



XIENCAC
ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

VII ELACAC
ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

Búzios - RJ - 2011

SIMULAÇÃO CFD EM REGIME TRANSIENTE DE UM AUDITÓRIO PARA O LEVANTAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS DURANTE OS PERÍODOS DE REFRIGERAÇÃO DE UM CONDICIONADOR DE AR TIPO SPLIT

**Andre Luiz de Freitas Coelho (1); Álvaro Messias Bigonha Tibiriçá (2)
Antônio Cleber Gonçalves Tibiriçá (3); Júlio César Costa Campos (4)**

(1) Graduando do curso de Engenharia Mecânica, andre.coelho@ufv.br

(2) Dr. Eng., Professor do Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica, alvaro.tibirica@ufv.br

(3) Dr. Eng., Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, tibirica@ufv.br

(4) Dr. Eng., Professor do Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica, julio.campos@ufv.br

Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 36570-000, Tel.: (31) 3899 4097

RESUMO

A aplicação de simulação CFD (*Computer Fluid Dynamics*) para determinação da distribuição de temperatura e velocidade em edificações tem sido tema de pesquisa de diversos autores. Em geral, a condição de regime permanente é adotada na maioria das simulações. Quando as variações no tempo nas variáveis de estudo são lentas ou pequenas, a hipótese de regime permanente é plausível. No entanto, para situações nas quais as variações no tempo das variáveis de interesse são mais rápidas, a hipótese de regime permanente não pode ser utilizada. Neste contexto enquadram-se a maioria dos sistemas de condicionamento de ar de pequeno porte como os *split*. Esses equipamentos utilizam algoritmos de controle do tipo Liga-Desliga, os quais provocam mudanças bruscas de temperatura na corrente de ar proveniente do condicionador de ar. Este trabalho investiga a distribuição de temperatura e de velocidade em um auditório durante os momentos em que o condicionador de ar está Ligado (jato de ar frio). Um modelo CFD do auditório em estudo foi criado e simulado utilizando o software CFX 11. Foram utilizadas condições de contorno obtidas experimentalmente. Resultados da simulação foram comparados com dados experimentais. Zonas de desconforto foram identificadas.

Palavras-chave: simulação computacional, CFD, ar condicionado, desempenho térmico

ABSTRACT

The application of CFD simulation (*Computer Fluid Dynamics*) to determine the velocity and temperature distribution in buildings has been the subject of research by several authors. In general, the condition of steady-state is adopted in most simulations. When changes over time in the study variables are slow and small, the steady-state hypothesis is plausible. However, for situations in which changes over time are faster, the steady-state hypothesis can not be used. This is the situation of most small air conditioning systems as split systems. These devices use On-Off control algorithm, which cause abrupt changes in temperature airflow. This study investigates the temperature and velocity distributions of an auditorium during the time air conditioner is On (cold airflow). A CFD model of the auditorium was built and simulated using the software CFX 11. Boundary conditions were obtained experimentally. Simulation results were compared with experimental data. Discomfort zones were identified.

Keywords: computer simulation, CFD, air conditioning, thermal performance.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o uso de CFD como uma ferramenta para o cálculo das distribuições de temperatura e velocidade em edificações teve aumento significativo. Essas aplicações englobam o uso de CFD para prever as características do escoamento de ar em apartamentos, consultórios, salas de aula, auditórios, museus, instalações industriais, terminais aeroportuários, estações de trem e ginásios (Stamou *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2009). Li *et al.* (2009) avaliaram o conforto térmico em uma estação de trem condicionada na China, utilizando simulações CFD em regime permanente. Cheong *et al.* (2003) o conforto em auditório com ar condicionado. Stamou *et al.* (2008) empregou simulação CFD em regime permanente para avaliar o conforto térmico em um ginásio de esportes na Grécia. Lo e Novoselac (2010) avaliaram o desempenho de sistema de ar condicionado com jatos localizados através de simulações CFD em regime permanente. Catalina *et al.* (2009) utilizou um experimento em escala natural e simulação CFD em regime permanente para estudar sistema de resfriamento radiante no teto.

Sistemas de ar condicionado pequenos costumam utilizar sistemas de controle de duas posições (Liga-Desliga). Este é o modo de controle mais simples e provavelmente mais comum. Ele consiste em manter o compressor (elemento responsável por manter o ciclo de refrigeração do equipamento de condicionamento de ar em funcionamento) ligado enquanto a temperatura do ambiente for superior à temperatura desejada, e desligado caso contrário. Uma diferença entre a temperatura de acionamento e desligamento do compressor é habitualmente utilizada para evitar que o compressor ligue e desligue com uma frequência muito alta. A Figura 1 ilustra o funcionamento típico do algoritmo de controle Liga-Desliga com diferencial.



