

SISTEMA DE AR CONDICIONADO EM ÔNIBUS RODOVIÁRIO: ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO E DE CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO

Pedro Marques dos Santos Ventura
pedroventura01@gmail.com

Resumo. O desenvolvimento deste trabalho tem como objetivo o estudo do escoamento e das trocas de calor em cabine de ônibus rodoviário com ar condicionado e de avaliação numérica do conforto térmico neste tipo de veículo automotivo. Inicialmente, é apresentada uma breve introdução e as etapas necessárias para a simulação de ônibus rodoviário. Estas etapas compreendem a geração da geometria e das malhas do ônibus a partir de dimensões reais com a utilização dos programas Ansys/ICEM e Gambit; e o estabelecimento das condições de contorno e de convergência de simulação no programa CFD/Fluent. Para tal, foram realizadas medições em campo, com ônibus estacionado ao sol, para a determinação de condições de contorno e de temperaturas e velocidades no interior da cabine. Em seguida foi realizado estudo de independência de malha e comparação entre resultados experimentais e numéricos para verificação do processo de simulação realizado. Posteriormente, foram obtidos campos de temperaturas e de vetores velocidade. Então, foram realizadas simulações considerando condições diferenciadas de insuflamento do ar e a sua influência no escoamento na cabine. Finalmente, para a avaliação de conforto térmico foi utilizado método numérico baseado nas trocas de calor em manequim digital e técnica das temperaturas equivalentes. Resultados numéricos de temperaturas equivalentes são apresentados em diagramas de sensação térmica para verificação das condições de conforto térmico.

Palavras-chave. Ar condicionado, Conforto térmico, Sistemas de ventilação, CFD, Ônibus rodoviários.

1. Introdução

Os fluidos em movimento estão presentes em todos os lugares e suas características tem sido objeto de estudo, desde os tempos mais remotos, por meio de análises teóricas – em geral, insuficientes – e de métodos experimentais.

O desenvolvimento da ciência nas últimas décadas, aliado ao rápido desenvolvimento dos computadores, permite que problemas que antes não poderiam ser resolvidos possam ser resolvidos por processos de simulação computacional. Neste contexto, a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD – Computational Fluid Dynamics) permite estudar o comportamento de fluidos (campos de vetores velocidade, temperatura, transmissão de calor, transporte de massa, etc.) por meio de modelos matemáticos representativos das leis da física que modelam esses fenômenos.

A modelagem matemática do escoamento e das trocas de calor em ônibus rodoviários é bastante complexa. Para que o processo de simulação seja realizado corretamente, são necessários dados experimentais confiáveis, que são utilizados como condições de contorno para a simulação e como comparação entre os dados gerados e os medidos.

A simulação numérica se tornou uma ferramenta extremamente útil no que diz respeito a problemas que envolvem o comportamento de escoamento de fluidos. Além de diminuir o tempo gasto com problemas complexos, é possível modificar as características do sistema, para o caso de, por exemplo, haver alteração das condições de contorno, de forma prática e eficiente.

Com relação ao conforto térmico, até o momento, muito pouco tem sido feito para melhorar as condições em ônibus rodoviários. Esta questão tem sido relegada a um segundo plano, devido à falta de interesse das empresas de transporte rodoviário e da sociedade como um todo.

2. Aspectos Gerais da Simulação Computacional

2.1 Construção das Geometrias

Para a realização das simulações numéricas, o primeiro passo é a construção de uma geometria que reproduza os elementos do ambiente real (poltronas, insuflamento, janelas, paredes, etc.). O ônibus estudado possui 19 poltronas (38 assentos), com dimensões internas de 11,73 m de comprimento, 2,44 m de largura e 1,90 m de altura e 21,35 m² de área envidraçada.

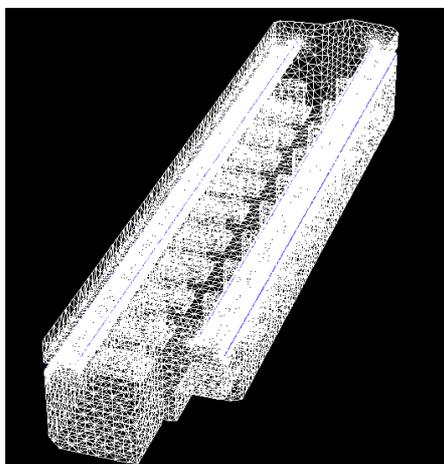
2.2 Geração das Malhas

Foram geradas quatro malhas (A, B, C e D), modificando apenas o grau de refinamento (número de elementos), sem alterações na estrutura da malha (Tab. (1)). Um exemplo de malha é apresentado na Fig. (1).

