

# ANÁLISE DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DE RECINTOS OCUPADOS

Clodoaldo de Oliveira Carvalho Filho, Engenheiro Mecânico  
Cezar Otaviano Ribeiro Negrão, PhD  
Cláudio Melo, PhD  
Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC  
Caixa Postal 476, CEP 88040-900, Florianópolis - SC  
Tel. (048) 234 5691, Fax (048) 234 5166, E-mail: negrao@nrva.ufsc.br

## RESUMO

O presente trabalho apresenta uma avaliação dos parâmetros que influem na sensação de conforto térmico. Esta análise é realizada através de modelos computacionais, tais como a simulação térmica de edificações e a dinâmica dos fluidos computacional. No primeiro caso, o ar é considerado completamente misturado (propriedades assumidas uniformes no interior do recinto análise global), enquanto que no segundo, gradientes de temperatura e velocidade do ar são avaliados (análise local). Comparações entre os resultados dos dois modelos, para uma situação onde um aparelho condicionador de ar de janela é empregado na climatização de uma sala, indicam que a análise global pode induzir a conclusões enganosas.

## ABSTRACT

The current work presents an evaluation of the main parameters affecting thermal comfort. This analysis is based on computational methods, such as building thermal simulation and computational fluid dynamics. In the former, the air properties are taken as uniform within the occupied space (global analysis), whereas in the latter, temperature and velocity gradients are assessed (local analysis). Comparisons between the methods, where a window type air conditioning unit is employed to cool a thermal zone, suggest that the global analysis may lead to mistaken conclusions.

## INTRODUÇÃO

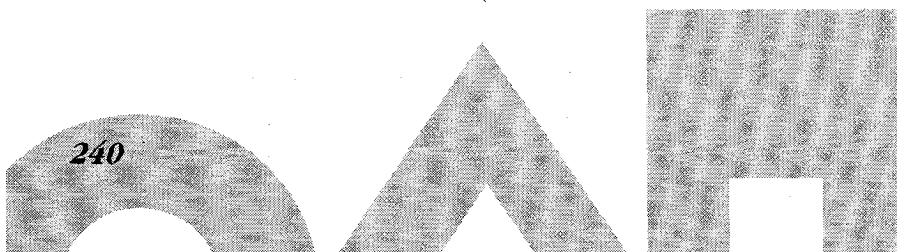
Presente em várias atividades da vida moderna, a climatização tem como objetivo primário propiciar condições adequadas de conforto térmico aos ocupantes dos recintos condicionados. Reconhecidamente, várias atividades profissionais são realizadas com maior adequação e maior desempenho quando o condicionamento de ar está presente.

Apesar de suportar severas variações das condições climáticas, o corpo humano apenas expressa satisfação com o meio ao seu redor numa estreita faixa de condições. Vários estudos foram realizados com o objetivo de quantificar e qualificar as variáveis que proporcionam condições de conforto. Dentre estes, destaca-se o trabalho realizado por Fanger (1970). Baseado em princípios de transferência de calor e massa e em experimentos realizados com uma amostra significativa de indivíduos, Fanger desenvolveu um modelo que avalia a influência de diversas variáveis no conforto térmico.

O aparecimento de ferramentas para a simulação térmica de edificações (STE), baseadas nos princípios de conservação da energia e da massa, possibilitou não somente a predição da energia associada com a climatização dos ambientes como também das condições ambientais resultantes. A prática comum neste tipo de análise é considerar uniforme as condições do ar (velocidade, temperatura e umidade) no interior das zonas térmicas. Entretanto, esta hipótese pode não ser totalmente válida em algumas situações onde as propriedades do ar variam significativamente, proporcionando diferentes sensações de conforto.

A avaliação de escoamentos através de técnicas como a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) (Patankar, 1980 e Maliska, 1995) torna possível o cômputo da distribuição de temperatura e velocidade do ar, permitindo assim a avaliação ponto a ponto das condições de conforto no interior de recintos ocupados.

No presente trabalho, a temperatura e a velocidade do ar, além da temperatura média radiante são quantificadas. Estas propriedades são avaliadas de forma localizada para uma sala climatizada através de um condicionador de ar de janela. A influência da posição do condicionador na distribuição destas variáveis é também analisada. Além disso, são realizadas comparações com resultados do método global, onde o ar é considerado completamente misturado.



