

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

MATHEUS FALCÃO LUCCI

**ANÁLISE NUMÉRICA DO SISTEMA *MULTIZONE* DE CONDICIONAMENTO  
DE AR AUTOMOTIVO**

Joinville

2022

MATHEUS FALCÃO LUCCI

**ANÁLISE NUMÉRICA DO SISTEMA *MULTIZONE* DE CONDICIONAMENTO  
DE AR AUTOMOTIVO**

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Automotiva do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador(a): Prof. Diogo Lôndero da Silva, Doutor. Eng.

Joinville

2022

MATHEUS FALCÃO LUCCI

**ANÁLISE NUMÉRICA DO SISTEMA *MULTIZONE* DE CONDICIONAMENTO  
DE AR AUTOMOTIVO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 24 de julho de 2022.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Diogo Lôndero da Silva, Doutor. Eng.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Talita Possamai, Doutora. Eng.  
Membro(a)  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Marcos Alves Rabelo Dr. Eng.  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a minha família, Márcia e Fernando, que me apoiaram e sempre me incentivaram durante toda a jornada acadêmica.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer ao Prof. Doutor Diogo Lôndero que me integrou ao laboratório de Refrigeração Veicular e fomentou em mim o desejo de sempre continuar aprendendo e assim, descobrindo uma área na engenharia em que eu tenha grande interesse. À minha família, Marcia Falcão Lorencini e Fernando Lorencini, que sempre estiveram ao meu lado, sem eles este trabalho não poderia ser realizado, serei eternamente grato a vocês. Aos meus amigos - Filipe Fischer, Giulia Rizzo, Pedro Sampaio, Cibele Mozer, Thálita Pereira, Vitória Nunes, e Willian Becker - que percorreram a trajetória acadêmica ao meu lado, fornecendo imenso suporte. Por fim, à Mestrando Damylle Donati pelos ensinamentos passados que auxiliaram na conclusão deste trabalho. Quando se está longe da família os amigos são seu elo mais próximo.

“Torna-te aquilo que és”  
(NIETZSCHE, 1908)

## RESUMO

Nas últimas décadas o número de automóveis de passeio equipados com sistemas de condicionamento de ar tem aumentado significativamente no Brasil. Atualmente, estima-se que 80% dos carros novos saiam de fábrica já equipados com este recurso. Os principais fatores que justificam essa tendência são o clima subtropical e tropical do Brasil e a redução dos custos de fabricação e montagem dos componentes. Em sistemas convencionais de condicionamento de ar automotivo, o controle de temperatura no interior da cabine é geralmente realizado com base na medição da temperatura do ar de retorno por apenas um sensor. No entanto, esta estratégia pode não agradar a todos os passageiros, uma vez que existem gradientes de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar no interior da cabine. Adicionalmente, o conforto térmico depende de fatores associados a cada indivíduo, tais como a taxa metabólica, idade, estado de saúde e vestimenta. Por este motivo, observa-se uma tendência na utilização de sistemas de condicionamento de ar do tipo *multizone*, que permitem diferentes regulagens de temperatura para diferentes regiões do veículo. Com base nesses fatos, este trabalho tem como objetivo, de início, apresentar o sistema *multizone* e seus princípios de funcionamento. Para tanto, uma extensa revisão bibliográfica será realizada sobre o assunto para compreender as suas principais características construtivas e identificar as diferenças e similaridades existentes entre o sistema convencional de condicionamento de ar e o do tipo *multizone*. Posteriormente, será desenvolvida uma geometria simplificada do sistema de dutos para estimar as vazões mássicas que saem nos difusores de ar no interior da cabine do veículo, em seguida será feita a análise numérica dos campos de velocidade e temperaturas no interior do automóvel. Os resultados deste trabalho serão úteis para auxiliar no projeto de sistemas *multizone* e avaliar o seu desempenho energético. Por meio deste estudo foi obtido uma variação de 69% de velocidade de ar e de 1,5 °C de temperatura entre o banco traseiro e o banco do motorista do sistema convencional e 2,5 para o *Multizone*. Todos os estudos feitos no trabalho em questão foram realizados no Laboratório de Refrigeração Veicular (ReVe).

**Palavras-chave:** Condicionamento de ar automotivo. Sistema *multizone*.  
Análise Numérica.

## ABSTRACT

In the last decades, the number of equipment vehicles organized with air conditioning systems has increased significantly in Brazil. Currently, it is estimated that 80% of new cars are dressed as tools already equipped with this feature. The main factors that justify this trend are the subtropical and tropical climate in Brazil and the reduction in the manufacturing and assembly costs of components. In conventional automotive air conditioning systems, in-cab temperature control is normally performed based on the return air temperature setting by a single sensor. However, this strategy may not suit all passengers, as there are temperature, relative humidity and air velocity gradients inside the cabin. Additionally, thermal comfort depends on factors associated with each individual, such as metabolic rate, age, health status and clothing. For this reason, a temperature trend is observed in the use of Multizone conditioning systems, which allow different settings for different regions of the vehicle. Based on these facts, this work aims, at first, to present the multizone system and its working principles. Therefore, an extensive literature review will be carried out on the subject to understand the main constructive characteristics and identify the differences and similarities between the conventional air conditioning system and the multizone system. Subsequently, a simplified geometry of the duct system will be developed to estimate the mass flows that leave the diffusers inside the vehicle cabin, followed by a numerical analysis of the velocity and temperature fields inside the car. The results of this work will be useful to assist in the design of multizone systems and to evaluate their energy performance. For this study, it was achieved a difference of 69% for the air velocity and 1,5 °C for the temperature between the front seat and the back seat between for the conventional and 2,5 °C for the Mutizone case. All studies in the work in question were carried out at the Vehicular Refrigeration Laboratory (ReVe).

**Keywords:** Air conditioning. Multizone. Numerical Analysis.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Sistema de Aquecimento Veicular.....   | 19 |
| Figura 2 - Sistema de refrigeração .....  | 21 |
| Figura 3 - Fatores de conforto térmico.....   | 23 |
| Figura 4 – Montagem de um sistema distribuição de condicionamento de ar veicular .....                        | 25 |
| Figura 5 - HVAC para o sistema <i>multizone</i> .....   | 26 |
| Figura 6 - Sistema <i>dual-zone</i> .....   | 26 |
| Figura 7 - Câmara mistura de ar.....  | 27 |
| Figura 8 - Ilustração esquemática da metodologia de cálculo .....   | 28 |
| Figura 9 - Perfil com flutuações e média das propriedades.....  | 30 |
| Figura 10 - Hierarquia dos modelos atuais de turbulência.....   | 31 |
| Figura 11 - Subcamada viscosa .....   | 33 |
| Figura 12 - Representação da malha empregada na validação para a comparação com os resultados analíticos..... | 34 |
| Figura 13 - Representação Esquemática do Sistema de Distribuição de Ar  | 35 |
| Figura 14 - Localização dos <i>inlets</i> e <i>outlets</i> .....  | 36 |
| Figura 15 - Dados de variação da pressão empírico e CFD.....  | 39 |
| Figura 16 - Velocidade do fluido na saída dos difusores .....   | 42 |
| Figura 17 - Velocidade do fluido no interior da cabine do automóvel .....                                     | 42 |
| Figura 18 - Vista superior do campo de velocidade do sistema de distribuição de ar .....                      | 43 |
| Figura 19 - Vista direita do campo de velocidade do sistema de distribuição de ar .....                       | 43 |
| Figura 20 - Velocidade versus número de elementos I.....  | 45 |
| Figura 21 - Velocidade versus velocidade II .....   | 46 |
| Figura 22 – Vista isométrica da malha escolhida para a análise numérica ..                                    | 46 |
| Figura 23 - Campo de velocidade sistema convencional plano central I .....                                    | 47 |
| Figura 24 - Campo de velocidade sistema convencional passageiro I .....                                       | 48 |
| Figura 25 - Campo de velocidade sistema convencional motorista I.....   | 49 |
| Figura 26 - Campo de velocidade sistema convencional frontal I.....   | 50 |
| Figura 27 - Campo de velocidade sistema convencional superior I.....  | 50 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 28 - Linhas para captação de dados .....  | 51 |
| Figura 29 – Velocidade sistema convencional versus comprimento adimensional $X$ .....                    | 51 |
| Figura 30 – Velocidade sistema convencional versus comprimento adimensional $Z$ .....                    | 52 |
| Figura 31 - Campo de temperatura sistema convencional plano central I ....                               | 53 |
| Figura 32 - Campo de temperatura sistema convencional plano superior I ..                                | 53 |
| Figura 33 - Campo de temperatura sistema convencional motorista I .....                                  | 54 |
| Figura 34 - Campo de temperatura sistema convencional passageiro I .....                                 | 54 |
| Figura 35 – Temperatura sistema convencional versus $X$ .....  | 55 |
| Figura 36 - Temperatura sistema convencional versus $\bar{Z}$ .....                                      | 56 |
| Figura 37 - Campo de velocidade sistema <i>multizone</i> motorista II .....                              | 57 |
| Figura 38 – Velocidade sistema <i>multizone</i> versus $X$ .....   | 58 |
| Figura 39 – Velocidade sistema <i>multizone</i> versus $Z$ .....   | 58 |
| Figura 40 - Campo de temperatura sistema <i>multizone</i> passageiro II .....                            | 59 |
| Figura 41 - Campo de temperatura sistema <i>multizone</i> motorista II .....                             | 60 |
| Figura 42 - Campo de temperatura sistema <i>multizone</i> plano superior II .....                        | 60 |
| Figura 43 - Temperaturas sistema <i>multizone</i> versus $X$ .....                                       | 61 |
| Figura 44 – Temperatura sistema <i>multizone</i> versus $Z$ .....  | 61 |
| Figura 45 - Velocidades médias sistema convencional e <i>multizone</i> .....                             | 62 |
| Figura 46 - Diferença de velocidade em porcentagem do sistema convencional para o <i>Multizone</i> ..... | 63 |
| Figura 47 - Temperaturas médias sistema convencional e <i>Multizone</i> .....                            | 64 |
| Figura 48 - Diferença de temperatura entre o sistema convencional e o <i>Multizone</i> .....             | 65 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Configuração da malha do duto liso .....                             | 33 |
| Tabela 2 - Configuração malha do sistema de distribuição de ar .....            | 35 |
| Tabela 3 - Condições operacionais I – Sistema convencional.....                 | 37 |
| Tabela 4 - Condições operacionais II - Sistema convencional .....               | 37 |
| Tabela 5 - Condições operacionais III – Sistema <i>multizone</i> .....          | 38 |
| Tabela 6- Condições operacionais IV - Sistema <i>multizone</i> .....            | 38 |
| Tabela 7 – Vazão mássica e velocidade média para sistema <i>Multizone</i> ..... | 41 |
| Tabela 8 - Vazão mássica e velocidade média para sistema convencional .         | 41 |
| Tabela 9 – Dados das malhas .....   | 44 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

HVAC – Sistema de Aquecimento Ventilação e Condicionamento de Ar

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

ReVe – Laboratório de Refrigeração Veicular

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

DNS – *Direct Numerical Simulation*

RANS – *Reynolds Average Numerical Simulation*

LES – *Large Eddy Simulation*

## LISTA DE SÍMBOLOS

|             |   |
|-------------|---|
| $Re$        | Número de Reynolds  |
| $Re_{ctr}$  | Número de Reynolds Crítico  |
| $D$         | Diâmetro [ $m$ ]  |
| $\nu$       | Viscosidade cinemática [ $m^2/s$ ]  |
| $\vartheta$ | Velocidade [ $m/s$ ]  |
| $\rho$      | Densidade [ $kg/m^3$ ]  |
| $f$         | Fator de Atrito   |
| $\Delta p$  | Varição de Pressão [ $Pa$ ]   |
| $\dot{m}$   | Vazão Mássica [ $kg/s$ ]  |
| $e/D$       | Rugosidade Relativa   |
| $L$         | Comprimento [ $m$ ]   |
| $x$         | Comprimento na direção $x$ [ $m$ ]  |
| $\bar{x}$   | Comprimento característico na direção $x$ [ $m$ ]                                   |
| $\bar{X}$   | Comprimento adimensional na direção $x$   |
| $z$         | Comprimento na direção $z$ [ $m$ ]  |
| $\bar{z}$   | Comprimento característico na direção $z$ [ $m$ ]                                   |
| $\bar{Z}$   | Comprimento adimensional na direção $z$   |
| $\rho$      | Densidade do fluido;  |
| $t$         | Variável tempo;   |
| $x_i, x_j$  | Coordenadas espaciais do sistema cartesiano;  |
| $u_i, u_j$  | Componentes de velocidade vetor $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z) = (u, v, z)$ ;           |
| $P_1$       | Força de superfície (pressão);  |
| $\mu$       | Viscosidade do fluido;  |
| $S^{u_i}$   | Termo fonte relativo a cada componente de velocidade;                               |
| $T$         | Temperatura do fluido;  |
| $k$         | Condutividade térmica do fluido;  |
| $c_p$       | Calor específico do fluido (pressão constante);                                     |
| $S^T$       | Termo fonte relativo ao balanço de energia.   |
| $Y+$        | Número adimensional que informa o tamanho da primeira célula na definição da malha. |



## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>16</b> |
| <b>1. OBJETIVOS</b> .....  | <b>17</b> |
| 1.1. OBJETIVO GERAL .....  | 17        |
| <b>1.1.2. Objetivos Específicos</b> .....                          | <b>17</b> |
| <b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....                              | <b>18</b> |
| 2.1. SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR VEICULAR .....               | 18        |
| <b>2.1.1. Sistema de aquecimento de ar</b> .....                   | <b>18</b> |
| <b>2.1.2. Sistema de arrefecimento</b> .....                       | <b>18</b> |
| 2.2. SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR .....                        | 19        |
| <b>2.2.1. Compressor</b> .....                                     | <b>19</b> |
| <b>2.2.2. Condensador</b> .....                                    | <b>20</b> |
| <b>2.2.3. Válvula de expansão</b> .....                            | <b>20</b> |
| <b>2.2.4. Evaporador</b> .....                                     | <b>20</b> |
| 2.3. FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO .....                | 21        |
| 2.4. SISTEMA <i>MULTIZONE</i> .....                                | 22        |
| <b>2.4.1. Funcionamento do sistema <i>multizone</i></b> .....      | <b>24</b> |
| <b>3. METODOLOGIA</b> .....  | <b>28</b> |
| 3.1. MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS .....                              | 29        |
| <b>3.1.2. Modelos de turbulência</b> .....                         | <b>29</b> |
| 3.2 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL .....                      | 32        |
| 3.3 DUTOS DE DISTRIBUIÇÃO DO FLUIDO .....                          | 34        |
| 3.4 GEOMETRIA DO VEÍCULO .....                                     | 35        |
| 3.5 CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO .....                                    | 37        |
| <b>4. RESULTADOS</b> .....   | <b>39</b> |
| 4.1 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL .....                      | 39        |
| 4.2 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DO FLUIDO .....                        | 40        |
| 4.3. ANÁLISE DE MALHA .....  | 44        |
| 4.4. ANÁLISE EM DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL .....           | 47        |
| 4.5. ANÁLISE DE DADOS .....  | 47        |
| <b>4.5.1. Condição operacional I – Sistema convencional</b> .....  | <b>47</b> |
| <b>4.5.2. Condição operacional II – Sistema convencional</b> ..... | <b>52</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4.5.3. Condição operacional III – Sistema <i>multizone</i></b> .....     | <b>56</b> |
| <b>4.5.4. Condição operacional IV - Sistema <i>Multizone</i></b> .....      | <b>59</b> |
| <b>5. CONCLUSÕES</b> .....  | <b>66</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA</b> .....   | <b>68</b> |
| <b>ANEXO A – DESENHO TÉCNICO DA GEOMETRIA DO DUTO DE REFRIGERAÇÃO</b> ..... | <b>70</b> |
| <b>ANEXO B – GEOMETRIA REFERÊNCIA PARA AUDI Q7</b> .....                    | <b>71</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

No início da era dos transportes motorizados, carros não possuíam cabines fechadas, isso significa que os passageiros precisavam adequar suas roupas para a situação climática quando desejavam sair com seus automóveis. A construção de veículos com cabine fechada pareceu óbvia para suceder os de aberta devido às necessidades dos passageiros. Esta mesma necessidade desdobrou-se para o sistema de ventilação, aquecimento e refrigeração. Os primeiros sistemas de aquecimento veicular eram feitos pelo calor gerado pela queima do próprio combustível do veículo ou colocando dentro do carro tijolos quentes. A ventilação se dava pela abertura das janelas do automóvel e, no caso de alguns veículos como o Fusca, por exemplo, de pequenas janelas dianteiras para direcionamento do ar para o piloto e passageiro. Todas estas tecnologias foram superadas com a criação dos trocadores de calor, que usavam ou o calor do sistema de exaustão ou a água do sistema de arrefecimento como fonte para aquecer o interior do veículo. (STOECKER e JONES, 1985)

O sistema de condicionamento de ar passou por um longo período de desenvolvimento até ser vendido em grande escala para as companhias automotivas. Os primeiros modelos de ciclo fechado foram feitos em torno de 1939, estes continham um condensador, compressor e secador – este sistema é chamado de fechado pelo fato de o fluido refrigerante percorrer um caminho fechado por estes elementos. Os problemas deste sistema eram que ele operava continuamente e para interromper o seu funcionamento era necessário a retirada de uma correia que se localizava no porta-malas do veículo. Uma evolução desse sistema foi utilizada em alguns modelos Cadillac como uma diferente proposta para refrigeração, desta vez localizado no banco traseiro do carro. Estes exemplares, contudo, foram feitos em pequena escala. O sistema de condicionamento de ar foi somente vendido em grande escala após a Segunda Guerra Mundial, em 1945-1955 por Nash-Kelvinator (DALY, 2006).

Atualmente, os números mostram que em 2021 o Brasil vendeu cerca de 1.974.431 carros, como informou Moreno (2022) no jornal CNN. Deste total de vendas, apenas dois modelos, Fiat Mobi e Renault Kwid, não possuem ar condicionado de fábrica conforme Redação (2019) do Jornal Estadão. Podemos

atrelar estes números a vários fatores, um deles sendo o conforto térmico, levando em conta que o Brasil está localizado, na maior porção de seu território, em uma zona de clima tropical. Neste ensejo o *multizone* tem o intuito de criar microclimas reguláveis dentro do veículo por meio do sistema de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar (HVAC). Por meio deste trabalho obteve-se que houve uma variação na velocidade do ar no interior da cabine em torno de 69% em comparação entre o sistema convencional e o *Multizone* e a temperatura atingiu em média uma variação entre o motorista e os passageiros traseiros de 10,7% e entre o passageiro dianteiro e os traseiros por volta de 5% o que atende a cada passageiro em questão.

## **1. OBJETIVOS**

Para analisar a problemática do sistema *multizone*, propõe-se os seguintes objetivos.

### **1.1. OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral do presente trabalho é realizar uma análise numérica do sistema de condicionamento de ar *multizone* e comparar os resultados com o sistema convencional.

#### **1.1.2. Objetivos Específicos**

Para a viabilidade deste trabalho os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Definir os parâmetros na qual a simulação é baseada;
- Criação da geometria da cabine do automóvel, por meio de programa computacional, e gerar sua respectiva malha;
- Analisar temperatura do fluido (ar) em pontos específicos do veículo mediante simulações e pela geometria criada por intermédio do *software* especificado;
- Analisar a distribuição do fluido (ar) no interior do veículo;
- Analisar as diferentes temperaturas no interior do automóvel devido ao sistema *multizone* de condicionamento de ar.

- Comparar a distribuição de temperatura do ar entre o sistema *multizone* e o sistema convencional.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo são apresentados os fundamentos relacionados ao funcionamento do sistema de condicionamento de ar e as principais características de um sistema *multizone*. Este capítulo serve de base para o entendimento do tópico subsequente.

### **2.1. SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR VEICULAR**

O sistema de condicionamento de ar é composto pelos subsistemas de aquecimento e resfriamento de ar que serão detalhados a seguir.

#### **2.1.1. Sistema de aquecimento de ar**

O sistema de aquecimento do veículo utiliza o calor gerado pela combustão do motor para aquecer o ar e este ser direcionado para dentro da cabine.

#### **2.1.2. Sistema de arrefecimento**

Os componentes deste sistema são, bomba de água, ventilador, radiador, reservatório do refrigerante, termostato, núcleo de aquecimento e válvula de troca de calor.

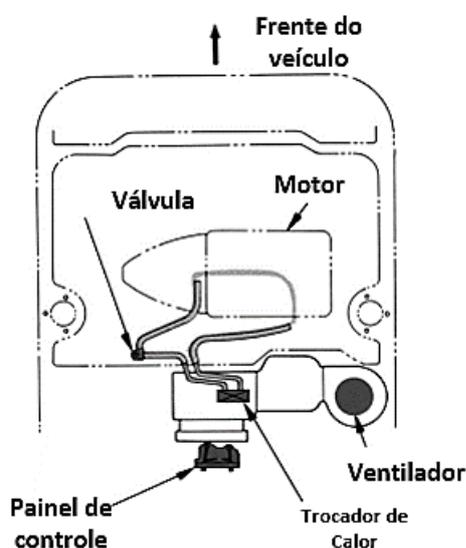
O processo inicia quando se dá a ignição do carro, com isto o motor começa seu ciclo de combustão. Devido à combustão o bloco do motor se aquece e por este motivo é necessário à utilização de um fluido refrigerante para manter a temperatura do motor na temperatura de serviço.

Com o acionamento do motor, a bomba de água que está conectada a ele começa a funcionar e bombeia o fluido refrigerante, que está na parte inferior do tanque do radiador, para o bloco do motor. O fluido, por sua vez, passa pelo motor e

realiza uma troca térmica, diminuindo assim a temperatura do motor. Este modelo simplificado pode ser visto na Figura 1.

Quando o passageiro seleciona a função de ar quente do veículo a válvula de troca de calor é aberta, deixando o fluido refrigerante passar. Este fluido em alta temperatura entra no trocador de calor e resfria-se. O calor perdido pelo fluido é transferido para o ar e em seguida o ventilador succiona este ar para dentro do veículo, como mostra a Figura 1. (SCOCCIA, 1999).

Figura 1 - Sistema de Aquecimento Veicular



Fonte: Adaptado de Daly, 2006.

## 2.2. SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR

### 2.2.1. Compressor

A função do compressor é comprimir e circular o vapor do líquido refrigerante superaquecido em torno de um sistema de circuito fechado onde a presença de qualquer líquido ou sujeira danificará o compressor. Os compressores variam em desenho, tamanho, peso, velocidade de rotação e deslocamento. Eles também podem ser mecanicamente ou eletricamente acionados. O compressor usa 80% da energia necessária para operar um sistema de ar-condicionado. Isso significa que o tipo de compressor usado no sistema determinará a eficiência geral do sistema. Isto é particularmente importante para a economia de combustível e a poluição.

