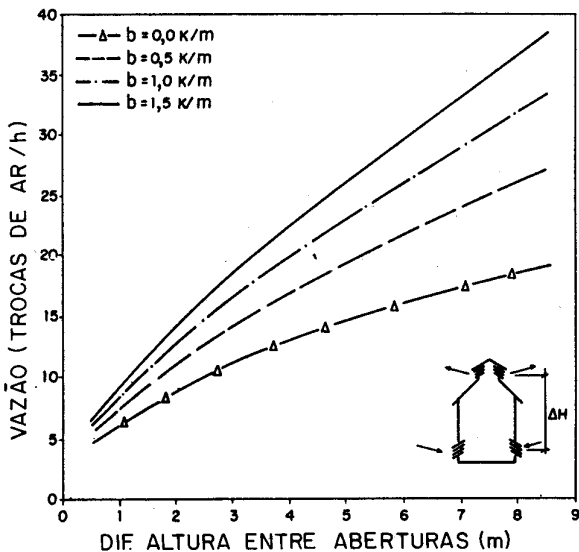


Fig.2 - Efeito da estratificação térmica vertical sobre a vazão de ar induzida.

#### Aberturas de altura elevada

Para aberturas de altura elevada, tais como portas de carga e descarga em pavilhões industriais, necessita-se de uma abordagem um pouco diferente, já que as mesmas podem conter o plano neutro. Isto significa dizer que pode ocorrer, por exemplo, que o ar entre pela parte inferior e saia pela parte superior da mesma abertura. Uma solução conveniente consiste em reescrever-se a equação (2), da seguinte forma:

$$Q_x = K_x A_x (2\Delta P/\rho)^{0,5} \quad (11)$$

onde o subscrito x refere-se a uma faixa horizontal da abertura, conforme indicado na Figura 3.

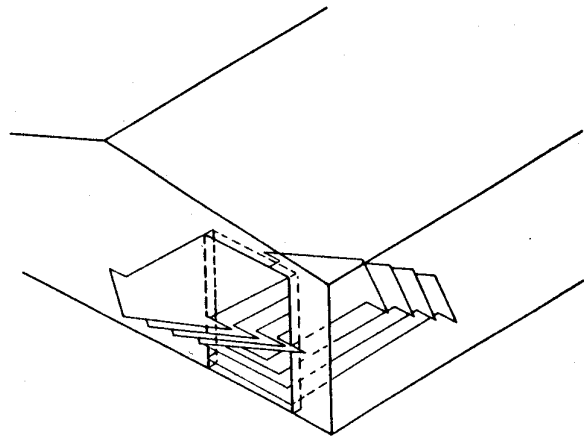
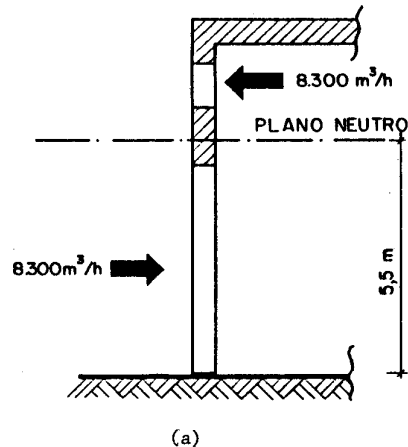


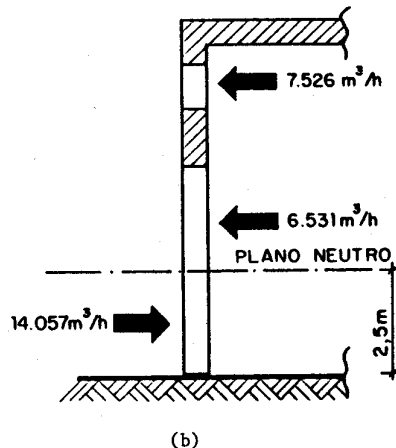
Fig.3 - Passagens múltiplas de ar por uma abertura de altura elevada.

