



AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO EM AMBIENTES DE ESCRITÓRIOS COM SISTEMA DE AR CONDICIONADO TIPO *SPLIT*

Ramos, M. B.; Araki, L.T.; Hernandez Neto, A.; Tribess, A.

Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Prof. Mello Moraes, 2231
05508-900 – São Paulo – SP, fone: (11) 3091-5355

e-mail: atribess@usp.br

RESUMO

O conforto térmico em ambientes de escritórios é um assunto que tem despertado bastante interesse por parte de pesquisadores por se tratar de um requisito de produtividade nas empresas e estar intimamente relacionado com o consumo de energia. Para suprir a necessidade humana de conforto térmico, trabalhos foram desenvolvidos e normas foram elaboradas para definir métodos de avaliação e normalização de condições que proporcionem conforto térmico. No presente trabalho foi realizada avaliação experimental e numérica de sistema de ar condicionado do tipo *Split* para análise de seu desempenho em proporcionar condições de conforto térmico adequadas em ambientes de escritórios. Para esta avaliação foram realizados ensaios e simulações numéricas em um laboratório que reproduz, em escala real, as características de ambientes de escritórios com condições controladas. Os resultados experimentais mostraram que em mais de 65% das situações o percentual de insatisfeitos (PPD) é superior a 10% e em quase 20% das situações verifica-se $PPD > 20\%$; não atendendo os critérios de conforto térmico de Fanger e das normas ASHRAE 55 e ISO 7730. Quanto às simulações numéricas, os resultados não mostraram boa concordância com os valores experimentais, mesmo considerando-se os cuidados que foram tomados durante o processo de simulação.

ABSTRACT

Thermal comfort in office environments is a subject with great research interest related with the need of productivity increase and lower energy consumption levels. To satisfy the human need of thermal comfort, works were developed and norms were elaborated to define evaluation and normalization methods of thermal comfort conditions. In the present work experimental and numeric evaluation of a split air conditioning system was accomplished for the analysis of its performance in providing adequate thermal comfort conditions in office environments. For this evaluation tests and numeric simulations were accomplished at a laboratory that reproduces, in real scale, the characteristics of office environments with controlled conditions. The experimental results showed that in more than 65% of the situations the percentage of dissatisfied (PPD) is superior to 10% and in almost 20% of the situations $PPD > 20\%$ is verified; not attending Fanger thermal comfort criteria and ASHRAE 55 and ISO 7730 norms. Regarding to the numeric simulations, the results didn't show good matching with the experimental values, even considering the cares that were taken during the simulation process.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente existem diversos tipos de sistemas de ar condicionado no mercado. Na escolha do sistema de ar condicionado influem diversos fatores, dentre eles pode-se citar: o espaço disponível, o tipo de ocupação, a capacidade de refrigeração, a renovação de ar, os custos de instalação, os custos de operação e manutenção, entre outros.

O sistema de ar condicionado tipo *split* é usualmente indicado para ambientes menores e também em ambientes com uso intermitente, como salas de reuniões. É um sistema que apresenta grande flexibilidade, sendo próprio para instalação em ambientes sem comunicação direta com o meio externo, pois apresenta facilidade de instalação da unidade condensadora em lajes e ambientes externos ao edifício.

A preocupação com o conforto térmico dos usuários muitas vezes não é considerada no momento da escolha do equipamento e do local de instalação. Desse modo, freqüentemente a instalação do sistema de ar condicionado de forma não planejada, acarreta insatisfação dos usuários por desconforto térmico e até problemas de saúde.

Por ser relativamente novo no mercado, o sistema *split* ainda não possui muitos estudos publicados sobre o seu desempenho. No entanto, sua utilização cada vez mais freqüente e problemas de conforto térmico decorrentes de sua incorreta utilização justificam a realização de um número maior de trabalhos. Para realização de um estudo mais aprofundado sobre o seu desempenho, incluindo condições de projeto, carga térmica, potencial de conservação de energia e conforto térmico, há a necessidade de levantamentos experimentais e realização de simulações numéricas.

No presente trabalho foi realizada avaliação experimental e numérica de sistema de ar condicionado do tipo *split* para análise de sua performance em proporcionar condições de conforto térmico adequadas em ambientes de escritórios. Para esta avaliação foram realizados ensaios e simulações numéricas em um laboratório que reproduz, em escala real, as características de ambientes de escritórios com condições controladas.

2. O SISTEMA DE AR CONDICIONADO TIPO *SPLIT*

Os sistemas de ar condicionado tipo *split*, são sistemas de expansão direta, que podem ser divididos em duas classes: com dutos e sem dutos. De forma geral, os sistemas tipo *split* são compostos por uma unidade interna (evaporador), uma unidade externa (compressor e condensador), tubulações de fluido refrigerante e conexões elétricas.