### **2.2.2. Condensador**

A função do condensador é atuar como um trocador de calor para dissipar a energia térmica contida no líquido refrigerante. O vapor superaquecido entra pela parte superior e o fluido refrigerante subresfriado deixa-o pela parte inferior. O condensador deve ser altamente eficiente, porém o mais compacto possível. Quando o fluido refrigerante sai do compressor sua pressão e temperatura são altas, devido à compressão. Quando este entra no condensador sua temperatura diminui – devido à troca térmica - até atingir o ponto de líquido subresfriado para assegurar que não entre vapor na válvula de expansão. Em relação à posição, o condensador se localiza na parte frontal do veículo, onde um alto fluxo de ar atravessa sua superfície aletada, auxiliando na remoção de calor. (DALY, 2006)

### **2.2.3. Válvula de expansão**

A função da válvula de expansão é de controlar a quantidade de volume de fluido refrigerante que passa no interior do condensador para o evaporador, assim regulando a capacidade de refrigeração do sistema. (MCDOWALL, 2007)

### **2.2.4. Evaporador**

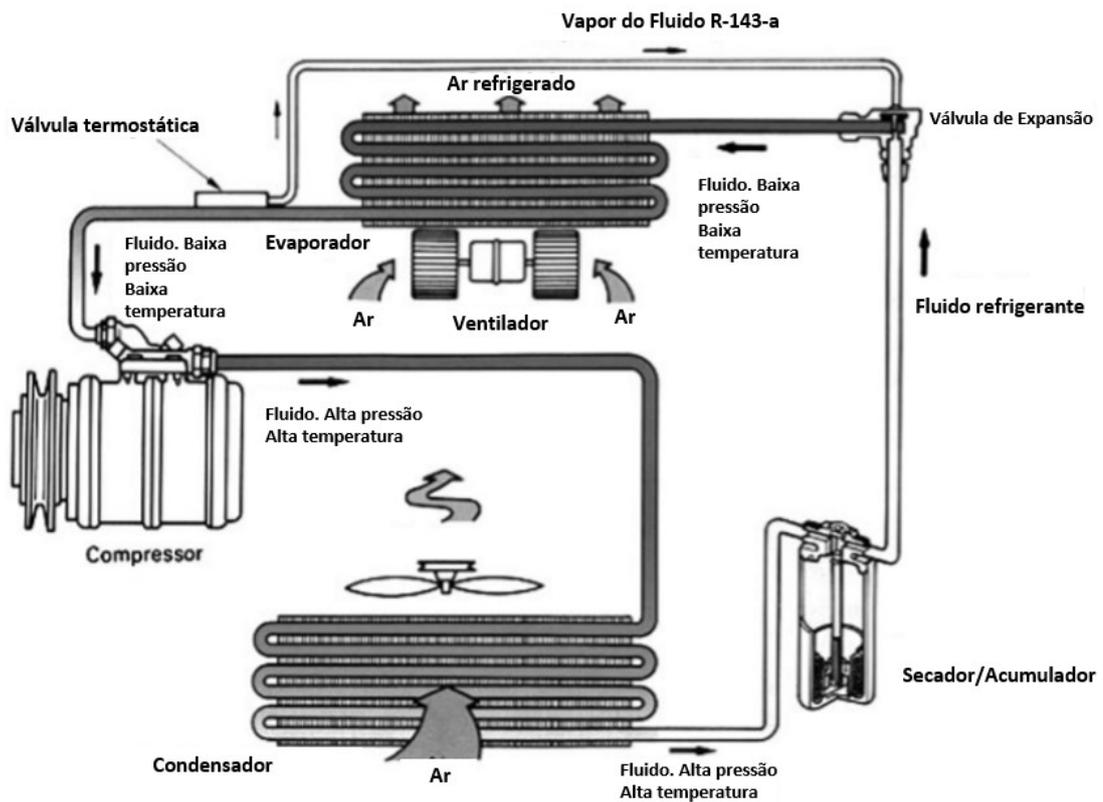
O evaporador é muito semelhante em construção a um condensador. Um evaporador terá uma serpentina, tubo e barbatana ou construção do tipo paralelo. A função de um evaporador é fornecer uma grande área de superfície para permitir que o ar externo geralmente úmido flua por meio dele liberando sua energia térmica para o refrigerante dentro. O refrigerante a esta altura terá sofrido uma grande queda de pressão e temperatura provenientes da válvula de expansão / orifício fixo. Como a temperatura do evaporador está baixa em relação ao ar ambiente, há uma troca de calor entre eles, havendo condensação nas paredes externas do evaporador e resfriamento do ar exterior que é direcionado ao interior da cabine por meio de um ventilador, neste ponto o fluido refrigerante atinge o ponto de saturação. O refrigerante ainda pode absorver uma pequena quantidade de energia térmica. Este fará isso e ficará superaquecido e assim fluirá para o compressor. As gotículas de água que se condensaram na superfície do evaporador aprisionam a sujeira e partículas estranhas, isto auxilia na higienização do ar exterior. O teor de umidade

também é reduzido para que o ar mais limpo seja distribuído para o interior do veículo. Isso melhora o nível de conforto, especialmente em condições de alta umidade e permite que a transpiração evapore mais rapidamente. O ar desumidificado é muito eficaz para o desembaçamento de janelas se houver um grande número de passageiros no veículo ou se o clima estiver úmido. (STOECKER e JONES, 1985)

### 2.3. FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

A seguir a Figura 2 exemplifica visualmente o sistema de refrigeração de um veículo.

Figura 2 - Sistema de refrigeração



Fonte: Adaptado de Daly, 2006.

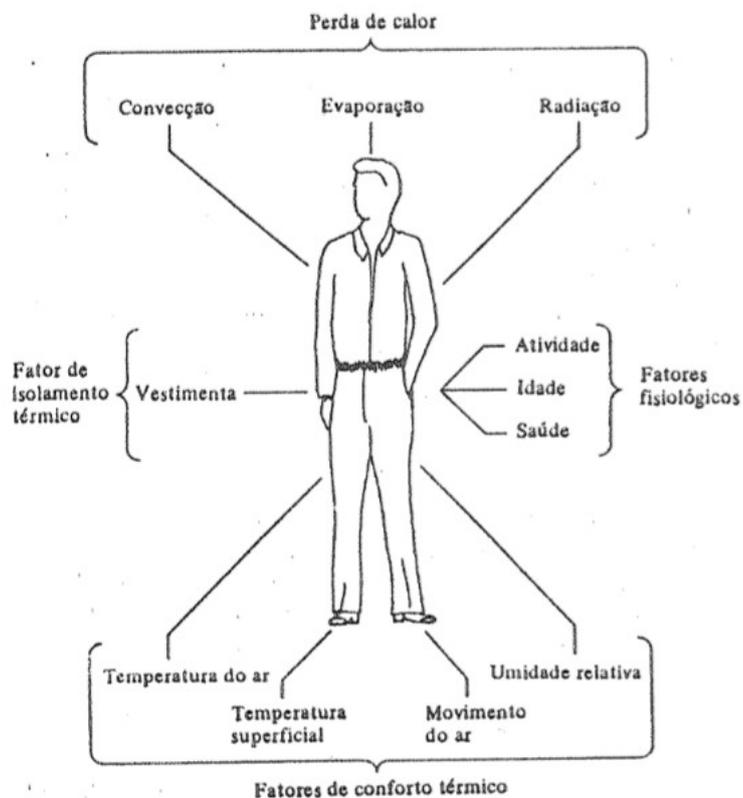
## 2.4. SISTEMA *MULTIZONE*

Segundo McDowall (2007), zona é um local no interior do automóvel no qual o HVAC é controlado por somente um sensor. Em cada zona pode-se aquecer ou resfriar conforme a necessidade dos ocupantes. Devido a diferenças fisiológicas que naturalmente existem nos ocupantes de um veículo torna-se difícil atingir o conforto térmico individual com um único ajuste de velocidade e temperatura do ar (STOECKER e JONES, 1985). Por este motivo, observa-se uma tendência de mercado na direção de sistemas de condicionamento de ar do tipo *multizone* que permitem o controle localizado da temperatura e fluxo de ar dentro da cabine do automóvel (DALY, 2006).

Por exemplo, o motorista pode, por algum motivo desejar refrigeração, entretanto, o passageiro sente-se com frio necessitando aquecimento. Ambos possuem parâmetros de ajuste de temperatura e ventilação para sua zona.

Segundo Stoecker (1985), existem fatores fisiológicos para que haja uma temperatura agradável para o ser humano, alguns destes fatores são: idade e saúde; fatores de isolamento térmico como as roupas e as condições de conforto térmico: temperatura do ar, temperatura superficial, movimento do ar e umidade relativa. Dentre estes o sistema *multizone* consegue controlar apenas a temperatura, circulação e umidade relativa do ar. Então é necessária a compreensão de que a complexidade do conforto térmico para o ser humano abrange um leque de vários fatores e o sistema de refrigeração não consegue satisfazer todos, alguns destes aspectos podem ser vistos na Figura 3.

Figura 3 - Fatores de conforto térmico



Fonte: (STOECKER e JONES, 1985)

O sistema consiste na regulação personalizada da temperatura no interior do veículo, ar quente para um passageiro e refrigeração para outro, por exemplo. Um dos pontos onde o *multizone* gera uma economia de energia se dá na questão de que a incidência de sol não é igual em toda a superfície do automóvel, devido a isso, a temperatura não será a mesma. Com isto, o sistema oferece uma configuração de temperatura para cada passageiro do veículo e oferece também a diminuição no fluxo de ar conforme o número de passageiros no mesmo. Este sistema não foi concebido somente pela economia de energia que traz, mas também pela demanda de conforto aos passageiros.

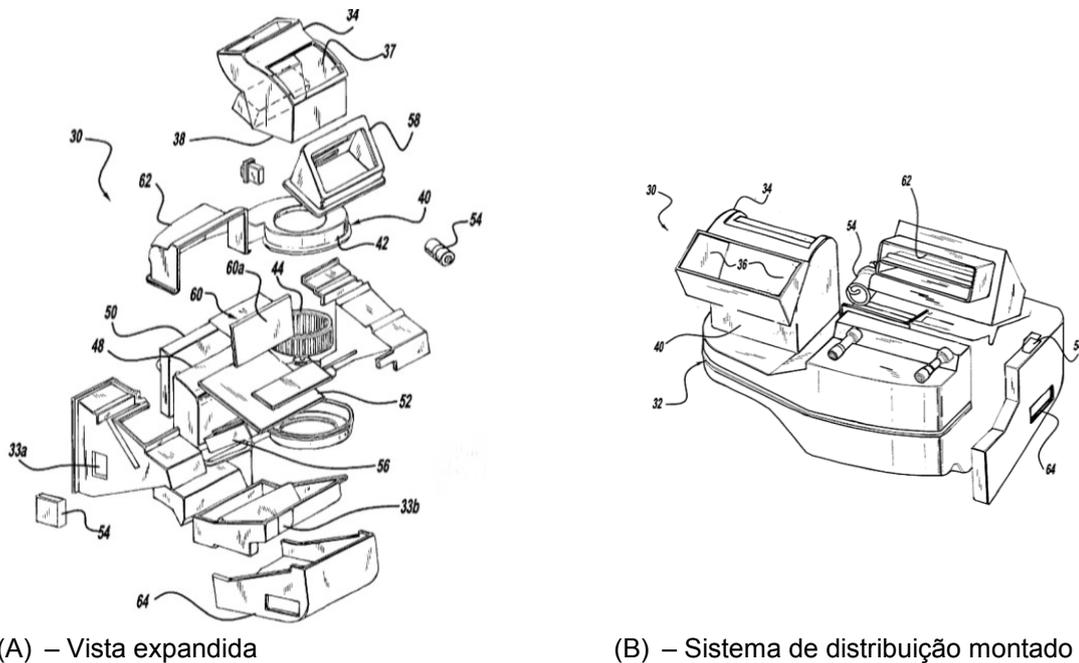
### 2.4.1. Funcionamento do sistema *multizone*

O problema mais recorrente entre os dois sistemas HVAC é o espaço necessário para a implantação do sistema por zonas no automóvel. Os sistemas de zona única são geralmente projetados para utilizar de forma ideal a quantidade de espaço disponível em um determinado tipo de veículo, bem como para se adaptar à forma do espaço. Quando um sistema de zona dupla é projetado, por exemplo, ele geralmente deve estar em conformidade com o mesmo tamanho e forma, portanto, solicitando uma função adicional, porém sem espaço extra (KINMARTIN, FALZONE e HOFFMAN, 1992).

Uma adversidade que o sistema de zona única possui é dado por ele não conseguir manter a temperatura similar no interior do veículo todo. De acordo com o exemplo mais simples, a distribuição de ar é desequilibrada devido às válvulas de distribuição de ar. Elas conduzem o ar condicionado para múltiplas saídas, disponibilizadas em vários locais do compartimento do automóvel. Embora a diferença de temperatura seja causada pela diferença de fluxo de ar entre os locais do compartimento, um desequilíbrio drástico no fluxo de ar não é desejável. Por essa razão, é difícil fornecer um controle de refrigeração confortável, com o qual as temperaturas em todos os lugares sejam mantidas uniformes ou uma grande diferença de temperatura seja disponibilizada apenas alterando o fluxo de ar. Isto também se aplica a outras formas de controlar o fluxo de ar, por exemplo, múltiplos ventiladores no interior do painel, ou aletas para o ajuste da direção do ar. Neste quesito o *multizone* é a melhor opção, na qual o sistema principal controla o fluxo de ar na parte dianteira do carro e outra unidade de condicionamento de ar controla a parte traseira do veículo (HALL e FANTIN, 2002).

