

UTILIZAÇÃO DE CFD NA AVALIAÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO EM AMBIENTES CONDICIONADOS NA PRESENÇA DE ASSIMETRIAS DE RADIAÇÃO TÉRMICA

Jorge E. Corrêa¹, jecorrea@ufpa.br
Clóvis R. Maliska², maliska@sinmec.ufsc.br

¹Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Mecânica, LABCLIMA, CEP: 66.075-110.

²Universidade Federal da Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, SINMEC, CEP: 88.040-900.

Resumo: Neste artigo, realiza-se a avaliação de conforto térmico em um ambiente condicionado com auxílio de um programa em CFD (Computational Fluid Dynamics): utiliza-se o ANSYS Workbench Versão 11.0 para construir a geometria, a malha numérica, resolver os sistemas lineares correspondentes para obter os campos de velocidade e temperatura do ar e visualizar esses resultados. O programa ASHRAE Thermal Comfort V. 1.0 é utilizado para avaliação de conforto térmico em três casos diferentes: (1) temperatura radiante média próxima da temperatura do ar; (2) assimetria de temperatura radiante média entre o piso e o forro; e (3) assimetria de temperatura radiante média entre paredes. Os resultados obtidos são comparados e analisados. Verifica-se que embora os ambientes térmicos não apresentassem desconforto térmico, o desconforto localizado era mais acentuado onde havia assimetria de radiação térmica piso-forro do que para assimetrias existentes entre paredes.

Palavras-chave: CFD, Conforto Térmico, Ar Condicionado

1. INTRODUÇÃO

Os ambientes construídos servem a diversas finalidades e dependendo delas são projetados com as funcionalidades adequadas. Se sua finalidade é comercial, institucional, ou mesmo residencial, ou seja, um ambiente no qual o foco está voltado para os ocupantes, o conforto térmico é um item importante a ser avaliado. Nesses ambientes, os padrões internos de escoamento de ar, que influenciam fortemente os fatores ambientais relacionados ao conforto térmico, são complexos e dependem da interação de diferentes forças relacionadas com a ventilação natural e/ou mecânica e com o empuxo. Geralmente, apresentam velocidade do ar abaixo de 0,25 m/s nas zonas ocupadas e números de Reynolds relativamente baixos ($\sim 10^5$). O escoamento pode ser laminar, de transição ou turbulento, ou mesmo uma combinação deles em regime transiente. Essa complexidade torna a experimentação em laboratório ou em campo extremamente difícil e dispendiosa. Assim, a experimentação computacional é uma alternativa atraente para tratar esses problemas em virtude da disponibilidade crescente de programas em CFD e do avanço contínuo na capacidade de processamento e velocidade dos computadores.

A utilização de programas em CFD para simulação de escoamentos de ar dentro de ambientes construídos tem obtido sucesso considerável (ZHAI, 2007). Entretanto, muitos fatores influenciam os resultados e usuários diferentes podem obter diferentes resultados para o mesmo problema usando o mesmo programa em CFD. A precisão dos resultados de simulação depende dos conhecimentos e da experiência do usuário em dinâmica dos fluidos, e da sua habilidade com as técnicas numéricas. Além disso, a escolha do modelo de turbulência é um ponto chave que afetará diretamente a precisão e a eficiência da simulação.

2. AVALIAÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO

A percepção de um ambiente termicamente confortável relaciona-se com a energia gerada pelo metabolismo, sua transferência para o ambiente e ajustes fisiológicos da temperatura corporal. A dissipação de calor depende de fatores ambientais (temperatura, velocidade e umidade do ar e radiação térmica) e pessoais (atividade desenvolvida e tipo de vestimenta). O desconforto pode ser sentido no corpo inteiro (desconforto térmico) ou em partes dele (desconforto local). As diferenças individuais impossibilitam estabelecer condições térmicas que satisfaçam a todos. Por isso, as normas especificam condições em que 80% dos ocupantes de um determinado ambiente, cujas condições atendem seus requisitos, estarão satisfeitos com o ambiente térmico. As sensações térmicas subjetivas podem ser quantificadas através da escala mostrada abaixo:

+ 3	Muito quente
+ 2	Quente
+ 1	Levemente quente
0	Neutro
- 1	Levemente frio
- 2	Frio
- 3	Muito frio

