UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

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

Pedro Marques dos Santos Ventura

São Paulo
2008

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

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

Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Graduação em Engenharia

Pedro Marques dos Santos Ventura
Orientador: Arlindo Tribess

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Ventura, Pedro Marques dos Santos

Sistema de ar condicionado em ônibus rodoviário: estudo numérico do escoamento e de condições de conforto térmico / P.M.S. Ventura. – São Paulo, 2008.

67 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Ônibus 2.Ar condicionado 3.Conforto veicular I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

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, são apresentadas uma breve introdução e a revisão bibliográfica. Em seguida, as etapas necessárias para a simulação de ônibus rodoviário são apresentadas e detalhadas. 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, inicialmente 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.

ABSTRACT

The development of this work has 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 technique. Numeric results of the equivalent temperatures are shown in thermal sensation diagrams to verify the thermal comfort conditions.

Key words: Air conditioning, Thermal comfort, Venting systems, CFD, Road buses.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo apoio dado ao longo de minha vida acadêmica, aos meus colegas de turma, a todos os integrantes do Laboratório de Conforto Térmico, ao meu orientador e líder do Laboratório de Conforto Térmico, Professor Doutor Arlindo Tribess, a Empresa Viação Andorinha, que disponibilizou, em várias ocasiões, ônibus rodoviários para a obtenção dos dados experimentais e a todos aqueles que estiveram envolvidos em meu crescimento como engenheiro e, acima de tudo, como pessoa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Vista geral do ônibus 7
Figura 4.2 - Vista de localização do retorno de ar centralizado na cabine..... 8
Figura 4.3 – Dutos de ventilação com filete “INLET” indicado..... 9
Figura 4.4 – Malha do ônibus 10
Figura 4.5 – Malha mostrando poltronas, dutos e inlet’s..... 11
Figura 4.6 – Malha dos dutos, inlet e retorno 11
Figura 4.7 – Duto e inlet’s detalhados 12
Figura 4.8 – Monitoramento dos resíduos. Malha D – aprox. 1500 iterações 16
Figura 4.9 – Monitoramento dos resíduos. Malha C – aprox. 500 iterações 16
Figura 4.10 – Monitoramento dos resíduos. Malha B – aprox. 470 iterações 17
Figura 4.11 – Monitoramento dos resíduos. Malha A – aprox. 325 iterações 17
Figura 5.1 – Comparação entre resultados de simulação e dados experimentais 18
Figura 5.2 – Vetores velocidade no insuflamento..... 20
Figura 5.3 - Vetores velocidade no retorno..... 20
Figura 5.4 – Vetores velocidade no plano longitudinal passando pelo centro do ônibus 21
Figura 5.5 – Campo de temperaturas no insuflamento 22
Figura 5.6 – Campo de temperaturas no retorno..... 22
Figura 5.7 – Campo de temperaturas no plano longitudinal passando pelo centro do ônibus 23
Figura 6.1 – Vista geral da cabine com a nova localização do retorno..... 24
Figura 6.2 – Vista das grelhas de retorno..... 25
Figura 6.3 – Dutos de ventilação e “inlet’s” 25
Figura 6.4 – Dutos de ventilação, “inlet’s” e poltronas 26
Figura 6.5 – Vetores velocidade Estudo A..... 27
Figura 6.6 – Campo de temperaturas Estudo A 27
Figura 6.7 – Vetores velocidade Estudo B..... 28

Figura 6.8 – Campo de temperaturas Estudo B 29
Figura 6.9 – Vetores velocidade Estudo C..... 30
Figura 6.10 – Campo de temperaturas Estudo C..... 30
Figura 7.1 – Perfil ideal de temperaturas equivalentes e limites de tolerância para a condição de verão – Nilsson, 2004 32
Figura 7.2 – Geometria do manequim numérico com dezoito segmentos..... 33
Figura 7.3 – Geometria da sala de calibração do manequim numérico 35
Figura 7.4 – Malha da sala de calibração do manequim numérico..... 36
Figura 7.5 – Fluxo de calor de calibração dos segmentos..... 38
Figura 7.6 – Coeficientes de troca de calor de calibração..... 38
Figura 7.7 – Dimensões externas da seção da cabine do ônibus rodoviário..... 39
Figura 7.8 – Geometria da seção da cabine do ônibus rodoviário 40
Figura 7.9 – Malha da seção da cabine do ônibus rodoviário..... 40
Figura 7.10 – Fluxo de calor dos segmentos dos manequins..... 42
Figura 7.11 – Diagrama de conforto térmico – Manequim 1..... 51
Figura 7.12 – Diagrama de conforto térmico – Manequim 2..... 51
Figura 7.13 – Diagrama de conforto térmico – Manequim 3..... 52
Figura 7.14 – Diagrama de conforto térmico – Manequim 4..... 52

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Número de elementos das malhas geradas 9
Tabela 4.2 - Superfícies e tipos 12
Tabela 4.3 – Condições de contorno do ônibus rodoviário 14
Tabela 4.4 – Valores residuais para verificação da convergência 15
Tabela 7.1 – Condições de contorno de calibração do manequim numérico 36
Tabela 7.10 - Dados – Manequim 3 49
Tabela 7.11 - Dados – Manequim 4 50
Tabela 7.2 - Espessuras das superfícies dos segmentos 37
Tabela 7.3 – Condições de contorno da seção de ônibus rodoviário 41
Tabela 7.4 - Dados – Manequim 1 43
Tabela 7.5 - Dados – Manequim 2 44
Tabela 7.6 - Dados – Manequim 3 45
Tabela 7.7 - Dados – Manequim 4 46
Tabela 7.8 - Dados – Manequim 1 47
Tabela 7.9 - Dados – Manequim 2 48

1 PROJETO 1

1.1 INTRODUÇÃO 1

1.2 OBJETIVOS 2

2 DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS 3

2.1 MÉTODO DE TRABALHO 3

2.1.1 Geração de Malhas 3

2.1.2 Simulações / Estudo de Independência de Malha 3

2.1.3 Comparação com Resultados Experimentais 4

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5

4 ETAPAS PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA 7

4.1 CONSTRUÇÃO DAS GEOMETRIAS 7

4.2 GERAÇÃO DE MALHAS 8

4.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO 12

4.4 SIMULAÇÃO E CRITÉRIOS DE CONVERGÊNCIA 15

5 RESULTADOS 18

5.1 ESTUDO DE INDEPENDÊNCIA DE MALHA E COMPARAÇÃO COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS 18

5.2 VETORES VELOCIDADE 19

5.3 CAMPOS DE TEMPERATURA 19

6 ESTUDO DE INSUFLAMENTO DIFERENCIADO 24

6.1 RESULTADOS DO ESTUDO A 26

6.2 RESULTADOS DO ESTUDO B 28

6.3 RESULTADOS DO ESTUDO C 29

6.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS 31

7 ANÁLISE DE CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO 32

7.1 MANEQUIM NUMÉRICO 33

7.2 METODOLOGIA UTILIZADA NO ESTUDO 33

7.3 CALIBRAÇÃO DO MANEQUIM NUMÉRICO 34

7.3.1 Geometria de calibração gerada 34
7.3.2 Malha de calibração gerada 35
7.4 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO MANEQUIM NUMÉRICO 37
7.5 SIMULAÇÃO DA SEÇÃO DA CABINE DO ÔNIBUS RODOVIÁRIO 38
7.5.1 Geometria da seção da cabine do ônibus rodoviário gerada 39
7.5.2 Malha da seção da cabine do ônibus rodoviário gerada 40
7.6 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA SEÇÃO DA CABINE DO ÔNIBUS RODOVIÁRIO 42
7.7 DIAGRAMAS DE CONFORTO TÉRMICO 42
7.7.1 Resultados 50
8 COMENTÁRIOS FINAIS 53
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 55

1 PROJETO

1.1 Introdução

Os fluidos em movimento estão presentes em todos os lugares e suas características têm 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.

As técnicas de simulação numérica em ônibus rodoviário não têm sido muito utilizadas devido à falta de interesse das empresas de transporte rodoviário e pela ampla variedade de marcas e modelos de ônibus no mercado. Até o momento, poucas pesquisas foram feitas com o objetivo de melhorar as condições de conforto térmico nesse meio de transporte.

A modelagem matemática dos ônibus rodoviários é bastante complexa devido aos vários fatores que influenciam nas condições do escoamento. 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.

1.2 Objetivos

Os objetivos a serem atingidos no presente trabalho são:

- Realizar estudo numérico do escoamento do ar e trocas de calor em cabines de ônibus rodoviário com ar condicionado, com vistas ao desenvolvimento de método numérico de avaliação de conforto térmico neste tipo de veículo automotivo;
- Analisar o campo de distribuição de temperaturas e de velocidades em ônibus rodoviários dotados de sistema de ar condicionado;
- Confrontar resultados de simulação dos campos de temperatura e velocidade com dados experimentais para verificação da confiabilidade das simulações realizadas;
- Avaliação de condições de conforto térmico utilizando método numérico baseado nas trocas de calor em manequim digital e na técnica das temperaturas equivalentes.

2 DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

2.1 Método de Trabalho

As simulações serão realizadas considerando ônibus executivo com sistema de condicionamento de ar da cabine. A abordagem do problema se inicia com a geração da geometria e das malhas, determinação das condições de contorno, das variáveis relevantes ao problema e aos fenômenos físicos presentes, tendo, como principal finalidade, a correspondência entre o caso real e o caso simulado numericamente. As simulações serão realizadas utilizando programação comercial de CFD, no caso, Fluent.

2.1.1 Geração de Malhas

Depois que a geometria do problema é gerada (a partir das dimensões reais do ônibus), são geradas as malhas. Para a geração da malha, são necessários: o tipo de elemento de malha e o tamanho dos elementos de malha em cada superfície. Esses parâmetros são definidos de acordo com o "refinamento" desejado da malha. Além de definir o parâmetro de cada elemento para definir a qualidade da malha, também é necessário um "ajuste" de elementos que estejam muito longe do "elemento ideal" (definido, no caso deste projeto em que foram usados elementos tetraédricos, como sendo o tetraedro ideal).

2.1.2 Simulações / Estudo de Independência de Malha

Para o estudo de independência de malha, deverá ser usada a mesma geometria para gerar malhas de diferentes números de elementos (nós), ou até diferentes tipos de elementos (tetraedro, prisma, etc.).

Esse estudo serve para mostrar que os resultados obtidos não dependem do grau de refinamento da malha utilizada. Ou seja, que a malha não altera os resultados obtidos. Nas simulações realizadas, será utilizado o modelo de turbulência k-ε.

2.1.3 Comparação com Resultados Experimentais

Ao se empregar programas de simulação numérica para tentar simular situações reais, precauções devem ser tomadas para que os resultados obtidos sejam confiáveis, pois nem sempre o resultado será fisicamente possível ou real. Portanto, todo cuidado será necessário ao comparar os resultados obtidos por meio de programas de simulação numérica e os dados reais medidos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão e atualização bibliográfica permitiram verificar que existem muito poucos artigos - praticamente inexistentes, que tratam da questão do conforto térmico em cabines de ônibus.

Os artigos que tratam da questão de conforto térmico em veículos automotivos, via de regra, tratam do conforto térmico em automóveis (Cisternino, 1999; Han e Huang, 2001; Rugh e Bharathan, 2005; Lebbin e Hosni, 2005). Em aeronaves, por exemplo, resultados de estudos publicados referem-se, normalmente, ao escoamento e às trocas de calor e não especificamente à avaliação de conforto térmico (Irgens e Melikov, 2004; Loomans et al., 2004; Pennecot et al., 2004; Günther et al., 2004). Trabalho pioneiro de avaliação numérica de conforto térmico em cabine de aeronave foi desenvolvido e publicado por pesquisadores da EPUSP e da Embraer (Stancato et al., 2006).

Embora o número de publicações seja reduzido, relacionado com a grande competitividade no setor automotivo, técnicas de simulação numérica, aliadas com a experimentação em campo, estão se tornando ferramentas de suma importância no que se refere ao conforto térmico de um passageiro em cabines de veículos. Devido a variações das condições de contorno e da especificidade do escoamento e trocas de calor em cada tipo de veículo automotivo, as características dos sistemas instalados na cabine como, por exemplo, o sistema de insuflamento de ar, são de difícil determinação. Assim, técnicas numéricas estão sendo implementadas em variados tipos de aplicações e, especialmente em veículos automotivos, estão em constante melhoria e desenvolvimento (Bao et al, 2005).

Com o uso de CFD, condições de contorno que antes seriam de difícil implementação no projeto - como a presença de radiação térmica incidente no ônibus, são agora tratadas apenas como mais um dos itens a serem definidos na simulação. De acordo com Wu e Chen (1999), os resultados obtidos nas simulações realizadas pelos pesquisadores apresentaram boa concordância com dados medidos,

fato que torna a ferramenta confiável mesmo nestas condições de contorno antes consideradas de difícil tratamento.

Por outro lado, em climas quentes e úmidos, se o ônibus não possuir sistema de ar condicionado, as condições térmicas internas podem ter variações bastante amplas, causando grande desconforto térmico aos passageiros. Este desconforto térmico estará intimamente ligado com a umidade relativa e com a temperatura no ambiente da cabine. Em estudo realizado em Hong Kong, Mui e Shek (2005) verificaram que essas condições podem variar de 66% de umidade relativa a 38ºC, para um ônibus sem condicionamento de ar, até 59% de umidade relativa a 24ºC, para um ônibus com condicionamento térmico adequado.

Outro fator importante com relação a condições de conforto térmico é o fluxo de ar (velocidade e temperatura) ao redor de um passageiro em ônibus rodoviário. Resultados obtidos por Conceição et al. (1998) mostram que os campos de temperatura e de velocidade do ar na cabine estão intimamente ligados com a geometria do ônibus (localização e forma das poltronas, dutos de ar, insuflamento etc.).Tais elementos devem ser otimizados separadamente, e posteriormente, em conjunto, de forma a minimizar as perdas de eficiência do sistema de ar condicionado e garantir condições de conforto térmico.

4 ETAPAS PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

4.1 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. Para melhor visualização da geometria, a seguir são apresentadas vistas isométricas do ônibus.

Na Figura 4.1 é apresentada uma vista geral do ônibus mostrando os elementos que interferem nos campos de temperatura e velocidades, como as poltronas, banheiro, geladeira, dutos, paredes.

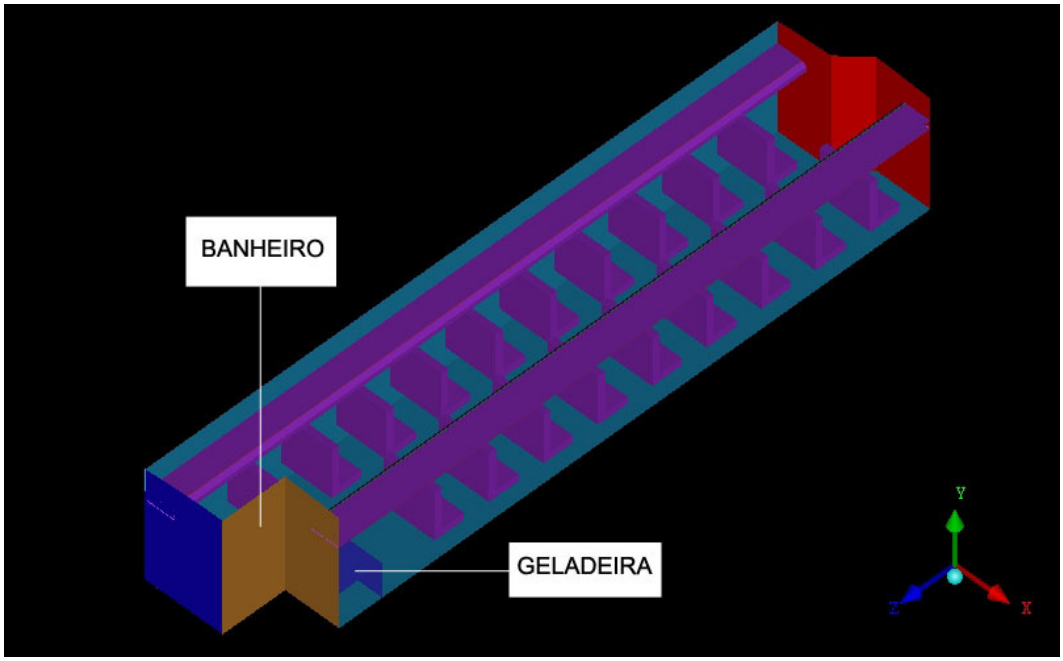


Figura 4.1 – Vista geral do ônibus

Na Figura 4.2 são apresentadas a dimensão e localização das grelhas de retorno de ar pelo teto (parte central do ônibus) e na Figura 4.3 são apresentados detalhes das aberturas dos dutos de insuflamento de ar (“inlet’s”).