Tabela (1) – Número de elementos das malhas geradas

Malha A	220000
Malha B	373000
Malha C	532000
Malha D	915000

Figura (1) – Malha do ônibus



2.3 Condições de Contorno

Antes de entrar com as condições de contorno no programa CFD/Fluent, é necessário definir o tipo de cada superfície da geometria do ônibus nos programas de geração de malha, Ansys/ICEM ou Gambit. Os tipos de superfícies utilizadas são apresentados na Tab. (2).

Tabela (2) - Superfícies e tipos

Superfície	Tipo
Difusores	velocity-inlet
Grelha de retorno	outlet-vent
Demais superfícies	wall

Em seguida foram definidos os parâmetros das condições de contorno (Tab. (3)), considerando condições de regime permanente:

- Temperaturas superficiais na envoltória interna do ônibus (piso, teto, paredes laterais e vidros) e nas poltronas e dutos de insuflamento de ar.
- Temperatura e velocidade do ar insuflado na cabine, para os difusores;
- Temperatura do ar de exaustão, para as grelhas de retorno;
- Radiação solar externa.

Tabela (3) – Condições de contorno do ônibus rodoviário

Superfície	Temperatura (°C)	Velocidade (m/s)	Radiação (W/m ²)
Inlet direito superior	17,7	1,09	-
Inlet esquerdo superior	18,3	0,87	-
Inlet direito inferior	19,3	2,90	-
Inlet esquerdo inferior	19,3	2,47	-
Outlet	22,0	-	-
Dutos	19,0	-	-
Paredes laterais	28,0	-	-
Vidros	32,0	-	-
Teto	34,9	-	-
Piso	24,5	-	-
Poltronas	25,2	-	-
Radiação Externa	-	-	850

Os valores numéricos foram obtidos a partir de medições no ônibus rodoviário estacionado no sol (com condição externa de radiação de aproximadamente 850 W/m² durante as medições), apresentados na Tab. (3). Efeitos de radiação solar foram considerados na continuidade do trabalho. Considerando que o processo de simulação prevê condições em regime permanente, mas as trocas de calor no ônibus ocorrem em regime transiente (função de alteração nas condições externas, principalmente da radiação solar), foi necessário realizar o processo de medição ao longo do tempo (algumas horas) e utilizar valores médios.

Para medir as temperaturas do ar foram utilizados termômetros de resistência PT100 com precisão da ordem de +/- 0,2°C. Para medir temperaturas superficiais foi utilizado termômetro infravermelho, que possui resolução de 0,2°C a 275°C, com precisão de +/- 0,1°C. Para medir velocidades do ar foram utilizados anemômetros omnidirecionais com faixa de medição de 0 a 1 m/s e precisão de +/- (0,04 + 3% da velocidade de fundo de escala) m/s. Para determinar a radiação solar total incidente foi utilizado piranômetro, faixa de medição de 0 a 1500 W/m², precisão de +/- 10 W/m².

2.4 Simulação e Critérios de Convergência

Uma vez determinadas a geometria, a malha e as condições de contorno, foram iniciadas as simulações no programa CFD/Fluent. As discretizações adotadas para as simulações iniciais foram: discretização padrão para a pressão e de primeira ordem para a densidade, para a energia cinética turbulenta, para a taxa de dissipação turbulenta e para a energia. O modelo de turbulência adotado nas simulações foi o $k - \epsilon$ padrão. Para verificação da convergência da simulação foi utilizado o método de monitorar os resíduos até alcançarem um valor menor que o valor absoluto estipulado. Foram estabelecidos valores absolutos residuais para as variáveis apresentadas na Tab. (4).

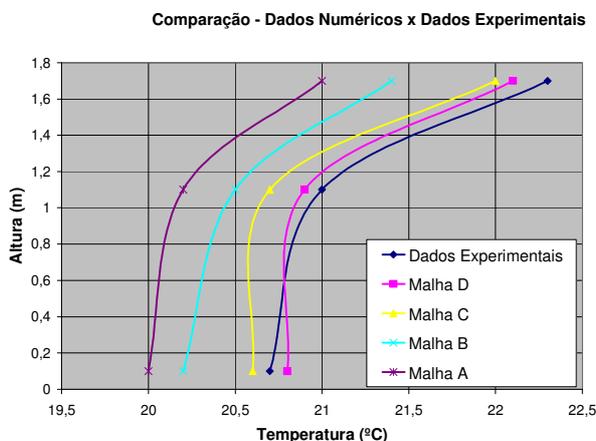
Tabela (4) – Valores residuais para verificação da convergência

Equação	Resíduo absoluto
Continuidade	0,001
Velocidade em x, y e z	0,001
Energia	0,000001
k e ϵ	0,001