Na Figura 4 mostra-se, de forma esquemática, a distribuição das vazões de ar e o posicionamento do plano neutro, em função do número de divisões adotado na

VAZÃO DE AR INDUZIDA =  $8.300 \text{ m}^3/\text{h}$



VAZÃO DE AR INDUZIDA =  $14.057 \text{ m}^3/\text{h}$



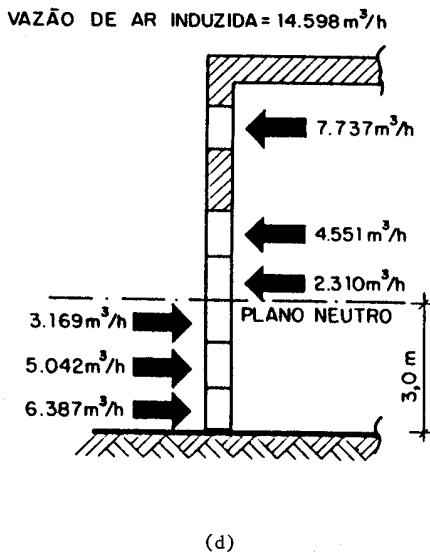
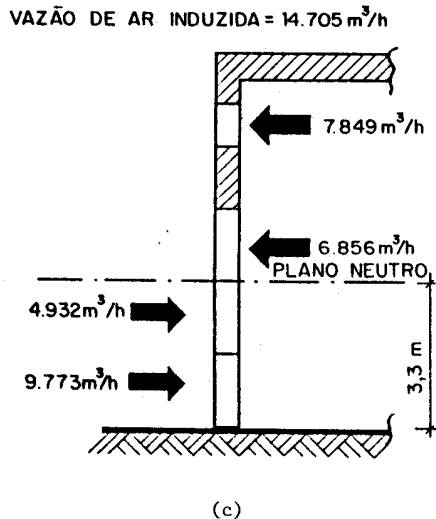


Fig.4 - Efeito do número de divisões na determinação da vazão de ar induzida através de aberturas de altura elevada.

a) uma divisão; b) duas divisões; c) três divisões e d) quatro divisões.

análise das trocas de ar em uma abertura de altura elevada na ausência da ação do vento e sob uma diferença de temperatura entre o ar interno e externo de 3°C. Conforme pode-se verificar, a medida que o número de divisões é aumentado, tanto a vazão de ar induzida como a altura do plano neutro tendem para valores constantes.

#### Concentração de poluentes

Após a determinação das trocas de ar, em cada zona de uma edificação, pode-se utilizar tais informações para avaliar-se a variação temporal da concentração interna de um determinado poluente. Para tanto, admite-se condições de mistura perfeita, ou seja que o ar admitido mistura-se uniformemente com a massa de ar interno.

Para equacionar-se este problema, considere-se a Figura 5.

Aplicando-se a equação da continuidade, obtém-se:

$$dm/dt = \dot{m}_e - \dot{m}_i + S \quad (12)$$

ou

$$V\dot{m} dC/dt + Q(C_i - C_e) = S \quad (13)$$

onde  $\dot{m}$  refere-se ao fluxo de massa de poluente,  $V$  ao volume do ambiente considerado,  $S$  a taxa de emissão de poluente e  $C$  a concentração de poluente. Integrando-se a equação (13), obtém-se:

$$C_i(t) = (C_e + S/Q) (1 - e^{-nt}) + C_0 e^{-nt} \quad (14)$$

onde  $C_0$  refere-se a concentração inicial de poluente,  $n$  a taxa de trocas de ar, e  $t$  ao tempo.

Para edificações com zonas múltiplas, a equação (13) toma a seguinte forma:

$$V\dot{m}_j dC_j/dt = \sum_{k=1}^{N_j} Q_{kj} C_{kj} + S_j \quad (15)$$

onde  $N_j$  refere-se ao número de passagens de ar na  $j$ -ésima zona e  $C_{kj}$  a concentração do poluente no ar adentrando ou saindo da  $j$ -ésima zona.

Assim, para analisar-se uma edificação com zonas múltiplas, torna-se necessário resolver, simultaneamente, um conjunto de equações diferenciais, o que é feito através do método de Runge-Kutta, de acordo com as indicações de White (1974).

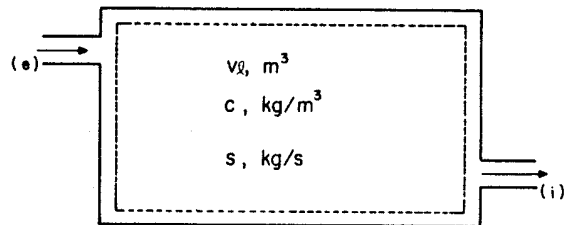


Fig.5 - Volume de controle para a dedução da equação da diluição.