4.2 Geração de Malhas

A malha gerada nesta etapa é resultado da familiarização e domínio das ferramentas de geração de malha (Ansys/ICEM e Gambit). Uma vez que a malha é gerada, é necessário o seu refinamento para que os elementos não fiquem muito diferentes do elemento ideal, como foi citado no item 2.1.1.

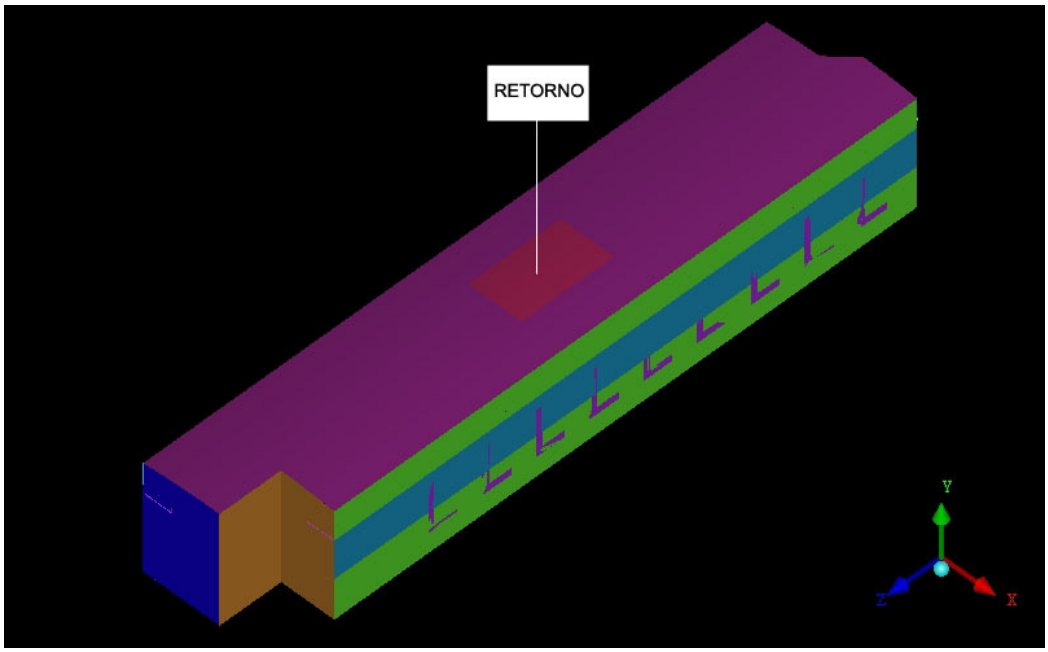


Figura 4.2 - Vista de localização do retorno de ar centralizado na cabine

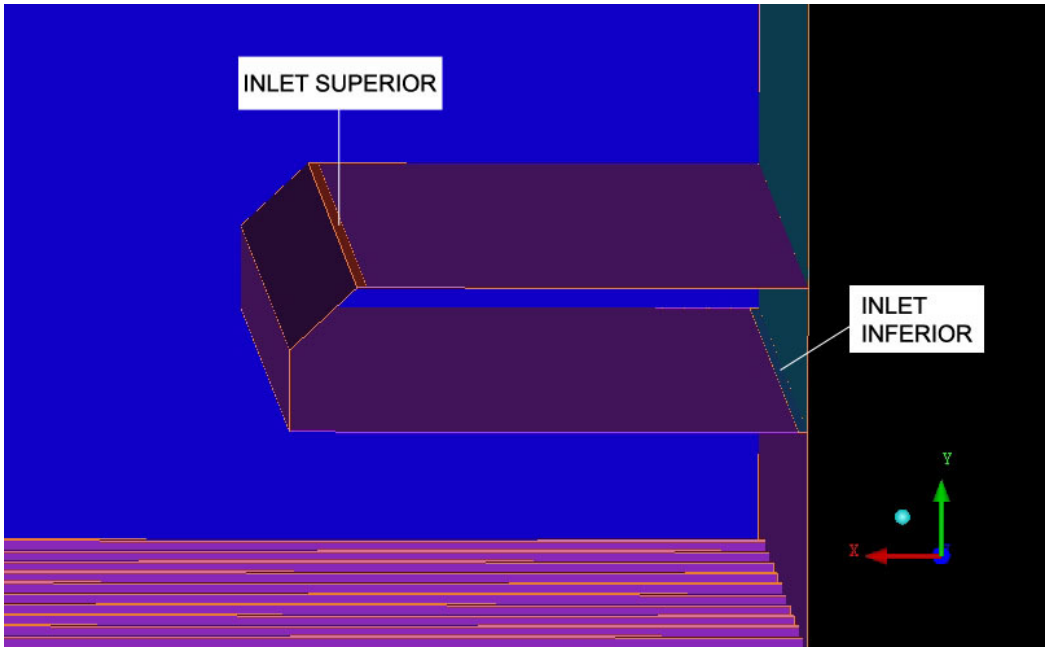


Figura 4.3 – Dutos de ventilação com filete “INLET” indicado

Foram geradas quatro malhas (A, B, C e D), modificando apenas seu grau de refinamento (número de elementos), sem mudanças na geometria em si (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Número de elementos das malhas geradas

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

Na Figura 4.4 é apresentada uma das malhas geradas. Para facilitar a visualização, na Figura 4.5 são mostradas apenas as poltronas, dutos e inlet’s. Na

Figura 4.6, os dutos e o outlet (em vermelho) e, na Figura 4.7, um duto e seus respectivos “inlet’s” (em azul) em detalhes.

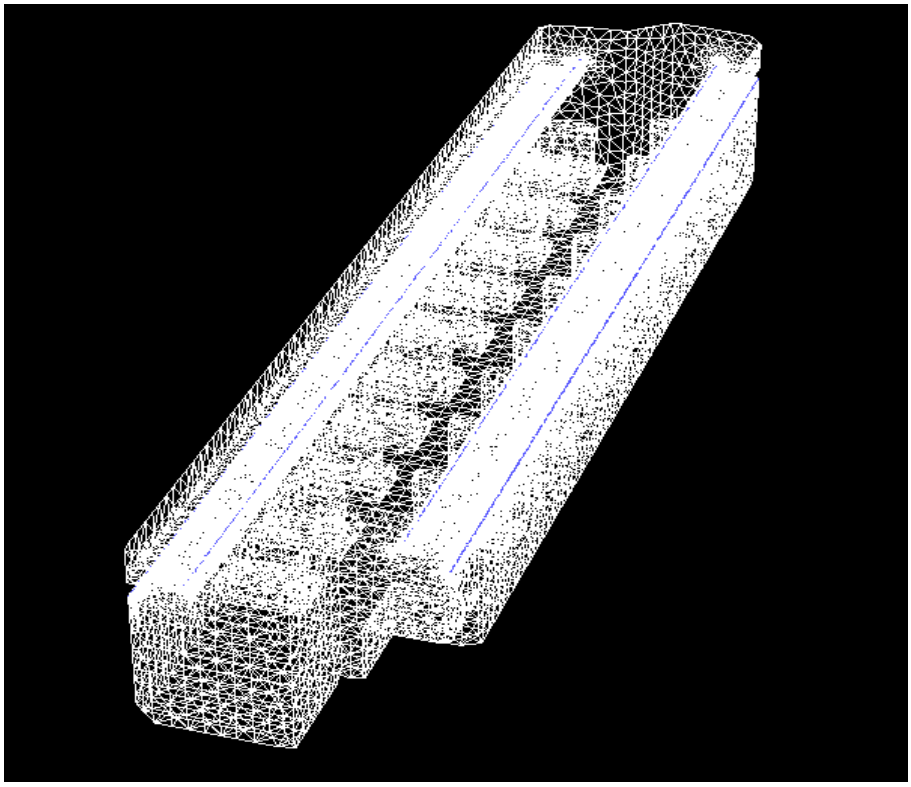


Figura 4.4 – Malha do ônibus

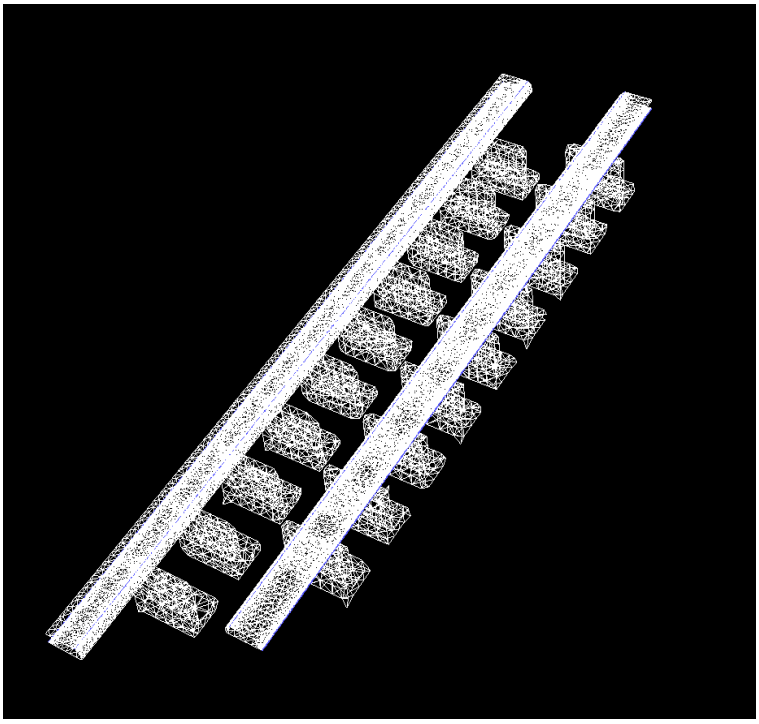


Figura 4.5 – Malha mostrando poltronas, dutos e inlet’s

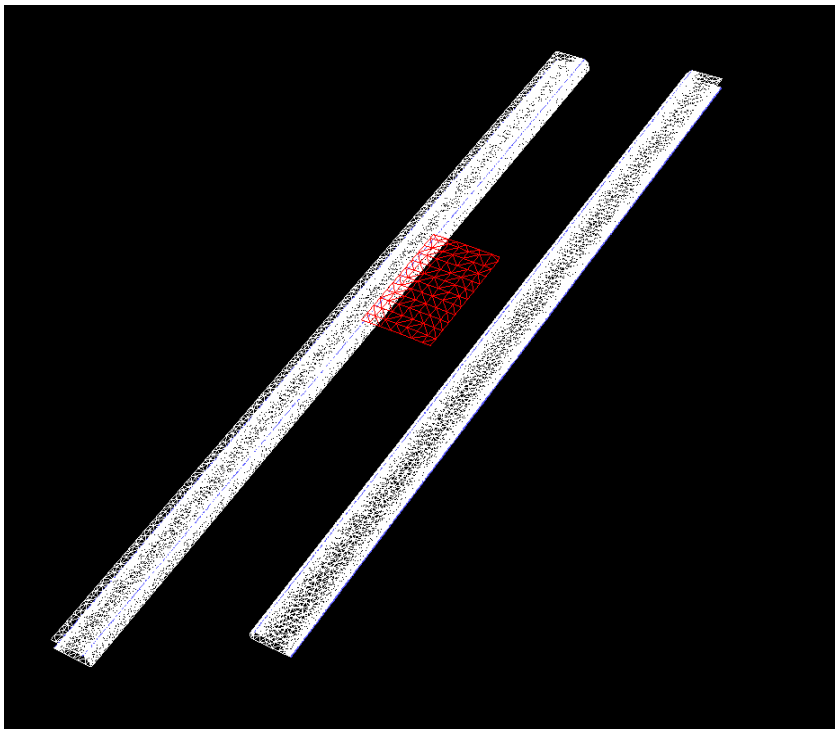


Figura 4.6 – Malha dos dutos, inlet e retorno

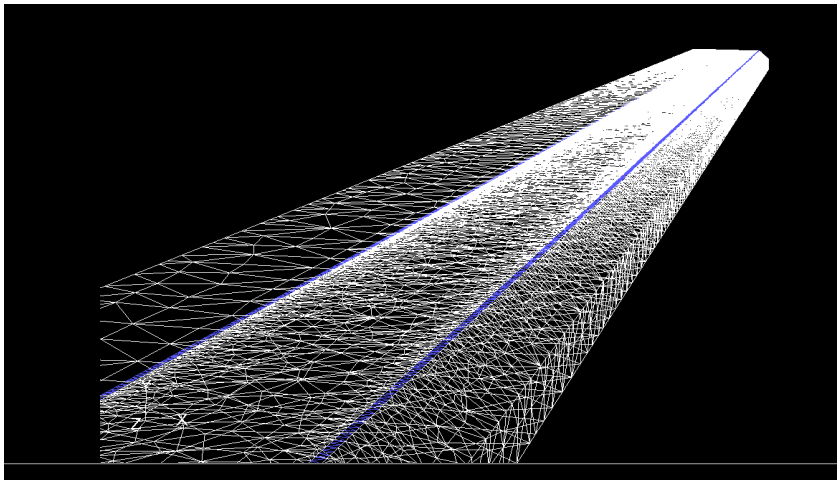


Figura 4.7 – Duto e inlet's detalhados

4.3 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 Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - 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, 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.

Os valores numéricos foram obtidos a partir de medições no ônibus rodoviário estacionado ao sol (com condição externa de radiação de aproximadamente 850 W/m² durante as medições), que são apresentados na Tabela 4.3. 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.

Tabela 4.3 – Condições de contorno do ônibus rodoviário

Superfície	Temperatura (ºC)	Velocidade (m/s)	Radiação (W/m²)
Inlet direito superior (Insuflamento)	17,7	1,09	-
Inlet esquerdo superior (Insuflamento)	18,3	0,87	-
Inlet direito inferior (Insuflamento)	19,3	2,90	-
Inlet esquerdo inferior (Insuflamento)	19,3	2,47	-
Outlet (retorno)	22,0	-	-
Dutos	19,0	-	-
Paredes laterais	28,0	-	-
Vidros	32,0	-	-
Teto	34,9	-	-
Piso	24,5	-	-
Poltronas	25,2	-	-
Radiação Externa	-	-	850

Para medir as temperaturas do ar foram utilizados termômetros de resistência PT100 com precisão da ordem de +/- 0,2ºC. Para medir temperaturas superficiais foi utilizado termômetro infravermelho, que possui resolução de 0,2ºC a 275ºC, com precisão de +/- 0,1ºC.

Para medir velocidades do ar foram utilizados anemômetros omnidirecionais com faixa de medição de 0 a 10 m/s e precisão de +/- (0,04 + 3% da velocidade de fundo de escala) m/s. Para determinar radiação total incidente foi utilizado piranômetro, faixa de medição de 0 a 1500 W/m², precisão de +/- 10 W/m².

4.4 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 $k-\varepsilon$ 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 seguintes variáveis: equação da continuidade, da velocidade em x, da velocidade em y, da velocidade em z, da energia, de k e de ε. Tais valores residuais, para cada uma dessas equações, são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Valores residuais para verificação da convergência

Equação	Resíduo absoluto
Continuidade	0,001
Velocidade em x, y e z	0,001
Energia	$1 \cdot 10^{-6}$
k e ε	0,001

Nas Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 (que representam as malhas D, C, B e A, respectivamente) são apresentados os monitoramentos dos resíduos e a ocorrência da convergência.