No sistema *split* com dutos a distribuição do ar frio ocorre por dutos conectados diretamente ao evaporador e conta com elementos como grelhas e válvulas (*dumpers*). No sistema *split* sem dutos (*ductless system*), objeto de estudo no presente trabalho, o ar sai diretamente do evaporador para o ambiente e a distribuição ocorre próximo ao evaporador. Em ambos os casos, o calor retirado do ambiente por meio do evaporador é rejeitado para a atmosfera por meio da unidade condensadora externa, composta pelo compressor e pelo condensador.

Como exemplos de aplicações típicas têm-se salas de reuniões, escritórios e pequenos estabelecimentos comerciais. As vantagens desse sistema incluem instalação fácil e versátil (as unidades internas podem ser instaladas tanto no teto como nas paredes), boa eficiência energética do sistema e baixo custo de operação. Além disso, é um sistema que apresenta menores níveis de ruído e pode ser controlado e programado por controle remoto sem fio.

A utilização de sistemas *split* sem dutos, por serem sistemas sem renovação de ar, apenas recirculação, necessita de cuidados especiais que devem ser tomados quanto à renovação de ar (ligação com outros ambientes com renovação de ar, aberturas de portas, etc.) e a permanência de pessoas por períodos longos nestes ambientes.

3. O LABORATÓRIO E AS CONDIÇÕES DE ENSAIO

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Conforto Térmico do Departamento de Engenharia Mecânica que conta com ambiente que representa em escala real uma célula de um edifício de escritórios com 34,8 m² contendo duas estações de trabalho com 4 m² e uma com 8 m², delimitadas por divisórias removíveis de alturas h=1,20 m e/ou h=1,60 m, cadeiras, mesas com equipamentos (computadores, impressoras, etc.) (Leite, 2003). Neste laboratório, instalado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo (FAPESP) e de empresas do setor, para avaliação de conforto térmico em ambientes com sistema de ar condicionado pelo piso e pelo teto, foi instalado o sistema *split* não dutado, conforme apresentado na Figura 1.

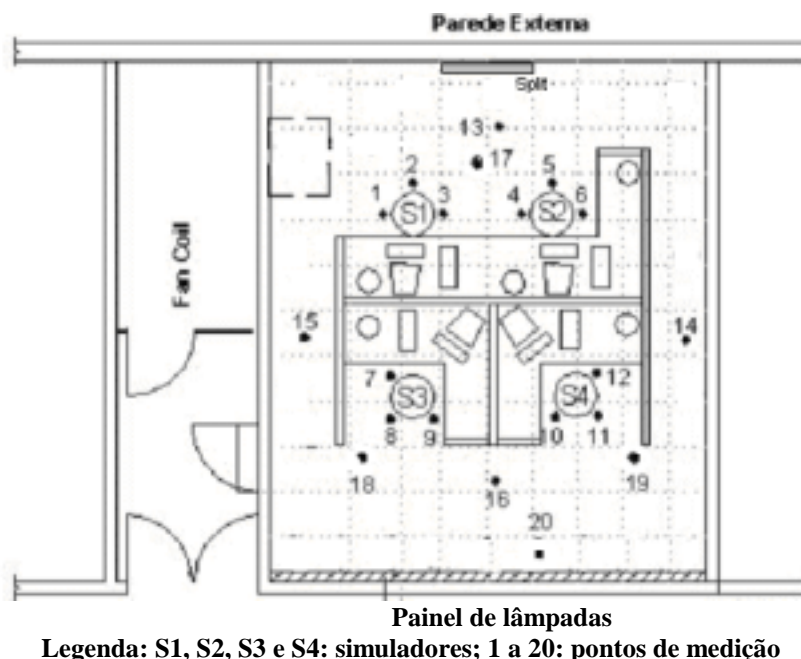


Figura 1 - Planta baixa do laboratório e pontos de medição (adaptado de Leite e Tribess, 2002).

O *split*, com capacidade nominal de 18.000 Btu/h (1,5 TR), foi instalado no centro da parede oposta ao painel de lâmpadas (simulação de insolação), conforme mostrado na Figura 1, e próximo ao teto (procedimento usualmente adotado). Os ensaios foram realizados com o sistema *split* operando com velocidade de insuflamento baixa e aletas de direcionamento de ar fixas (sem movimentação).

Nos ensaios foram utilizadas fontes internas de calor no ambiente com as seguintes cargas nominais: quatro “simuladores”, um em cada posto de trabalho, dotados de resistências elétricas com dissipação de calor correspondente a pessoas em atividade de escritório (representando usuários) = 480W; iluminação = 500W; radiação solar simulada (painel de lâmpadas) = 3200W e equipamentos = 400W, num total de 4580W, que equivalem a 132 W/m².

As condições determinadas para os ensaios compreendem simulações de condições térmicas típicas em ambientes de escritórios comerciais no Brasil, com temperaturas variando de 25 a 26°C (condições de verão), considerando vestimentas utilizadas que apresentam índices de isolamento térmico de $I_{roupa} = 0,5$ CLO. Para esta condição, a ISO 7730 (1994) sugere para atividades de escritório, com taxa de metabolismo (M) de 1,2 met (69,6 W/m²), que as temperaturas operativas¹ (T_o) ideais para conforto devem estar na faixa de 25 a 26°C, para valores de velocidade relativa do ar (V_{ar}) de $0,10 < V_{ar} \leq 0,30$ m/s e umidade relativa do ar (UR) em torno de 50% .