1.1 Fatores ambientais e pessoais

A temperatura radiante média T_{rm} é um fator importante na interação térmica do corpo humano com o ambiente. É definida como a temperatura uniforme de uma cavidade imaginária na qual a transferência líquida de calor por radiação com o corpo humano seria igual àquela que ocorre no ambiente real. Dos resultados de simulação obtém-se as *temperaturas médias das paredes e superfícies* que envolvem o ambiente. A maioria dos materiais de construção apresenta uma elevada emissividade, de modo que todas as superfícies no ambiente podem ser consideradas superfícies negras. Assim, a temperatura radiante média do ambiente é dada por:

$$T_{rm}^4 = T_1^4 F_{p-1} + T_2^4 F_{p-2} + \dots + T_N^4 F_{p-N} \quad (1)$$

onde: T_N = temperatura superficial média da superfície N, K; F_{p-N} = fator de forma entre a pessoa e a superfície N, adimensional.

Como a soma dos fatores de forma é unitária, a temperatura radiante média à quarta potência é igual à soma das temperaturas superficiais médias à quarta potência ponderada pelos seus respectivos fatores de forma. Em geral, a determinação dos fatores de forma entre as superfícies e uma pessoa dentro do ambiente é um processo difícil e demorado. O fator de forma depende da posição e da orientação da pessoa com relação à superfície (Fanger, 1972). A Figura 1 pode ser usada para estimar valores médios de fatores de forma entre pessoas sentadas e superfícies retangulares verticais e horizontais.

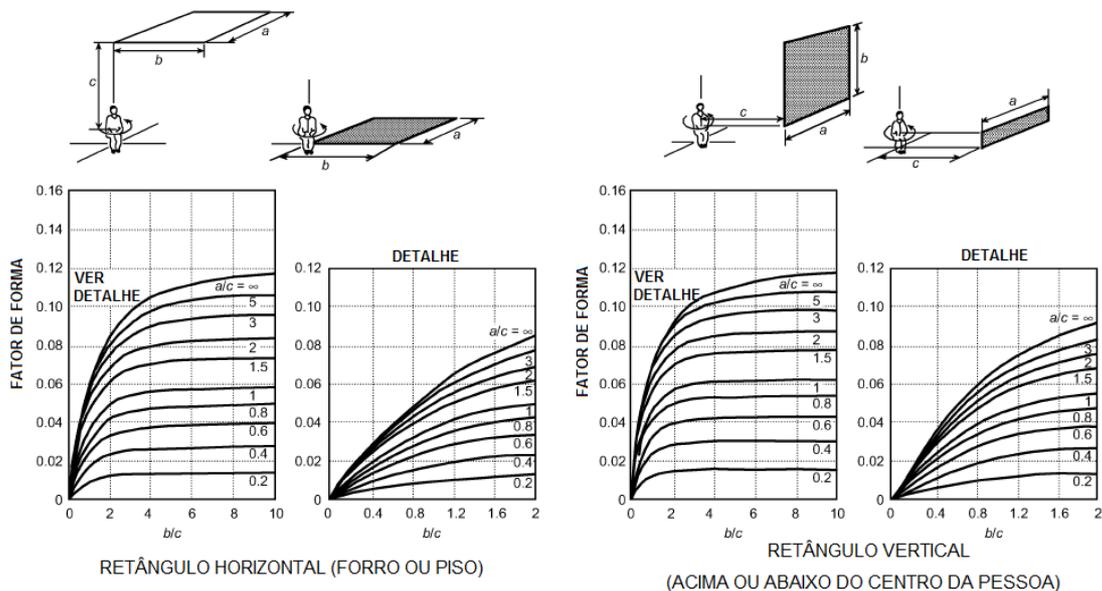


Figura 1 – Fator de forma médio entre a pessoa sentada girando em torno de seu eixo vertical e superfícies retangulares (ASHRAE, 2005).