No entanto, em veículos a motor típicos de passageiros, o compartimento de passageiros tem um espaço para quatro ou mais passageiros. Portanto, pelo menos quatro zonas de ar condicionado são necessárias e, assim, são necessárias pelo menos quatro unidades de ajuste de temperatura. Isso torna a estrutura do sistema de ar condicionado complexa e com muitas partes móveis, nota-se isto na Figura 4. Além disso, esse sistema requer uma grande quantidade de dutos de ar e sensores conectados entre as respectivas unidades de ajuste de temperatura e suas saídas correspondentes, resultando em um aumento na resistência do fluxo de ar (SCOCCIA, 1999).

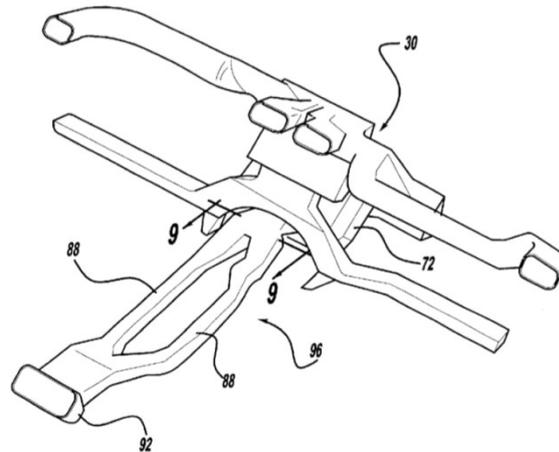
Figura 4 – Montagem de um sistema distribuição de condicionamento de ar veicular



Fonte: Hall (2002). Legendas básicas: 34 - 36 - 62 = Saídas do fluido para o interior da cabine; 44 = Ventilador.

Conforme patente ilustrada na Figura 5, ela possibilita a montagem de um sistema *multizone* em qualquer carro que possui o sistema HVAC, (HALL e FANTIN, 2002). Nela, um sistema HVAC convencional é modificado, mediante a um conjunto de dutos que se acoplam na câmara de mistura e fazem a distribuição de ar, assim, o sistema se torna um trizona, com a possibilidade de ajuste de temperatura nas posições do motorista, passageiro dianteiro e apenas uma saída para os passageiros traseiros. Esta patente nos chama atenção para a simplicidade da ideia e pela funcionalidade nela obtida.

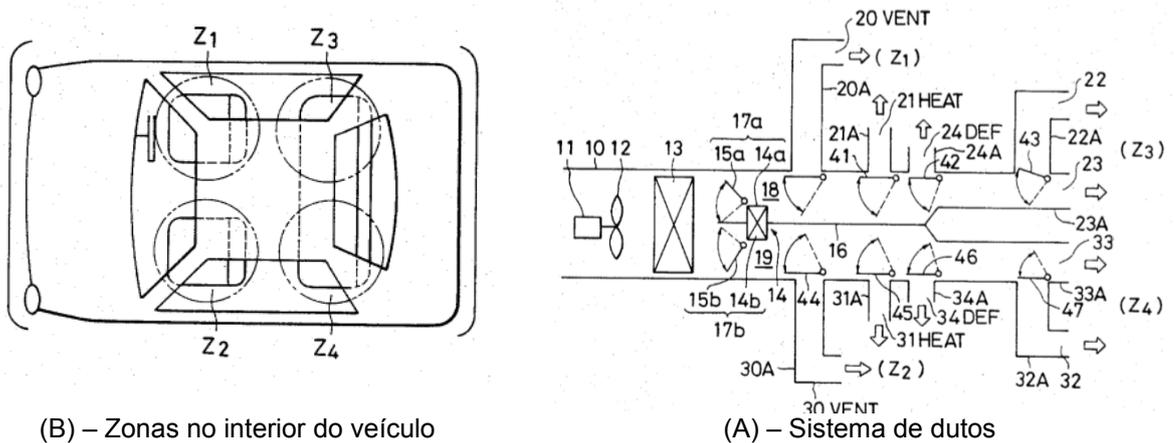
Figura 5 - HVAC para o sistema *multizone*



Fonte: Hall (2002). Legendas: 30 = Entrada de ar; 88 = Dutos de distribuição do ar; 9 = Dutos para distribuição do ar para os pés; 92 = Saída de ar para passageiros traseiros.

Como se pode observar na Figura 6, este sistema possui quatro zonas: Z1, Z2, Z3, Z4. Por sua vez, Z1 e Z3 possuem o mesmo ajuste de temperatura, isso quer dizer, que a temperatura nestas zonas é igual, o mesmo se aplica a Z2 e Z4 (NISHIMURA, MORI e YOSHIMI, 1985).

Figura 6 - Sistema *dual-zone*



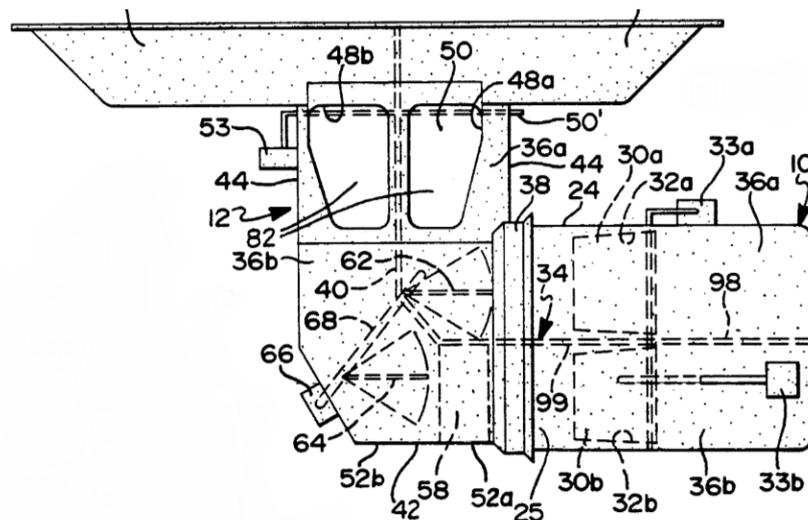
(B) – Zonas no interior do veículo

(A) – Sistema de dutos

Fonte: Nishimura (1985). Legendas básicas: 12 = Ventilador; 13 = Evaporador; 14 = Núcleo de aquecimento; 15a - 15b - 41 - 42 - 43 - 44 - 45 - 46 - 47 = Aletas de direcionamento do ar.

Outra configuração, que pode ser vista na Figura 7, se repete na ideia, porém, não na execução. Neste outro projeto há apenas a configuração de mudança de temperatura para o motorista e o passageiro. Neste modelo o ar entra na câmara de mistura e é dividido em duas partes como podemos ver na Figura 7, tendo portanto apenas duas temperaturas diferentes ao sair para os passageiros. Vale ressaltar que esta patente possui o enfoque maior na montagem do sistema, dito isto, ela explora mais o aspecto espacial – mesmo espaço utilizado- para um sistema *multizone* e para o *Dual-Zone*, (KINMARTIN, FALZONE e HOFFMAN, 1992). Esta patente é interessante na questão que a linha de manufatura tem a flexibilidade da escolha entre os sistemas, já que ambos ocupam o mesmo espaço esse quesito na parte de montagem automotiva é bem significativo e diminui o custo de produção dos veículos.

Figura 7 - Câmara mistura de ar



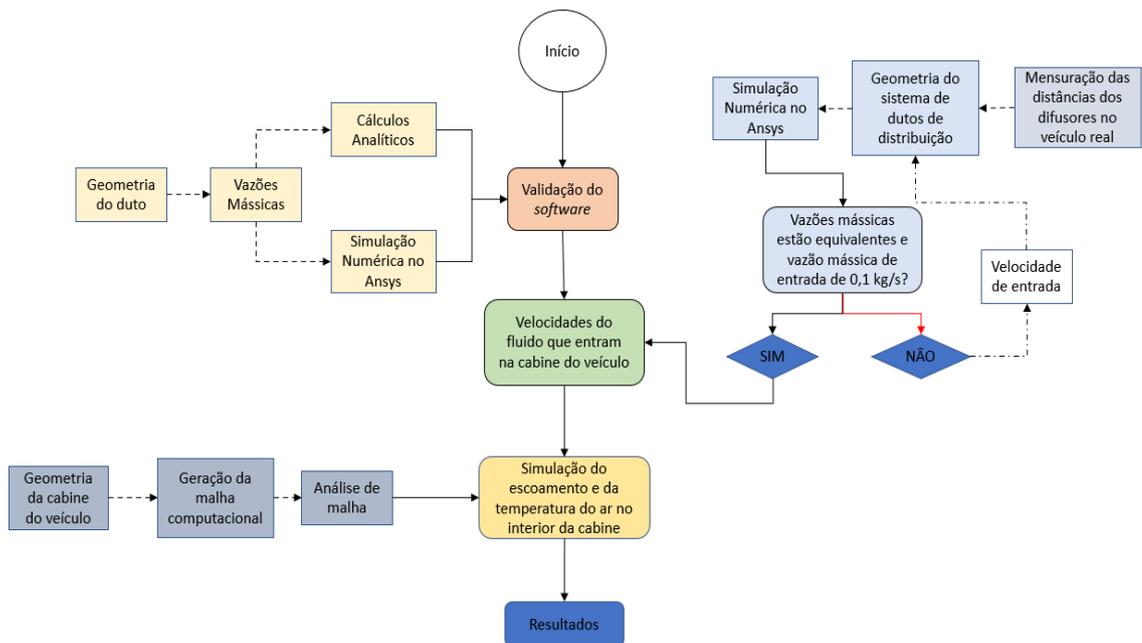
Fonte: Kinmartin (1982). Legendas básicas: 10 = Carcaça da câmara de mistura; 98 = Parede para divisão do fluido; 30a – 30b = Aletas de direcionamento do fluido; 82 = Aletas de direcionamento do fluido para dentro da cabine do veículo.

Analisando as patentes apresentadas do sistema *multizone* percebe-se que elas possuem apenas o controle de duas zonas de temperatura. O sistema basicamente funciona particionando um fluxo de ar para um lado do veículo com uma determinada temperatura e outro fluxo para o outro lado do veículo – motorista e passageiro dianteiro - e um terceiro fluxo sendo direcionado para a parte traseira, que pode ser particionado em dois, mas não há possibilidade de mudança de temperatura para os passageiros situados na parte de trás do veículo.

### 3. METODOLOGIA

Nesta seção será apresentado o roteiro necessário para a comparação entre o sistema convencional e o sistema *Multizone*, conforme Figura 8. Iniciou-se com a escolha do programa de computador para a realização desta análise. O programa escolhido foi o *Ansys*, a escolha deste foi devido à sua robustez na resolução de casos que englobam dinâmica de fluidos e transferência de calor e pela gama de modelamentos que ele possibilita a realização. Após a escolha do programa de computador, foi necessário efetuar a validação do modelo matemático do mesmo.

Figura 8 - Ilustração esquemática da metodologia de cálculo



Fonte: Autor (2022)

### 3.1. MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

O método dos volumes finitos realiza a linearização das equações diferenciais que governam os problemas de dinâmica dos fluidos e térmicos para a resolução computacional. Há dois métodos equivalentes para a obtenção das equações de conservação aproximadas no método de volumes finitos: o balanço das propriedades investigadas no volume de fluido infinitesimal e a integração das equações conservativas (diferenciais) neste volume. (MALISKA, 2017)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = \frac{\partial P_1}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S^{u_i} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S^T \quad (3)$$

As equações 1, 2 e 3 representam equações da conservação de massa, quantidade de movimento linear e de energia, respectivamente (BEJAN, 2013 apud MALISKA, 2017, p. 12).

O problema abordado neste trabalho segue a hipótese de fluido incompressível ( $\rho$  constante), viscoso ( $\mu \neq 0$ ), sem fontes de energia ( $S^{u_i} = S^T = 0$ ), com propriedades constantes ( $c_p$ ,  $k$  constantes), fluido newtoniano e com a presença de forças de campo (campo gravitacional).