¹ Temperatura operativa: temperatura de um meio imaginário (envolvendo ar e superfícies) com o qual a pessoa troca a mesma quantidade de calor por convecção e radiação que aquela trocada com o meio real.

Esses parâmetros serviram de referência para se criar duas condições na sala representadas pelas temperaturas do ar, T_a , medidas no centro geométrico da câmara de testes, em regime permanente, abrangendo condições típicas de verão: **Condição 1** $\rightarrow T_a = 26,0^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$; **Condição 2** $\rightarrow T_a = 25,0^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$.

Em cada condição criada no ambiente foram realizadas medições de variáveis de conforto térmico (temperatura do ar, T_a , umidade relativa do ar, UR , velocidade do ar, V_a , temperatura de globo², T_G) utilizando critérios e procedimentos em conformidade com as determinações da ASHRAE 55 (2004) e ISO 7726 (1998). Foram realizadas medições das variáveis para cada condição em 16 pontos apresentados na Figura 1, que representam as diferentes zonas da sala. Os pontos de 1 a 12 correspondem às áreas ao redor dos simuladores S1, S2, S3 e S4, enquanto os pontos 13 a 16 e 17 a 20 se referem à região de circulação.

Em cada ponto foram realizadas medidas de temperatura e velocidade do ar nas alturas de 0,1m, 0,6m, 1,1m e 1,8m (ASHRAE 55, 2004), assim como nas alturas de 2,0m e 2,35m para cobrir o pé direito da sala. As temperaturas de globo foram obtidas a 0,6m nos postos de trabalho (altura correspondente à pessoa sentada) e 1,1m nas áreas de circulação e nas correspondentes aos difusores de piso (pessoa de pé). Os instrumentos de medição utilizados, apresentados na Figura 2, atendem às especificações da norma ISO 7726 (1998), com características apresentadas na Tabela 1.



Figura 2 – Sistema de aquisição de dados no ambiente e “simuladores”.

O período de medição foi de 5 minutos, com aquisição de dados em intervalos de 10 segundos, realizados em cada ponto. Um período de estabilização dos sensores de 3 minutos anterior ao início da medição em cada ponto foi adotado.

Tabela 1 – Características dos instrumentos de medição

Variáveis	Faixa de medição	Precisão
Temperatura do ar	10 – 30 °C	$\pm 0,5$ °C
Temperatura de globo	10 – 40 °C	$\pm 0,5$ °C
Velocidade do ar	0 – 1 m/s	$\pm[0,05 + 0,05V]$ m/s
Umidade relativa	30 a 70%	$\pm 3\%$

² Temperatura de globo, T_g , utilizada na determinação da temperatura radiante média, T_r (ISO 7726, 1998).

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nas Figuras 3 e 4 são apresentados os perfis de temperatura e velocidade, representando as condições 1 e 2, respectivamente.