Se a diferença existente entre as temperaturas das superfícies for relativamente pequena, a Equação (1) pode ser simplificada à sua forma linear. Assim:

$$T_{rm} = T_1 F_{p-1} + T_2 F_{p-2} + \dots + T_N F_{p-N} \quad (2)$$

Além dos fatores ambientais, especificam-se dois pessoais: resistência térmica da roupa (vestimenta) e taxa metabólica (atividade desenvolvida). A taxa metabólica depende do tipo de como a atividade é realizada e da condição física do indivíduo. A Tabela 1 apresenta valores típicos de taxa metabólica para um adulto saudável em atividade contínua. A unidade usada para expressar a taxa metabólica por unidade de área corporal é o met (*metabolism*).

Tabela 1 – Taxa metabólica para algumas atividades (adaptado de ISO 7730, 2005).

Atividade	W/m ²	met*
Descansando	46	0,8
Sentado, quieto	58	1,0
De pé, relaxado	70	1,2
Lendo, sentado	58	1,0
Escrevendo	58	1,0
Datilografando, digitando	65	1,1
Arquivando, sentado	70	1,2
Arquivando, de pé	80	1,4
Caminhando de um lado a outro	100	1,7
Arquivando, pacotes	120	2,1

(*) 1 met = 58,2 W/m² de área de superfície corporal.

A resistência térmica da roupa é expressa em unidades clo (*clothing*). A resistência térmica da vestimenta I_{cl} pode ser calculada com auxílio da resistência térmica de cada peça de roupa $I_{cl,i}$, pelo somatório dado por:

$$I_{cl} = \sum_i I_{cl,i} \quad (3)$$

A Equação (3) fornece valores com precisão aceitável para roupas típicas de ambientes internos. A resistência térmica de cada peça de roupa é dada na Tabela 2.

Tabela 2 – Resistência térmica de peças de roupas individuais (adaptado de ISO 7730, 2005).

Peças de roupa	$I_{cl,i}$ (clo*)
Meia leve	0,03
Cueca “slip”, calcinhas	0,05
Cueca tradicional, combinação	0,13
Camiseta	0,09
Camisa de mangas curtas leve	0,20
Camisa de mangas compridas leve	0,28
Vestido leve	0,17
Suéter de mangas curtas leve	0,17
Suéter de mangas compridas	0,37
Calça leve	0,26
Calça média	0,32
Sapato comum	0,04

(*) 1 clo = 0,155 (m²·K)/W

1.2 Normas disponíveis

O conforto térmico é definido como uma condição mental que expressa satisfação do ocupante com o ambiente térmico. As normalizações técnicas ANSI/ASHRAE 55-2004 e ISO 7726-2005 estão disponíveis para avaliação de conforto térmico em ambientes condicionados. Existe uma norma brasileira, ABNT/NBR-16.401: Parte 3, que também é baseada nas duas internacionais citadas.

Na primeira, os critérios de conforto térmico são estabelecidos em termos de *temperatura operativa*, que é a média da temperatura do ar e da temperatura radiante média ponderada pelos respectivos coeficientes de transferência de calor. Com velocidade relativa do ar até 0,4 m/s e temperatura radiante média até 50°C a *temperatura operativa* é simplesmente a média aritmética entre a temperatura do ar e a radiante média. A *temperatura efetiva* é a temperatura operativa de um ambiente com 50% de umidade relativa que causaria nos ocupantes a mesma dissipação de calor sensível e latente que ocorre no ambiente real. A Figura 2 mostra zonas de conforto para verão e inverno sobre um diagrama psicrométrico modificado para incluir essas temperaturas. Esse diagrama é válido para pessoas em atividades sedentárias ou leves ($M \leq 1,2$ met).

Embora estabeleçam critérios para ambientes internos, as zonas de verão e inverno são necessárias em função das mudanças que ocorrem habitualmente no modo de vestir de uma estação para outra. No verão, a resistência térmica da roupa varia entre 0,35 e 0,6 clo e seu valor típico 0,5 clo (0,078 m²·K/W); no inverno, varia entre 0,8 e 1,2 clo com valor típico 0,9 clo (0,14 m²·K/W).