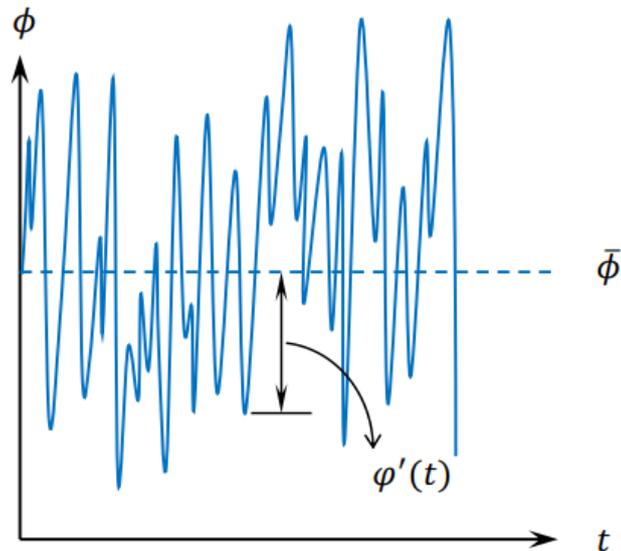
#### 3.1.2. Modelos de turbulência

Turbulência define-se como o regime de escoamento após o número de Reynolds crítico,  $Re_{crit}$ , isto é, mesmo com condições de contorno pré-estabelecidas o comportamento do fluido se torna instável.

“Tal comportamento gera perfis de propriedades como o da Figura 9, com características oscilatórias. De modo a modelar a turbulência, a propriedade é descrita tal como a equação (4), na qual  $\bar{\phi}$  é a média temporal dos valores e  $\phi'(t)$  é a componente de

flutuação dos mesmos, chamada de decomposição de Reynolds".  
(DONATI, 2019, p. 35)

Figura 9 - Perfil com flutuações e média das propriedades

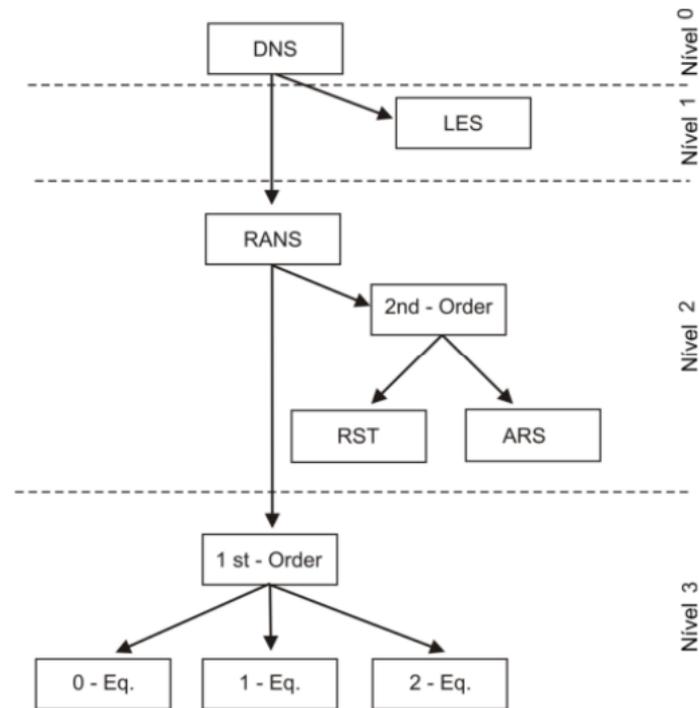


Fonte: (DONATI, 2019)

$$\phi(t) = \bar{\phi} + \phi'(t) \quad (4)$$

Como pode-se observar na Figura 10, há uma hierarquia para as resoluções dos métodos de turbulência, sendo o DNS (*Direct Numerical Simulation*) o mais sofisticado, possuindo a capacidade de calcular vórtices de pequena escala. O método LES (*Large Eddy Simulation*) trabalha com vorticidade de maior escala comparado com o DNS e o RANS (*Reynolds Average Numerical Simulation*) é o de nível 2 que calcula por meio da média de flutuações de Reynolds, como podemos ver na Figura 9. Quanto maior o nível, como mostra a Figura 10, menor a acurácia na resolução de problemas com turbulência.

Figura 10 - Hierarquia dos modelos atuais de turbulência



Fonte: Adaptado de Blazek (2001) apud Possamai (2014). Abreviações: DNS = Direct Numerical Simulation; LES = Large Eddy Simulation; RANS = Equações da Conservação Média de Reynolds; 1st order = fechamento da turbulência de primeira ordem; 2st order = fechamento da turbulência de segunda ordem; RST = Modelos de transporte da Tensão de Reynolds; ARS = Modelos algébricos da Tensão de Reynolds; 0-, 1-, 2-Eq = Modelos de zero, uma e duas equações.

O método RANS foi utilizado neste trabalho. Ele utiliza modelos  $k - \varepsilon$  e  $k - \omega$  *sst* o modelo  $k - \varepsilon$  avalia relativamente bem as médias de flutuações e tende a uma rápida convergência, entretanto ele não é recomendado para cálculos onde o interesse é a camada limite e o modelo SST é recomendável para interação sólido-fluido que não é o escopo deste trabalho. (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2006).

Analisando a literatura, os resultados para  $k - \varepsilon$  serão utilizadas para a análise fluidodinâmica neste trabalho. Com o auxílio da ferramenta *Ansys Fluent* será adicionado o modelo térmico ao escoamento.

### 3.2 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

Executou-se a validação do programa computacional comparando os resultados obtidos da perda de carga por meio de *software* para um caso simples. Iniciou-se pela escolha das dimensões do duto, 1 metro de comprimento e 50 milímetros de diâmetro, com estas dimensões foram propostas três vazões mássicas diferentes para a rotina matemática, estas foram:  $\dot{m}_1 = 0,002 \text{ kg/s}$ ;  $\dot{m}_2 = 0,003 \text{ kg/s}$ ;  $\dot{m}_3 = 0,004 \text{ kg/s}$ . A razão da escolha destas vazões mássicas é devido à geometria do duto, como seu diâmetro é pequeno em relação ao comprimento, foram utilizadas vazões mássicas baixas comparadas a que foram usadas no sistema de distribuição do fluido. O fluido empregado é o ar que possui  $\rho = 1,205 \text{ kg/m}^3$  e viscosidade cinemática  $\nu = 1,51 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  ambos a  $20^\circ\text{C}$ . Com estes dados pode-se encontrar a velocidade  $\vartheta_{1,2,3}$  (média) do fluido na seção transversal do duto. As respectivas velocidades médias são:  $\vartheta_1 = 0,86 \text{ m/s}$ ;  $\vartheta_2 = 1,40 \text{ m/s}$ ;  $\vartheta_3 = 1,84 \text{ m/s}$ . A partir destes dados podemos calcular o número de Reynolds associado ao escoamento.

$$Re = \frac{D\vartheta}{\nu} \quad (5)$$

Onde D é o diâmetro do tubo,  $\vartheta$  é a velocidade do fluido e  $\nu$  é viscosidade cinemática do mesmo. Com isto encontramos os seguintes valores de Reynolds:  $Re_1 = 2937,34$ ;  $Re_2 = 4762,08$ ;  $Re_3 = 6241,69$ . Com base no número de Reynolds podemos calcular o fator de atrito pela equação de Colebrook-White.

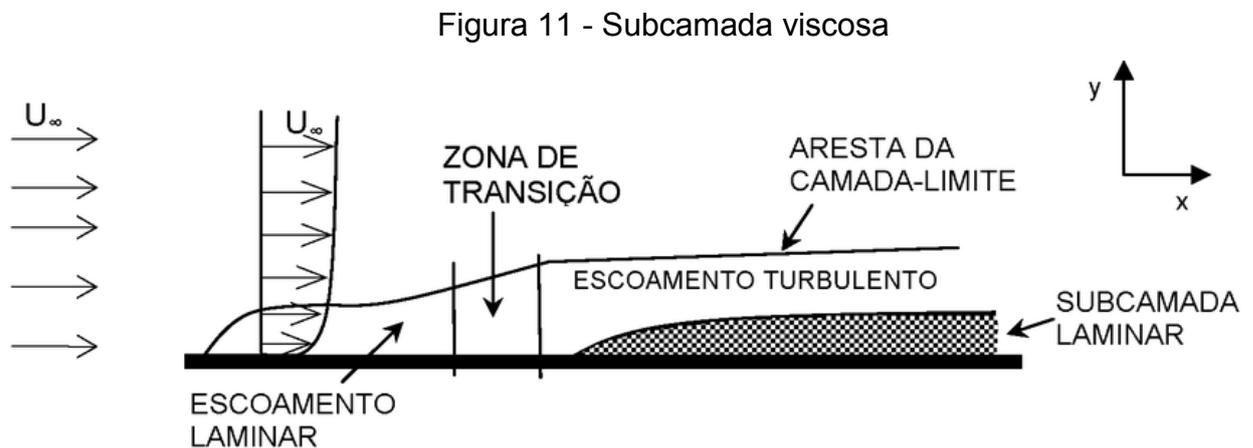
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left( \frac{e/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (6)$$

Esta fórmula, por sua vez, é uma equação iterativa. Utilizou-se a função “Atingir meta” do programa computacional Excel para a realização da rotina matemática. Considerando a rugosidade do plástico  $e/D = 0,000005 \text{ mm}$ , encontraram-se,  $f_1 = 0,04380$ ;  $f_2 = 0,03792$  e  $f_3 = 0,03511$  para os fatores de atrito. Com estes fatores de atrito foram possíveis calcular analiticamente a variação de pressão entre as extremidades do duto devido ao escoamento do fluido, conforme a equação:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = f \frac{L}{D} \rho \frac{V^2}{2} \quad (7)$$

As mesmas condições de operação foram utilizadas no software *Ansys* para calcular numericamente a perda de carga do escoamento de ar ao longo do duto.

Iniciou-se o método computacional analisando o fator adimensional  $y^+$  que pode ser observado na Figura 11. Quando pensamos em escoamento, a velocidade do fluido na parede é zero, portanto, em certa altura do duto -próximo à parede- o escoamento se torna laminar, o que é chamado de subcamada viscosa. O fator adimensional  $y^+$  foi levado em consideração nesta análise de validação. Utilizou-se escoamento turbulento por meio do modelo  $k - \varepsilon$  de turbulência.



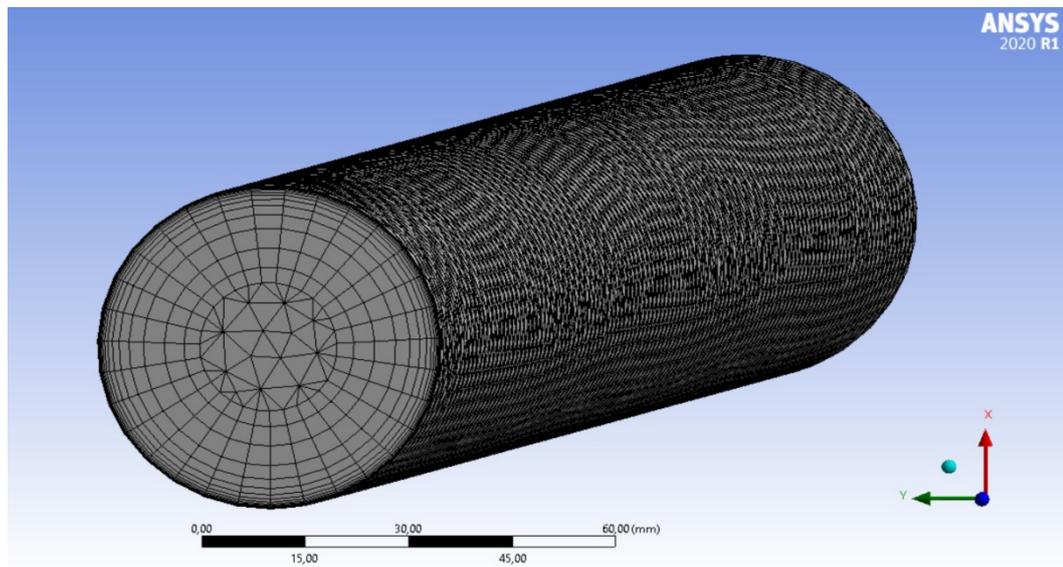
Fonte: (SOUZA, OLIVEIRA, *et al.*, 2011)

Pode-se observar na Figura 12 e Tabela 1 a configuração da malha final. Os resultados obtidos na validação do programa computacional estão apresentados na Tabela 7 e Tabela 8 da seção 4 do documento.