# FUNDAMENTOS TEÓRICOS

## SIMULAÇÃO TÉRMICA DE EDIFICAÇÕES

O comportamento térmico de uma edificação é fundamentalmente dependente dos processos de transferência de calor e massa que ocorrem entre esta e o meio exterior. A edificação é composta de um conjunto de elementos (estrutura, equipamentos, sistemas de iluminação, ocupantes, etc.), cada qual com características próprias, que participam de forma integrada e interativa destes processos. A determinação das trocas de calor e massa implica em satisfazer as equações de conservação da energia e da continuidade. Estas equações para um volume de controle P podem ser expressas da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_p V_p \phi_p) = \sum_{j=1}^n K_{j,p} A_j (\phi_j - \phi_p) + S_{\phi_p} V_p \quad (1)$$

onde  $\rho_p$  é a densidade do ar,  $V_p$  é o volume de controle,  $\phi_p$  é a temperatura do volume P (conservação da energia) ou é igual a 1 (conservação da massa), j é um volume de controle em contato com P,  $K_{j,p}$  é a condutância de calor ou de massa linearizada (coeficientes convectivos, condutivos, radiativos ou fluxos de massa) entre P e j,  $A_j$  é a área superficial do volume de controle e  $S_{\phi}$  a geração de energia ou de massa por unidade de volume. O somatório são todas interações térmicas e de massa do volume P com seus vizinhos. No caso da conservação da massa, este somatório representa todos os fluxos de massa que chegam ou deixam o volume P. Discretizando a edificação em vários volumes de controle, surge um conjunto de equações que devem ser resolvidas simultaneamente para cada instante de tempo afim de se conhecer a distribuição de temperatura - temperatura dos elementos construtivos e do ar na sala - e de fluxos de ar no interior da edificação. A técnica utilizada para solução do sistema de equações resultante é descrita por Clarke (1985).

## ESCOAMENTO DE AR E DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA

A determinação dos campos de velocidade e temperatura que caracterizam o escoamento no interior do recinto é feita através da solução das equações de conservação oriundas da mecânica dos fluidos (conservação da massa e quantidade de movimento) e da transferência de calor (conservação da energia). Os efeitos de convecção natural, considerados nestas equações, proporcionam uma dependência do campo de velocidades em relação ao campo de temperaturas. A turbulência - característica deste tipo de escoamento - é considerada através do tradicional modelo k-ε (Rodi, 1984) e o escoamento próximo às superfícies através das funções de parede (Launder and Spalding, 1974).

A equação da conservação a ser resolvida para cada uma das grandezas acima mencionadas (incluindo as equações para k e ε) é expressa como:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial\phi}{\partial x_j} - \rho u_j \phi \right) + S_{\phi} \quad (2)$$

Tabela 1- Termos das Equações governantes.

Equação	$\phi$	$\Gamma_{\phi}$		$S_{\phi}$
		lam.	turb.	
Continuidade	1	-	-	-
Momento	$u_i$	$\mu$	$\mu_{ef}$	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{ef} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \rho g_i$
Energia	T	$\frac{\mu}{Pr}$	$\Gamma_T$	$q''' / c_{p,a}$
Energia de Turbulência	k	-	$\frac{\mu_{ef}}{\sigma_k}$	$G - C_D \rho \epsilon - G_b$
Dissipação da Energia de Turbulência	ε	-	$\frac{\mu_{ef}}{\sigma_{\epsilon}}$	$C_1 \frac{\epsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} - C_3 \frac{\epsilon}{k} G_b$

$$\Gamma_T = \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} ; \mu_{ef} = \mu_t + \mu ; \rho = \rho(T) ; \mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$G_b = g \beta_T \frac{\mu_t}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial x_i} ; G = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} ; u_i = U, V, W$$

$$C_D = 1,0 ; C_1 = 1,44 ; C_2 = 1,92 ; C_3 = 1,44 ; x_i = x, y, z$$

$$\sigma_k = 1,0 ; \sigma_{\epsilon} = 1,3 ; \sigma_T = 0,9 ; C_{\mu} = 0,09$$

onde  $f$  representa a variável a ser determinada em seu valor médio;  $Gf$  é o coeficiente difusivo da variável no meio;  $Sf$  é o seu termo fonte;  $r$  é a densidade do ar e  $u_j$  a componente da velocidade na direção  $x_j$ . Os termos acima mencionados encontram-se indicados na Tabela 1.

Maiores detalhes sobre os modelos de mecânica dos fluidos e transferência de calor computacional utilizados, e o método de solução do sistema de equações resultante podem ser encontrados em (Patankar, 1980 e Negrão, 1997).