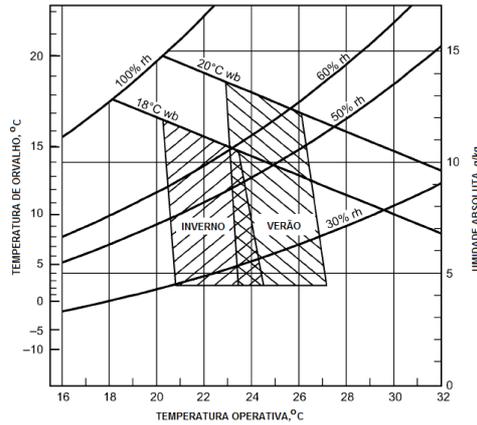


Figura 2 – Zonas de conforto para verão e inverno (ASHRAE, 2005).

Na segunda, esses critérios são estabelecidos em termos dos índices *PMV* (*Predicted Mean Vote*) e *PPD* (*Predicted Percentage Dissatisfied*), calculados através dos fatores ambientais e pessoais. O *PMV* estima o valor médio do voto de um grande número de pessoas expostas ao mesmo ambiente térmico. Como os votos individuais estão dispersos em torno dessa média são usados para obter a estimativa do número de pessoas que estão desconfortáveis, ou seja, sentindo muito frio ou muito calor. O *PMV* é calculado por:

$$PMV = [0,303 e^{-0,036M} + 0,028] L \quad (4)$$

onde: *L* é a diferença entre o calor produzido pelo metabolismo e a parcela liberada para o ambiente e *M* a taxa metabólica. O *PPD* (*Predicted Percentage of Dissatisfied*), que estima o número de pessoas insatisfeitas com o ambiente térmico na mesma condição, é obtido por:

$$PPD = 100 - 95e^{-(0,03353 PMV^4 + 0,2179 PMV^2)} \quad (5)$$

A relação entre o *PMV* e o *PPD* é vista na Figura 3. Um *PPD* de 10 % corresponde à faixa de *PMV* de $\pm 0,5$. Com *PMV* = 0 somente 5 % dos ocupantes estarão insatisfeitos.

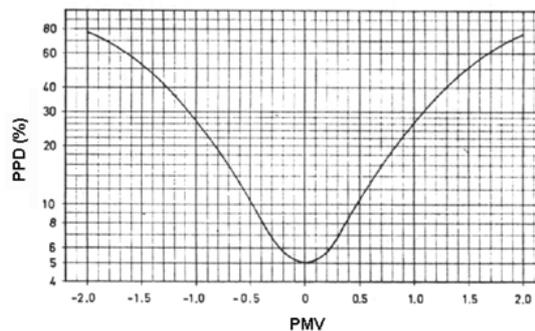


Figura 3 – Relação entre *PMV* e *PPD*.

2. GEOMETRIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO

A geometria do ambiente para análise do conforto térmico é apresentada na Figura 4. As dimensões são 4,00×3,00×2,80 m. Cada uma das janelas tem 1,40 × 1,00 m e estão instaladas a 0,80 m de altura com relação ao piso, em paredes opostas, equidistantes das paredes 1 e 3. A porta tem 2,10 m de altura × 0,90 m de largura e está a 0,10 m do piso, próxima ao canto inferior da parede 1. A insuflação de ar é feita por uma abertura de 0,40 m × 0,08 m na parede 3 a 2,10 m de altura do piso e equidistante das paredes 2 e 4. A descarga de ar é feita por uma abertura de 0,535 m × 0,225 m na parede 3 a 1,80 m de altura do piso e equidistante das paredes 2 e 4.

Embora a geometria seja relativamente simples é adequada aos propósitos deste trabalho. A malha numérica não-estruturada, estacionária e sem deformação, com 373.362 elementos foi desenvolvida de modo que as condições de contorno podem ser especificadas independentemente em cada uma das superfícies identificadas na Figura 4. As simulações foram feitas em regime permanente para coordenadas cartesianas. A pressão atmosférica de referência no ambiente e em sua vizinhança é de 1 atm. A força de empuxo atua na direção vertical e no sentido ascendente. Admite-

se condição de não escorregamento em todas as superfícies lisas em contato com o ar do ambiente. O modelo $k-\epsilon$ padrão foi utilizado para resolver a turbulência e o modelo DTRM (*Discrete Transfer Radiation Model*) para obter o campo de radiação térmica nas superfícies. No controle do módulo de solução dos sistemas lineares foi usado um esquema para advecção de alta resolução com critério de convergência (RMS) igual a 0,0001 em todas as equações.