Tabela 1 - Configuração da malha do duto liso

| Número de elementos | Geometria da célula computacional | Valor de $Y^+$ |
|---------------------|-----------------------------------|----------------|
| 480.829             | Wedge                             | 0,0023         |

Figura 12 - Representação da malha empregada na validação para a comparação com os resultados analíticos



Fonte: Autor (2022)

### 3.3 DUTOS DE DISTRIBUIÇÃO DO FLUIDO

Continuando na Figura 8, para encontrar a velocidade do fluido quando se adentrava na cabine do veículo, foi feita a geometria de distribuição do fluido, para criação foi utilizado o carro real (Audi Q7) medindo a distância entre os difusores, distância do difusor central do veículo até o difusor na que localiza na porção que os passageiros traseiros se situam e sua respectiva altura. O modelo do sistema de distribuição de ar, ilustrado na Figura 13, foi empregado para identificar a geometria capaz de balancear as vazões mássicas entre as saídas 1, 2, 3, 4 e 5 para o sistema *Multizone* e, para o sistema convencional com exceção da saída 5. Como alvo para o total de vazão mássica que entra no sistema de distribuição de ar, foi utilizado como referência o trabalho do Da Silva (2019), onde foi calculada a vazão mássica que passa pelo condensador e entra nos dutos de distribuição, este valor é de  $\dot{m} = 0,10 \text{ kg/s}$ .

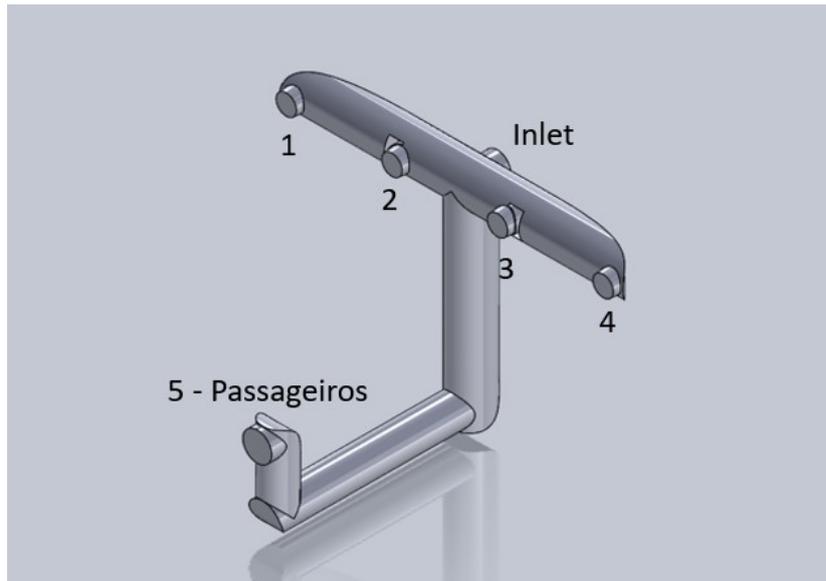
A Figura 13 mostra uma representação esquemática do sistema de distribuição de ar, que foi modelado no *Solidworks* considerando uma geometria simplificada do sistema de distribuição e posteriormente analisada em programa computacional, esta geometria pode ser encontrada em mais detalhes no Anexo 1. A Tabela 2 nos mostra a configuração da malha utilizada nesta análise.

Tabela 2 - Configuração malha do sistema de distribuição de ar

| Número de elementos | Geometria da célula computacional | Valor de Y+ |
|---------------------|-----------------------------------|-------------|
| 1.276.881           | <i>tetrahedral</i>                | 0,0028      |

Fonte: Autor (2022)

Figura 13 - Representação Esquemática do Sistema de Distribuição de Ar



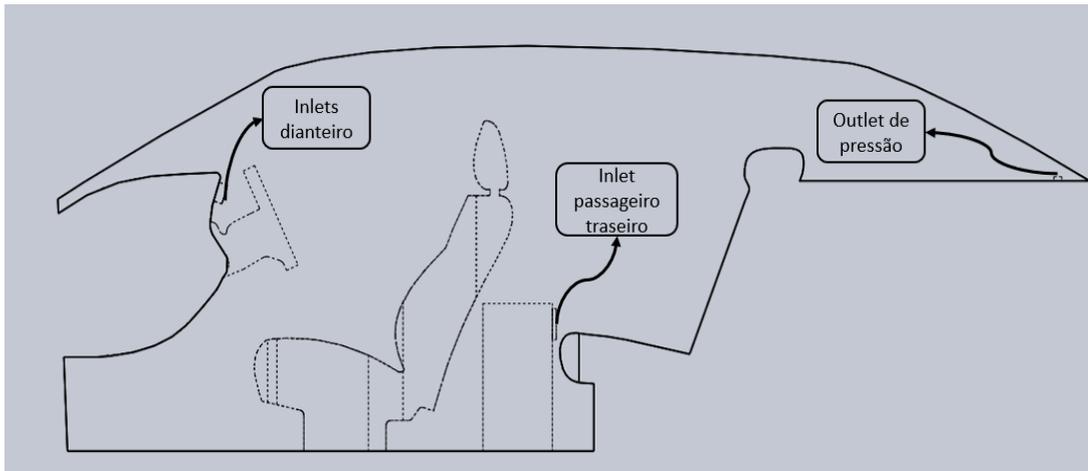
Fonte: Autor (2022)

### 3.4 GEOMETRIA DO VEÍCULO

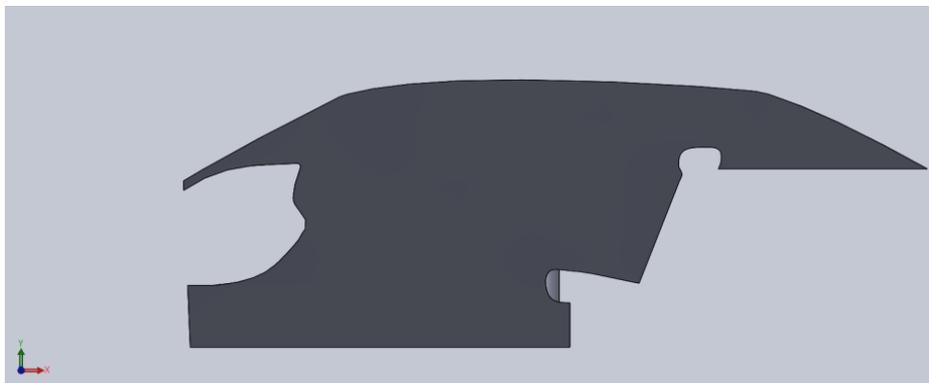
Seguindo o fluxograma, Figura 8, após a obtenção dos dados de velocidade que entram na cabine do veículo podemos dar início à simulação no mesmo. O modelo utilizado para o trabalho foi o *Audi Q7 2020*, pois este possui o sistema multizone.

Inicialmente foi criada a geometria do interior do veículo, Figura 14, no *software* de modelagem por meio das dimensões que podem ser encontradas no Anexo B, e a partir disso foi iniciada a análise de malha.

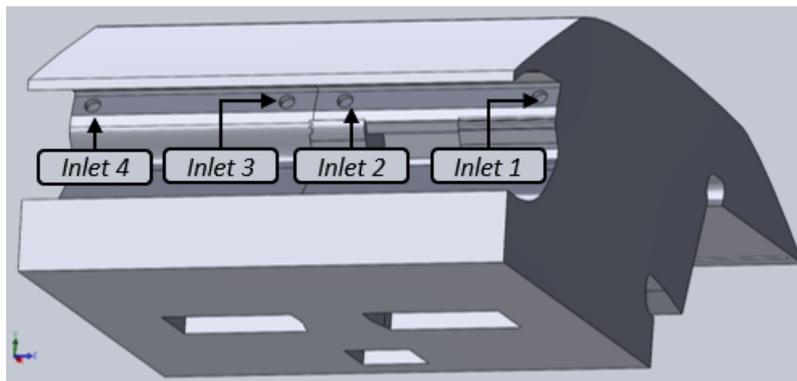
Figura 14 - Localização dos *inlets* e *outlets*



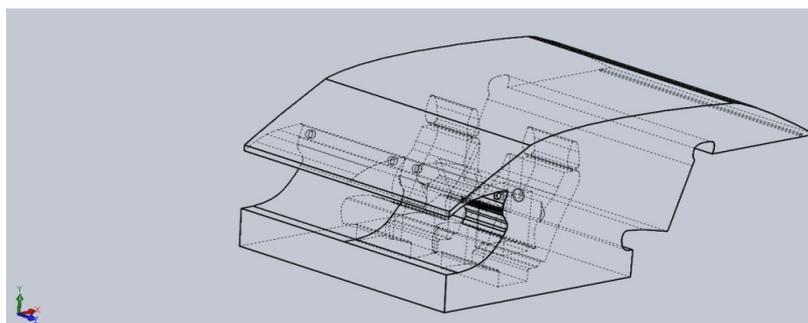
(A) – Vista lateral com localização dos *inlets* e *outlet*



(B) - Vista lateral direita



(C) - Vista frontal/direta parcial



(D) - Vista isométrica por traços  
Fonte: Autor (2022)

### 3.5 CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Se mantendo na Figura 8, detendo as velocidades que o fluido entra na cabina do automóvel foi possível construir as condições de operação para o caso convencional e para o *Multizone*, conforme Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6. Para as condições de operação para análise do escoamento do fluido foram utilizadas superfícies adiabáticas nas paredes, temperatura do fluido igual ao do domínio, 25 °C e velocidades conforme as tabelas. A fim de analisar o gradiente de temperatura foi utilizado temperatura 30 °C nas paredes e 10 °C para os difusores no sistema convencional e para o sistema *Multizone* foram utilizados 20 °C nos difusores do motorista e 10 °C para os difusores dos passageiros dianteiro e traseiro. Possuindo estas condições, foi possível realizar as simulações numéricas para encontrar os campos de velocidade e os gradientes de temperatura, a fim de posterior comparação entre o caso convencional e o *Multizone*.

Tabela 3 - Condições operacionais I – Sistema convencional

| <i>Inlets</i>  | Ligado/Desligado | Temperatura das paredes (°C) | Temperatura Fluido (°C) | Velocidade fluido (m/s) |
|----------------|------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <i>Inlet 1</i> | Ligado           | Parede Adiabática            | -                       | 4,146                   |
| <i>Inlet 2</i> | Ligado           |                              | -                       | 3,367                   |
| <i>Inlet 3</i> | Ligado           |                              | -                       | 3,419                   |
| <i>Inlet 4</i> | Ligado           |                              | -                       | 4,172                   |
| <i>Inlet 5</i> | Desligado        |                              | -                       | -                       |

Fonte: Autor (2022)

Tabela 4 - Condições operacionais II - Sistema convencional

| <i>Inlets</i>  | Ligado/Desligado | Temperatura das paredes (°C) | Temperatura Fluido (°C) | Velocidade fluido (m/s) |
|----------------|------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <i>Inlet 1</i> | Ligado           | 30                           | 10                      | 4,146                   |
| <i>Inlet 2</i> | Ligado           |                              | 10                      | 3,367                   |
| <i>Inlet 3</i> | Ligado           |                              | 10                      | 3,419                   |
| <i>Inlet 4</i> | Ligado           |                              | 10                      | 4,172                   |
| <i>Inlet 5</i> | Desligado        |                              | -                       | -                       |

Fonte: Autor (2022)

Tabela 5 - Condições operacionais III – Sistema *multizone*

| <i>Inlets</i>  | Ligado/Desligado | Temperatura das paredes (°C) | Temperatura Fluido (°C) | Velocidade fluido (m/s) |
|----------------|------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <i>Inlet 1</i> | Ligado           | Parede Adiabática            | -                       | 5,837                   |
| <i>Inlet 2</i> | Ligado           |                              | -                       | 4,342                   |
| <i>Inlet 3</i> | Ligado           |                              | -                       | 4,348                   |
| <i>Inlet 4</i> | Ligado           |                              | -                       | 5,888                   |
| <i>Inlet 5</i> | Ligado           |                              | -                       | 5,740                   |