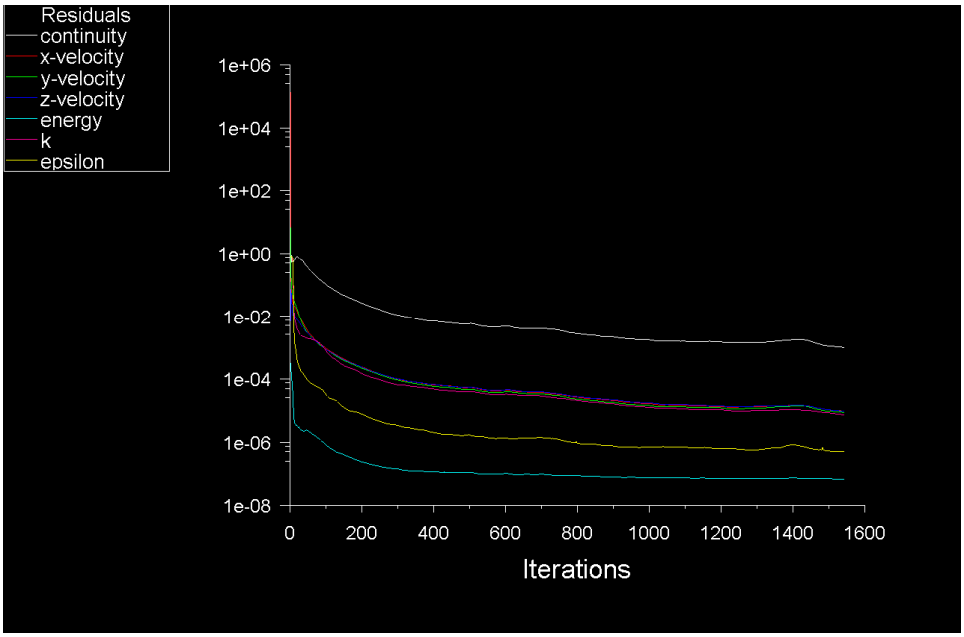


Figura 4.8 – Monitoramento dos resíduos. Malha D – aprox. 1500 iterações

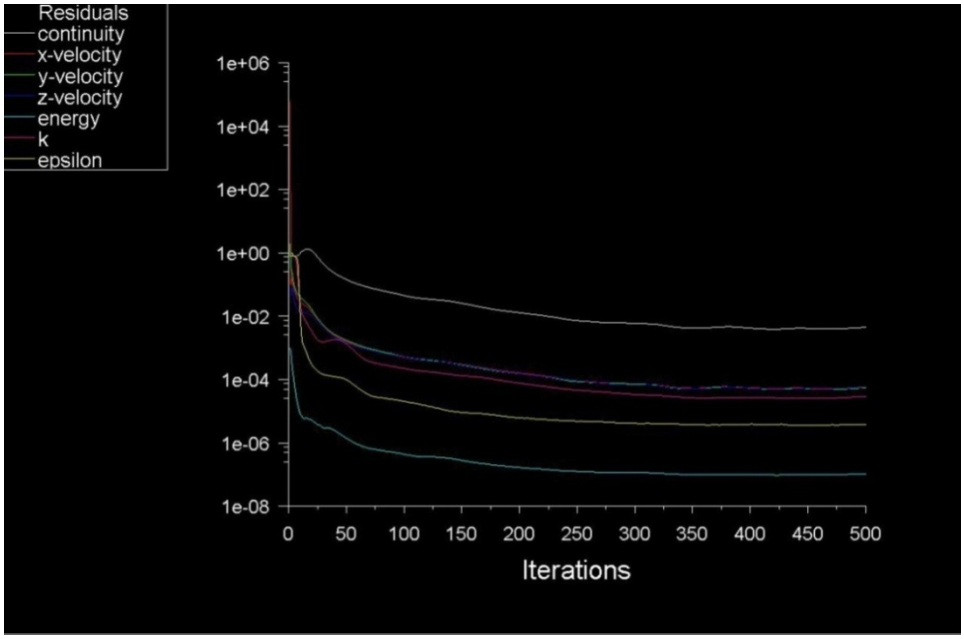


Figura 4.9 – Monitoramento dos resíduos. Malha C – aprox. 500 iterações

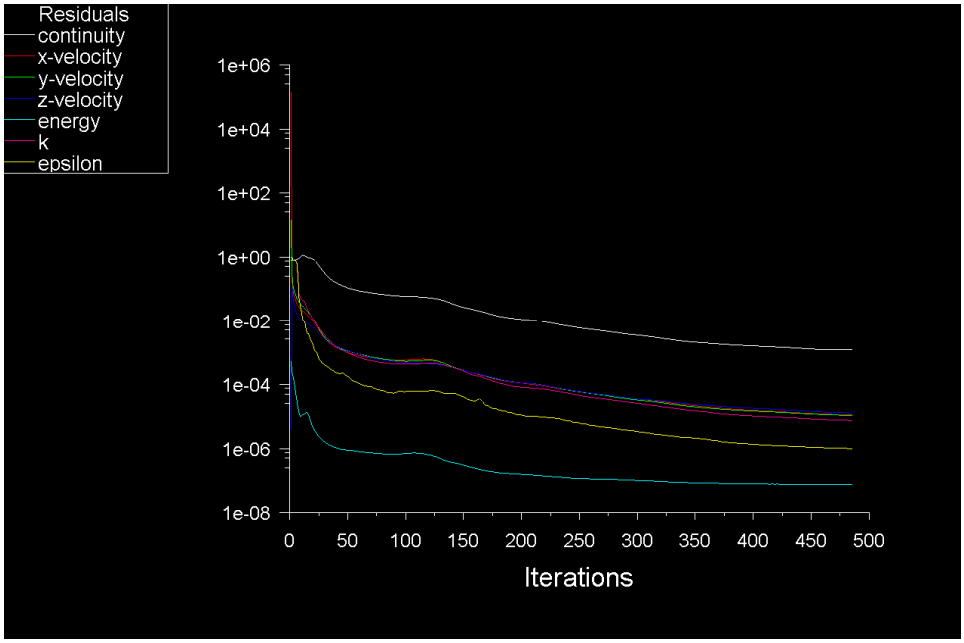


Figura 4.10 – Monitoramento dos resíduos. Malha B – aprox. 470 iterações

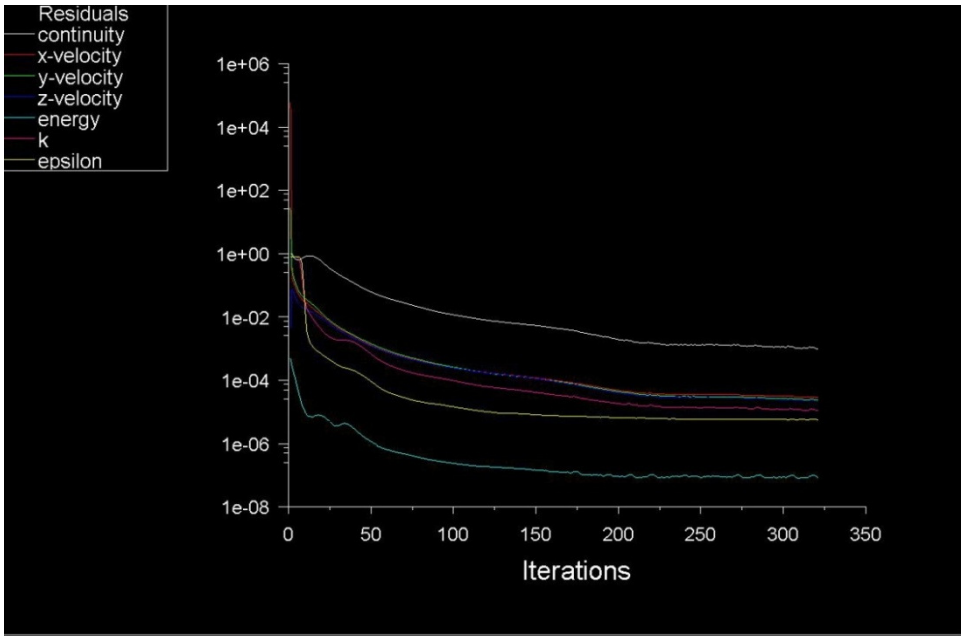


Figura 4.11 – Monitoramento dos resíduos. Malha A – aprox. 325 iterações

5 RESULTADOS

5.1 Estudo de Independência de Malha e Comparação com Resultados Experimentais

Durante o processo de medições também foram levantados valores de temperatura em uma seção central do ônibus para comparação com resultados de simulação. Na Figura 5.1 estes valores são apresentados juntamente com aqueles obtidos nas simulações utilizando malhas A, B, C e D no estudo de independência de malhas. 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 e ASHRAE 55.

Verifica-se nos resultados apresentados na Figura 5.1 que, por ser a malha mais refinada, a malha D é a que se aproxima melhor dos dados experimentais, o que era esperado.

No item 5.2 são apresentados os campos de velocidades e de temperaturas obtidos nas simulações realizadas (para a malha D); que são de fundamental importância na avaliação de condições de conforto térmico em ambientes interiores.

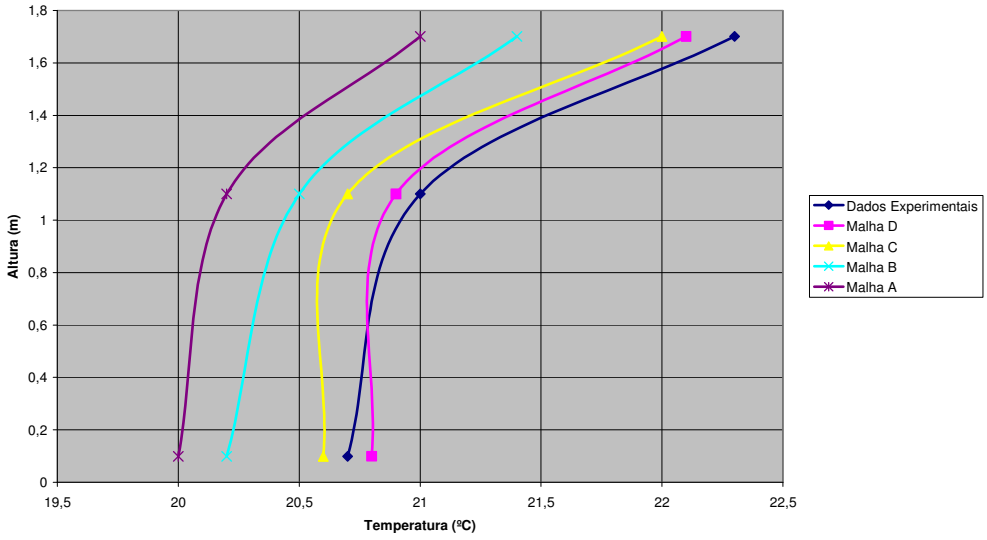


Figura 5.1 – Comparação entre resultados de simulação e dados experimentais

5.2 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), na saída de ar no difusor - insuflamento (Figura 5.2), no retorno de ar (Figura 5.3) e em um plano longitudinal passando pelo centro do ônibus (Figura 5.4).

Ao analisar a Figura 5.4, é possível verificar velocidades muito pequenas na região próxima às poltronas. Valores maiores são encontrados em regiões próximas ao difusor (inlet) e ao 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 nas Figuras 5.2 e 5.3, que apresentam o campo de velocidades no insuflamento e no retorno.

5.3 Campos de Temperatura

Analogamente aos vetores velocidade, são apresentados campos de temperatura na saída de ar no difusor – insuflamento (Figura 5.5), no retorno de ar (Figura 5.6) e em um plano longitudinal passando pelo centro do ônibus (Figura 5.7).

Ao analisar a Figura 5.7, é possível verificar que a cabine possui um campo de temperaturas que se encontra em uma faixa de 20,6 ºC a 21,9 ºC (nas poltronas). Valores maiores são encontrados em regiões mais afastadas do difusor (insuflamento) e do retorno.