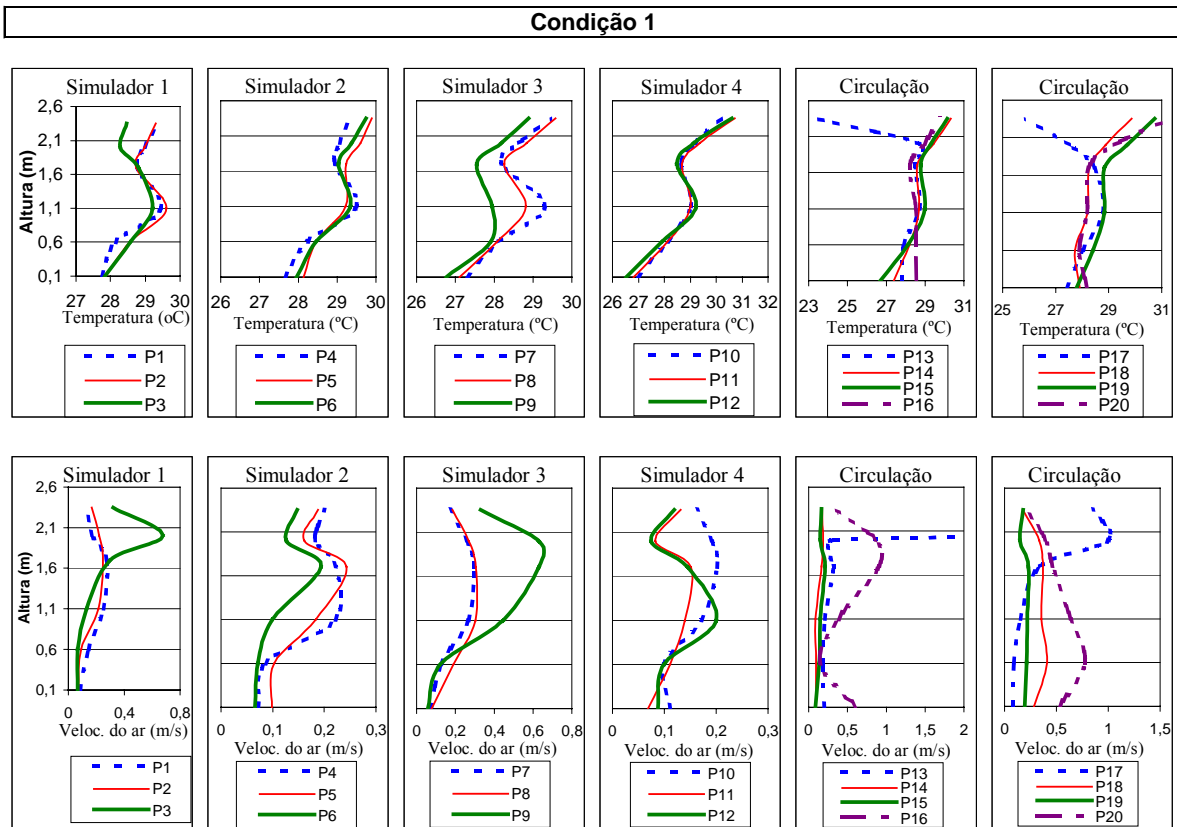


Figura 3 – Perfis de temperatura e velocidade na condição 1: 26,0° C

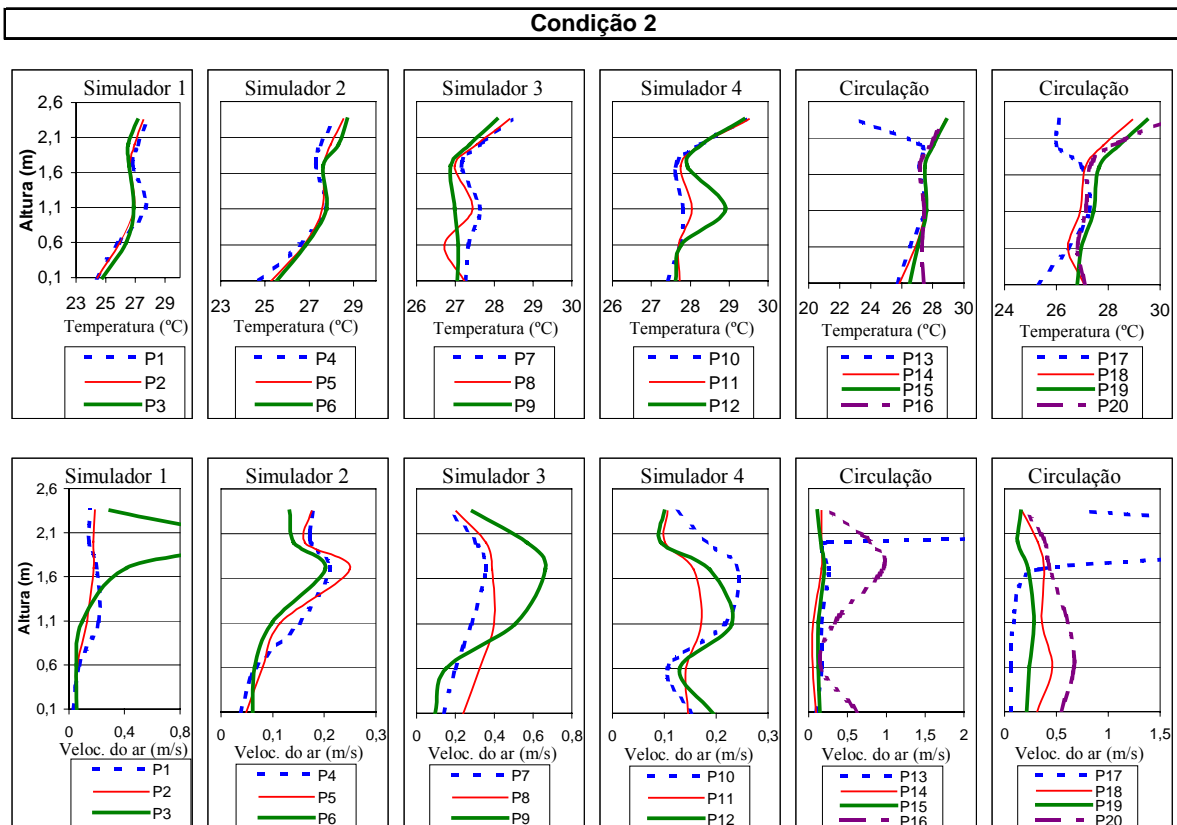


Figura 4 – Perfis de temperatura e velocidade na condição 2: 25,0° C.