A Figura 6 procura ilustrar o efeito das vazões de ar induzidas em cada zona, sobre a concentração de poluentes. Nesta Figura a concentração inicial em cada zona, foi considerada como sendo igual a 1000 p.p.m., a concentração do ar externo como sendo igual a 300 p.p.m. e a geração interna de contaminantes foi considerada desprezível. Na Figura 6.a, desprezou-se o efeito chaminé, enquanto que na Figura 6.b, ambos os efeitos foram considerados. As vazões de ar induzidas encontram-se indicadas na Figura em questão. Pode-se observar, na Figura 6.a, que as zonas que apresentam uma maior penetração de ar externo apresentam uma redução mais rápida da concentração de poluentes. Na Figura 6.b. observa-se que com o aumento da vazão de ar induzida, devido a ação do vento sobre a edificação, ocorre uma aceleração no processo de redução da concentração interna de poluentes em todas as três zonas consideradas.

#### Condições psicrométricas de ar interno

Para determinar-se a variação temporal das condições psicrométricas do ar interno, decidiu-se estabelecer equações que permitam o cálculo da umidade absoluta e da entalpia do ar em cada intervalo de tempo. Com estas propriedades determinadas, e considerando-se que a pressão interna é, praticamente, idêntica a pressão atmosférica, pode-se calcular as demais propriedades psicrométricas.

Assim, para determinar-se a variação temporal da umidade absoluta, em cada zona de uma edificação,  $W_j$ , utiliza-se a seguinte equação

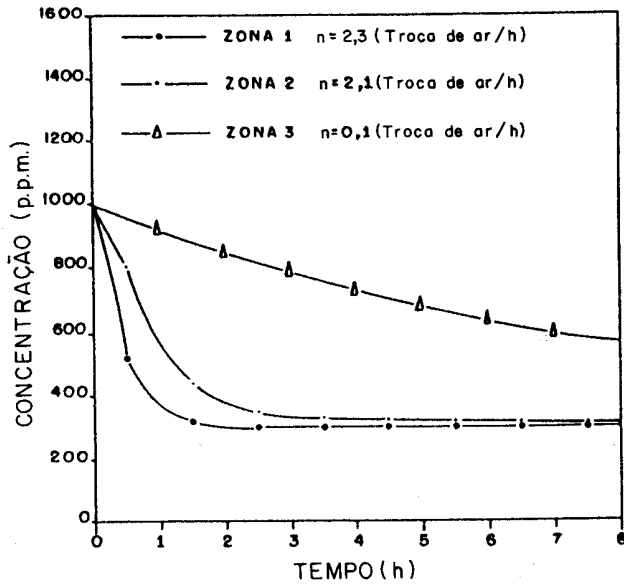
$$d(M_j W_j)/dt = \sum_{k=1}^{N_j} \dot{m}_{kj} W_{kj} + S_{w_j} \quad (16)$$

onde  $M_j$  refere-se a massa de ar seco na  $j$ -ésima zona,  $m_{kj}$  ao fluxo de massa de ar seco, através da passagem  $k$ , para ou da  $j$ -ésima zona,  $W_{kj}$  a umidade absoluta do ar adentrando ou saindo da  $j$ -ésima zona e  $S_{Wj}$  a geração de vapor d'água na  $j$ -ésima zona.

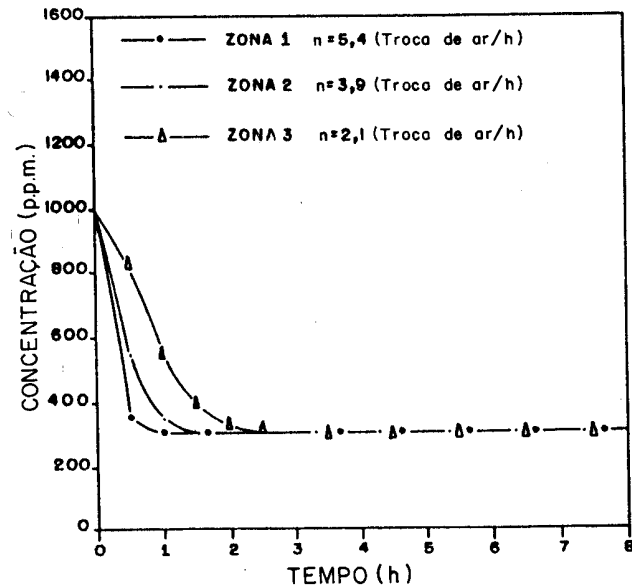
A variação temporal da entalpia,  $h_j$ , é obtida a partir da equação da energia, como indicado a seguir:

$$d(M_j h_j)/dt = \sum_{k=1}^{N_j} m_{kj} h_{kj} + H_j \quad (17)$$

onde  $h_{kj}$  refere-se a entalpia do ar adentrando ou saindo da  $j$ -ésima zona e  $H_j$  a geração de calor na  $j$ -ésima zona.