3. Resultados experimentais e de simulação

Durante o processo de medições foram levantados valores de temperatura em uma seção central do ônibus para comparação com resultados de simulação. Na Fig. (6) estes valores são apresentados juntamente com aqueles obtidos nas simulações utilizando malhas A, B, C e D. Os pontos escolhidos para comparação se situam na seção central do ônibus nas alturas 0.1m e 1.1m acima do piso (também foi utilizado um ponto localizado a 1,7 m acima do piso apenas como fator comparativo), conforme recomendado nas normas ISO 7730 (1994) e ASHRAE 55 (2004). Verifica-se nos resultados apresentados na Fig. (2) que a malha D é a que se aproxima melhor dos dados experimentais, o que era esperado, por ser a mais refinada. No item a seguir, são apresentados os campos de velocidades e de temperaturas obtidos nas simulações realizadas (para a malha D); que são de fundamental importância no estabelecimento de condições de conforto térmico em ambientes interiores.

Figura (2) – Comparação entre resultados de simulação e dados experimentais

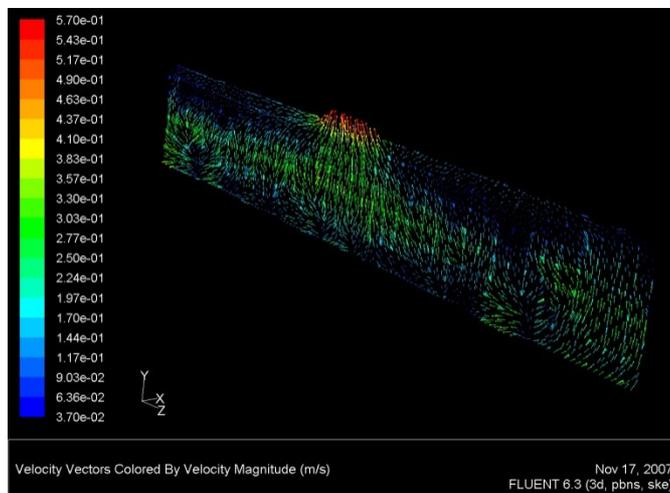


3.1 Vetores Velocidade

Para uma análise mais cuidadosa da região de interesse de estudo, são apresentados os campos de velocidade obtidos com a malha escolhida no item anterior (malha D), em um plano longitudinal passando pelo centro do ônibus

(Fig. (3)). As regiões que apresentam maiores valores de velocidade são aquelas mais próximas do difusor (inlet) e do retorno (outlet), uma vez que, nas regiões de insuflamento e retorno do ar ocorrem velocidades maiores do que as encontradas no restante da cabine. A ocorrência de regiões com maiores velocidades é nítida na Fig. (3), que apresenta o campo de velocidades na região próxima ao retorno realizado na parte central superior do ônibus..

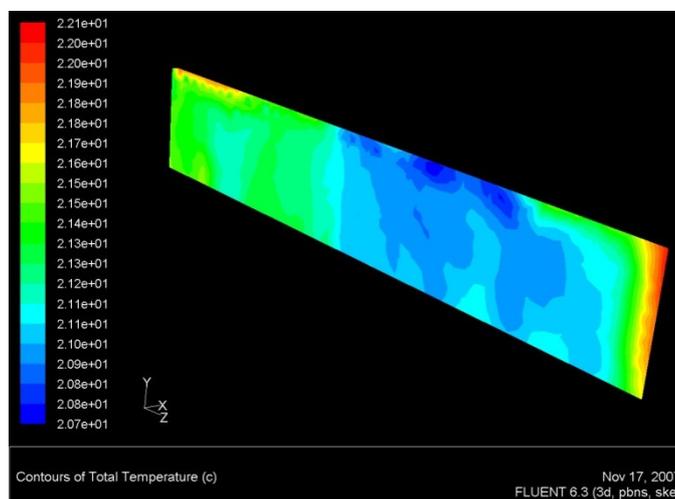
Figura (3) – Vetores velocidade no plano longitudinal passando pelo centro do ônibus



3.2 Campos de Temperatura

Analogamente aos vetores velocidade, é apresentado o campo de temperaturas em um plano longitudinal passando pelo centro do ônibus (Fig. (4)). Ao analisar a Fig. (4), é possível verificar que a cabine possui um campo de temperaturas que se encontra em uma faixa de 20,6 °C a 21,9 °C (próximo das poltronas). Valores maiores são encontrados em regiões mais afastadas do difusor (insuflamento) e do retorno.

Figura (4) – Campo de temperaturas no plano longitudinal passando pelo centro do ônibus



4. Estudo de Insuflamento Diferenciado

Neste item são apresentados resultados de modificações no retorno e no insuflamento de ar para análise da distribuição do ar na cabine. As condições de contorno foram mantidas as mesmas para possibilitar análise comparativa de resultados. Foram realizados três estudos, o primeiro (Estudo A) com modificação somente no retorno de ar da cabine (Fig. (5)), mantendo o insuflamento superior lateral, o segundo (Estudo B) com modificação somente no insuflamento, que era realizado na parte superior da cabine para a parte inferior desta (Fig. (6)), e o terceiro (Estudo C) que une os dois sistemas, ou seja, com modificação tanto no retorno quanto no insuflamento.