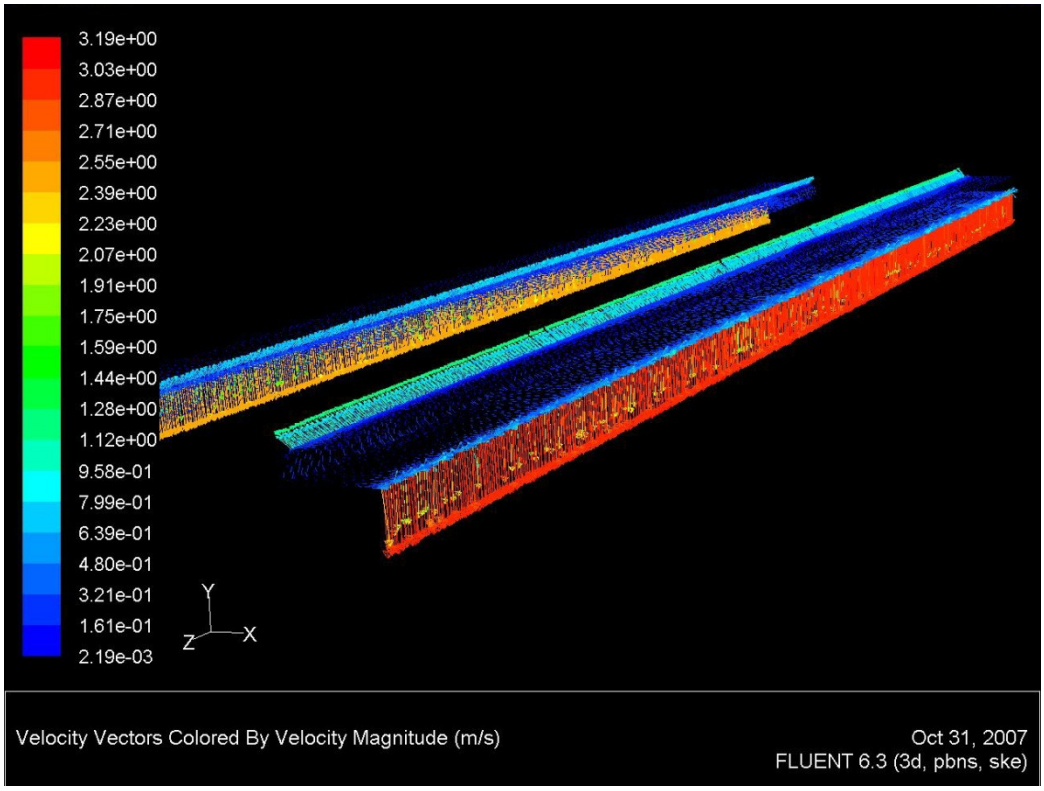


Figura 5.2 – Vetores velocidade no insuflamento

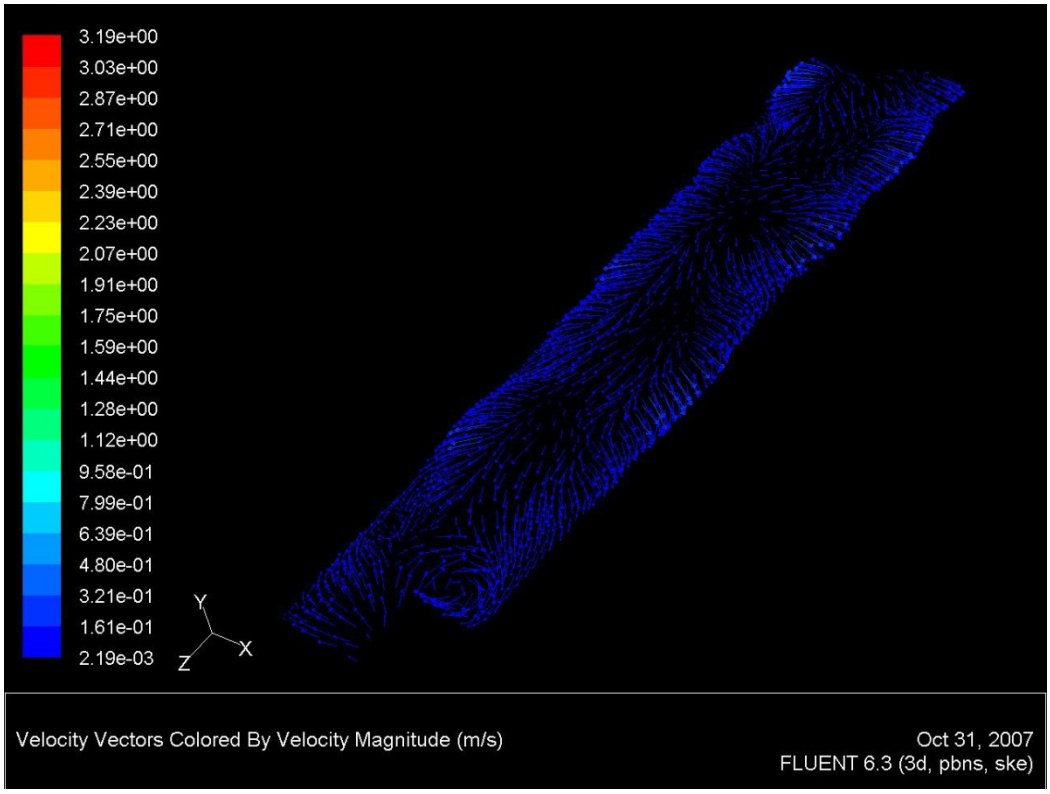


Figura 5.3 – Vetores velocidade no retorno

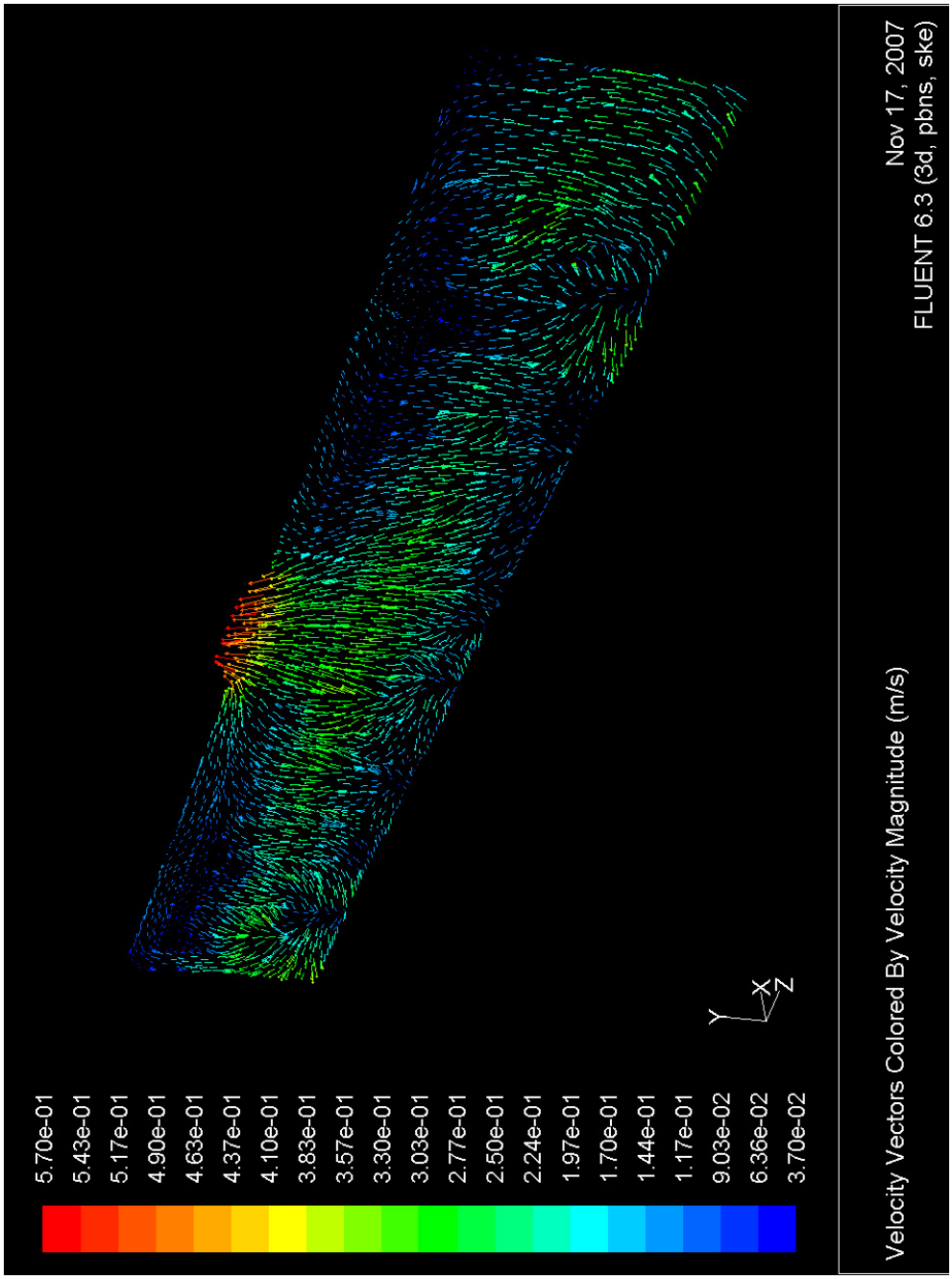


Figura 5.4 – Vetores velocidade no plano longitudinal passando pelo centro do ônibus

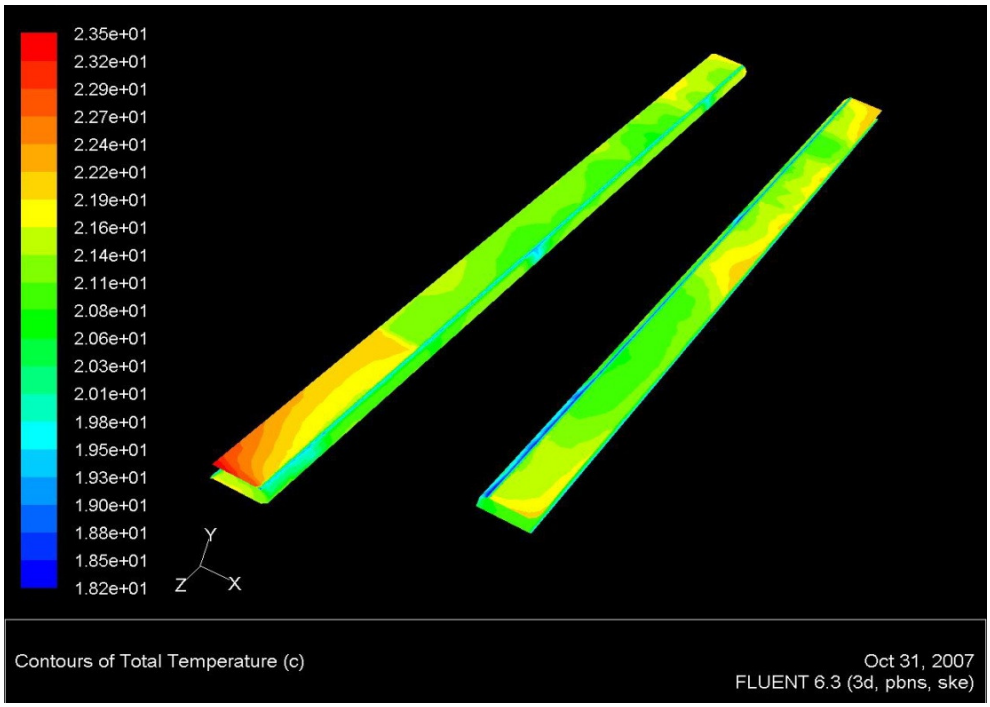


Figura 5.5 – Campo de temperaturas no insuflamento

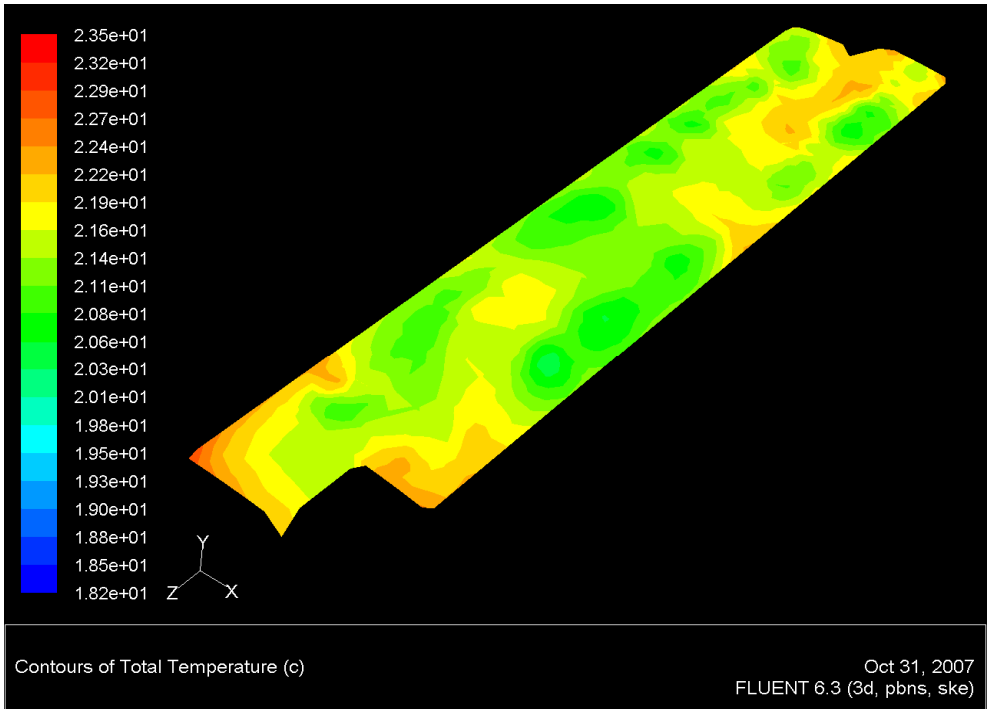


Figura 5.6 – Campo de temperaturas no retorno

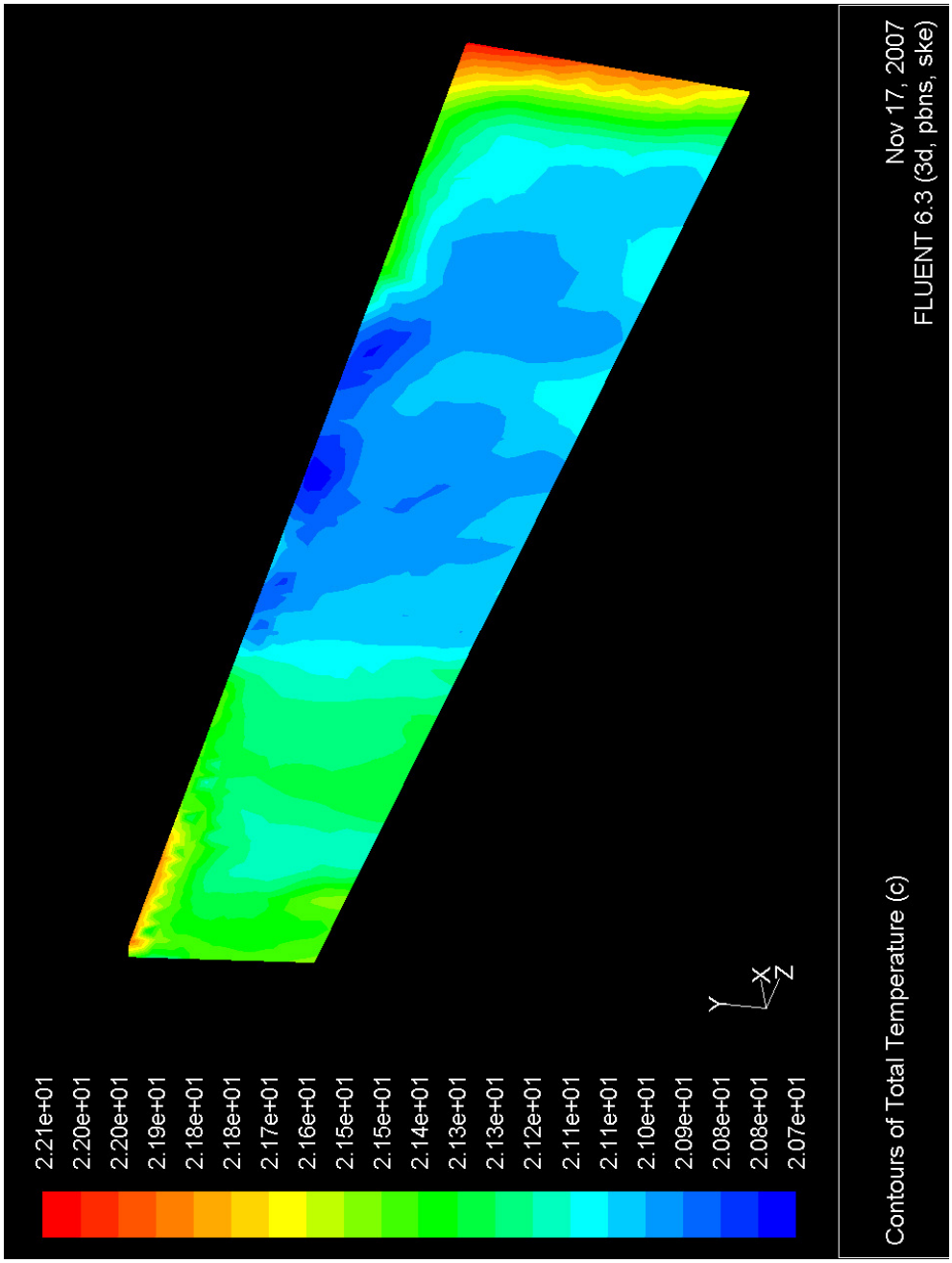


Figura 5.7 – Campo de temperaturas no plano longitudinal passando pelo centro do ônibus

6 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.

ESTUDO A

Inicialmente foi realizado estudo com modificação somente no retorno do ar na cabine, alterando dos dois evaporadores da parte central (Figura 4.2) para a configuração apresentada nas Figuras 6.1 e 6.2.

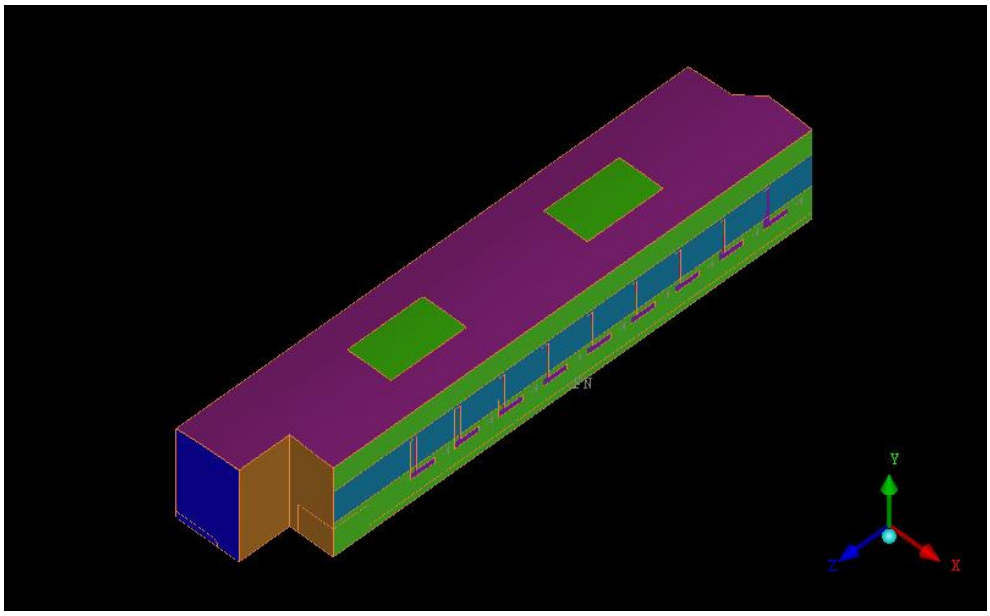


Figura 6.1 – Vista geral da cabine com a nova localização do retorno

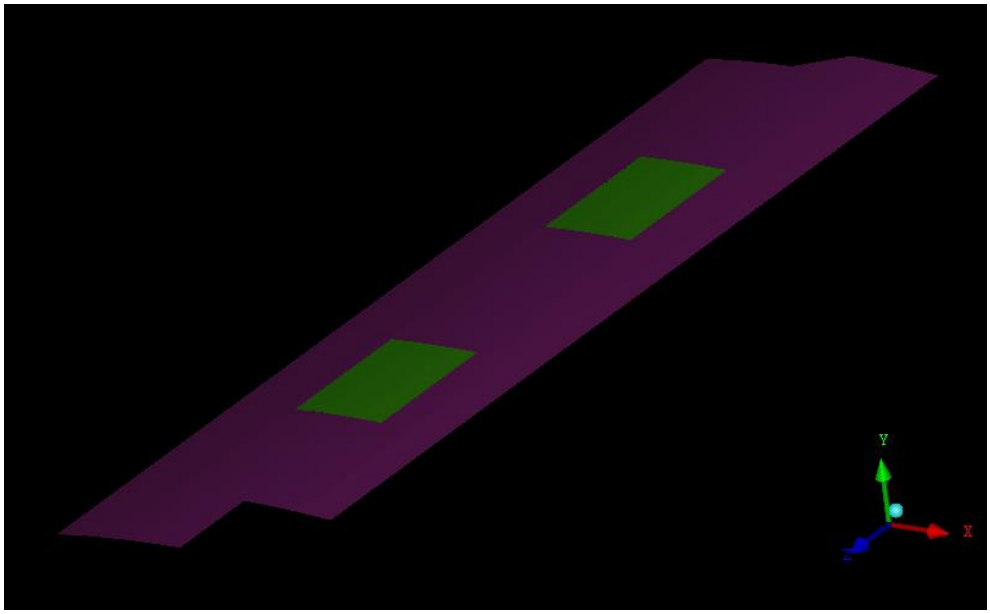


Figura 6.2 – Vista das grelhas de retorno

ESTUDO B

Mantendo o retorno conforme apresentado na Figura 4.2, foi alterado o insuflamento, que era realizado pela parte superior da cabine (Figura 4.3), para a parte inferior, conforme apresentado nas Figuras 6.3 e 6.4.