(a)

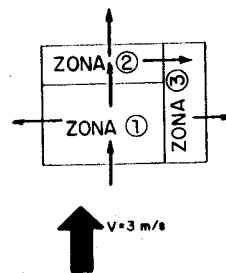
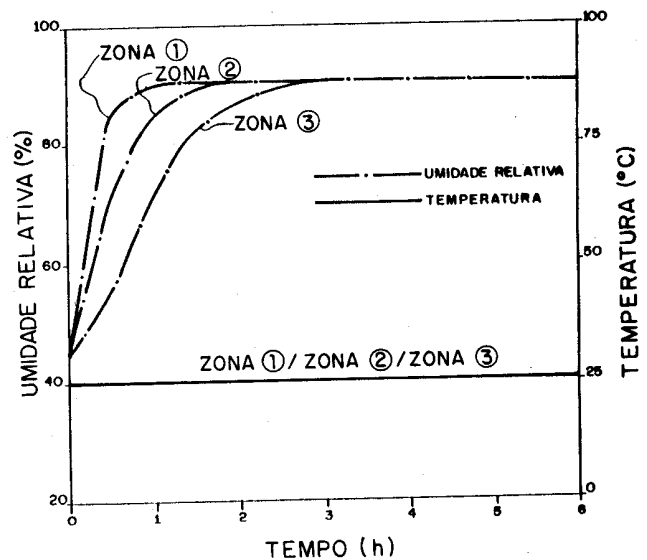


(b)

Fig.6 - Efeito das trocas de ar sobre a diluição de poluentes, no interior de edificações de zonas-múltiplas. a) sem ação do vento e b) com velocidade do vento igual a 3 m/s.

O conjunto de equações resultantes, da aplicação das equações (16) e (17) a cada zona de uma edificação é resolvido simultaneamente utilizando-se um procedimento similar ao empregado para a equação. (15)

A Figura 7 ilustra o efeito de trocas de ar entre zonas e com o meio externo sobre o comportamento da umidade relativa e da temperatura de bulbo seco do ar interno. Neste caso, considerou-se tanto a temperatura do ar externo como do interno como sendo igual a 25°C, e admitiu-se uma umidade relativa relativa de 90% para o ar externo, enquanto que a umidade relativa inicial, nas três zonas, foi considerada como sendo igual a 45%. As trocas de ar resultantes, sob a ação do vento com velocidade de 3 m/s, são indicadas na Figura em questão. Conforme pode-se verificar, devido a maior concentração de vapor d'água no ar externo, a umidade absoluta resultante será tanto maior quanto maior for a troca de ar em uma determinada zona. Como não há variação da temperatura de bulbo seco, consequentemente isto significará também um aumento da umidade relativa.



ZONA	$\phi$ (%) (INICIAL)	$T_{in}$ (°C) (INICIAL)	$n$ (h <sup>-1</sup> )
①	45	25	4,8
②	45	25	3,2
③	45	25	2,1

$\phi_e = 90\%$      $T_e = 25^\circ\text{C}$

Fig.7 - Efeito das trocas de ar sobre as condições psicrométricas do ar no interior de edificação de zonas-múltiplas.

A Figura 8 mostra uma situação onde as condições psicrométricas do ar interno a cada zona, e a as condições do ar externo são assumidas iguais. Na zona 1, assumiu-se uma geração de calor sensível de 30 kW, enquanto na demais zonas tal geração é desprezível.