Figura (5) – Vista geral da cabine com a antiga e a nova localização do retorno (Estudo A)

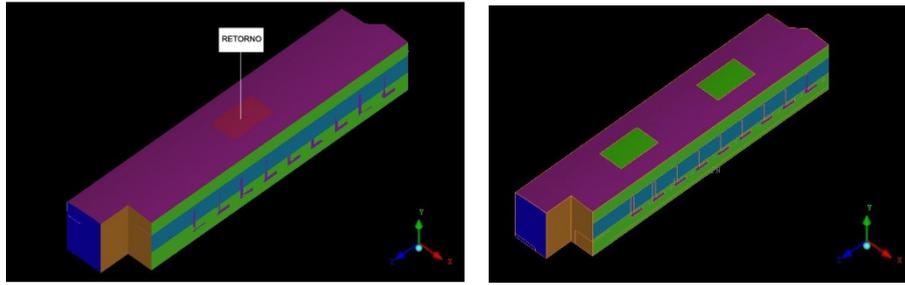
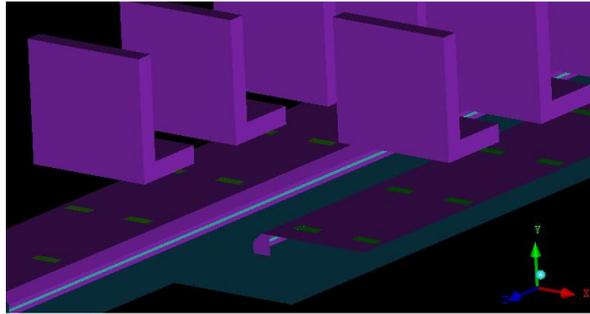


Figura (6) – Dutos de ventilação, *inlet's* e poltronas (Estudo B)



- Resultados do Estudo C

A título de exemplificação, nas Figs. (7) e (8) são apresentados, respectivamente, resultados de vetores velocidades e do campo de temperaturas em um plano longitudinal passando pelo centro do ônibus.

Figura (7) – Vetores velocidade Estudo C

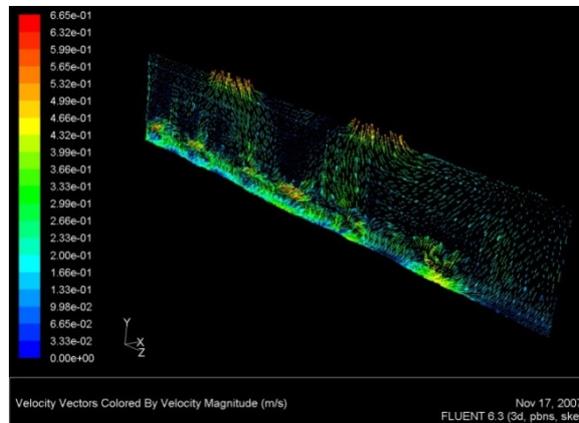
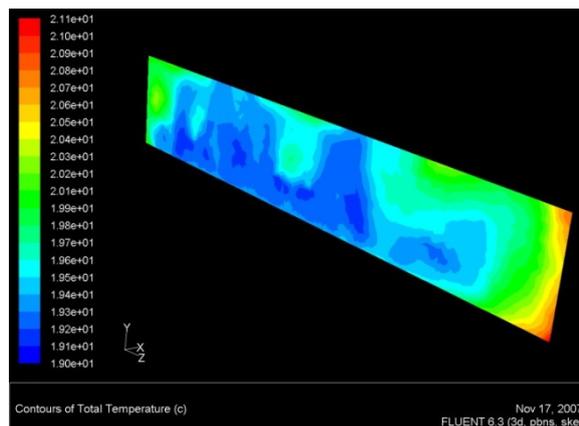


Figura (8) – Campo de temperaturas Estudo C



5. Análise dos Resultados do Insuflamento Diferenciado

Como já foi dito anteriormente, este estudo foi realizado mantendo-se as condições de contorno e de insuflamento (temperatura e velocidade), modificando-se apenas a geometria do sistema de distribuição de ar da cabine. Com relação ao estudo C, observa-se que, com a união dos dois sistemas, referentes aos estudos A e B, o campo de velocidade se tornou mais homogêneo quando comparado ao sistema de distribuição de ar comum de um ônibus rodoviário. As temperaturas da cabine também são mais baixas quando comparadas ao sistema comum de distribuição de ar, podendo o ar ser insuflado a uma maior temperatura (contribuindo com os custos para o condicionamento da cabine).