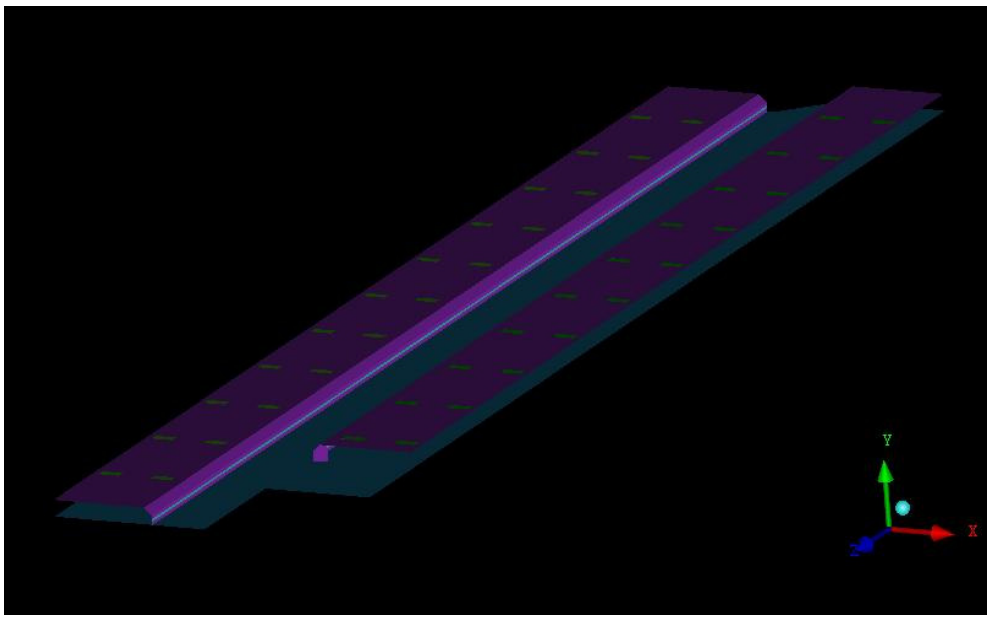


Figura 6.3 – Dutos de ventilação e “inlet’s”

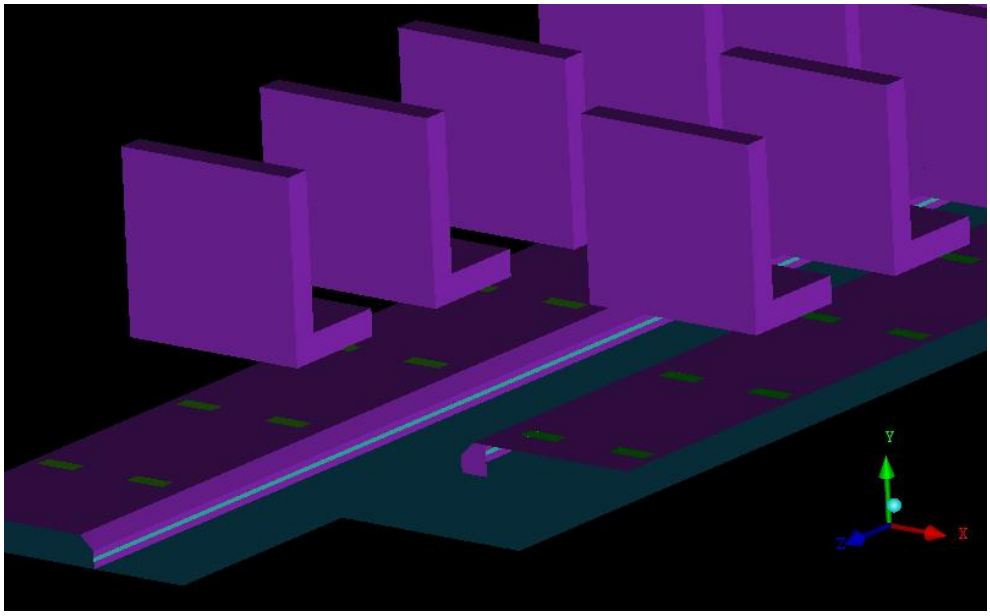


Figura 6.4 – Dutos de ventilação, “inlet’s” e poltronas

ESTUDO C

Utilizando retorno conforme apresentado nas Figura 6.1 e 6.2 e insuflamento conforme apresentado nas Figuras 6.3 e 6.4.

6.1 Resultados do Estudo A

Nas Figuras 6.5 e 6.6 são apresentados, respectivamente, resultados de vetores velocidades e do campo de temperaturas em um plano longitudinal passando pelo centro do ônibus.

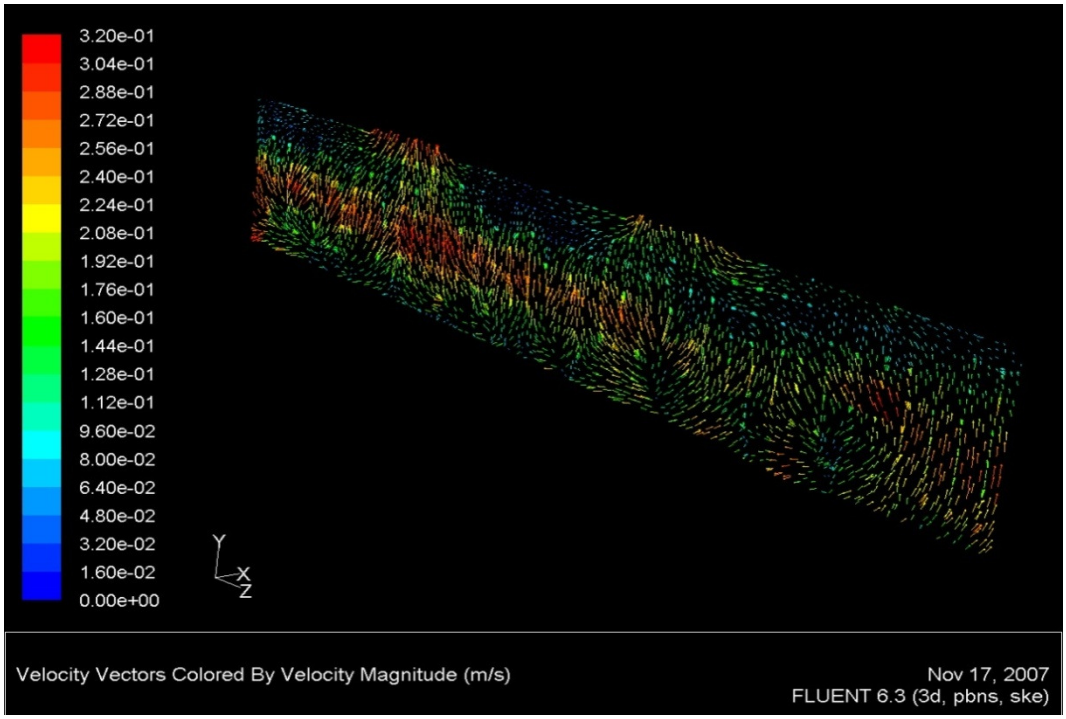


Figura 6.5 – Vetores velocidade Estudo A

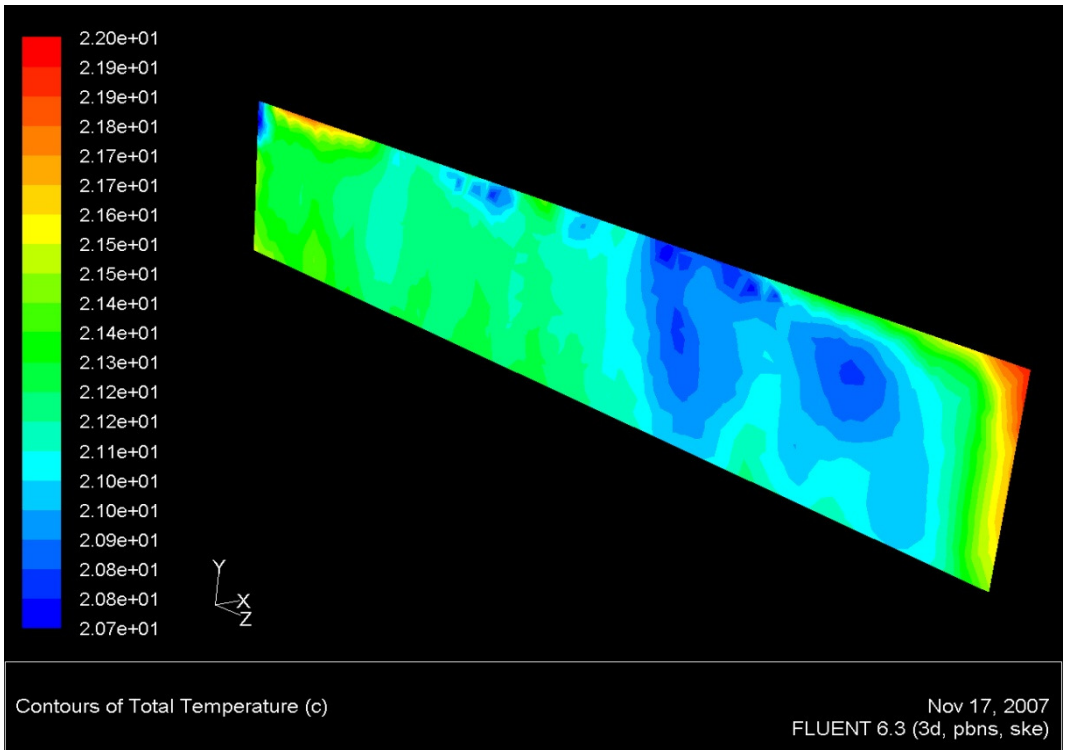


Figura 6.6 – Campo de temperaturas Estudo A

6.2 Resultados do Estudo B

Nas Figuras 6.7 e 6.8 são apresentados, respectivamente, resultados de vetores velocidades e do campo de temperaturas em um plano longitudinal passando pelo centro do ônibus.

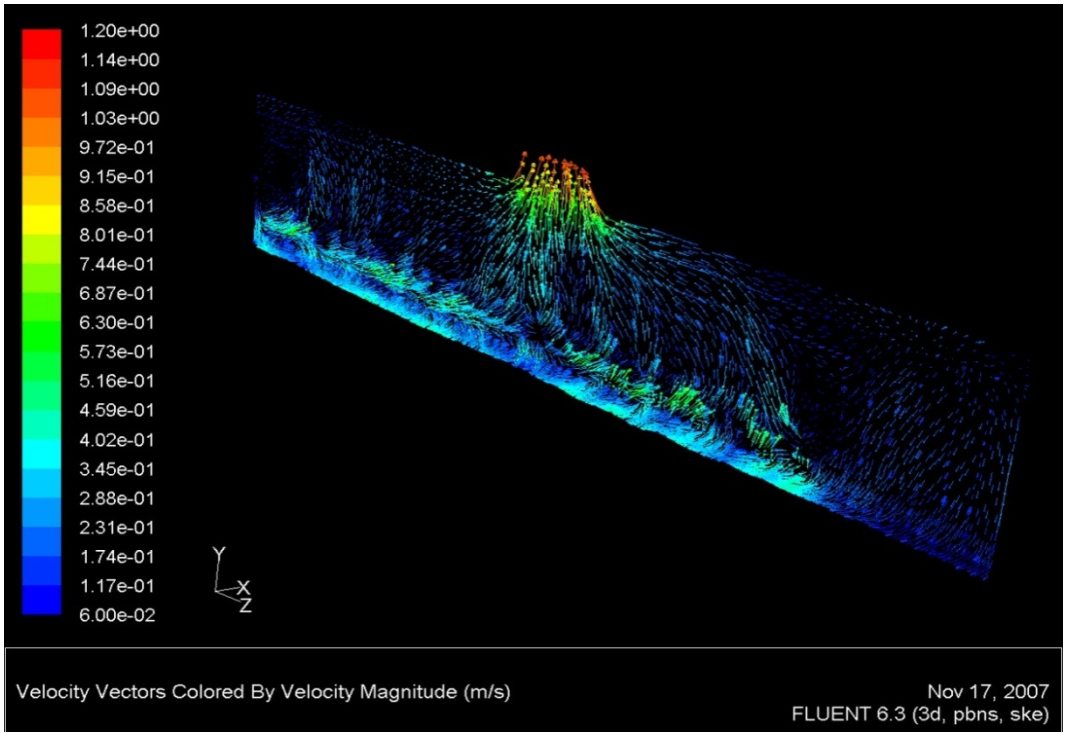


Figura 6.7 – Vetores velocidade Estudo B

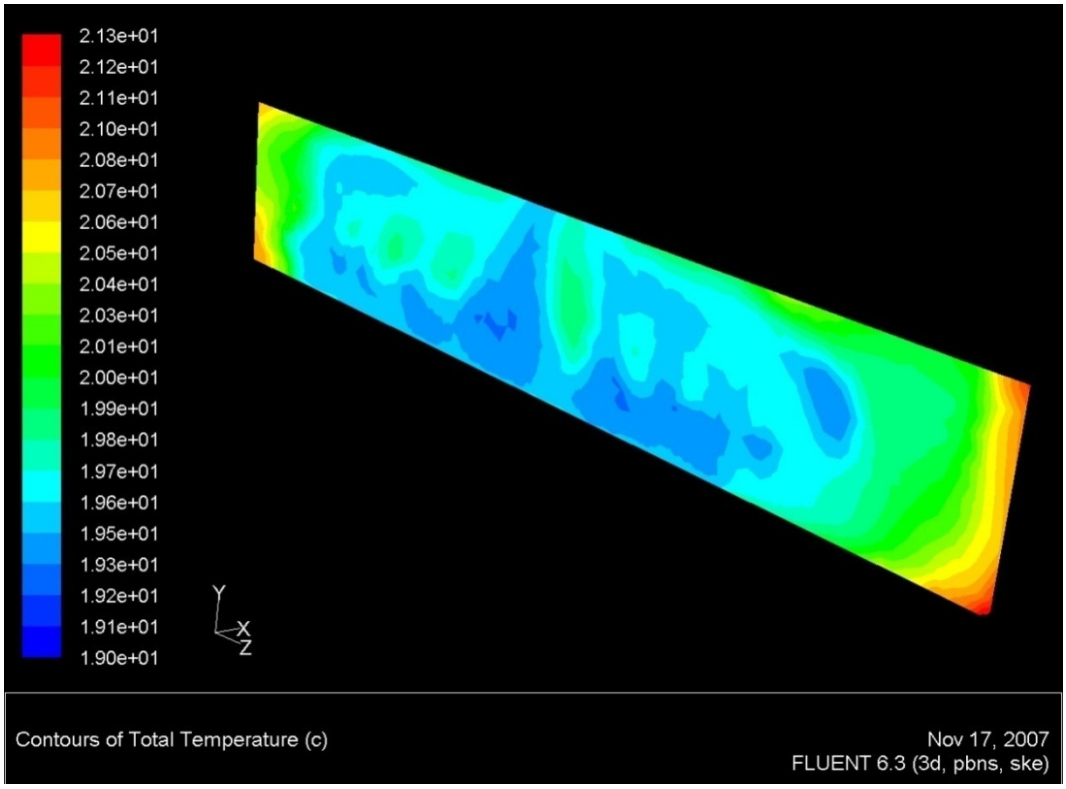


Figura 6.8 – Campo de temperaturas Estudo B

6.3 Resultados do Estudo C

Nas Figuras 6.9 e 6.10 são apresentados, respectivamente, resultados de vetores velocidades e do campo de temperaturas em um plano longitudinal passando pelo centro do ônibus.