### CONFORTO TÉRMICO

Sabe-se que a sensação de conforto térmico é afetada pela temperatura média radiante, temperatura, velocidade e umidade do ar e por fatores relativos aos ocupantes: tipo de vestimenta e intensidade das atividades desenvolvidas. A influência destes parâmetros na sensação de conforto é quantificada através dos índices PMV (Predicted Mean Vote) e PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) propostos por Fanger (1970).

### ESTUDO DE CASO

#### RECINTO TESTADO

A sala a ser simulada está localizada em um prédio situado na cidade de Florianópolis - SC, orientado longitudinalmente no sentido leste-oeste. Está posicionada no último andar, na extremidade norte do edifício, com a janela voltada para o oeste, onde encontra-se o condicionador de ar de janela. Suas paredes são construídas com tijolos de cimento de dois furos rebocados em ambos os lados, e seu teto vem a ser a própria laje de concreto do edifício, coberta com telhas de cimento amianto. As superfícies norte e oeste são paredes externas e as demais paredes, internas.

#### SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DA EDIFICAÇÃO

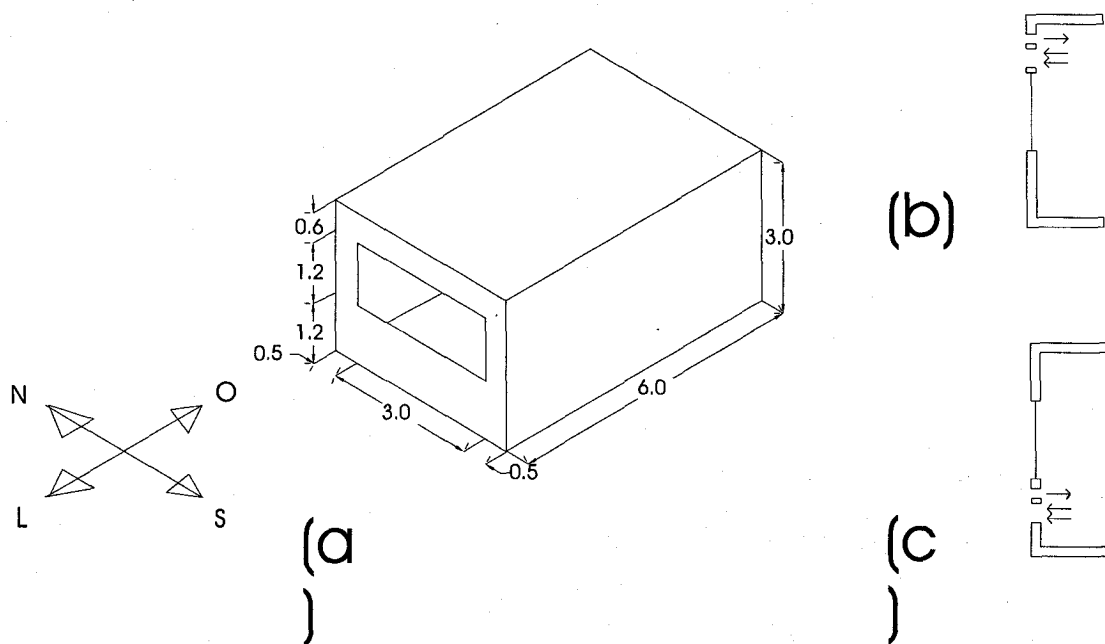


Figura 1. a) Orientação e dimensões da sala; b) Condicionador posicionado acima da janela; c) Condicionador abaixo da janela.

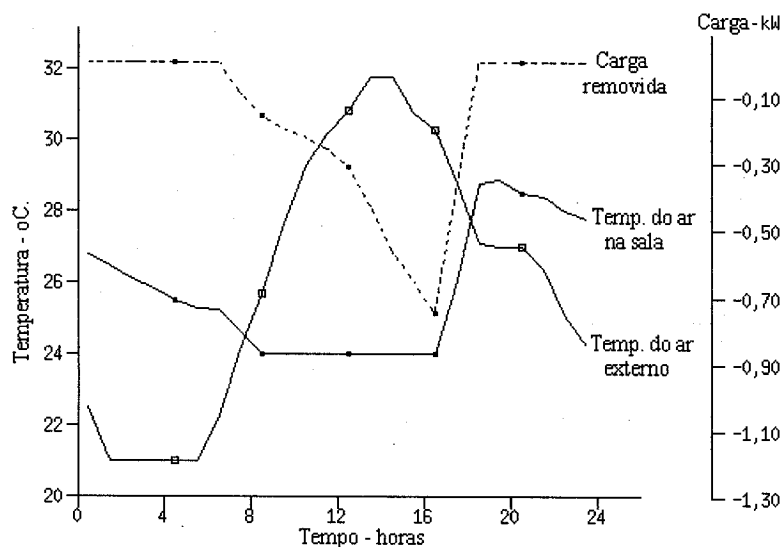
Uma simulação do comportamento térmico da sala (ver figura 1) foi realizada para um dia típico de verão com auxílio do código computacional ESP-r (Clarke, 1985). Foram utilizados dados climáticos para o dia 09 de janeiro de 1995 obtidos na cidade de Florianópolis. Tanto a geometria quanto a composição das paredes deste ambiente foram simplificadas para facilitar a configuração do problema.