6. Análise de condições de conforto térmico

Um critério para a avaliação térmica de ambientes é a utilização de manequins térmicos e o método de temperaturas equivalentes (Wyon et al., 1989 e Holmer et al., 1995), definida como sendo a temperatura uniforme de um ambiente imaginário, sem movimentação de ar, onde uma pessoa trocava a mesma quantidade de calor sensível por radiação e por convecção que no ambiente real. Utilizando este critério, Nilsson (2004), desenvolveu método numérico de avaliação de conforto térmico utilizando manequim digital dividido em dezoito segmentos, para os quais foram definidas temperaturas ótimas e tolerâncias para ambientes em duas situações: inverno e verão. No desenvolver do presente trabalho foram utilizados apenas dados experimentais de verão (com radiação solar da ordem de 850 W/m²). Portanto, os resultados de temperaturas equivalentes obtidos no presente trabalho serão comparados com resultados de diagrama de sensação térmica para a condição de verão (Nilsson, 2004).

6.1 Metodologia utilizada no estudo

Para a avaliação de conforto térmico pelo método das temperaturas equivalentes, um manequim real deve ser calibrado em uma câmara climática com velocidades de escoamento do ar próximas de zero e com a mesma temperatura do ar e das paredes da câmara. Fazendo isso, a temperatura do ar e das paredes será a temperatura equivalente (tipicamente igual a 25°C para a condição de verão). Os coeficientes de troca de calor de calibração de cada segmento podem então ser determinados pela Eq.(1).

$$h_{cal} = \frac{q}{t_s - t_{eq}} \quad (1)$$

onde, h_{cal} é o coeficiente de troca de calor de calibração [W/m².°C], t_{eq} é a temperatura equivalente (25°C) [°C], t_s é a temperatura superficial do segmento [°C] e q é o fluxo de calor do segmento do manequim [W/m²].

Os coeficientes de troca de calor de calibração (h_{cal}) para cada segmento do manequim numérico são calculados tendo-se em mãos os valores de fluxo de calor (q) para cada segmento do manequim, os valores das temperaturas superficiais dos segmentos do manequim (t_s – usualmente, 34°C) e o valor de temperatura equivalente do ambiente (t_{eq} - que, para a condição de verão, é igual a 25°C). Com os coeficientes de troca de calor de calibração determinados, pode-se calcular a temperatura equivalente dos segmentos do manequim no ambiente da cabine do ônibus, usando-se a mesma equação, mas com diferentes dados de entrada. Para o cálculo da temperatura equivalente do ambiente estudado, entra-se com o fluxo de calor de cada segmento do manequim (para este ambiente), as temperaturas superficiais de cada segmento do manequim (fixadas em 34°C, ou seja, mesmo valor da calibração) e os coeficientes de troca de calor de calibração de cada segmento encontrados anteriormente.

6.2 Calibração do manequim numérico

Para a calibração do manequim numérico, foi criada uma sala cúbica com dois metros de lado (2x2x2 m). O manequim numérico foi posicionado no centro de um “tapete” (0,7x0,95 m), o qual é posicionado a 0,5 m da parede de trás e com a mesma distância das paredes laterais (Fig. (9)). O insuflamento é feito pelo piso (exceto pelo tapete) e o retorno do escoamento é feito pelo teto. A partir da geometria, foi gerada uma malha de aproximadamente 230.000 elementos, apresentada na Fig. (10). O modelo de turbulência adotado continua sendo o k-ε padrão. O material fixado para todas as superfícies do manequim é o algodão, com densidade de 80 kg/m³, calor específico de 1300 J/kg.K, condutividade térmica de 0,06 W/m.K.

6.3 Simulação da seção da cabine do ônibus rodoviário

Para a simulação da cabine do ônibus rodoviário com o manequim foi utilizada apenas uma seção da cabine (Fig. (12)) devido ao grande número de elementos de cada manequim. Caso fosse utilizada a cabine de forma integral, a malha resultante teria mais de dois milhões de elementos, o que tornaria o processamento da simulação inviável para as condições de processamento disponíveis. A partir da geometria, foi gerada uma malha de aproximadamente 500.000 elementos, apresentada na Fig. (13).