Figura 1 – Exemplo típico do algoritmo de controle Liga-Desliga com diferencial. Adaptado de ASHRAE Fundamentals (2001)

Simulações CFD são baseadas na solução numérica das equações diferenciais parciais de Conservação da Massa, Conservação do Momento Linear e Conservação de Energia. Essas equações são resolvidas numericamente para um conjunto de volumes elementares acoplados (Método dos Volumes Finitos). Para cada elemento, as equações básicas descritas anteriormente são resolvidas e os resultados são utilizados pelos elementos vizinhos como condição de contorno. Um software de simulação CFD deve ser capaz de resolver sistemas de equações diferenciais parciais com centenas ou milhares de equações. Problemas simples envolvem milhares de elementos, e para cada elemento há pelo menos cinco equações a serem resolvidas – uma para conservação da massa, três para conservação do momento linear (uma para direção espacial) e uma para conservação de energia. Além das equações básicas, são de uso corriqueiro as equações de turbulência que visam modelar o fenômeno de turbulência presente nos escoamentos fluídos na escala macroscópica na qual são realizadas as simulações CFD pelos softwares comerciais. O modelo de turbulência mais utilizado é o k- ϵ que acrescenta mais duas equações ao sistema de equações. Entre os softwares comerciais disponíveis destacam-se o Fluent, o Flovent, Phoenics e o Ansys CFX. Este último foi escolhido para fazer as simulações deste trabalho.

2. OBJETIVOS

Os objetivos deste artigo são: 1) investigar, através de simulação CFD, a variação no tempo da distribuição de temperatura em um auditório durante os momentos nos quais o condicionador de ar está ligado; 2) verificar diferença entre valores de temperatura simulados e obtidos experimentalmente.

3. MÉTODO

O método deste trabalho está dividido em três etapas principais:

1. Aquisição de dados do auditório
2. Elaboração de um modelo computacional CFD representativo para o auditório
3. Solução numérica do modelo CFD

3.1. Aquisição de dados

O auditório em estudo faz parte do Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica (DEP) da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Ele é utilizado para seminários e aulas de graduação relacionadas a este departamento. O auditório possui lugar para 40 pessoas e as seguintes dimensões: 9,75 m (comprimento) x 5,10 m (largura) x 2,80 m (altura). A parede direita está voltada para o exterior e as demais paredes são internas. A parede ao fundo possui janela em toda sua extensão, estão voltadas para o interior do prédio e não recebem insolação direta. O teto é de gesso e possui um vão de 70 cm até a laje que é coberta por telhas metálicas.

Foi feito monitoramento do auditório durante vários períodos em dias diferentes nos meses de janeiro, fevereiro e março de 2011. Em todas as medições o auditório estava vazio, pois a proposta deste trabalho era construir modelos CFD o mais simples possível tornando a modelagem menos complexa e com menos variáveis para análise. Por este motivo, optou-se por não utilizar o auditório ocupado, o que tornaria necessária a modelagem da carga térmica causada por pessoas que por si só é um problema de modelagem CFD suficientemente grande para que seja abordado em outro trabalho. A Figura 2 mostra duas fotos do auditório com sistema de aquisição de dados de temperatura.

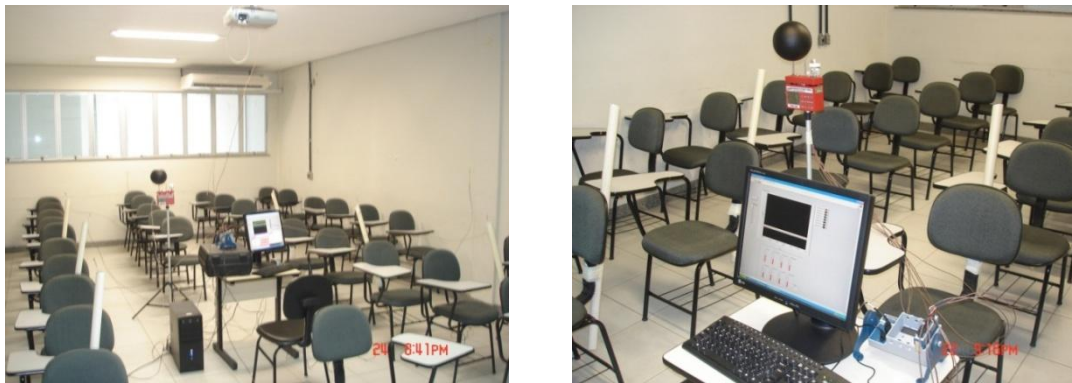


Figura 2 – Foto do auditório com sistema de aquisição de dados de temperatura

Catorze pontos de monitoramento de temperatura foram utilizados. Oito são para utilização como condição de contorno para simulação CFD: temperaturas das paredes (4), temperatura do piso (1), temperatura do teto (1), temperatura do jato de ar do condicionador de ar (1) e temperatura do ar na entrada (sucção) do condicionador de ar (1). Eles foram posicionados na região central das superfícies monitoradas. Outros seis pontos foram distribuídos no interior da sala a uma altura aproximadamente a de uma pessoa sentada em volta do equipamento de aquisição de dados. A posição destes foi limitada pela extensão dos cabos dos sensores (2 m). Os dados medidos nestes pontos foram utilizados para comparação com os dados da simulação. A Figura 3 mostra um esquema isométrico do auditório com os pontos de monitoramento de temperatura, e a Tabela 1 as coordenadas destes pontos.