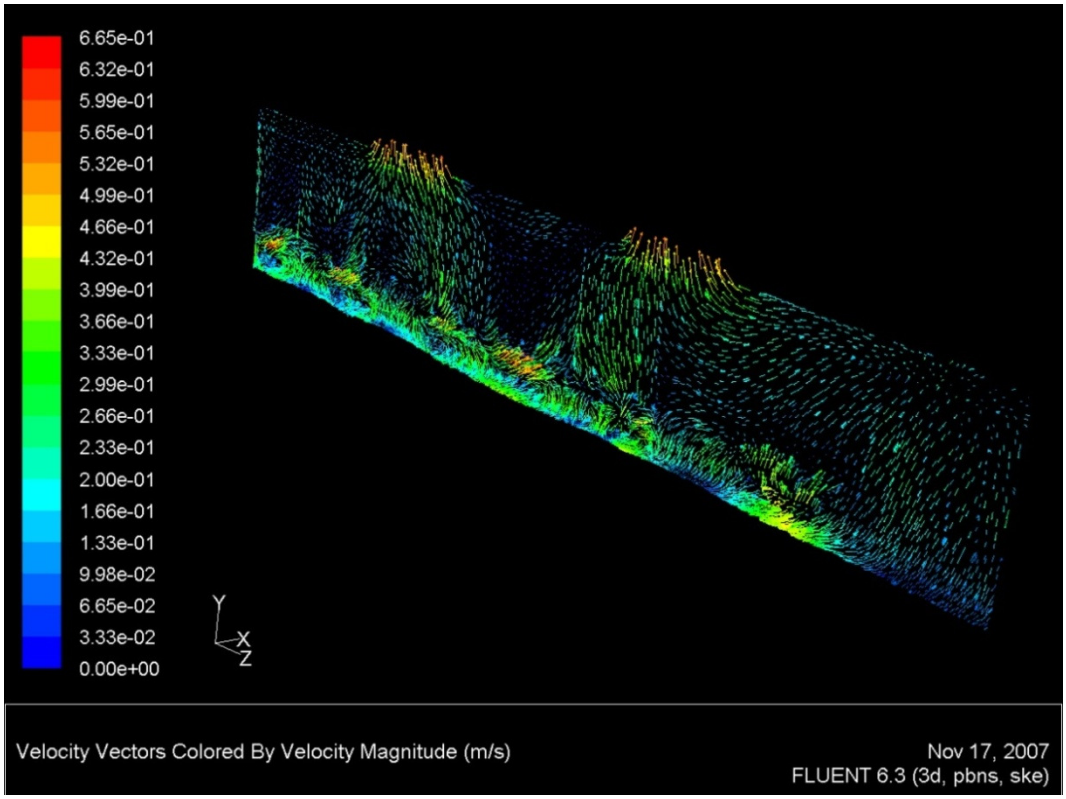


Figura 6.9 – Vetores velocidade Estudo C

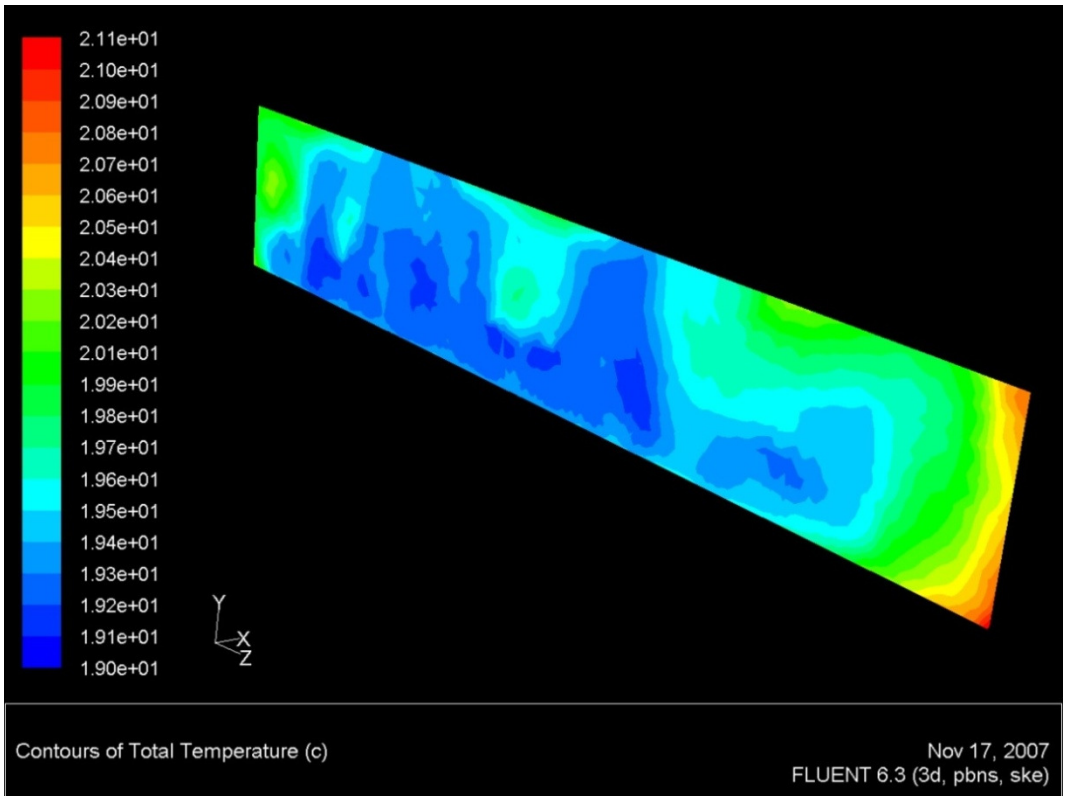


Figura 6.10 – Campo de temperaturas Estudo C

6.4 Análise dos Resultados

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.

No estudo A, observa-se que o escoamento se torna mais homogêneo (Figura 6.5) quando comparado ao sistema de distribuição de ar comum de um ônibus rodoviário (Figura 5.4). O campo de temperaturas, apenas mudando o sistema de retorno (Figura 6.2), se torna mais homogêneo, mas sem grande diferença em relação à amplitude de temperatura da cabine como um todo.

Para o estudo B, observa-se que, com apenas um retorno, o escoamento não apresenta homogeneidade no campo de velocidades (Figura 6.7). Porém as temperaturas são mais baixas, podendo-se dizer que, para atingir as condições de conforto térmico, o ar poderia ser insuflado a uma temperatura maior (contribuindo com a diminuição dos custos para o condicionamento da cabine).

Finalmente, 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 (ainda mais que no caso A, que apresenta a formação de vórtices ao longo de toda a cabine). As temperaturas da cabine também são mais baixas quando comparadas ao sistema comum de distribuição de ar, podendo o ar, novamente, ser insuflado a uma maior temperatura (contribuindo com os custos para o condicionamento da cabine).

7 ANÁLISE DE CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO

Um critério para a avaliação térmica de ambientes é a utilização da técnica 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 trocaria a mesma quantidade de calor sensível por radiação e por convecção que no ambiente real.

Baseando-se na avaliação de conforto de vinte pessoas, Nilsson (2004), desenvolveu o modelo do manequim numérico, dividido em dezoito segmentos, para os quais foram definidas temperaturas ótimas e tolerâncias para ambientes em duas situações diferentes, inverno e verão. No desenvolver deste trabalho foram utilizados apenas dados experimentais de verão (com radiação solar da ordem de 850 W/m²), portanto, os dados obtidos nesta etapa de simulações serão comparados com a carta de perfis de temperatura de conforto térmico para a condição de verão (Figura 7.1).

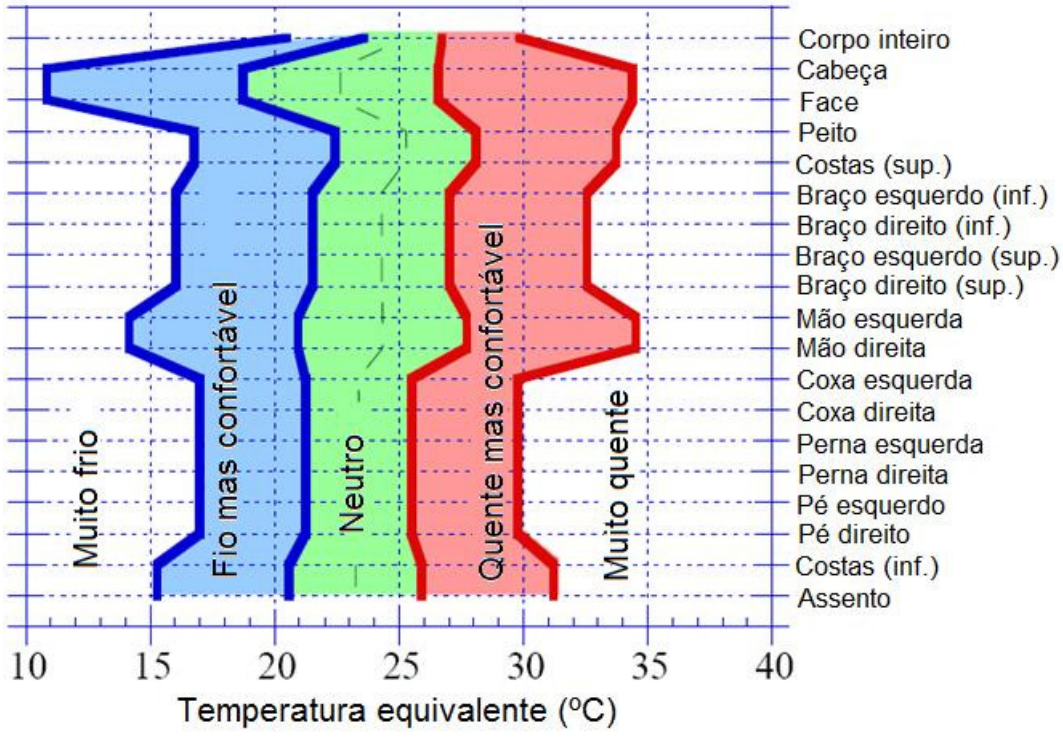
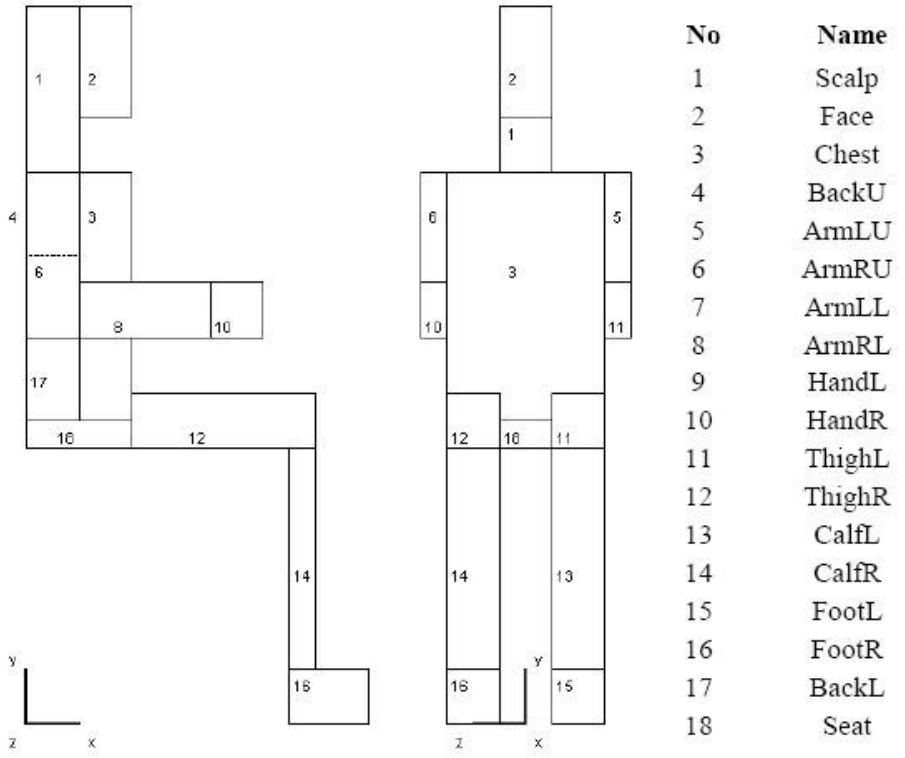


Figura 7.1 – Perfil ideal de temperaturas equivalentes e limites de tolerância para a condição de verão – Nilsson, 2004

7.1 Manequim numérico

Para avaliar as temperaturas equivalentes de um passageiro dentro da cabine de um ônibus rodoviário foi criado um manequim numérico dividido em dezoito segmentos (Nilsson, 2004), como mostrado na Figura 7.2.



No	Name
1	Scalp
2	Face
3	Chest
4	BackU
5	ArmLU
6	ArmRU
7	ArmLL
8	ArmRL
9	HandL
10	HandR
11	ThighL
12	ThighR
13	CalfL
14	CalfR
15	FootL
16	FootR
17	BackL
18	Seat

Figura 7.2 – Geometria do manequim numérico com dezoito segmentos

7.2 Metodologia utilizada no estudo

Para a avaliação de conforto térmico pela técnica das temperaturas equivalentes, o manequim 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 25ºC 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}: coeficiente de troca de calor de calibração [W/m².ºC]

t_{eq}: temperatura equivalente (25ºC) [ºC]

t_s: temperatura superficial do segmento [ºC]

q: 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, 34ºC) e o valor de temperatura equivalente do ambiente (t_{eq} - que, para a condição de verão, é igual a 25ºC).

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 34ºC) e os coeficientes de troca de calor de calibração de cada segmento encontrados anteriormente.

7.3 Calibração do manequim numérico

7.3.1 Geometria de calibração gerada

Para a calibração do manequim numérico, foi criada uma sala cúbica com dois metros de lado (2x2x2 metros). O manequim numérico foi posicionado no centro de um “tapete” (0,7x0,95 metros), o qual é posicionado a 0,5 metros da parede de trás e com a mesma distância das paredes laterais (Figura 7.3). O insuflamento é feito pelo piso (exceto pelo tapete) e o retorno do escoamento é feito pelo teto.

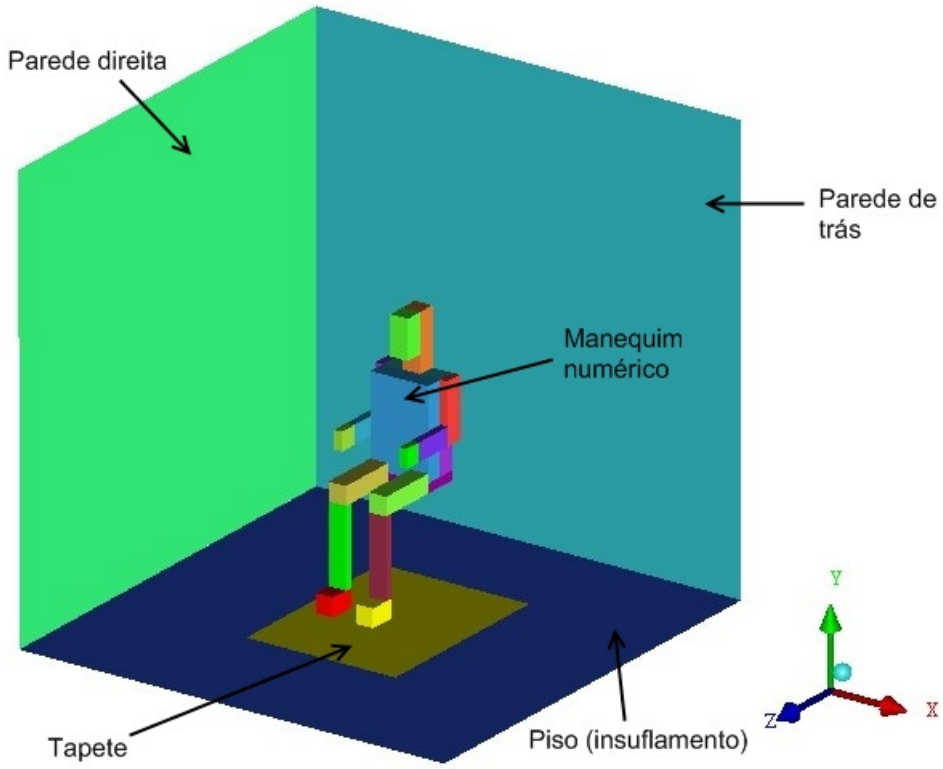


Figura 7.3 – Geometria da sala de calibração do manequim numérico

7.3.2 Malha de calibração gerada

A partir da geometria, foi gerada uma malha de aproximadamente 230.000 elementos, apresentada na Figura 7.4.

Para a simulação da malha gerada, foram utilizadas as condições de contorno apresentadas na Tabela 7.1. O modelo de turbulência adotado continua sendo k-ε padrão.