Figura (9) – Sala experimental de calibração do manequim térmico

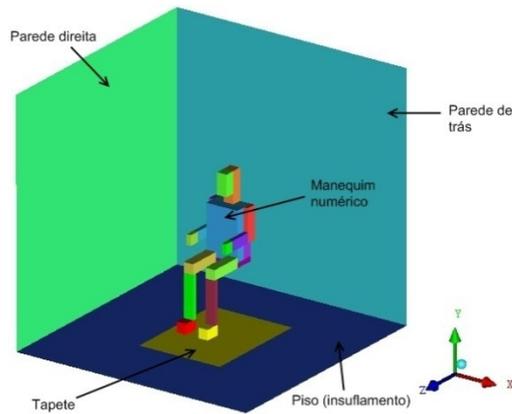


Figura (10) – Malha da sala de calibração do manequim numérico

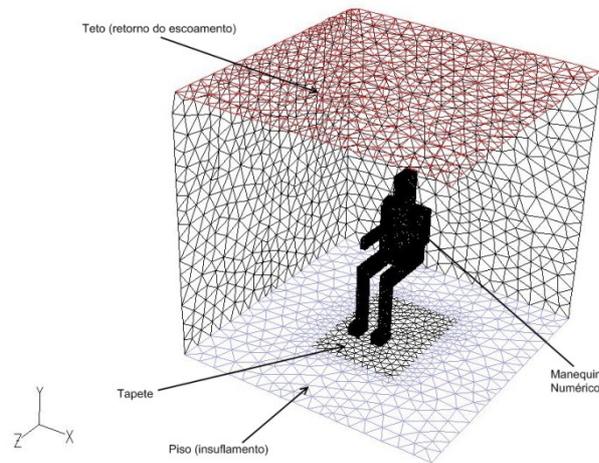
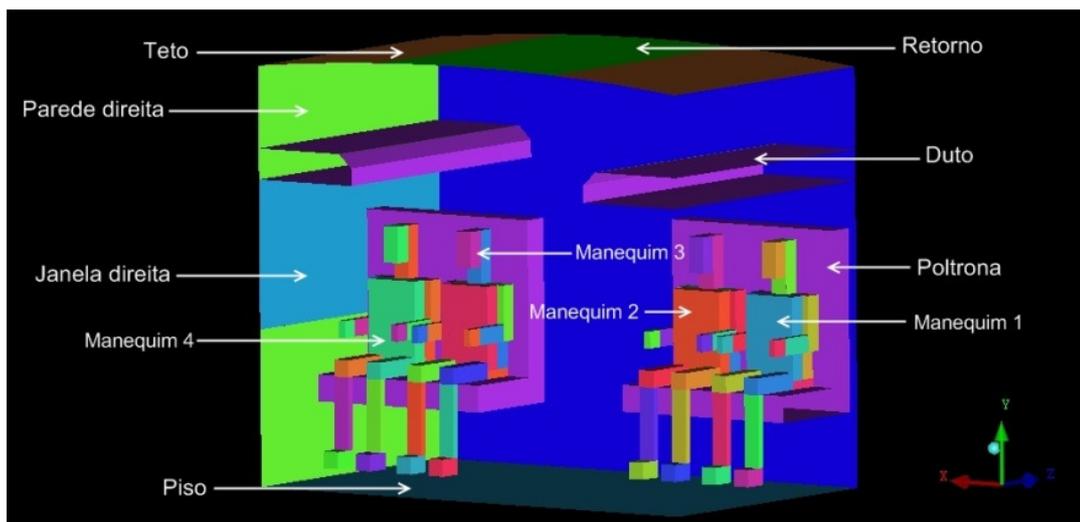
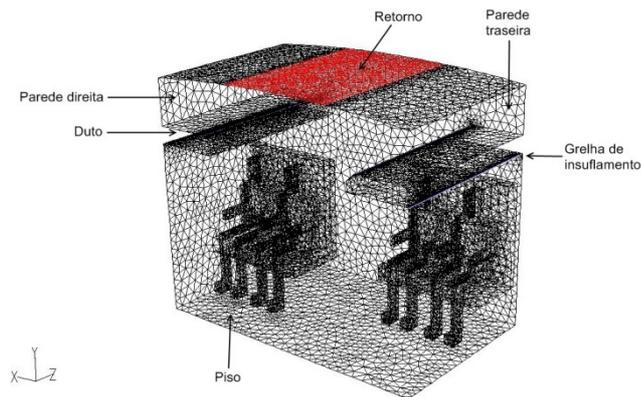


Figura (12) – Geometria da seção da cabine do ônibus rodoviário



Para a simulação da malha gerada, foram utilizadas as condições de contorno apresentadas na Tab. (3). O modelo de turbulência adotado continua sendo k-ε padrão. As superfícies seccionais (frontal e traseira) não participam na radiação solar e foi fixado um valor de 25°C (valor aproximado da temperatura da região onde elas foram criadas na cabine integral).