Fonte: Autor (2022)

Tabela 6- Condições operacionais IV - Sistema *multizone*

| <i>Inlets</i>  | Ligado/Desligado | Temperatura das paredes (°C) | Temperatura Fluido (°C) | Velocidade fluido (m/s) |
|----------------|------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <i>Inlet 1</i> | Ligado           | 30                           | 20                      | 5,837                   |
| <i>Inlet 2</i> | Ligado           |                              | 20                      | 4,342                   |
| <i>Inlet 3</i> | Ligado           |                              | 10                      | 4,348                   |
| <i>Inlet 4</i> | Ligado           |                              | 10                      | 5,888                   |
| <i>Inlet 5</i> | Ligado           |                              | 10                      | 5,740                   |

Fonte: Autor (2022)

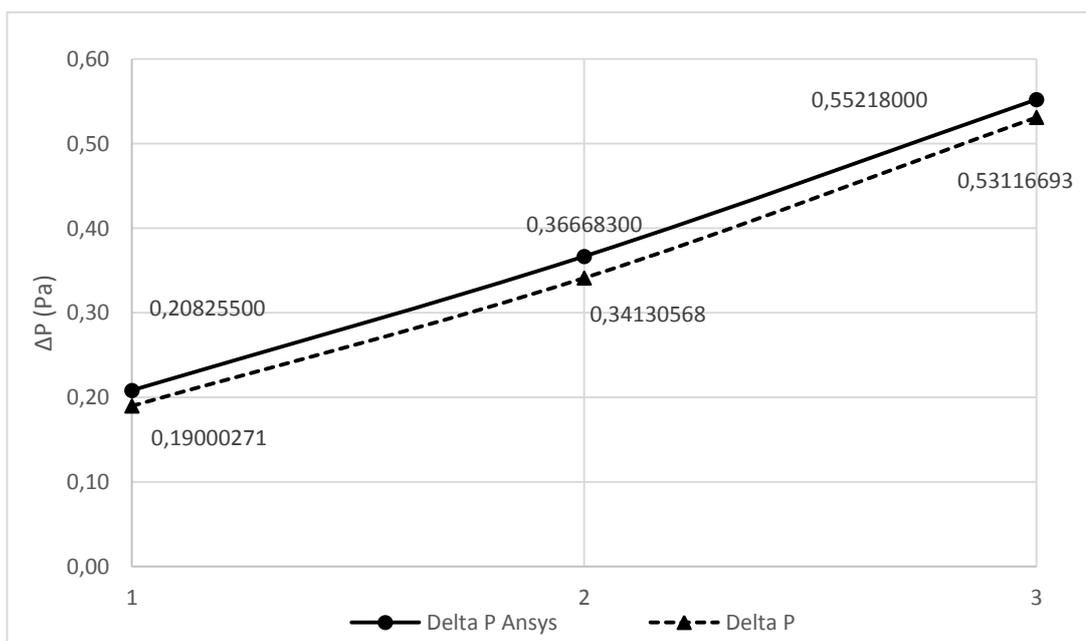
## 4. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados do modelo de validação do programa computacional, posteriormente foi feita a análise do sistema de dutos de distribuição do fluido para dentro do veículo, com intuito de encontrar as velocidades com que o ar entra no automóvel e uma igualdade de vazão mássica para o sistema convencional e *Multizone*. Em seguida foi realizada a análise de malha para a cabine do veículo com o objetivo de otimizar tempo computacional. Por fim, foi realizada a simulação em programa computacional para análise do campo de escoamento e gradiente de temperatura com a intenção de comparar o sistema convencional com o sistema *Multizone*.

### 4.1 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

Conforme rotina de cálculo demonstrada no capítulo anterior a Figura 15 mostra-nos a comparação dos resultados das variações de pressões obtidas numericamente e a calculada analiticamente pela equação (7).

Figura 15 - Dados de variação da pressão empírico e CFD



Fonte: Autor (2022)

Conforme mostra a Figura 15, os resultados analíticos da variação de pressão são  $\Delta p_1 = 0,1900 Pa$ ;  $\Delta p_2 = 0,3413 Pa$  e  $\Delta p_3 = 0,5312 Pa$ . Por sua vez, as variações de pressão encontradas pelo *software* foram  $\Delta p_{1'} = 0,2082 Pa$ ;  $\Delta p_{2'} = 0,3666 Pa$  e  $\Delta p_{3'} = 0,5522 Pa$ . As diferenças entre o valor computacional e a solução analítica foram, respectivamente,  $\Delta p_{1,1'} = 0,0182 Pa$ ;  $\Delta p_{2,2'} = 0,0254 Pa$  e  $\Delta p_{3,3'} = 0,0210 Pa$ . Portanto, maior desvio que tivemos foi na última vazão mássica,  $\dot{m}_1 = 0,003 kg/s$  onde o erro da diferença em relação ao valor do *software* atingiu 6,92%. Os demais erros foram 8,76% e 3,80%, respectivamente. Esta diferença é aceitável tendo em vista o erro envolvendo a equação analítica da ordem de  $\pm 10\%$ .

## 4.2 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DO FLUIDO

Nesta seção foram analisados os resultados obtidos de acordo com a modelagem citada na seção 3.2. Essa condição de balanço de vazões mássicas é desejada, uma vez que uniformiza a distribuição de ar no interior da cabine. Com isto em mente, foram feitas algumas simulações e modificações na geometria até encontrar uma velocidade em que as vazões de todas as saídas fossem próximas. Esta velocidade foi de 15 m/s, os valores de *outlets* gerados podem ser encontrados na Tabela 7. Posteriormente foi feita uma segunda análise para o sistema convencional - vedando o *outlet* 5 - e variando a velocidade de *inlet* para encontrar a mesma vazão mássica do sistema *Multizone*, isto foi necessário para analisarmos a distribuição e troca de calor dentro do fluido dentro do veículo quando apenas os difusores da parte frontal do carro estiverem abertos. Os resultados estão descritos na Tabela 8.

Tabela 7 – Vazão mássica e velocidade média para sistema *Multizone*

| <i>Face ID</i>            | <i>Vazão mássica<br/>(kg/s)</i> | <i>Velocidade<br/>(m/s)</i> |
|---------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| <i>Inlet</i>              | 0,144                           | 15,000                      |
| <i>Outlet 1</i>           | -0,031                          | 5,837                       |
| <i>Outlet 2</i>           | -0,017                          | 4,342                       |
| <i>Outlet 3</i>           | -0,016                          | 4,348                       |
| <i>Outlet 4</i>           | -0,031                          | 5,888                       |
| <i>Outlet Passageiros</i> | -0,049                          | 5,740                       |

Fonte: Autor (2022)

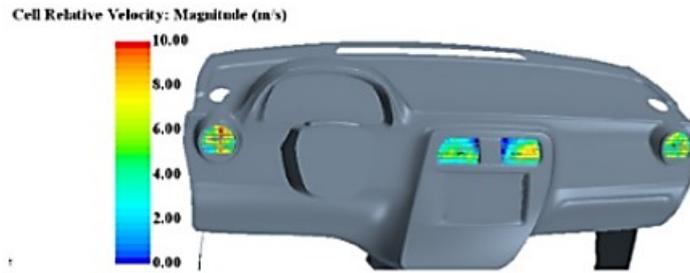
Tabela 8 - Vazão mássica e velocidade média para sistema convencional

| <i>Face ID</i>            | <i>Vazão mássica<br/>(kg/s)</i> | <i>Velocidade<br/>(m/s)</i> |
|---------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| <i>Inlet</i>              | 0,072                           | 7,500                       |
| <i>Outlet 1</i>           | -0,022                          | 4,146                       |
| <i>Outlet 2</i>           | -0,014                          | 3,367                       |
| <i>Outlet 3</i>           | -0,014                          | 3,419                       |
| <i>Outlet 4</i>           | -0,022                          | 4,172                       |
| <i>Outlet Passageiros</i> | -                               | -                           |

Fonte: Autor (2022)

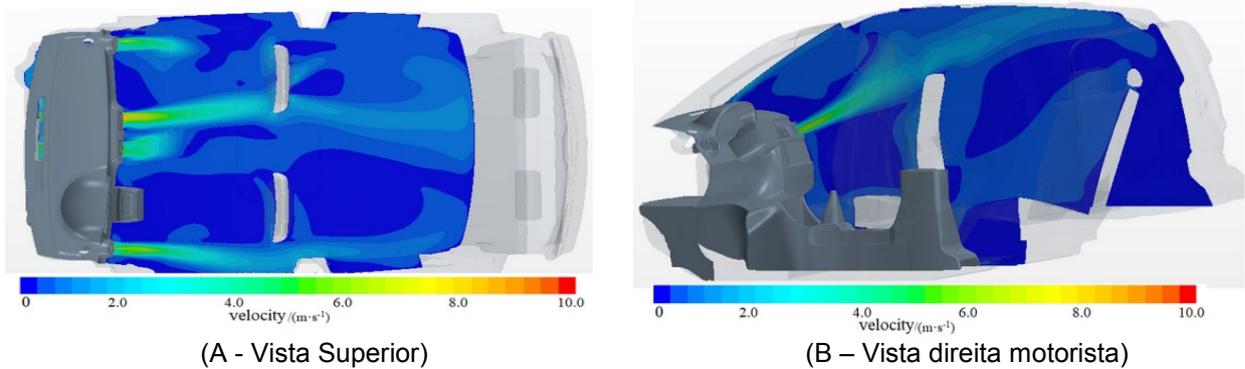
A faixa de variação de velocidade deste trabalho corrobora com a velocidade do fluido que escoar para dentro do veículo que foi obtida por meio da análise do ventilador no interior da câmara de mistura no trabalho de Libian Tan (2021). Nesta velocidade foi encontrada pela análise do ventilador que se encontra dentro da câmara de mistura de ar, estas velocidades podem ser encontradas na Figura 16. Observa-se na Figura 17 que as velocidades nos *outlets*, pontos 1, 2, 3 e 4, estão na faixa entre 4 a 6 *m/s*, que são valores dentro dos encontrados na simulação deste trabalho, devido a isto a vazão mássica calculada foi aceita.

Figura 16 - Velocidade do fluido na saída dos difusores



Autor (2022): (TAN e YUAN, 2021)

Figura 17 - Velocidade do fluido no interior da cabine do automóvel



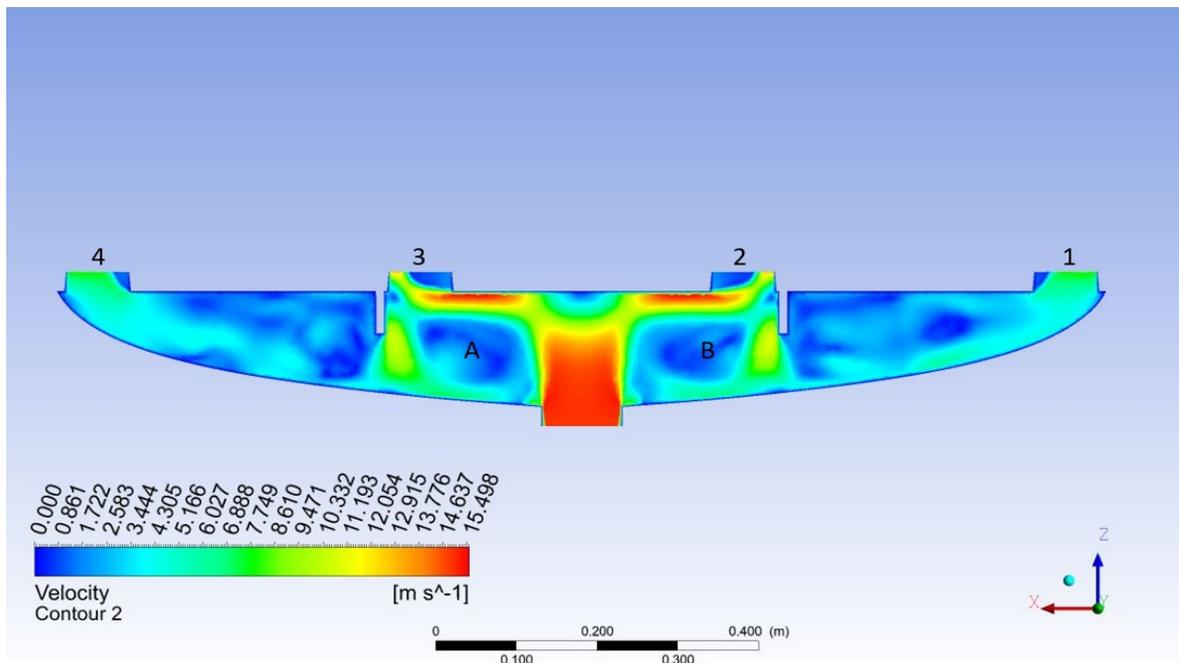
(A - Vista Superior)