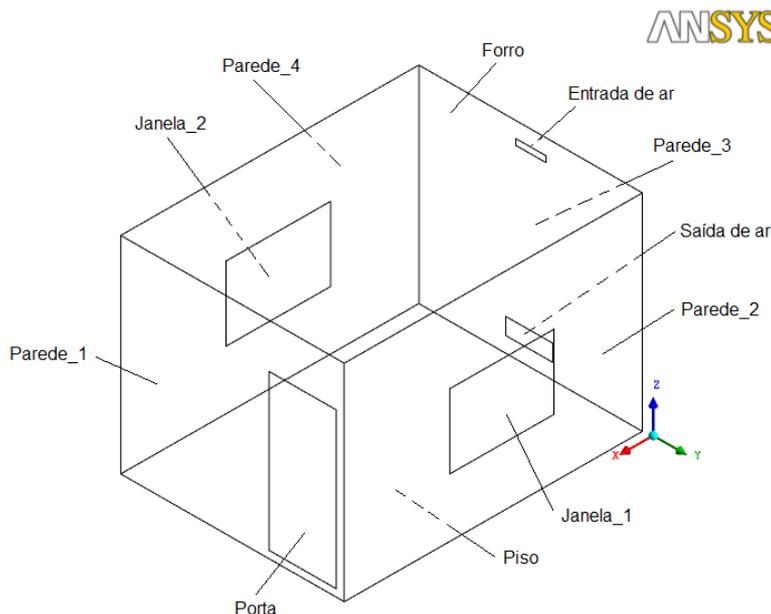


Figura 4 – Geometria para simulações em análises de conforto térmico.

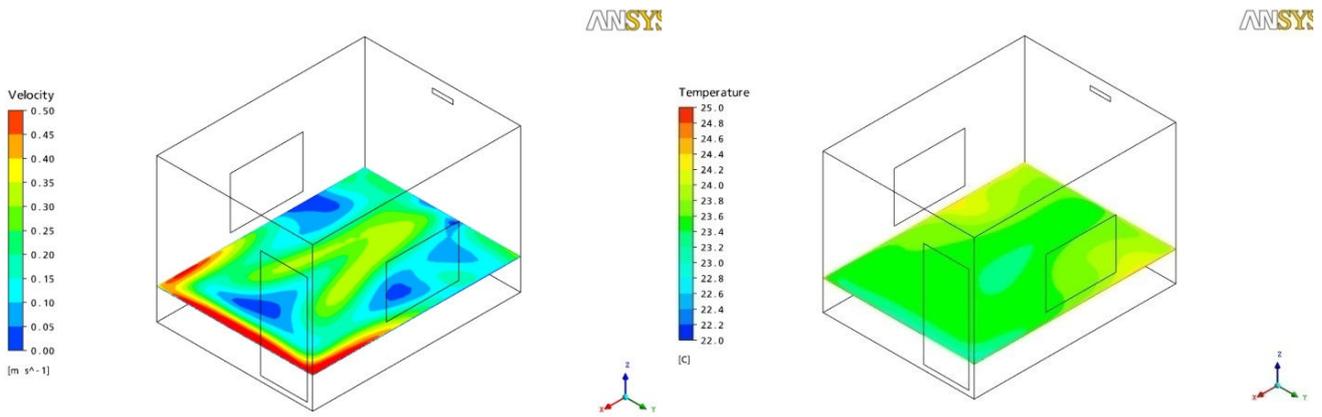
Para avaliação de conforto térmico três casos diferentes serão tratados: (1) temperatura radiante média próxima da temperatura do ar; (2) assimetria de temperatura radiante média entre o piso e forro; e (3) assimetria de temperatura radiante média entre paredes. A Tabela 3 apresenta as condições de contorno usadas em cada um desses casos.

Tabela 3 - Condições de contorno usadas nas simulações.