Analisando-se os resultados apresentados nas Figuras 3 e 4, verifica-se que:

- ocorrem variações significativas de velocidades em torno dos simuladores, principalmente no simulador 3, próximo ao painel de lâmpadas, com velocidades superiores a 0,25m/s (limite superior de velocidade na região de trabalho (até 1,1m para pessoas sentadas) recomendado pelas Normas ASHRAE 55 (2004) e ISO 7730 (1994)). Verificou-se, posteriormente que as maiores velocidades ao redor do simulador 3 ocorreram em função do posicionamento do *split*, que embora tenha sido centralizado na parede, tem uma parte “morta” onde estão os controles do equipamento, o que ocasiona um fluxo maior de ar para um dos lados.
- não ocorrem variações significativas de temperatura ao redor dos simuladores e, embora ocorram variações de simulador para simulador, estas são praticamente iguais na altura de 1,1m (região da cabeça para uma pessoa sentada). Verifica-se que nesta região as temperaturas encontram-se em torno de 28,5°C para a condição 1 (26°C no centro geométrico da sala) e de 27°C para a condição 2 (25°C no centro geométrico da sala). A diferença de 2,0 a 2,5°C entre as temperaturas no posto de trabalho e a temperatura no centro geométrico da sala é decorrente do tipo de escoamento que o sistema *split* provoca no ambiente, com velocidades relativamente elevadas nas regiões que são diretamente atingidas pelo jato de ar e, conseqüentemente, com temperaturas menores.

5. AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO NO AMBIENTE

A partir das variáveis de conforto térmico ambientais (T_a , \bar{T}_r , UR e V_a), foram determinados os valores de voto médio estimado (PMV) e de percentagem de pessoas insatisfeitas (PPD) de Fanger (Fanger, 1972), utilizando rotina de computador apresentada na ISO 7730 (ISO, 1994). Os resultados são apresentados na Tabela 2, em que se verifica que em mais de 65% das situações o percentual de insatisfeitos (PPD) é superior a 10% e em quase 20% das situações verifica-se PPD > 20% (acima dos limites admitidos pelas normas ASHRAE 55 (2004) e ISO 7730 (1994)).

Tabela 2. Variáveis de conforto térmico e valores de PMV e PPD.

Condição 1 (26 °C, Iroupa = 0,5 CLO)								
	S1	S2	S3	S4	Pto 13	Pto 14	Pto 15	Pto 16
Ta (°C)	28,4	28,4	28,0	28,0	28,7	28,7	29,0	28,5
Tg (°C)	27,5	27,6	27,1	27,4	27,6	27,8	27,1	28,0
hcg (CF)	1,83	1,81	1,86	1,67	1,94	1,82	2,21	1,57
hcg (CN)	0,74	0,68	0,93	0,75	1,15	0,70	0,96	1,67
Tr (°C)	27,2	27,3	26,8	27,2	27,2	27,5	26,3	27,4
To (°C)	27,8	27,8	27,4	27,5	28,1	28,1	27,7	28,1
Var (m/s)	0,10	0,09	0,15	0,10	0,21	0,09	0,15	0,39
UR (%)	41,0	41,0	40,0	40,0	40,0	40,0	42,0	42,0
PMV	0,85	0,88	0,64	0,78	0,75	0,95	0,76	0,60
PPD(%)	20,2	21,3	13,6	17,8	16,8	24,1	17,2	12,5
Condição 2 (25 °C, Iroupa = 0,5 CLO)								
	S1	S2	S3	S4	Pto 13	Pto 14	Pto 15	Pto 16
Ta (°C)	26,1	26,7	27,0	27,7	27,5	27,5	27,6	27,4
Tg (°C)	24,8	25,5	26,9	27,3	26,0	26,1	26,5	26,9
hcg (CF)	2,00	1,98	1,19	1,50	2,07	2,08	1,93	1,63
hcg (CN)	0,56	0,60	1,20	0,85	1,01	0,56	0,84	1,53
Tr (°C)	24,3	25,1	26,7	27,2	25,4	25,5	26,1	26,7
To (°C)	25,2	25,9	26,9	27,5	26,4	26,5	26,9	27,1
Var (m/s)	0,06	0,07	0,22	0,13	0,17	0,06	0,12	0,34
UR (%)	40	40	40	40	40	40	40	42
PMV	0,14	0,34	0,33	0,67	0,33	0,5	0,51	0,3
PPD(%)	5,4	7,4	7,3	14,4	7,3	10,2	10,4	6,9

onde: h_{cg} são os coeficientes de transferência de calor por convecção em $W/m^2 \cdot ^\circ C$.

6. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

As simulações numéricas foram realizadas utilizando programa comercial de Dinâmica dos Fluidos Computacional, o Fluent (FLUENT, 1998); que é uma das ferramentas usualmente utilizadas para a simulação de escoamentos de fluidos.