Conforme pode ser verificado, na Figura 8, devido a impossibilidade de haver variação da umidade absoluta do ar interno (a geração de vapor d'água em cada zona é considerada desprezível), a presença de uma geração de calor sensível, na zona 1, provocará devido as trocas de ar entre zonas, também um aumento da temperatura.

ra de bulbo seco do ar no interior das demais zonas. Com o aumento da temperatura de bulbo seco, e mantendo-se a umidade absoluta constante logo, como ilustra a Figura 8, haverá um decréscimo da umidade relativa do ar no interior de cada zona. Este decréscimo será tanto maior quanto maior for a elevação de temperatura de bulbo seco do ar no interior de uma determinada zona.

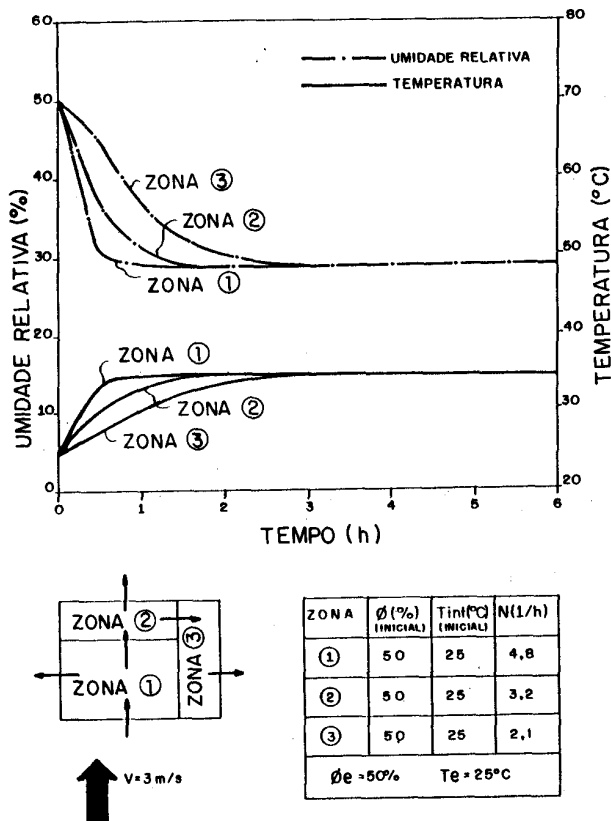


Fig.8 - Variação das condições psicrométricas do ar no interior de edificação de zonas múltiplas em decorrência de uma geração de 30 kW na zona 1.

#### CONCLUSÕES

Os fundamentos básicos de um programa computacional, capaz de estimar as trocas de ar por infiltração/ventilação, em edificações, foram apresentados. A estrutura computacional desenvolvida, denominada FLOW2, reúne várias características, geralmente não encontradas de uma maneira simultânea, nos modelos apresentados na bibliografia especializada, de acordo com a discussão apresentada por Caldeira Filho (1989).

Como características adicionais, o programa FLOW2, pode ser empregada tanto para edificações com zona-única como para edificações com zonas-múltiplas, assim como também adequa-se à análise da variação da concentração de poluentes e das condições psicrométricas de ar interno, em função das trocas de ar resultantes.

O programa FLOW2, vem a se constituir num forte instrumento de apoio para a análise do desempenho de sistemas de ventilação natural, assim como também pode ser incorporado a um programa geral de simulação de edificações, com o objetivo de permitir uma análise mais realística do impacto das trocas de ar por ventilação/infiltração, sobre os requisitos energéticos associados com sistemas de condicionamento de ar.

Tal programa, a exemplo de outros programas existen-

tes, depende das características do escoamento do ar nas aberturas. Assim, tanto maior será a sua aplicabilidade, quanto maior for a disponibilidade de tais dados.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CALDEIRA FILHO, Helio Callado. FLOW2 - Um modelo matemático para a análise de sistemas de ventilação natural em edificações. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 1989.
2. LIDDAMENT, M.W. Air infiltration calculation techniques an application guide. AIVC, U.K., June, 1986.
3. STOECKER, W. F. Design of thermal systems. 3rd edition, Mc Graw Hill, New York, 1989.
4. MELO, C. FLOW - An algorithm for calculating air infiltration into buildings. 3rd International Congress on Building Energy Management. Lausanne, Switzerland, 28/9 - 2/10/87, pp. 5-12.
5. MELO, C., CALDEIRA FILHO, H.C. Ventilação natural em edificações: modelação e análise. X Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro-RJ, 05 a 08 de Dezembro de 1989, pp. 553-556.
6. WHITE, F.M. Viscous fluid flow. Mc Graw Hill, New York, 1974.