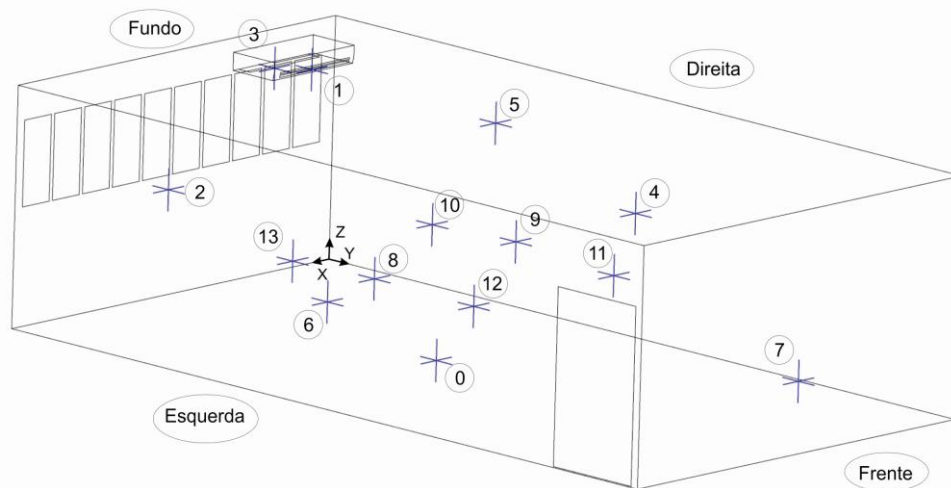


Figura 3 – Esquema isométrico do auditório com os pontos de medição.

Tabela 1 - Coordenadas dos pontos de medição de temperatura segundo eixos mostrado na Figura 3.

Ponto	Coordenada		
	x (m)	y (m)	z (m)
Piso (0)	2.50	4.10	0.00
Entrada Ar Sala (1)	1.12	0.85	2.50
Parede Janela (2)	2.60	0.00	1.20
Saida Ar Sala (3)	1.30	0.28	2.44
Parede Direita (4)	0.00	4.70	1.40
Teto (5)	2.30	4.70	2.80
Parede Esquerda (6)	5.10	4.85	1.23
Parede Quadro (7)	2.50	9.75	0.84
Centro Esquerdo (8)	3.54	5.25	1.23
Centro Direito (9)	1.12	4.70	1.17
Atrás Direito (10)	1.40	3.60	1.16
Frente Direita (11)	3.67	6.55	1.21
Frente Esquerda (12)	1.19	6.00	1.09
Atrás Esquerdo (13)	3.65	3.80	1.23

O sistema de aquisição dados de temperatura é composto por um rack modelo NI cDAQ-9174, de um módulo leitura de termopares modelo NI 9213 de 16 canais com resolução de 24 bits, de 14 termopares (tipos J, K, E, T) e do software de instrumentação Labview (versão 2010). O fabricante de todos os componentes do sistema é a National Instruments. O software é executado em um computador pessoal comum que se comunica com o sistema de aquisição de dados através de uma porta USB. A incerteza geral do sistema de aquisição de temperaturas foi calculada e seu valor é de $\pm 0,7$ °C.

A Figura 4 ilustra uma amostra de um conjunto de dados coletados durante um dos períodos de aquisição. Observa-se que a temperatura do jato que sai do condicionador de ar (Entrada Ar Sala na Figura 4) possui o comportamento típico de um controlador Liga-Desliga. E que a variação de temperatura nos diversos pontos do auditório possuem um comportamento cíclico.

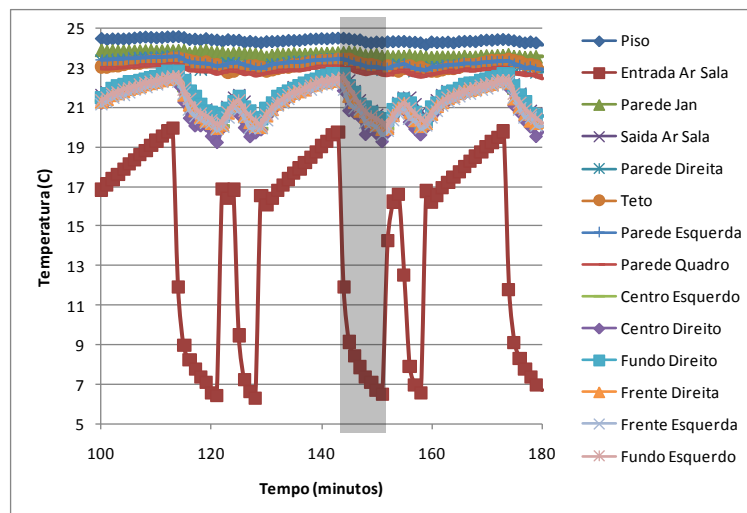


Figura 4 – Amostra de um conjunto de dados coletados durante um dos períodos de aquisição de dados. A área destacada representa o intervalo de dados utilizados na simulação feita para este artigo.