O procedimento numérico utilizado baseia-se na resolução de equações de conservação de energia e quantidade de movimento em um domínio de cálculo discretizado com o uso do Método dos Volumes Finitos. Na geração das malhas, que definem os volumes infinitesimais onde as equações utilizadas no programa de simulação são aplicadas, utilizou-se o programa Gambit. Nestas malhas são definidas as entradas, saídas, paredes e tipo de escoamento. As malhas devem ser geradas a partir da geometria do problema de forma que esta não interfira no resultado final. Para verificar a não dependência do tipo de malha e da quantidade de nós a serem gerados, é necessário fazer a simulação com diferentes números de nós para uma mesma malha e também fazer simulações com diferentes malhas.

Ao se empregar programas computacionais para tentar simular situações reais, deve-se tomar precauções para obter resultados confiáveis, pois não necessariamente o resultado da simulação é real ou fisicamente possível. Portanto, todo cuidado é necessário e realizar comparações entre dados obtidos experimentalmente e os fornecidos pelo simulador tem importância fundamental, ou seja, deve-se assegurar que estas ferramentas computacionais sejam utilizadas e testadas adequadamente.

Para assegurar uma correta utilização da ferramenta computacional, inicialmente foi simulado problema apresentado na literatura por Teodosiu et al. (2000) que apresentam a simulação de um ambiente tridimensional onde o fornecimento de ar é feito por um único difusor colocado junto ao teto e a exaustão é feita na parede oposta junto ao chão do ambiente. Para realizar as simulações foi utilizado o programa Fluent com uma variante do modelo de turbulência k- ϵ padrão, denominado k- ϵ realizável.

7. AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO AMBIENTE COM O SISTEMA *SPLIT*

Inicialmente foi gerada a malha correspondente ao Laboratório onde se encontra instalado o *split*, apresentada na Figura 5. O ambiente simulado possui área de 6.3 x 5.5 m² com altura de 2,7 m. Foi adicionado um duto, com as mesmas dimensões do retorno e comprimento de 5.0 m, para garantir perfil de velocidade completamente desenvolvido na saída. Desse modo, foi possível aplicar a condição de fluxo de massa constante na saída do ar. O processo inicial de simulação foi baseado no trabalho de Pustelnik e Tribess (2002), de simulação do mesmo laboratório com insuflamento de ar frio pelo piso.

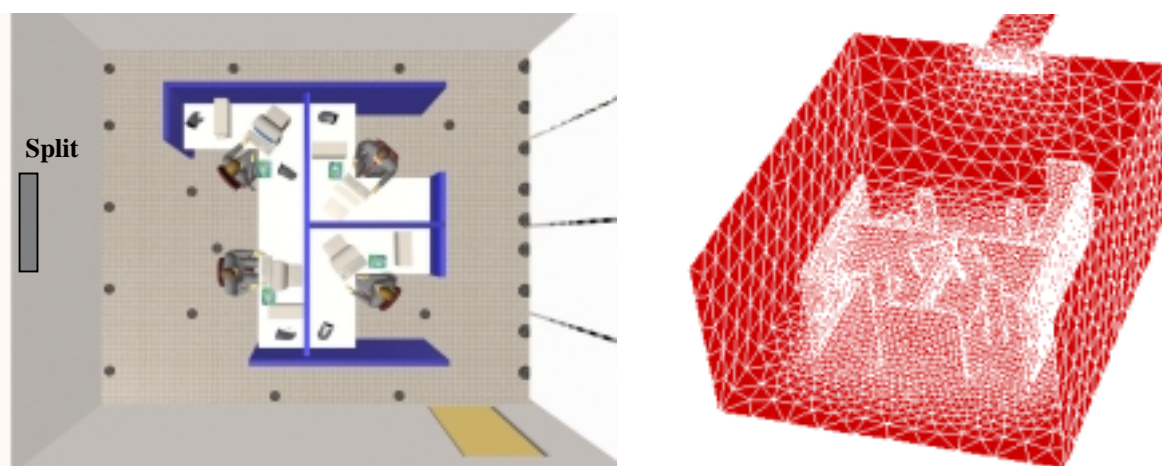


Figura 5. Vista do ambiente e da malha gerada para simulação.

Foram testados os modelos k- ϵ padrão e k- ϵ realizável. Convergência de resultados somente foi obtida com a utilização do modelo de turbulência k- ϵ realizável após 670 iterações e com resíduos da ordem de 10⁻⁶.

As simulações foram realizadas para as mesmas condições em que foi realizada a avaliação experimental. Resultados de simulação são apresentados nas Figuras 6 e 7.