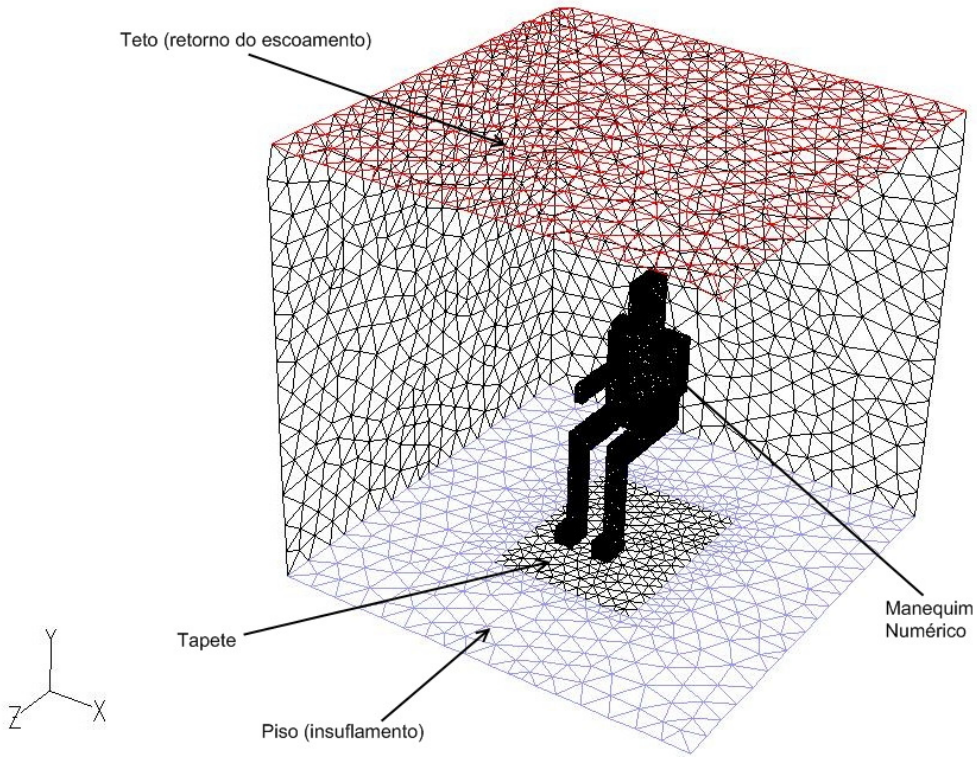


Figura 7.4 – Malha da sala de calibração do manequim numérico

Tabela 7.1 – Condições de contorno de calibração do manequim numérico

Superfície	Temperatura (ºC)	Velocidade (m/s)	Pressão relativa (Pa)
Inlet (grelha de insuflamento no piso)	25	0,05	-
Outlet (retorno pelo teto)	25	-	0
Paredes laterais	25	-	-
Piso	25	-	-
Manequim	34	-	-

O material fixado para todas as superfícies do manequim é o algodão, com as seguintes propriedades:

- Densidade: 80 kg/m³
- Calor específico: 1300 J/kg.K
- Condutividade térmica: 0,06 W/m.K

As espessuras utilizadas em cada superfície são apresentadas na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 - Espessuras das superfícies dos segmentos

Segmento do manequim	Espessura da superfície (m)
Braço direito (inf.)	0,00564
Braço direito (sup.)	0,00762
Braço esquerdo (inf.)	0,00576
Braço esquerdo (sup.)	0,00852
Costas (inf.)	0,01110
Costas (sup.)	0,00462
Perna direita	0,00534
Perna esquerda	0,00534
Peito	0,00780
Face	0,00054
Pé direito	0,00924
Pé esquerdo	0,01020
Mão direita	0,00000
Mão esquerda	0,00000
Cabeça	0,01068
Assento	0,00642
Coxa direita	0,00558
Coxa esquerda	0,00528

7.4 Resultados da calibração do manequim numérico

Com as condições de contorno apresentadas no item anterior, foi realizada a simulação da malha e os resultados dos fluxos de calor no manequim são apresentados nas Figuras 7.5 e 7.6.

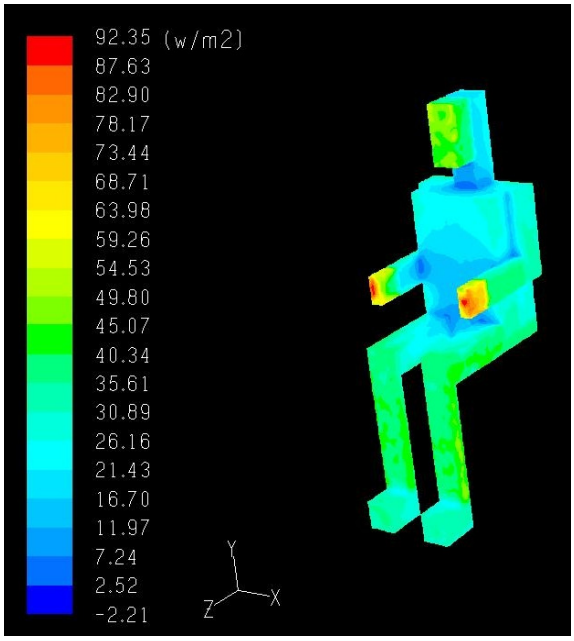


Figura 7.5 – Fluxo de calor de calibração dos segmentos

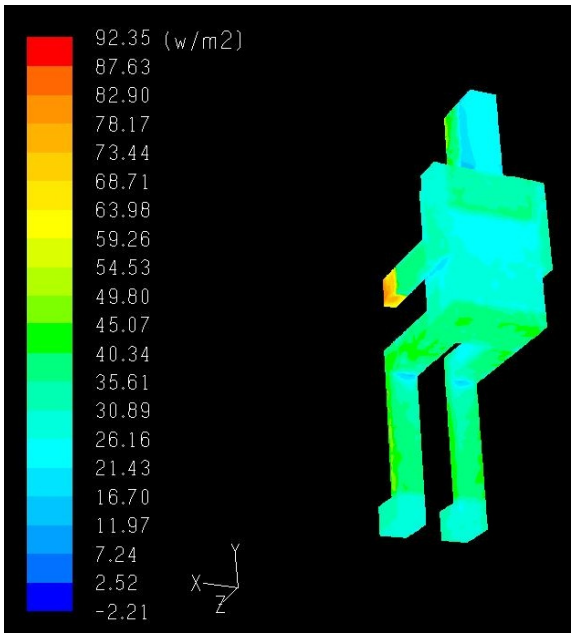


Figura 7.6 – Coeficientes de troca de calor de calibração

7.5 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 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 torna o processamento da simulação inviável.

7.5.1 Geometria da seção da cabine do ônibus rodoviário gerada

Como dito anteriormente, nesta etapa do estudo foi utilizada apenas uma seção da cabine. As dimensões principais foram mantidas (Figura 7.7) e foram inseridos dois manequins por poltrona, como apresentado na Figura 7.8.

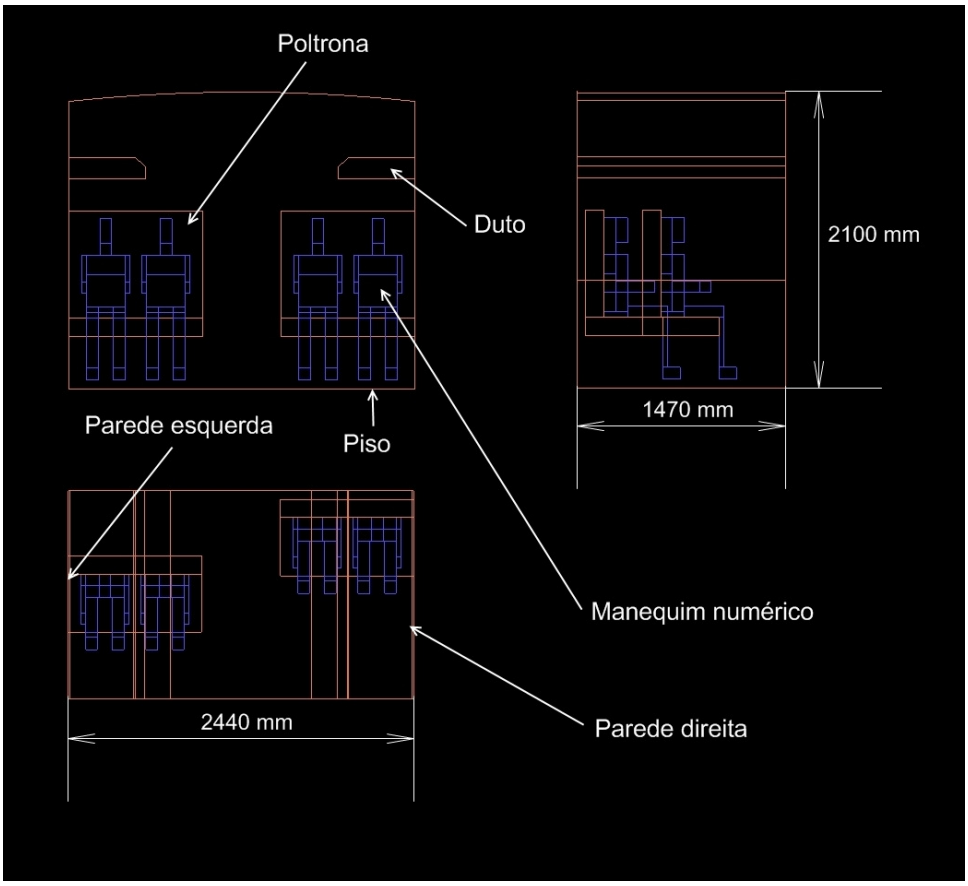


Figura 7.7 – Dimensões externas da seção da cabine do ônibus rodoviário

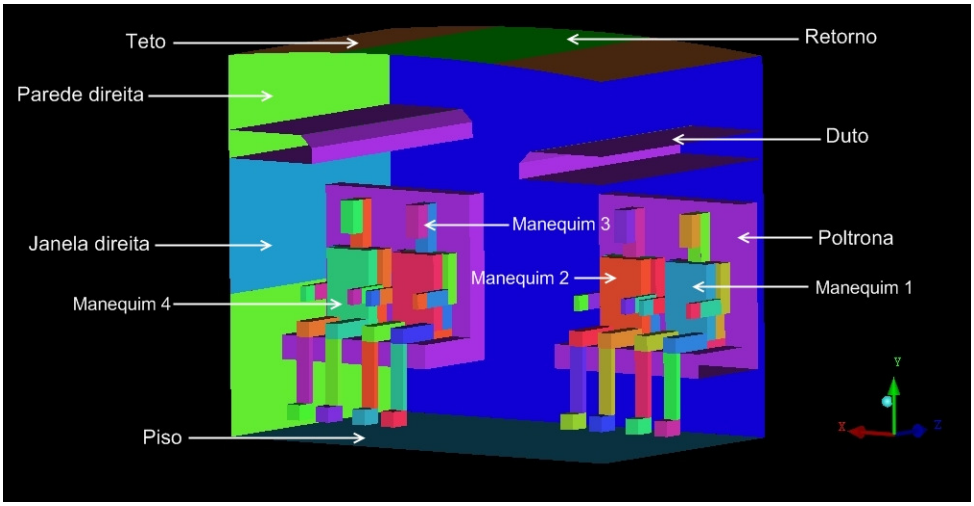


Figura 7.8 – Geometria da seção da cabine do ônibus rodoviário

7.5.2 Malha da seção da cabine do ônibus rodoviário gerada

A partir da geometria, foi gerada uma malha de aproximadamente 500.000 elementos, apresentada na Figura 7.9.

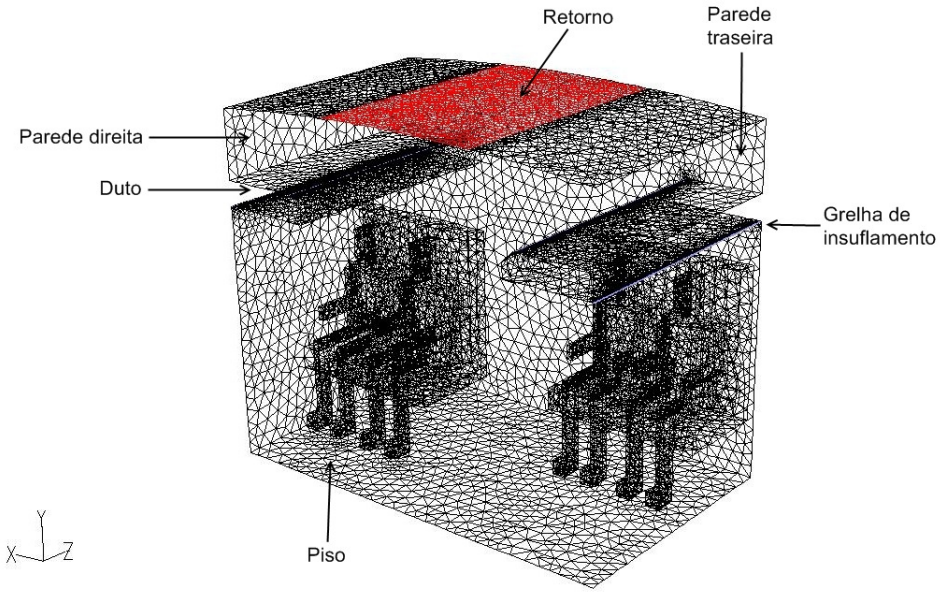


Figura 7.9 – Malha da seção da cabine do ônibus rodoviário

Para a simulação da malha gerada, foram utilizadas as condições de contorno apresentadas na Tabela 7.3. O modelo de turbulência adotado continua sendo k-ε padrão.

Tabela 7.3 – Condições de contorno da seção de ônibus rodoviário

Superfície	Temperatura (ºC)	Velocidade (m/s)	Radiação (W/m²)
Inlet direito superior (Insuflamento)	17,7	1,09	-
Inlet esquerdo superior (Insuflamento)	18,3	0,87	-
Inlet direito inferior (Insuflamento)	19,3	2,90	-
Inlet esquerdo inferior (Insuflamento)	19,3	2,47	-
Outlet (retorno)	22,0	-	-
Dutos	19,0	-	-
Paredes frontal e traseira	25,0	-	-
Paredes laterais	28,0	-	-
Vidros	32,0	-	-
Teto	34,9	-	-
Piso	24,5	-	-
Poltronas	25,2	-	-
Radiação Externa	-	-	850

As superfícies seccionais (frontal e traseira) não participam na radiação solar e foi fixado um valor de 25ºC (valor aproximado da temperatura da região onde elas foram criadas na cabine integral).

7.6 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 Figura 7.10.

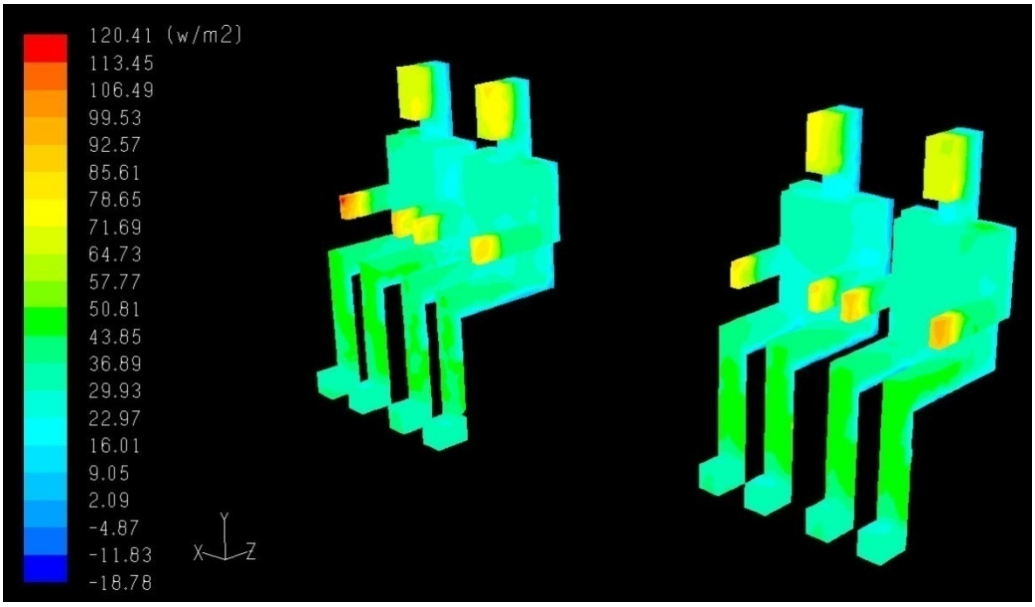


Figura 7.10 – Fluxo de calor dos segmentos dos manequins

7.7 Diagramas de Conforto Térmico

Para a geração dos diagramas de conforto térmico de cada manequim, foi utilizada a metodologia explicitada no item 7.2 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. As Tabelas 7.4, 7.5, 7.6 e 7.7 mostram os fluxos de calor de calibração e na cabine para cada segmento do manequim, para os manequins 1, 2, 3 e 4 (Figura 7.8), respectivamente.