Além do monitoramento da temperatura foram medidas as velocidades do jato de ar frio e do fluxo de ar que retorna ao condicionador de ar. Para tais medições utilizou-se um anemômetro de pás da Lutron modelo AM-4201. A temperatura de globo também foi monitorada. Durante todos os períodos de monitoramento sua variação sempre foi a mesma a temperatura de bulbo seco no mesmo ponto de medição dentro de uma tolerância de $\pm 1,5$ °C. A temperatura de globo foi medida com um medidor de stress térmico da Instruterm modelo TGD-300.

3.2. Modelo computacional CFD

Um modelo fluídico do auditório foi construído com a mesma configuração geométrica que o auditório real. O mobiliário não foi modelado. A influência das cadeiras no escoamento e na distribuição de temperatura foi desconsiderada com objetivo de tornar a malha mais simples. As simulações foram executadas usando malha hexadominante contendo 3814 elementos, ilustrada na Figura 5.

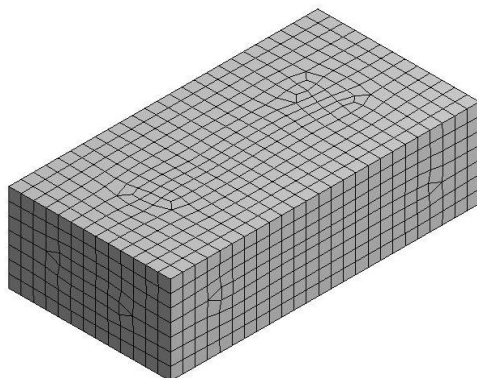


Figura 5 – Malha hexadominante utilizada na simulação do auditório.

O módulo CFX-PRE do software Ansys CFX (versão 11) foi utilizado para modelar o sistema. O escoamento foi modelado como tridimensional, turbulento, incompressível e transiente. As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia foram utilizadas. O modelo de turbulência k-ε foi adotado. Efeitos de empuxo foram considerados. Modelos de radiação e carga térmica (pessoas e equipamentos) não foram considerados. O fluido foi modelado como ar a 25 °C.

Dados coletados durante o intervalo de tempo destacado na Figura 4 foram usados como condição de contorno. A temperatura média do ar no auditório (22,48 °C) no instante imediatamente anterior ao início do funcionamento (estado Ligado) do condicionador de ar foi utilizada como condição inicial para temperatura do ar. Foram utilizados dados de velocidade e de temperatura dos jatos de ar na entrada e na saída do condicionador de ar como condição de contorno. Como as temperaturas desses jatos variaram durante os períodos de interesse, foram feitos ajustes de curvas para representar essas variações no tempo em cada período. As temperaturas das paredes, do teto e do piso também foram utilizadas como condição de contorno. Ajustes de curva também foram utilizados para representar essas variações no tempo. A Tabela 2 resume as condições de contorno utilizadas.

Tabela 2– Características dos materiais utilizados na simulação computacional.

Condição de Contorno	Tipo de Condição de Contorno	Temperatura (°C)*	Velocidade (m/s)
Entrada de Ar Sala	Entrada	$T = -2 \cdot 10^{-7}t^3 + 10^{-4}t^2 - 0,0429t + 11,709$	3,15
Saída de Ar Sala	Saída	**	0,9
Teto	Parede	$T = -0,0012t + 23,486$	**
Piso	Parede	$T = -0,0006t + 24,486$	**
Parede Esquerda	Parede	$T = -0,0011t + 23,405$	**
Parede Direita	Parede	$T = -0,0009t + 23,329$	**
Parede Fundo	Parede	$T = -0,0005t + 23,812$	**
Parede Frente	Parede	$T = -0,0007t + 22,973$	**

* tempo em segundos (período dos dados ajustados: 0 a 420 s)

** condição de contorno não utilizada

3.3. Solução numérica

A simulação foi configurada para ser em regime transiente durante o período de tempo destacado na Figura 4. Foram utilizados passos de um segundo num total de 420 segundos. Para cada instante de tempo foi executada no máximo 10 iterações até que o erro médio de cada equação atinja valor inferior a 10^{-4} . Foram

armazenados dados de simulação a cada 60 segundos. Um total de 1444 segundos foram gastos para realizar a simulação em um computador com processador Core2Duo de 2930 MHz. Na Tabela 3 constam os valores simulados em cada instante de tempo da simulação armazenado e os valores medidos para os seis pontos de medição indicados na Figura 3.