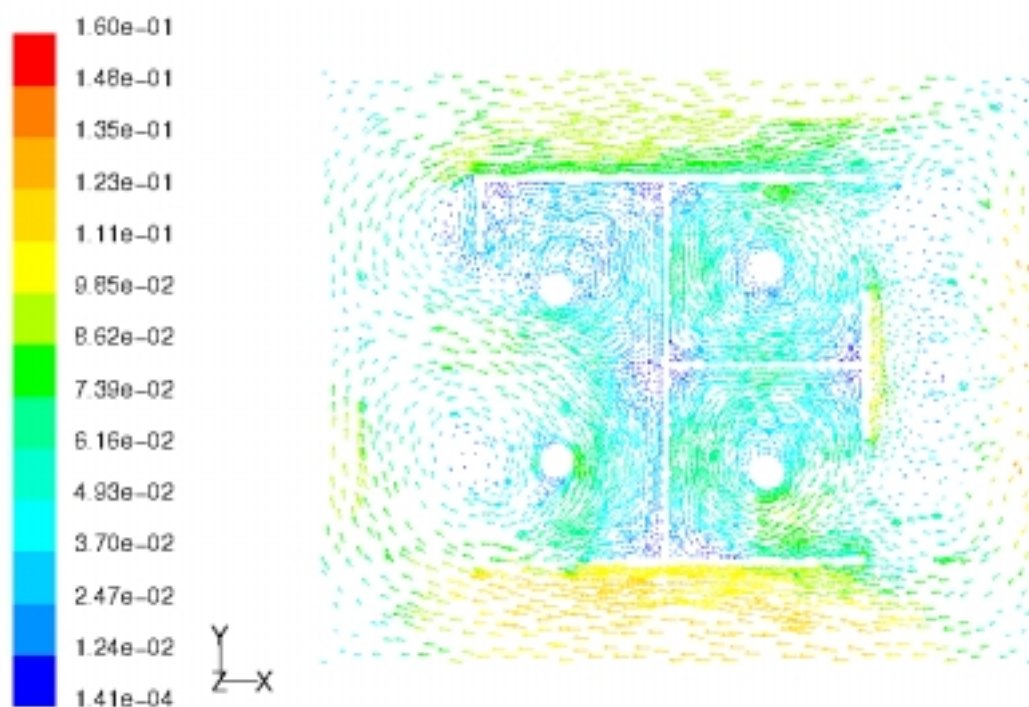


Figura 6. Distribuição de velocidades (m/s) em $z = 0.6$ m

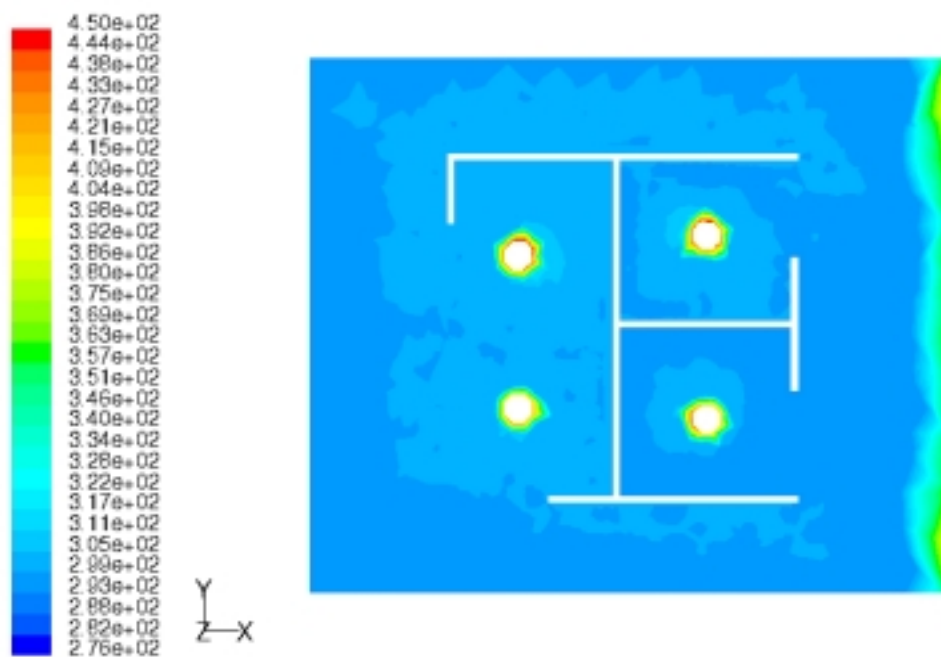


Figura 7. Distribuição de temperatura (K) em $z = 0.6$ m

Nas Figuras 8 e 9 são apresentados resultados comparativos de perfis de temperatura e velocidades, respectivamente, obtidos experimentalmente e por simulação (Fluent). A análise comparativa dos perfis permite verificar diferenças significativas entre os valores experimentais e de simulação.