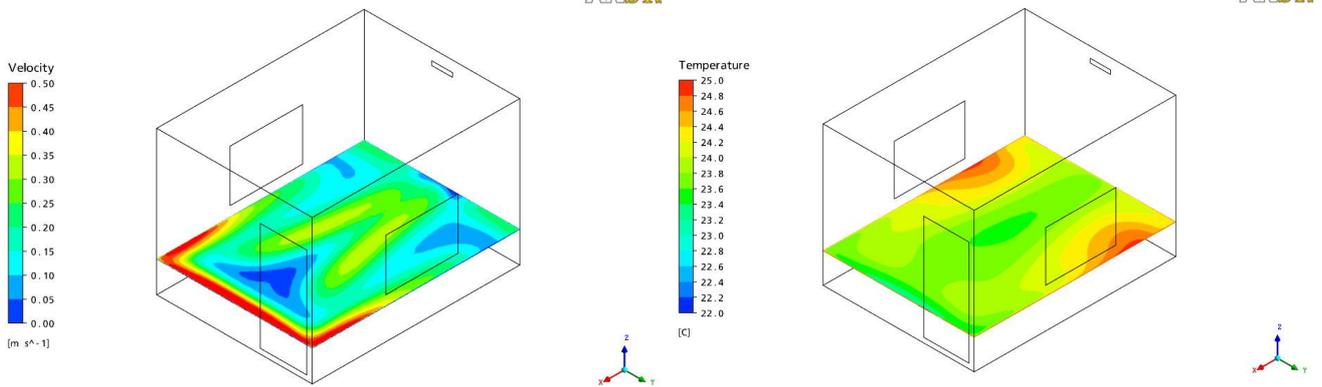
Parâmetro	Temperatura (°C)			Vazão de ar (kg/s)			Fluxo de calor (W/m ²)		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
Entrada de ar	20	20	20	0,175	0,175	0,175	-	-	-
Saída de ar	-	-	-	0,175	0,175	0,175	-	-	-
Piso	25	25	25	-	-	-	-	-	-
Forro	25	35	25	-	-	-	-	-	-
Janela 1	-	-	-	-	-	-	40	40	40
Janela 2	-	-	-	-	-	-	40	40	40
Parede 1	25	25	40	-	-	-	-	-	-
Parede 2	25	25	40	-	-	-	-	-	-
Parede 3	25	25	25	-	-	-	-	-	-
Parede 4	25	25	25	-	-	-	-	-	-
Porta	-	-	-	-	-	-	0	0	0

3. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

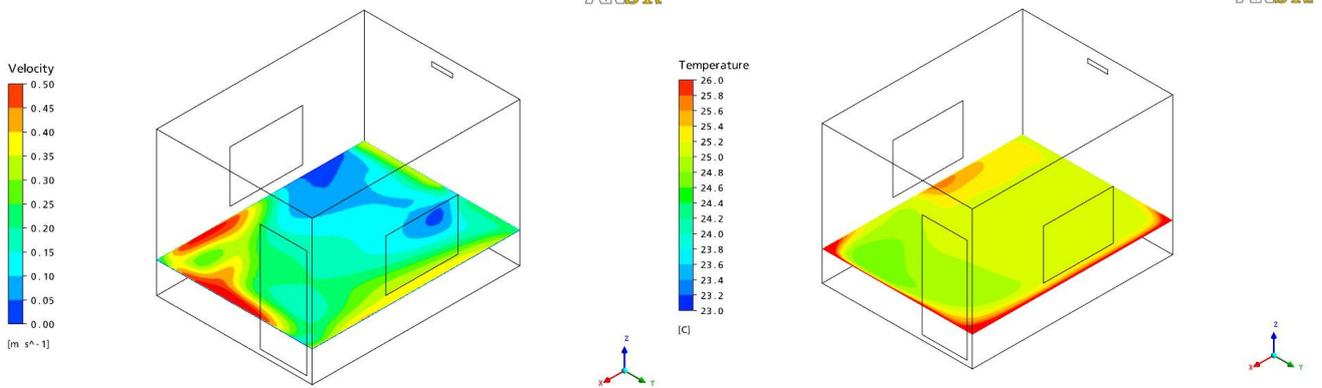
A Figura 5 apresenta os perfis de velocidade e de temperatura no plano horizontal localizado a 0,60 m do piso, pois, para a pessoa sentada os parâmetros usados para avaliação do conforto térmico devem ser os correspondentes a essa altura (ISO 7730, 2005). Além disso, como essa avaliação será feita para uma pessoa sentada e localizada no ponto central do piso, os parâmetros de conforto devem ser obtidos no ponto central desse plano. No caso (1), a temperatura média do ar é de 23,6 °C e no centro 23,4 °C; a velocidade relativa média do ar é de 0,24 m/s e no centro 0,25 m/s. No caso (2), os valores correspondentes de temperatura do ar são 23,9 °C e 23,5 °C e de velocidade relativa do ar são 0,24 m/s e 0,16 m/s. No caso (3), tem-se 25,3 °C e 25,0 °C e 0,24 m/s e 0,16 m/s.