Tabela 7.4 - Dados – Manequim 1

Segmento do manequim	Fluxo de calor de calibração (W/m²)	Fluxo de calor na cabine (W/m²)
Braço direito (inf.)	30,304	33,120
Braço direito (sup.)	30,319	26,149
Braço esquerdo (inf.)	30,145	40,605
Braço esquerdo (sup.)	28,687	30,662
Costas (inf.)	26,108	25,758
Costas (sup.)	31,409	37,842
Perna direita	39,122	45,492
Perna esquerda	39,051	45,408
Peito	20,635	32,332
Face	39,620	68,113
Pé direito	31,795	34,843
Pé esquerdo	29,923	32,506
Mão direita	60,221	77,909
Mão esquerda	62,080	88,517
Cabeça	19,490	24,949
Assento	37,035	28,868
Coxa direita	32,819	37,003
Coxa esquerda	33,317	35,708

Tabela 7.5 - Dados – Manequim 2

Segmento do manequim	Fluxo de calor de calibração (W/m²)	Fluxo de calor na cabine (W/m²)
Braço direito (inf.)	30,304	35,272
Braço direito (sup.)	30,319	34,698
Braço esquerdo (inf.)	30,145	29,531
Braço esquerdo (sup.)	28,687	24,803
Costas (inf.)	26,108	24,004
Costas (sup.)	31,409	28,834
Perna direita	39,122	45,203
Perna esquerda	39,051	46,379
Peito	20,635	29,301
Face	39,620	65,912
Pé direito	31,795	35,351
Pé esquerdo	29,923	32,978
Mão direita	60,221	72,420
Mão esquerda	62,080	70,655
Cabeça	19,490	21,397
Assento	37,035	29,831
Coxa direita	32,819	34,614
Coxa esquerda	33,317	37,218

Tabela 7.6 - Dados – Manequim 3

Segmento do manequim	Fluxo de calor de calibração (W/m²)	Fluxo de calor na cabine (W/m²)
Braço direito (inf.)	30,304	31,252
Braço direito (sup.)	30,319	23,763
Braço esquerdo (inf.)	30,145	36,170
Braço esquerdo (sup.)	28,687	30,775
Costas (inf.)	26,108	23,804
Costas (sup.)	31,409	40,120
Perna direita	39,122	43,723
Perna esquerda	39,051	43,515
Peito	20,635	30,240
Face	39,620	70,136
Pé direito	31,795	35,189
Pé esquerdo	29,923	32,575
Mão direita	60,221	71,081
Mão esquerda	62,080	73,213
Cabeça	19,490	26,562
Assento	37,035	32,632
Coxa direita	32,819	37,003
Coxa esquerda	33,317	35,708

Tabela 7.7 - Dados – Manequim 4

Segmento do manequim	Fluxo de calor de calibração (W/m²)	Fluxo de calor na cabine (W/m²)
Braço direito (inf.)	30,304	39,523
Braço direito (sup.)	30,319	30,439
Braço esquerdo (inf.)	30,145	34,267
Braço esquerdo (sup.)	28,687	27,039
Costas (inf.)	26,108	26,740
Costas (sup.)	31,409	41,343
Perna direita	39,122	43,980
Perna esquerda	39,051	44,420
Peito	20,635	32,318
Face	39,620	68,831
Pé direito	31,795	34,492
Pé esquerdo	29,923	32,960
Mão direita	60,221	90,351
Mão esquerda	62,080	81,812
Cabeça	19,490	24,243
Assento	37,035	31,994
Coxa direita	32,819	38,504
Coxa esquerda	33,317	40,026

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 nas Tabelas 7.8, 7.9, 7.10 e 7.11, para os manequins 1, 2, 3 e 4 (Figura 7.8), respectivamente. Os coeficientes globais de troca de calor de calibração são os mesmos para os quatro manequins, pois são obtidos a partir da geometria de calibração, onde só há um manequim.

Tabela 7.8 - Dados – Manequim 1

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

Tabela 7.9 - Dados – Manequim 2

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

Tabela 7.10 - Dados – Manequim 3

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

Tabela 7.11 - Dados – Manequim 4

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

7.7.1 Resultados

Os dados de temperatura equivalente foram plotados nos diagramas de conforto térmico (Figura 7.1), que são apresentados nas Figuras 7.11, 7.12, 7.13 e 7.14, para os manequins 1, 2, 3 e 4 (Figura 7.8), respectivamente.

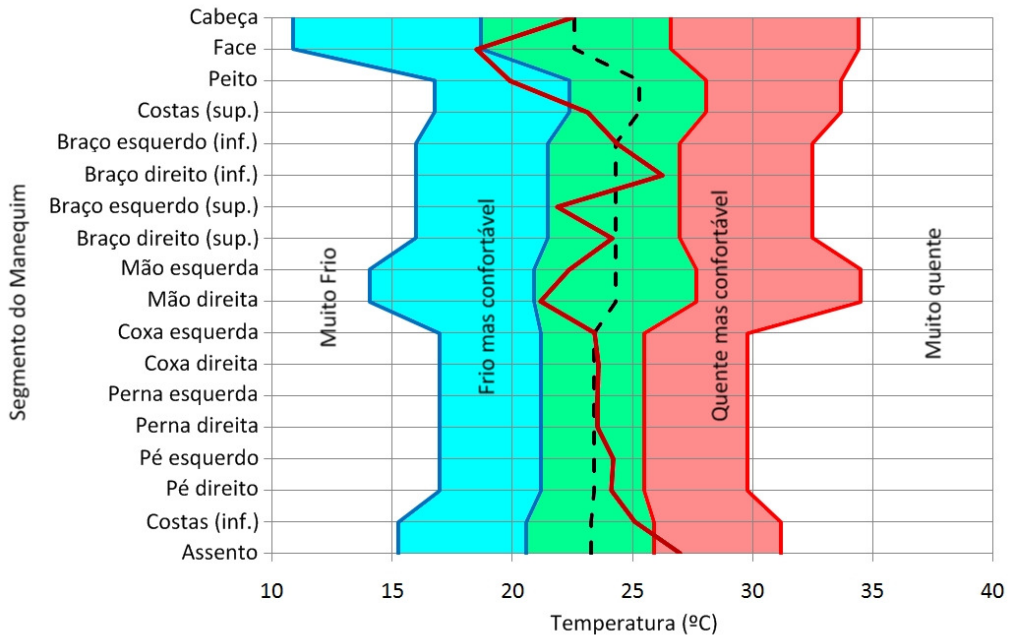


Figura 7.11 – Diagrama de conforto térmico – Manequim 1

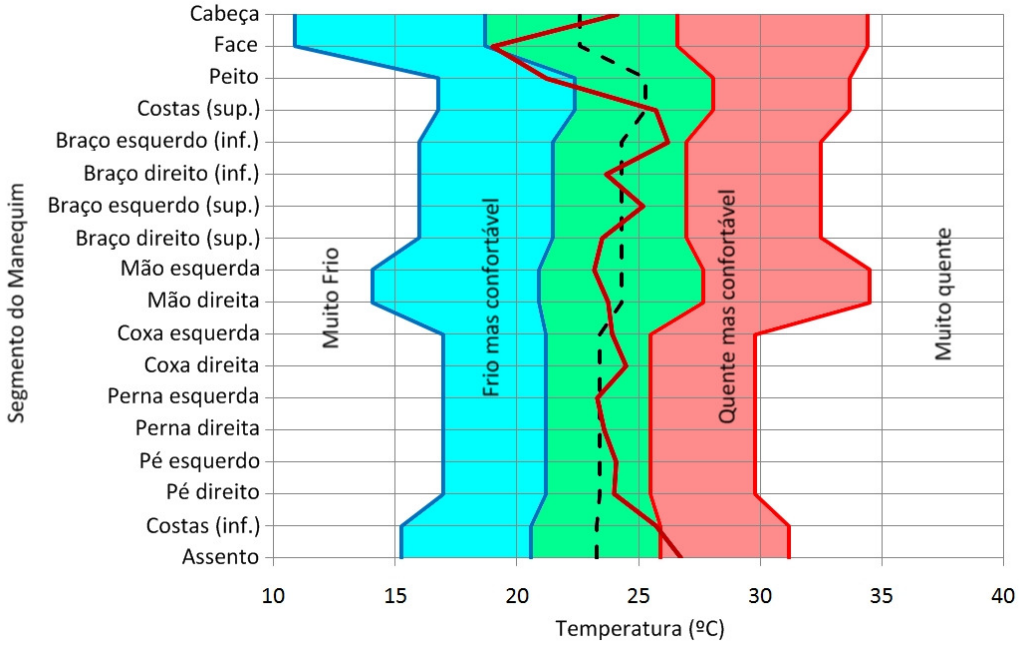


Figura 7.12 – Diagrama de conforto térmico – Manequim 2

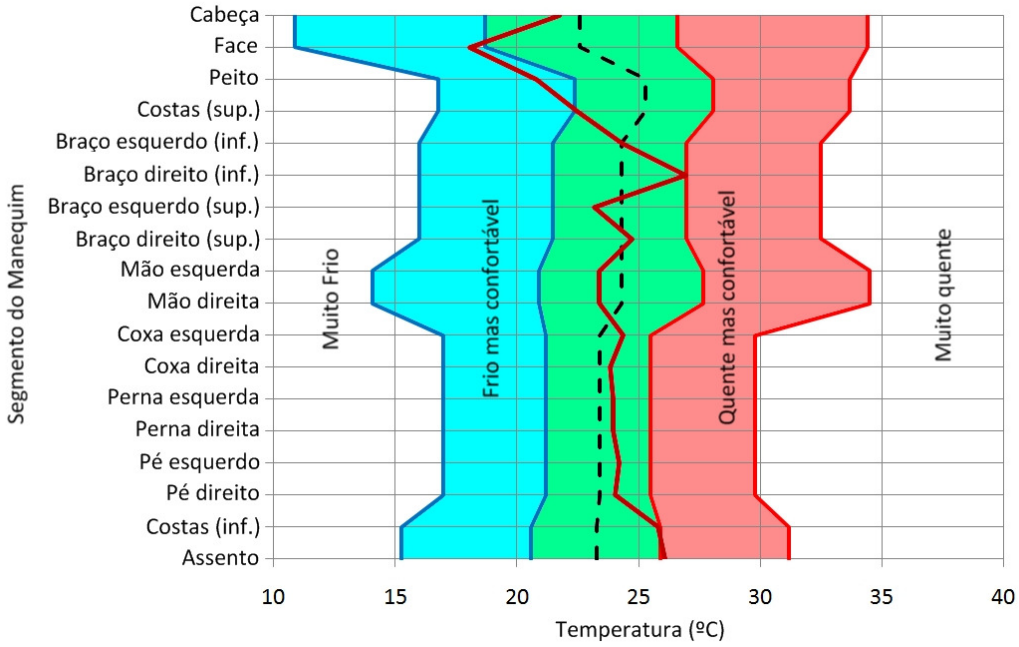


Figura 7.13 – Diagrama de conforto térmico – Manequim 3

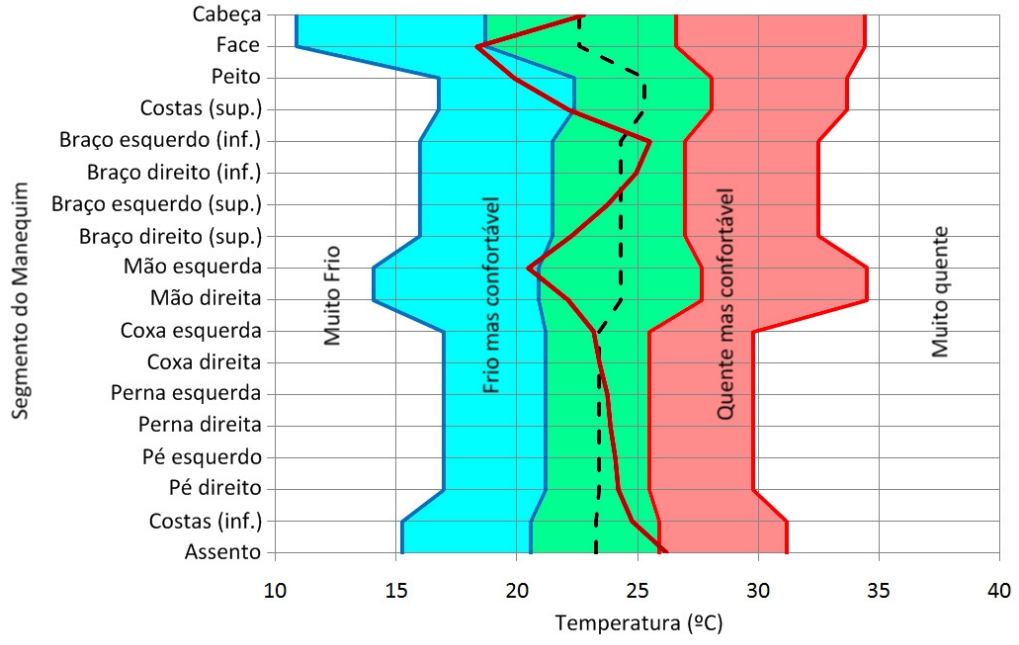


Figura 7.14 – Diagrama de conforto térmico – Manequim 4

8 COMENTÁRIOS FINAIS

Com o desenvolvimento deste trabalho foi possível familiarização com as ferramentas numéricas e realização de algumas simulações. Foi possível realizar aprendizado de geração de geometrias e malhas, bem como a realização de simulações numéricas com resultados consistentes.

Os resultados obtidos nas simulações se mostraram consistentes com os dados experimentais, validando o método utilizado.

O estudo de insuflamento diferenciado foi eficaz, pois mesmo com as condições externas inalteradas e com a possibilidade de diminuir os gastos de energia para resfriar o ar interno (podendo aumentar a temperatura de insuflamento), o resultado foi uma condição mais uniforme de temperaturas, tornando o sistema de insuflamento diferenciado mais eficiente que o encontrado no mercado.

Além de um campo de temperaturas mais uniforme, o campo de velocidades é mais homogêneo. Comparando as Figuras 5.4 e 6.9, pode-se notar que a formação de vórtices no segundo caso (insuflamento diferenciado) é consideravelmente menor, o que torna o campo de velocidades mais homogêneo. Isso se dá porque ao invés de uma única grelha de retorno (como pode ser observado na Figura 4.2), neste estudo são utilizadas duas grelhas de retorno (Figura 6.2).

Portanto, o sistema de insuflamento diferenciado proposto se mostrou mais eficiente que o sistema de insuflamento comum, com melhores campos de temperatura e de velocidade.

O estudo de conforto térmico através da técnica de temperaturas equivalentes se mostrou eficaz, apresentando resultados próximos de condições experimentadas em viagens em ônibus rodoviários. O estudo também mostra que os manequins, no geral, estão termicamente confortáveis, com leve sensação de frio na face e leve sensação de calor no assento.

Novamente, vale frisar que o estudo foi feito apenas em uma seção do ônibus devido ao grande número de elementos necessários para a simulação da cabine do ônibus de forma integral (com os manequins), o que tornaria inviável a simulação em um computador pessoal disponível no mercado atualmente.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE 55, 2004. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, New York.

BAO, T., SUN, Z., YUAN, X., CHEN, Y., WANG, K., DONG, X. (2005). Improvement and numerical analysis on the airflow distribution of bus air conditioning system. Journal of Xi'an Jiaotong University, v.39, n.1, p.61-65.

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.

GÜNTHER G., BOSBACH J, PENNECOT J., WAGNER C., LERCHE T., GORES I.(2004). Experimental and numerical simulations of idealized aircraft cabin flows. German Aerospace Center (DLR), Institute of Aerodynamics and Flow Technology, Bunsenstr and Germany Airbus Deutschland GmbH, Environmental Control Systems – German.

HAN T, HUANG L, KELLY S, HUIZENGA, C.; HUI, Z (2001) Virtual thermal comfort engineering. SAE 2001 World Congress, Detroit, USA, 2001-01-0588.

HOLMER, I.; NILSSON, H.; BOHM, M.; NOREN, O. (1995). Thermal aspects of vehicle comfort. Proc. 3rd Int. Conf. on Vehicle Comfort. Bolonha, ed Associazone Tecnica dell'Automobile (ATA). ATA Paper 91A1048.

IRGENS, S.; MELIKOV. A. (2004) Assessment of the thermal environment in an aircraft cabin. Proceedings of Roomvent 2004. Coimbra.

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.

LOOMANS, M.; JACOBS, P.; TISSOT, A.; MILES, S. (2004) In-flight measurement and simulation of aircraft environment. Proceedings of Roomvent 2004. Coimbra.

MUI, K. W., SHEK, K. W. (2005). Influence of in-tunnel environment to in-bus air quality and thermal condition in Hong Kong. Science of the total environment, v.347, n.1-3, p.163-174.

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.

PENNECOT, J.; BOSBACH, J.; WAGNER, C.; RAFAEL, M.; LERCHE, T.; REPP, S. (2004) Mixed convection in Idealized Airplane-Cabins: A Comparison Between Numerical Simulations and Particle Image Velocimetry Measurements. Proceedings of Rommvent 2004. Coimbra.

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.

STANCATO, F. ; FERREIRA, T.A., ARAÚJO, G. S., CRUZ, D. A., TRIBESS, A., PUSTELNIK, M. , SANTOS, L.C.C. (2006) Aircraft cabin thermal comfort evaluation using numerical manikins. Congresso SAE Brasil 2006. Society of Automotive Engineering. São Paulo.

WU, J., CHEN, Z. (1999). 3D numerical heat transfer analysis on heat insulation structure of moving air-conditioned bus. Qiche Gongcheng / Automotive Engineering, v.21, n.4, p.248-252.

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).