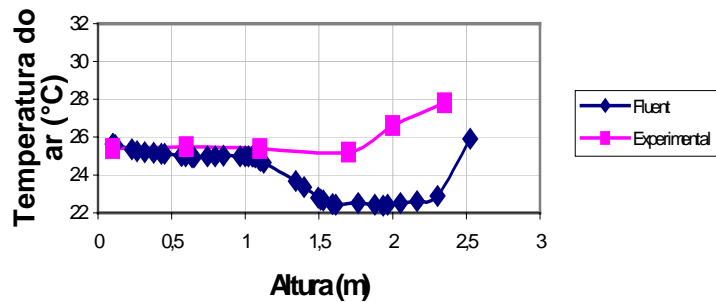


Figura 8. Perfis de temperatura (ponto 16)

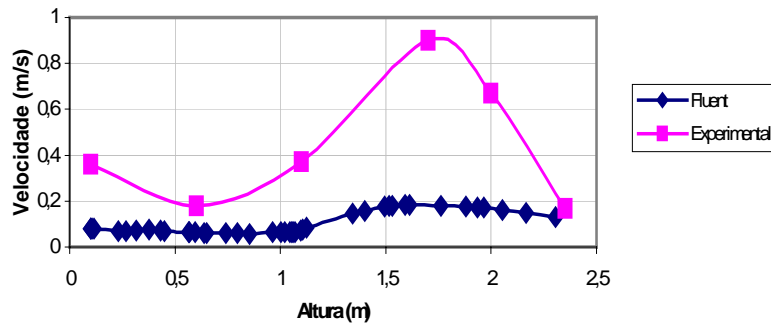


Figura 9. Perfis de velocidade (ponto 16)

Os resultados de simulação apresentados mostram a importância não só da utilização correta da ferramenta computacional, mas também e, principalmente, de conhecimentos de problemas numéricos e de escoamento de fluidos envolvidos.

Mesmo com os cuidados que foram tomados durante o processo de simulação, de um correto refinamento da malha na região de entrada do escoamento, de condições de contorno adequadas, etc., há a necessidade de melhorar e muito, principalmente as malhas (elementos) nas quais as equações de transferência de quantidade de movimento e de calor são resolvidas.

Adicionalmente, o levantamento experimental das vazões (velocidades) e temperaturas de insuflamento do split (não disponibilizadas nas informações técnicas do fabricante), utilizadas nas simulações, são fontes de incertezas, bem como os resultados experimentais utilizados para comparação de resultados.

8. CONCLUSÕES

Os resultados experimentais obtidos no presente trabalho mostram que o sistema de ar condicionado tipo *split* não dutado não é recomendado para utilização em ambientes de escritórios (com funcionários desenvolvendo atividades em estações de trabalho por longos períodos), pois acarreta diferenças significativas de condições térmicas entre postos de trabalho próximos, com elevado índice de insatisfeitos relacionado principalmente a regiões com velocidades excessivas do ar.

Por outro lado, o sistema split não dutado tem a vantagem de realizar uma troca de calor mais rápida e eficiente que os sistemas de ar condicionado centrais, pois “trabalha” com velocidades maiores; o que o torna recomendado para utilização em ambientes em que o tempo de permanência seja menor (salas de reuniões, ambientes com usos variados, ambientes comerciais com atividades diversas, etc.), com cuidado adicional quanto à renovação de ar.

Quanto aos resultados de simulação numérica do laboratório com o ar condicionado tipo *split* não dutado, os resultados mostram que há a necessidade de cuidados redobrados para a obtenção de resultados confiáveis (utilização de tipos diferentes de malha, maior refinamento da malha, testes com outros modelos de turbulência, utilização de outros critérios de convergência, etc). Por ser uma ferramenta poderosa para a solução de escoamento de fluidos, a dinâmica dos fluidos computacional também é uma ferramenta que pode induzir a conclusões rápidas e completamente equivocadas.

9. AGRADECIMENTOS.

Os autores agradecem à FAPESP pelo suporte financeiro para a instalação do laboratório onde foram realizados os ensaios.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____, (1998), “Fluent User’s Guide, Version 5.0”. Fluent Inc. Lebanon – NH, USA.

ASHRAE (2004). “Thermal environmental conditions for human occupancy”. (ANSI/ASHRAE Standard 55 - 2004). American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta - USA.

FANGER, P. O. (1972) “Thermal comfort – Analysis and applications in environmental engineering”. McGraw-Hill Book Company. New York.

ISO (1994). “Moderate thermal environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort” (ISO 7730). International Standards Organization, Geneva. 54.

ISO, (1998). “Thermal environments – Instruments and methods for measuring physical quantities” (ISO 7726). International Standards Organization, Geneva.

LEITE, B. C. C.; TRIBESS, A. (2002). “Analysis of the underfloor air distribution system: Thermal comfort and energy consumption”. In: ROOMVENT 2002 - Air Distribution in Rooms, Copenhagen. Elsevier, p. 245-248.

LEITE, B. C. C. (2003). “Sistema de ar condicionado com insuflamento pelo piso em ambientes de escritórios: Avaliação do conforto térmico e condições de operação”. Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 162 p.

PUSTELNIK, M.; TRIBESS, A. (2002). “Avaliação de ambientes com insuflamento de ar frio pelo piso utilizando simulação numérica”. In: Mercofrio 2002, Florianópolis (CD-ROM).

TEODOSIU, C.; RUSAOUEN, G.; LAPORTHE, S. (2000). “Improvement application of CFD to ventilated enclosures - A test case”, In: ROOMVENT 2000 - Air Distribution in Rooms, Reading, vol. 1, pp. 455-460.