Nesta simulação, o condicionador de ar é dotado de um sistema de controle ideal capaz de manter a temperatura ambiente constante, uniforme e igual a 24 °C. O ar é recirculado a uma taxa de aproximadamente 6,0 trocas por hora. Este valor corresponde a uma vazão nominal de 403 m<sup>3</sup>/h. O ambiente é considerado isento de infiltrações de ar. Como o ar é considerado completamente misturado neste tipo de análise, a influência da posição do condicionador não é avaliada.

Os resultados da simulação podem ser visualizados na Figura 2. Observa-se que para manter a temperatura constante em 24°C, a taxa de extração de calor do ambiente cresce continuamente entre 8 e 16:00h, chegando a um valor máximo de 774 W. A excitação máxima do sistema ocorre entre 13h e 14h, quando ocorre a maior incidência solar e a mais elevada temperatura do ar externo. Observa-se assim um atraso de 2 a 3 horas entre a excitação do meio e a resposta da edificação.

**Tabela 2. Temperatura média radiante, PMV e PPD calculados para o período simulado.**

Hora	T <sub>mr</sub> (°C)	PMV (-)	PPD (%)	Sensação
08:30	25,4	-0,52	11	confortável
09:30	25,5	-0,51	10	confortável
10:30	25,6	-0,48	10	confortável
11:30	25,8	-0,45	9	confortável
12:30	26,1	-0,40	8	confortável
13:30	26,6	-0,31	7	confortável
14:30	27,1	-0,22	6	confortável
15:30	27,4	-0,15	5	confortável
16:30	27,4	-0,09	5	confortável
17:30	28,1	0,36	8	confortável