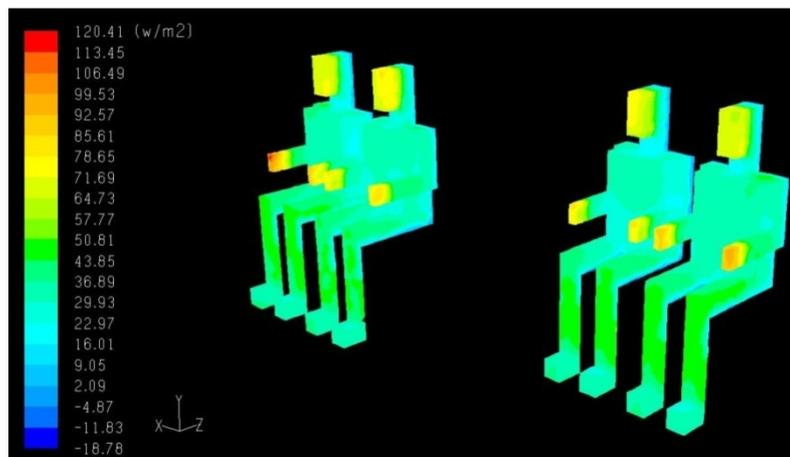
Figura (13) – Malha da seção da cabine do ônibus rodoviário



6.4 Resultados da simulação da seção da cabine do ônibus rodoviário

Com as condições de contorno apresentadas no item anterior, foi realizada a simulação da malha e os resultados dos fluxos de calor nos manequins são apresentados na Fig. (14).

Figura (14) – Fluxo de calor dos segmentos dos manequins



6.5 Diagramas de Conforto Térmico

Para a geração dos diagramas de conforto térmico de cada manequim foi utilizada a metodologia explicitada no item 6.1 deste estudo. Os valores de entrada de fluxo de calor foram obtidos das simulações realizadas, utilizando, para cada segmento do manequim, a média ponderada na área dos fluxos de calor. A partir desses dados, foram obtidos os coeficientes globais de troca de calor para os segmentos dos manequins e, conseqüentemente, as temperaturas equivalentes de cada segmento dos manequins, apresentados na Tab. (5), para os manequins 1, 2, 3 e 4 (Fig. (14)).

A título de ilustração, os resultados de temperatura equivalente dos manequins 1 e 2 foram plotados nos diagramas de sensação térmica e são apresentados nas Figs. (15) e (16), respectivamente.

Tabela (5) – Resultados de temperaturas equivalentes dos manequins digitais

Segmento do manequim	Coefficiente de troca de calor de calibração (W/m²K)	Temperatura equivalente (°C) Manequim 1	Temperatura equivalente (°C) Manequim 2	Temperatura equivalente (°C) Manequim 3	Temperatura equivalente (°C) Manequim 4
Braço direito (inf.)	3,3671	24,2	23,5	24,7	22,3
Braço direito (sup.)	3,3687	26,2	23,7	26,9	25,0
Braço esquerdo (inf.)	3,3494	21,9	25,2	23,2	23,8
Braço esquerdo (sup.)	3,1875	24,4	26,2	24,3	25,5
Costas (inf.)	2,9009	25,1	25,7	25,8	24,8
Costas (sup.)	3,4898	23,2	25,7	22,5	22,2
Perna direita	4,3469	23,5	23,6	23,9	23,9
Perna esquerda	4,3390	23,5	23,3	24,0	23,8
Peito	2,2928	19,9	21,2	20,8	19,9
Face	4,4022	18,5	19,0	18,1	18,4
Pé direito	3,5328	24,1	24,0	24,0	24,2
Pé esquerdo	3,3247	24,2	24,1	24,2	24,1
Mão direita	6,6912	22,4	23,2	23,4	20,5
Mão esquerda	6,8978	21,2	23,8	23,4	22,1
Cabeça	2,1656	22,5	24,1	21,7	22,8
Assento	4,1150	27,0	26,8	26,1	26,2
Coxa direita	3,6465	23,6	24,5	23,9	23,4
Coxa esquerda	3,7019	23,4	23,9	24,4	23,2

Figura (15) – Diagrama de sensação térmica – Manequim 1

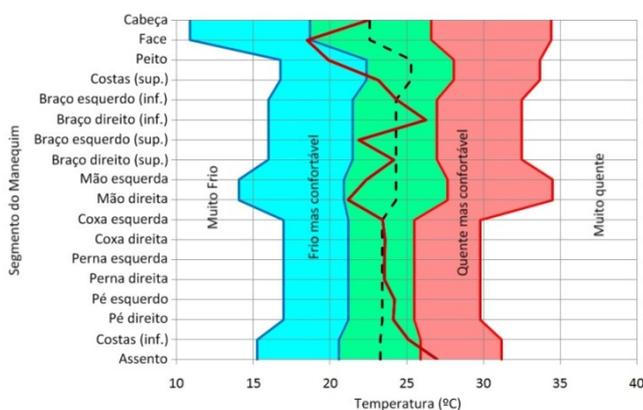
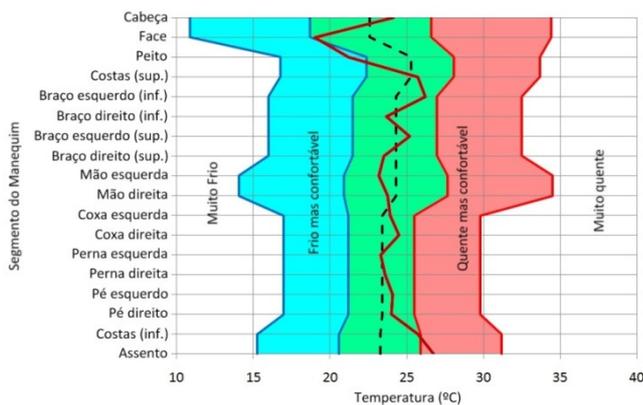