Tabela 3– Valores simulados e medidos

Tempo de simulação (s)	Temperatura Simulada (graus Celsius)						Temperatura Medida (graus Celsius)					
	Centro Esquerdo	Centro Direito	Fundo Direito	Frente Direita	Frente Esquerda	Fundo Esquerdo	Centro Esquerdo	Centro Direito	Fundo Direito	Frente Direita	Frente Esquerda	Fundo Esquerdo
0	22,48	22,48	22,48	22,48	22,48	22,48	22,47	21,84	22,67	22,33	21,93	22,53
60	22,06	22,41	22,36	21,68	22,21	22,24	21,84	20,82	22,09	21,59	21,25	22,05
120	21,17	21,43	21,41	21,06	21,32	21,34	21,36	20,70	21,73	21,28	20,99	21,58
180	20,54	20,90	20,90	20,43	20,74	20,63	20,91	20,49	21,17	20,83	20,87	21,11
240	19,98	20,36	20,38	19,88	20,13	20,13	20,54	19,61	21,03	20,55	20,26	20,78
300	19,47	19,89	19,93	19,35	19,64	19,64	20,30	19,89	20,76	20,31	20,16	20,54
360	18,94	19,31	19,37	18,80	19,04	19,08	20,18	19,66	20,49	20,12	20,00	20,44
420	18,33	18,73	18,76	18,22	18,42	18,39	20,03	19,25	20,04	19,89	19,62	20,19

4. RESULTADOS

4.1. Avaliação da distribuição de temperatura

Foi analisada a distribuição de temperatura durante a simulação em plano localizado a 1,2 m do piso (altura usual das pessoas sentadas no auditório), nos instantes de tempo 60s, 180s e 420s. Estes planos estão plotados com os contornos de temperatura na Figura 6. Pode-se perceber que na primeira figura a uma grande região com a temperatura entre 21,86 °C e 22,5 °C – faixa temperatura usada como condição inicial. Dois minutos depois (instante 180 s) a maior parte do plano plotado já está na região entre 20,57 °C e 21,21 °C. Aos sete minutos de simulação a temperatura na sala está praticamente uniforme perto do patamar do *setpoint* (temperatura de referência) do condicionador de ar. Em todos os momentos é possível observar um região mais fria lado direito da sala que com tempo desloca-se para mais perto do condicionador de ar.