Caso (1): Temperatura radiante média próxima da temperatura do ar



Caso (2): Assimetria de temperatura radiante média entre o piso e forro.



Caso (3): Assimetria de temperatura radiante média entre paredes.

Figura 5 – Perfis de velocidade relativa e temperatura do ar a 0,60m do piso.

Dos resultados de simulação são obtidas as temperaturas radiantes médias das superfícies que limitam o ambiente em questão, e também os fatores de forma entre a pessoa sentada numa cadeira posicionada no ponto central do piso e todas as superfícies do ambiente através da Figura 1. Como as diferenças essas temperaturas são pequenas, a Equação (2) será usada para calcular a temperatura radiante média do ambiente. Esses valores estão relacionados na Tabela 4.

As temperaturas e velocidades relativas do ar e as temperaturas radiante média foram obtidas dos resultados de simulações. Para calcular os índices de conforto PMV-PPD (*Fanger*, 1972; ISO 7730, 2005) necessita-se ainda de mais um fator ambiental (umidade relativa) e dois fatores pessoais (taxa metabólica e resistência térmica da vestimenta). As umidades relativas não podem ser obtidas desses resultados; por isso, nessas avaliações, serão adotados valores dentro da faixa adequada ao conforto: 40 a 60%. Em todos os casos admite-se uma pessoa ocupando o ponto central do piso, sentada, realizando tarefas relacionadas ao trabalho de digitar e vestida com roupas típicas de verão. Nesse caso, da Tabela 1 a taxa metabólica é 1,1 met (65 W/m²) e da Equação (1) com a Tabela 2 a resistência térmica da roupa será 0,5 clo.

Tabela 4 – Valores de temperaturas superficiais e fatores de forma.

SUPERFÍCIE	T_n (°C)			F_{p-n}
	Caso (1)	Caso (2)	Caso (3)	
Parede_1	25,0	25,2	38,7	0,0170
Parede_2	25,1	25,3	39,1	0,1636
Parede_3	24,9	25,1	25,2	0,0250
Parede_4	25,1	25,3	25,4	0,1636
Janela_1	27,6	28,9	32,2	0,0234
Janela_2	27,9	29,2	32,0	0,0234
Piso	25,0	25,0	25,4	0,3280
Forro	25,0	34,5	25,4	0,2480
Porta	24,1	25,0	30,6	0,0080
T_m (ambiente)	25,1	27,6	28,2	1,00

Utiliza-se o programa ASHRAE *Thermal Comfort* V. 1.0 para calcular os índices PMV-PPD nas situações anteriormente descritas, com os seguintes dados:

PARÂMETROS	Caso (1)	Caso (2)	Caso (3)
Temperatura do ar (°C)	23,4	23,5	25,0
Velocidade relativa do ar (m/s)	0,25	0,16	0,16
Temperatura radiante média (°C)	25,1	27,6	28,2
Umidade relativa (%)	50	50	50
Taxa metabólica (met)	1,1	1,1	1,1
Resistência térmica da roupa (clo)	0,5	0,5	0,5
PMV	-0,89	-0,23	0,16
PPD (%)	22	6	6

No caso (1), o PMV de -0,89 e PPD de 22 % indicam um ambiente levemente frio e um pouco desconfortável. Nos casos (2) e (3) temos as mesmas porcentagens de insatisfeitos, 6 %; entretanto, no caso (2) o PMV igual a -0,23 indicam ambiente levemente frio e no caso (3) o PMV de 0,16 ambiente levemente quente.