Figura (16) – Diagrama de sensação – Manequim 2



6.6. Análise dos Resultados de Conforto Térmico

Nas condições analisadas verificou-se a ocorrência de condições de conforto térmico, com leve sensação de frio na face e leve sensação de calor no assento. Infelizmente, este não é o resultado que se verifica na maioria das situações em ônibus rodoviário. O presente resultado é função dos valores experimentais, utilizados nas condições de contorno na simulação, terem sido obtidos em condições de temperaturas externas amenas.

Por outro lado, a utilização de manequins térmicos e digitais e o método de temperaturas equivalentes mostraram ser importantes e poderosas ferramentas na avaliação de conforto térmico em veículos automotivos, como os ônibus rodoviários.

7. Referências

- ASHRAE 55 (2004). **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, New York.
- CONCEICAO, E.Z.E., SILVA, M. C. G., VIEGAS, D. X. (1998). Airflow around a passenger seated in a bus. **ASHRAE Transactions**, v.104, n. Pt. 1A, p.628.
- HOLMER, I.; NILSSON, H.; BOHM, M.; NOREN, O. (1995). Thermal aspects of vehicle comfort. Proc. 3rd Int. Conf. on Vehicle Comfort. Bolonha, ed Associazione Tecnica dell'Automobile (ATA). ATA Paper 91A1048.
- ISO 7730 (1994). **Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions of thermal comfort**. - International Organization for Standardization, Geneva.
- LEBBIN, P. A.; HOSNI, M. H. (2005). Automobile climate measurements using two thermal observation manikins. Digital Human Modeling for Design and Engineering Symposium, Iowa City, Iowa. 14-16, Junho, 2005. **SAE Technical Paper Series** no 2005-01-2732.
- NILSSON, H. O. (2004). Comfort Climate Evaluations with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models. PhD Thesis of the Department for Work and Health, National Institute for Working Life. Estocolmo. ISBN 91-7045-703-4.
- RUGH, J. P., BHARATHAN D. (2005). Predicting human thermal comfort in automobiles. Vehicle Thermal Management Systems Conference and Exhibition. Toronto, Canada. **SAE Technical Paper Series** 2005-01-2008.
- WYON, D. P.; LARSSON, S.; FORSFREN, B.; LUNDGREN, I. (1989). Standard procedures for assessing vehicle climate with a thermal manikin. SAE Paper 890049 (reprinted from Subzero Engineering Conditions Conf. Proc. (Rovaniemi, Finland, Jan., 1989, paper P-220).

AIR CONDITIONING SYSTEM IN ROAD BUSES: NUMERICAL STUDY OF AIR FLOW AND THERMAL COMFORT CONDITIONS.

Pedro Marques dos Santos Ventura

pedroventura01@gmail.com

Abstract . The development of this work has as an objective the study of the air flow and the heat exchange in a road bus cabin with air conditioning and the numeric evaluation of thermal comfort in this kind of automotive vehicle. At start, it is presented a brief introduction and the necessary steps to simulate the road bus. These steps comprehend the generation of the geometry and meshes of the bus from real lengths using the softwares Ansys/ICEM and Gambit; and the establishment of the boundary and convergence conditions in order perform the simulation in the software CFD/Fluent. To do so, took place some field measurements, with the bus parked at the sun, to determine the boundary conditions and the temperature and velocities in the cabin. Next, it was done the mesh independency study and comparison between the experimental and numerical data to verify the performed simulation process. Afterwards, were obtained the temperature contours and the velocity vectors. Then, simulations were done considering different conditions of injecting the air and its influence on the air flow inside the cabin. Finally, to evaluate thermal comfort, was used the numeric method based in the heat exchanges of a digital manikin and the equivalent temperatures method. Numeric results of the equivalent temperatures are shown in thermal sensation diagrams to verify the thermal comfort conditions.

Keywords: Air conditioning, Thermal comfort, Ventilation Systems, CFD, Road buses.