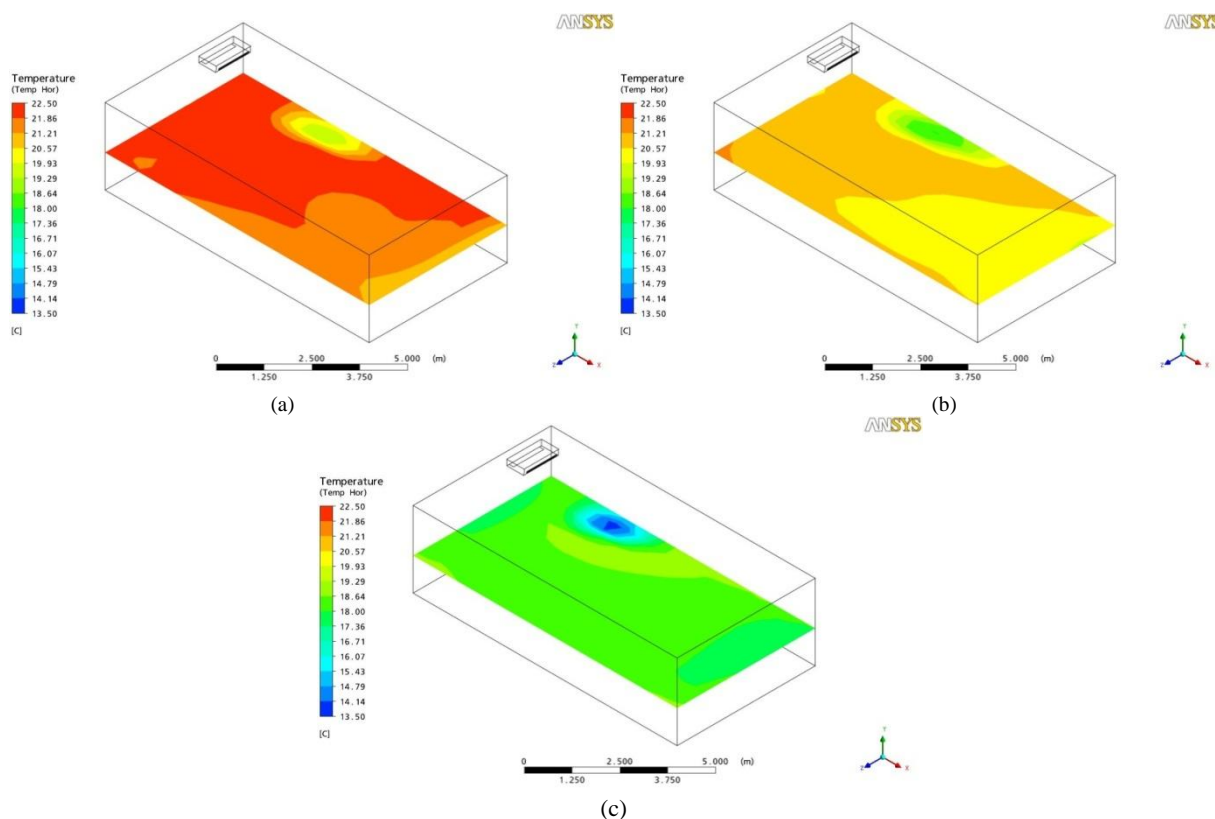


Figura 6 – Distribuição de temperatura nos instantes: (a) 60s, (b) 180s, (c) 420s

Como o comportamento do condicionador de ar é cíclico, as regiões de temperatura plotadas na figura acima se repetirão outras vezes nos momentos em que o sistema de ar condicionado estiver no estado Ligado. O resultado permite verificar que na operação normal de um condicionador de ar com controle Liga-Desliga periodicamente formam-se regiões com temperaturas diferentes inerentes ao esquema de controle Liga-Desliga.

4.2. Temperatura de Conforto Efetiva

A temperatura de conforto efetiva é um índice que combina os efeitos da temperatura do ar e movimentação do ar em termos de seu efeito psicológico no corpo humano (ASHRAE, 2001). Ela é calculada segundo a Equação 1.

$$T_{ef} = (T_i - T_{média}) - 7,66 (V_i - 0,15) \quad (1)$$

T_i e V_i representam a temperatura de bulbo seco e a velocidade no ponto de interesse, respectivamente, e $T_{média}$ é a temperatura bulbo seco média no ambiente em questão. Segundo Li et al.(2009), a maioria das pessoas se sente confortável para temperaturas de conforto efetivo entre $-1,7$ e $1,1$ °C com velocidade inferior a $0,35$ m/s.

Esse índice foi usado para verificar zonas de conforto e de desconforto existentes no auditório durante os períodos em que condicionador de ar está no estado Ligado. Na Figura 7 estão plotados contornos de temperatura de conforto efetiva para o plano localizado a $1,2$ m do piso. No primeiro gráfico de contorno é possível perceber regiões de desconforto quentes ($t_{ef} > 1,1$ °C) ocupando grande parte do auditório e uma região de desconforto fria no lado direito da sala ($t_{ef} < -1,7$ °C). Três minutos depois (instante 240 s) a maioria da sala está em uma região de conforto, há ainda região de desconforto quente e a região de desconforto fria no lado direito da sala permanece praticamente inalterada. No instante final da simulação (420 s) é possível notar a persistência da região de desconforto fria e a diminuição da região de desconforto quente.