Embora nas situações analisadas os ambientes apresentem níveis de conforto térmico compatíveis com as normas o desconforto local é outro aspecto que deve ser considerado. No caso (1) não há assimetrias de temperatura radiante e não ocorre desconforto localizado. Nos casos (2) e (3) essas assimetrias causarão desconforto. No caso (2), a assimetria de 10 K entre o piso e o forro fará com que 20 % dos ocupantes sintam desconforto local. No caso (3), a assimetria de 15 K causará 2,8 % de insatisfeitos. Verifica-se que as assimetrias de radiação térmica piso-forro provocam um desconforto local proporcionalmente mais acentuado do que a assimetria entre paredes.

4. CONCLUSÃO

Um programa computacional em CFD foi utilizado para avaliar o conforto térmico em um ambiente condicionado com a presença de assimetrias de radiação térmica piso-forro e entre paredes. Dos resultados de simulação foram obtidos os campos de velocidade relativa e temperatura do ar no interior do ambiente. Com os recursos disponíveis no seu módulo de análise de resultados as temperaturas radiantes médias das superfícies que o limitam foram calculadas. Com os fatores de forma obtidos para uma pessoa sentada no ponto central do piso calcularam-se as temperaturas radiantes médias as quais essa pessoa estava submetida. Admitindo umidade relativa de 50%, já que os resultados de simulação não fornecem os valores desse parâmetro, as condições do ambiente térmico foram avaliadas em três casos diferentes. Da análise e comparação desses resultados verifica-se que embora os ambientes térmicos não apresentassem desconforto térmico, o desconforto local é mais acentuado onde existem assimetrias de radiação térmica piso-forro do que para assimetrias existentes entre paredes.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) por financiar, durante o ano de 2008, este estágio através de bolsa de Pós-Doutorado Sênior (PDS).

Ao Prof. Clóvis R. Maliska, pelo compromisso de ser o professor responsável por este estágio de pós-doutorado.

6. REFERÊNCIAS

ASHRAE. **Handbook of fundamentals**. Atlanta-GA, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2005.

- ASHRAE. **Thermal environmental conditions for human occupancy: ANSI/ASHRAE Standard 55**. Atlanta-GA, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2004.
- ABNT/NBR-16401-2:2008. Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários Parte 2: Parâmetros de conforto térmico.
- FANGER, P. O. **Thermal comfort: analysis and in environmental engineering**. New York, McGraw-Hill, 1972.
- ISO 7730. **Ergonomics of the thermal environment - analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**. Geneva, 2005.
- LAMBERTS, R. et al. **Desempenho térmico de edificações**. Florianópolis, LABEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2000.
- MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. Rio de Janeiro, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1995.
- McQUISTON, F.C. ; SPITLER, P.E. **Cooling and heating load calculation manual**. Atlanta-GA, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1994. 2 ed.
- ZHAI, Z., ZHANG, Z., ZHANG, W., and CHEN, Q. 2007. "Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: Part-1: summary of prevent turbulence models," *HVAC&R Research*, 13(6).
- ZHAI, Z., ZHANG, Z., ZHANG, W., and CHEN, Q. 2007. "Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: Part-2: comparison with experimental data from literature," *HVAC&R Research*, 13(6).

USE OF CFD FOR EVALUATION OF THERMAL COMFORT AT CONDITIONED SPACE IN THE PRESENCE OF THERMAL RADIATION ASYMMETRIES

Jorge E. Corrêa¹, jecorrea@ufpa.br
Clóvis R. Maliska², maliska@sinmec.ufsc.br

¹Federal University of Pará, Technology Institute, LABCLIMA

²Federal University of Santa Catarina, SINMEC

Abstract: *In this paper, a thermal comfort evaluation is performed for an environment conditioned with the help of CFD (Computational Fluid Dynamics), where it was used the ANSYS Workbench Release 11.0 to build the geometry, the mesh, to solve the linear equations systems corresponding to the velocity and air temperature fields, and to view the results. The program ASHRAE Thermal Comfort V. 1.0 is used to evaluate the thermal comfort in three different cases: (1) mean radiant temperature close to air temperature, (2) mean radiant temperature asymmetry between floor and ceiling, and (3) mean radiant temperature asymmetry between walls. Results are compared and analyzed. It is verified that, although the thermal environments did not present thermal discomfort, the local discomfort observed was more pronounced for asymmetric thermal radiation between floor-ceiling than that between walls.*

Keywords: *CFD, Thermal comfort, Radiation asymmetries.*