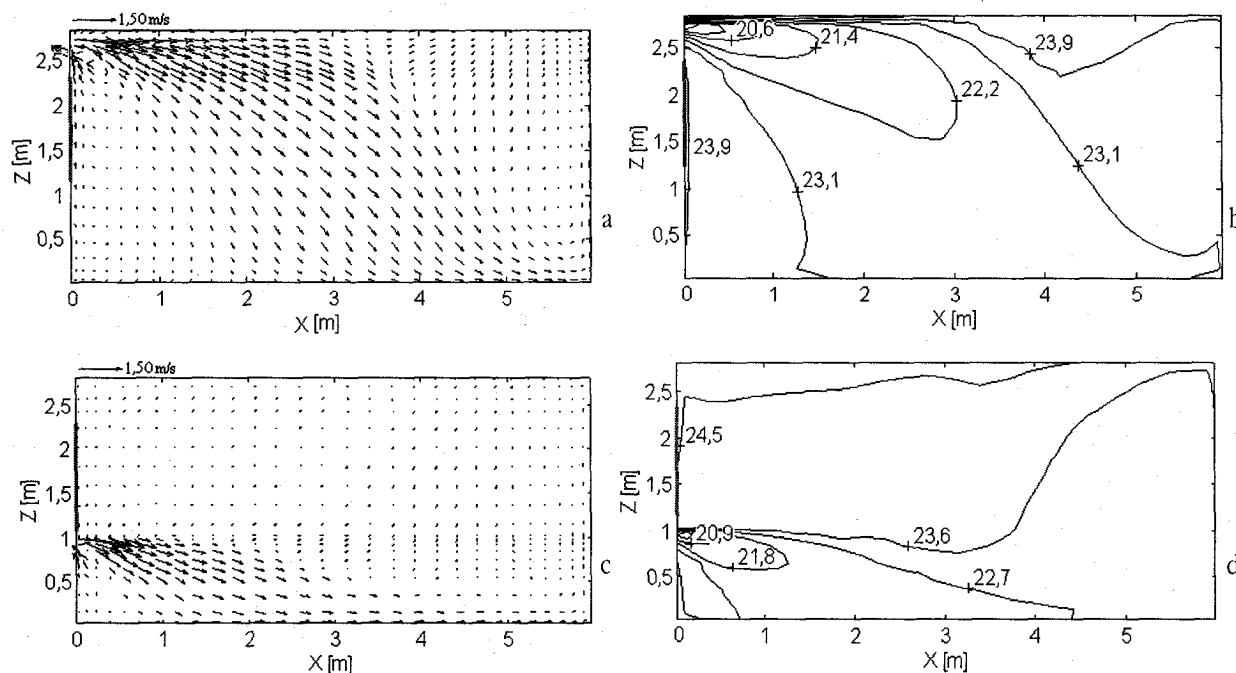


**Figura 2. Temperatura do ar externo, no interior da sala e carga térmica removida pelo condicionador.**

A partir das temperaturas do ar e das paredes, pôde-se avaliar as condições de conforto na sala. Considerou-se uma umidade relativa de 50%, velocidade relativa média de 0,1 m/s, nível de atividade de 1,0 met (pessoa sentada) e vestimentas típicas de verão (0,5 clo). Nesta primeira situação, a temperatura média radiante é considerada uniforme e aproximada como a média das temperaturas das superfícies internas das paredes ponderada por suas respectivas áreas - prática comum em aplicações de engenharia. Nestas condições, o ambiente apresentou condição satisfatória de conforto durante todo o período de ocupação, conforme mostra a tabela 2. Observe que o máximo percentual de pessoas insatisfeitas na sala ocorre no início do período de controle (PPD=11%). Ao longo do dia, o percentual de insatisfeitos se reduz, pois apesar da temperatura do ar se manter constante, a temperatura média radiante aumenta.

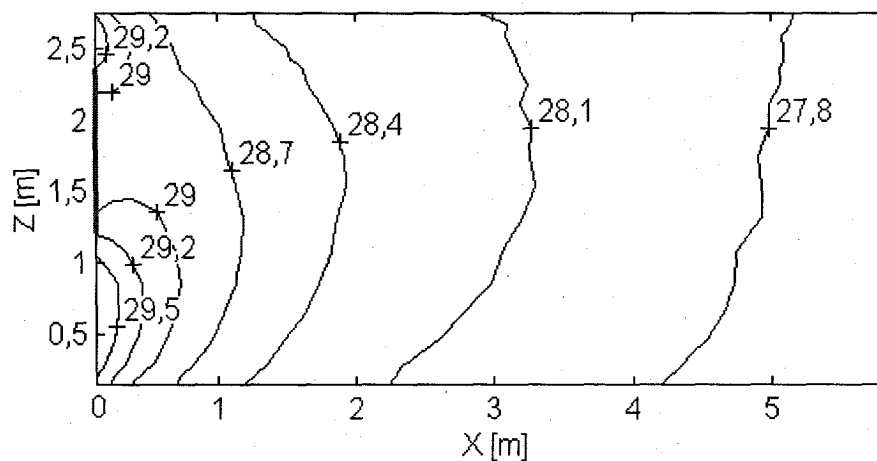
### ESCOAMENTO DE AR NO RECINTO

Como as temperaturas das superfícies internas das paredes são difíceis de serem estimadas, os resultados obtidos na simulação térmica foram utilizados como condições de contorno. Escolheu-se a hora de carga térmica máxima (16:00h) para simular, em regime permanente, o escoamento de ar no interior da sala. As equações foram discretizadas numa malha cartesiana de 30 x 24 x 20. Uma vez que estes campos dependem do modo como o ar é insuflado no ambiente, a simulação foi realizada para duas posições do condicionador na sala: uma acima e outra abaixo da janela conforme ilustrado na figura 1. Em ambas as situações, o condicionador encontra-se situado na região central da sala e não é considerada a presença de grelhas nas aberturas de insuflamento (70x10 cm) e de retorno (70x20 cm). O ar é insuflado a uma velocidade de 1,6 m/s (correspondente à vazão da análise anterior) e uma temperatura de 18°C. Este valor de temperatura foi encontrado, de acordo com a carga térmica máxima de 774 W, para se manter a temperatura média do ambiente em aproximadamente 24°C. Em situações reais, este valor é normalmente menor, entretanto o aparelho opera com ciclos liga-desliga para manter a temperatura constante.