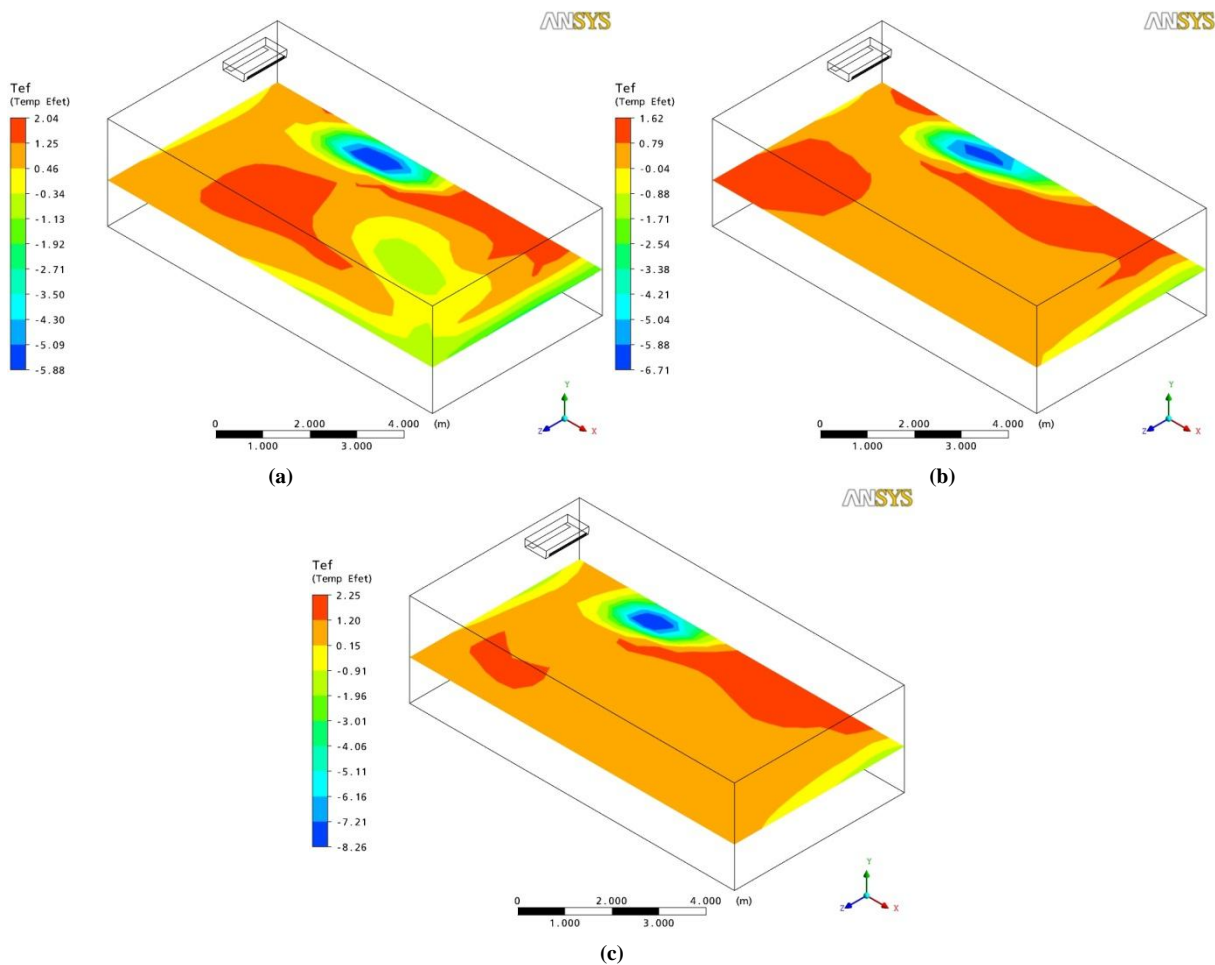


Figura 7 – temperatura de conforto efetiva nos instantes: (a) 60s, (b) 240s, (c) 420s

Como na análise da distribuição de temperatura feita na seção anterior, verifica-se aqui também a formação de regiões de conforto e de desconforto durante o funcionamento do condicionador de ar no estado Ligado. Uma zona fria de grande desconforto localizada no lado direito do auditório (perto da unidade evaporadora do condicionador de ar) é persistente durante todo intervalo simulado.

4.3. Dados simulados e dados experimentais

A Figura 8 contém os gráficos dos valores simulados e dos valores medidos para os seis pontos de monitoramento utilizados para validar os resultados (ver Figura 3 e Tabela 1). Junto a curva de valores medidos estão plotadas barras de erro com a incerteza de medição do sistema de aquisição de dados (0,7 °C).