**Figura 3. Campo de velocidades e distribuição de temperaturas no plano médio da sala : (a) e (b) condicionador acima da janela; (c) e (d) condicionador abaixo da janela.**

A figura 3 mostra os campos de temperatura e velocidade do ar num plano médio da sala (perpendicular e central ao condicionador) para as duas situações testadas. No primeiro caso, observa-se que o jato de ar insuflado consegue penetrar até o meio da sala (figura 3a), onde começa a se difundir longitudinalmente e lentamente perde sua força. Esta distribuição de velocidade proporciona uma mistura razoável do ar na sala, como pode ser observado através das isothermas da figura 3b, onde a temperatura do ar apresenta pequenos gradientes na zona de ocupação. Apesar de não apresentado, a distribuição de temperatura é ainda mais uniforme em outras regiões da sala, mostrando níveis de velocidades bem menores. No segundo caso, por sua vez, o jato de ar consegue pouca penetração no ambiente (figura 3c), provocando estratificação nos campos de velocidade e temperatura (figura 3d). Esta estratificação não está presente somente na região mostrada na figura 3d, mas em toda a região de ocupação, apresentando gradientes significativos entre a região dos pés e da cabeça.



**Figura 4. Distribuição de temperatura média radiante no plano médio da sala.**

Calculou-se também uma temperatura média radiante (t<sub>mr</sub>) na sala com base em um elemento de forma cúbica que percorre pontos do espaço interno. Os valores encontrados variam de 27,6 °C junto às paredes internas, a 30 °C próximo às paredes externas, conforme mostrado na figura 4. Como pode ser visto, a variação da t<sub>mr</sub> não é tão significativa na direção vertical.

Verifica-se então que o indivíduo não está sujeito a condições climáticas uniformes, como sugere a avaliação global. Além disso, observa-se que pessoas próximas ao condicionador (na segunda situação) ou sob o jato de ar (na primeira situação) estarão sujeitas a velocidades mais altas e temperaturas mais baixas do que aquelas em outras posições da sala. Por outro lado a temperatura média radiante aumenta longitudinalmente da direita para a esquerda (figura 4) o que pode compensar as condições adversas próximas às paredes externas. A variação espacial destas propriedades certamente proporcionará sensações de conforto térmico diferenciadas das indicadas pela análise global.

## CONCLUSÕES

Uma metodologia de cálculo das condições climáticas em espaços ocupados é apresentada. A situação estudada consiste de uma sala climatizada através de um condicionador de ar de janela instalado em duas posições diferentes. As condições climáticas resultantes são apresentadas e seus efeitos sobre as condições de conforto são discutidos.

Observa-se que os parâmetros climáticos do recinto são fortemente influenciados pela posição do condicionador, e que um mau posicionamento do aparelho pode promover uma estratificação dos campos de velocidade e temperatura, e conseqüentemente um sensação de desconforto devido às sensações diferenciadas entre a região dos pés e da cabeça.

Comparações com a análise global, que assume condições uniformes no interior do recinto, sugerem que esta pode induzir a conclusões errôneas a respeito das condições de conforto. Isto porque, para as situações testadas, existe uma variação considerável das propriedades do ar de ponto a ponto.

A presente investigação permite a identificação de situações que promovam sensações de conforto diferenciadas em um recinto, como também fornece informações que possam minimizar estas variações. Propõe-se, como investigação futura, formas mais adequadas de aplicação deste tipo de condicionador - parâmetros de insuflamento, posicionamento do aparelho e das grelhas, que permitam aumentar a homogeneidade das condições climáticas do ambiente e assegurem uma condição confortável a seus ocupantes. Além disso, sugere-se uma análise de conforto local baseada na distribuição das condições climáticas. Entretanto, deve-se atentar para o fato de que o indivíduo esta sujeito a variações de temperatura e velocidade entre os pés e a cabeça.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Clarke, 1985, Energy Simulation in Building Design, Adam Hilger.
- Fanger, P. O., 1970, Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering, McGraw Hill, New York.
- Launder, B. E. e Spalding, D. B., 1974, The Numerical Computation of Turbulent Flow, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, pp. 269-289.
- Negrão, C. O. R., 1997, Integration of Computational Fluid Dynamics and Building Thermal and Mass Flow Simulation, Energy and Buildings (aceito para publicação).
- Maliska, C. R., 1995, Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional, Livros Técnicos e Científicos Editora.
- Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation.
- Rodi, W., 1984, Turbulence Models and Their Applications in Hydraulics - A State of the Art Review, University of Karlsruhe, Karlsruhe, República Federativa da Alemanha.