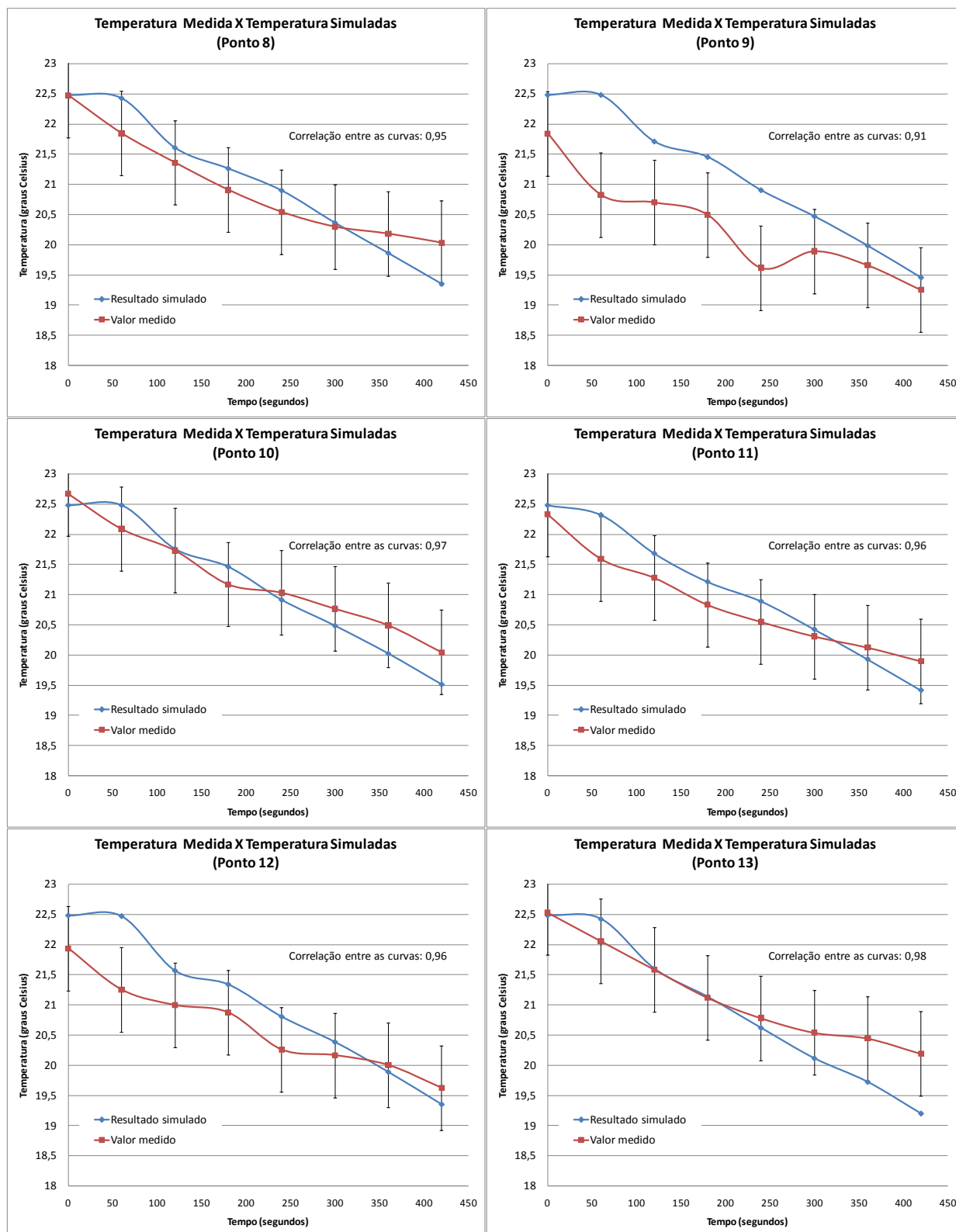


Figura 8 – Valores simulados e valores medidos para os seis pontos de verificação

Para cada conjunto de curvas foi calculado o coeficiente de correlação. O ponto 9 foi o que apresentou maior discrepância entre as temperaturas medidas e simuladas. Apesar das diferenças encontradas entre os valores medidos e simulados, para todos os conjuntos de dados há uma forte correlação (maior que 0,9) entre o medido e o simulado.

5. CONCLUSÕES

Foi proposta a simulação CFD em regime transiente de um auditório para verificação da distribuição de temperaturas nos momentos nos quais o condicionador de ar está no estado Ligado. Verificou-se a existência, através dos dados da simulação, de zonas de desconforto térmico durante os momentos em que o condicionador de ar está Ligado. Uma região de desconforto térmico com temperatura mais baixa foi identificada na simulação.

Os resultados obtidos na simulação concordaram, de modo geral, com dados de temperatura obtidos experimentalmente. No entanto, há ainda espaço para que o modelo CFD utilizado e os resultados obtidos sejam melhorados. Modelos mais completos, contendo a modelagem de carga térmica geradas por pessoas devem ser incluídos para que a simulações possam refletir com maior fidelidade situações de ocupação de ambientes condicionados. Apesar das simplificações utilizadas no modelo, os resultados encontrados demonstram que a utilização de simulações CFD para avaliação de ambientes condicionados é promissora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). **2001 ASHRAE Handbook – Fundamentals**. Atlanta, 2001.
- CATALINA, T.; VIRGONE, J.; KUZNIK, F. Evaluation of thermal comfort using combined CFD and experimentation study in a test room equipped with a cooling ceiling. **Building and Environment**, v. 44, p. 1740-1750, 2009.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**. Editora Mcgraw-Hill Brasil, 2007.
- CHEONG, K.W.D., DJUNAEDY, E., CHUA, Y.L., THAM, K.W., SEKHAR, S.C., WONG, N.H. AND ULLAH, M.B. Thermal comfort study of air-conditioned lecture theatre in the tropics. **Building and Environment**, Vol. 38, pp. 63-73, 2003.
- LI, Q.; YOSHINO, H.; MOCHILDA, A.; LEI, B.; MENG, Q.; ZHAO, L.; LUN, Y. CFD study of the thermal environment in an air-conditioned train station building. **Building and Environment**, v. 44, p. 1452-1465, 2009.
- LO, L. J.; NOVOSELAC, A. Localized air-conditioning with occupancy control in an open office. **Energy and Buildings**, v. 42, p. 1120-1128, 2010.
- STAMOU, A. I.; KATSIRIS, I. SCHAEELIN, A. Evaluation of thermal comfort in Galatsi Arena of the Olympics Athens 2004 using CFD Model. **Applied Thermal Engineering**, v. 28, p. 1206-1215, 2008.
- WANG, L.; WONG, N. H. Coupled Simulations for Naturally Ventilated Rooms Between Building Simulation (BS) and Computational Fluid Dynamics (CFD) for Better Prediction of Indoor Thermal Environment. **Building and Environment**, v. 44, p. 95-112, 2009.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG e FUNARBE pelo apoio financeiro ao grupo de pesquisa.