(B - Vista direita motorista)

Autor (2022): (TAN e YUAN, 2021)

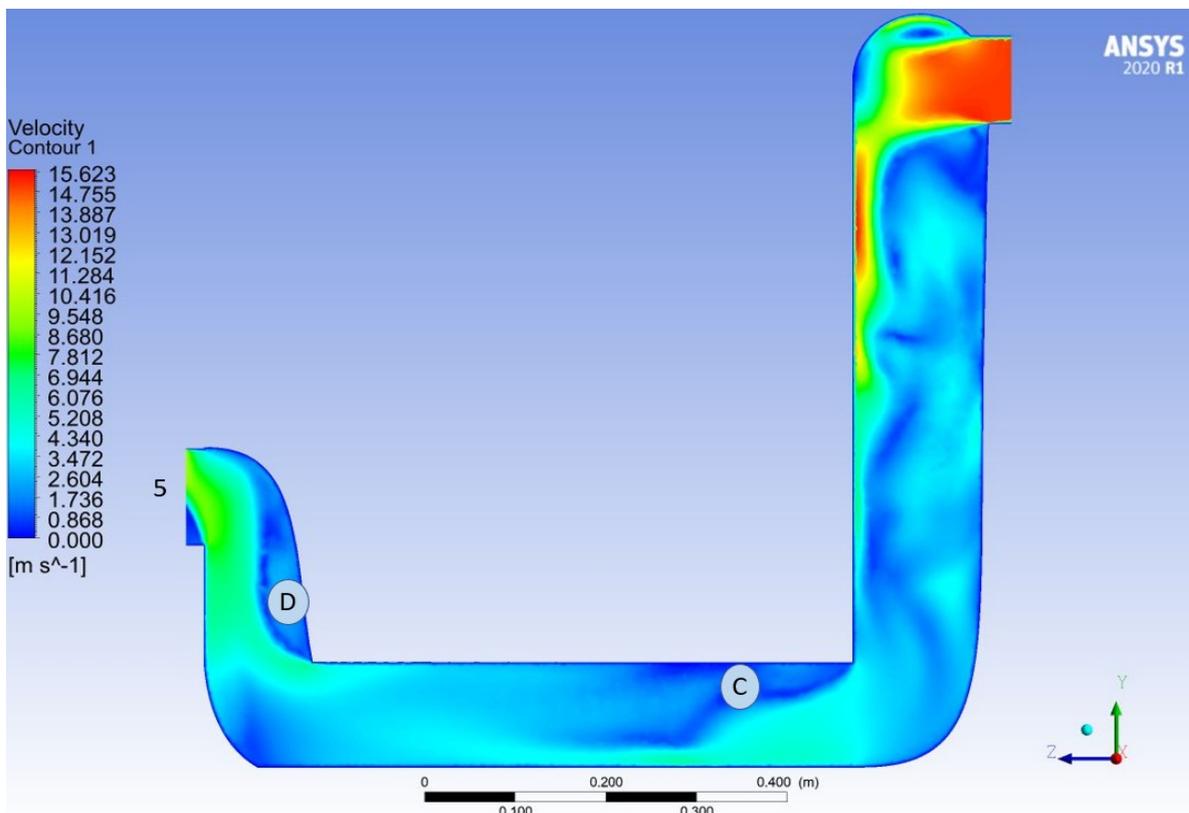
Podemos ver que nos pontos A e B da Figura 18 há zonas de recirculação de fluido, isto nos leva a diminuição da área efetiva de escoamento nos *outlets* 2 e 3 em comparação aos *outlets* 1 e 4. Devido a isto temos velocidades e consequentemente vazões mássicas diferentes nas saídas destes pares de *outlets*, (*vide* Tabela 7). A área de recirculação teve maior efeito nas saídas mencionadas anteriormente (2 e 3), no *outlet* dos passageiros traseiros (5) houveram perdas, porém elas foram compensadas pelo diâmetro da saída. Podemos observar as zonas de recirculação de ar (C e D) na Figura 19.

Figura 18 - Vista superior do campo de velocidade do sistema de distribuição de ar



Fonte: Autor (2022)

Figura 19 - Vista direita do campo de velocidade do sistema de distribuição de ar



Fonte: Autor (2022)

### 4.3. ANÁLISE DE MALHA

A análise de malha foi realizada para encontrar um balanço entre o custo computacional e a convergência das equações de conservação. Nesta, foram empregadas quatro malhas para avaliar o número de elementos e o tipo de *size function*, tamanho da malha nos assentos dos passageiros, o tamanho inicial da malha, o número de elementos totais, as velocidades médias no banco traseiro, o tempo e o *steps to convergence*, conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9 – Dados das malhas

| Mesh | Size Function                  | Assentos (mm) | Inlet (mm) | General (mm)   | Nº Elementos (10E6) | V avg 1 (m/s) | V avg 2 (m/s) | V avg 3 (m/s) | CPU (s) | Steps to Convergence |
|------|--------------------------------|---------------|------------|----------------|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------|----------------------|
| 1    | <i>Proximity and Curvature</i> | 3             | 1          | <i>Default</i> | 5,2                 | 0,2604        | 0,2422        | 0,8670        | 9,10E+3 | 250                  |
| 2    | <i>Proximity and Curvature</i> | 6             | 2          | <i>Default</i> | 2,3                 | 0,2604        | 0,2422        | 0,8670        | 9,26E+3 | 250                  |
| 3    | <i>Adaptive</i>                | 5             | 3          | 20             | 1,3                 | 0,3202        | 0,3541        | 0,8831        | 8,07E+3 | 500                  |
| 4    | <i>Adaptive</i>                | 5             | 3          | 15             | 1,4                 | 0,2544        | 0,0161        | 0,8815        | 8,42E+3 | 250                  |

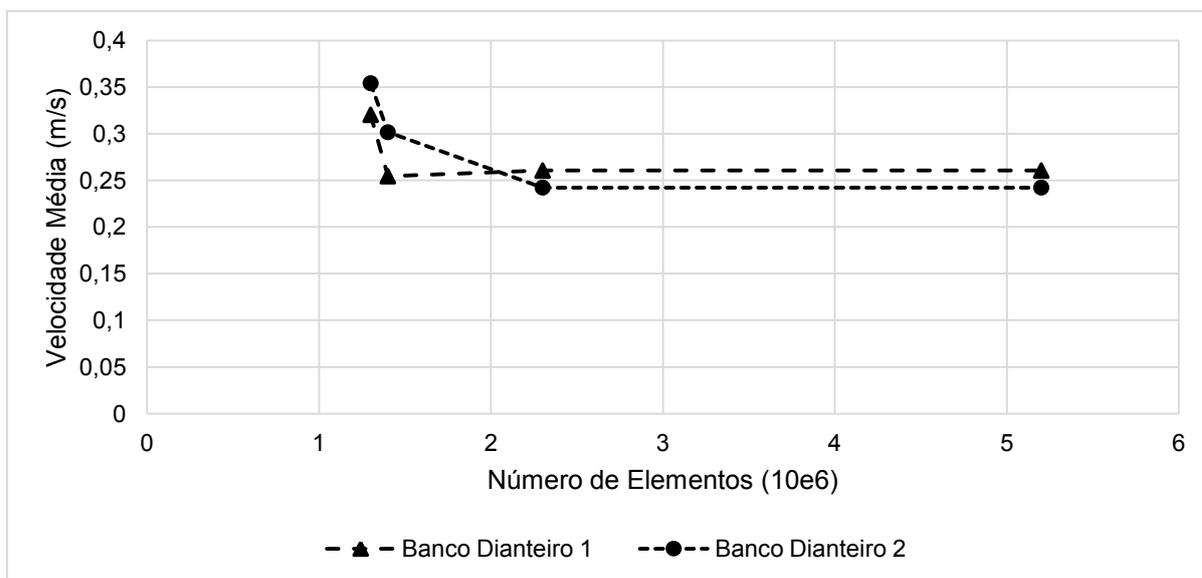
Fonte: Autor (2022)

Iniciou-se com o *size function*, foram utilizados o *Adaptive* e o *Proximity and Curvature*. Esta configuração define como a malha será distribuída ao redor do corpo em questão, dentro desta opção podemos achar cinco preferências diferentes, iremos nos atentar a apenas duas delas: *Adaptive* e *Proximity and Curvature*. Na primeira o sistema cria a malha no corpo com base no número de elementos selecionados anteriormente – coluna *General* -, posteriormente eles são refinados para as curvaturas do objeto e aproximação em 2 dimensões. No segundo caso, o *software* leva em consideração a proximidade entre a célula e uma borda (mudança

de geometria). Posteriormente a isto foi feito o refino de malha (*sizing*) nos assentos do veículo e nos *inlets*, conforme tabela acima.

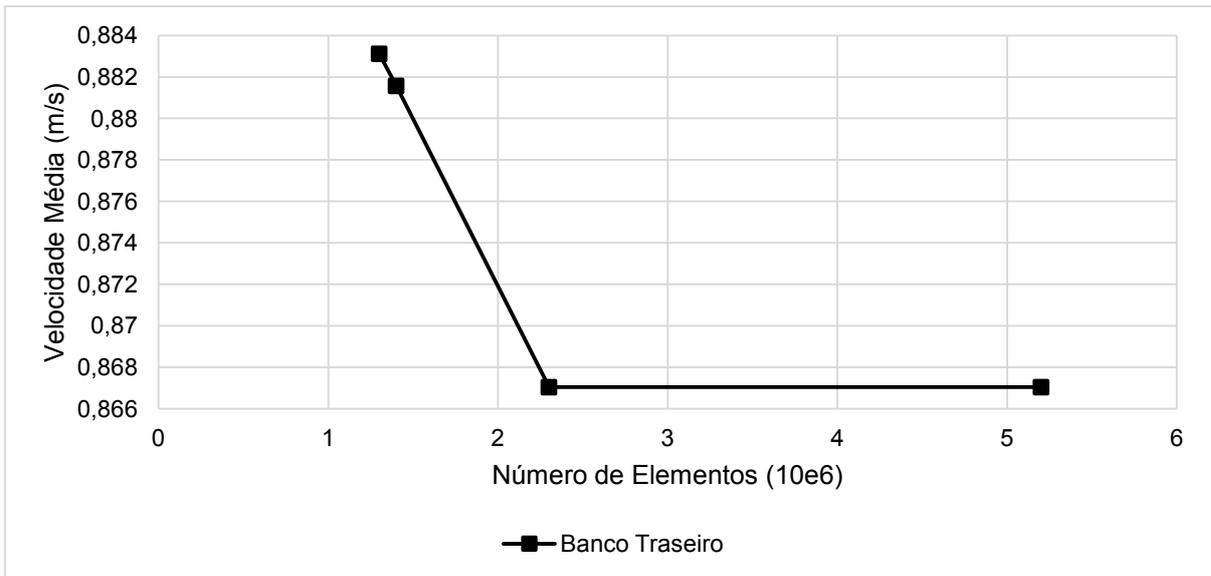
Percebe-se que nas malhas 3 e 4, Tabela 9, os valores de velocidade divergem consideravelmente das malhas 1 e 2, isto se dá pelo *size function* escolhido, sendo elas, então, descartadas. Analisando as malhas 1 e 2, podemos perceber que a malha atingiu seu limite em relação a valores, o custo computacional para geração e simulação da malha 1 foi alto comparado com as outras – necessidade de utilização do *Cluster* da Universidade Federal de Santa Catarina - Joinville (UFSC) –. A Figura 20 e a Figura 21 apresentam uma análise da velocidade média dos difusores em relação ao número de elementos. Em razão disto e de outros fatores citados anteriormente foi escolhida a malha 2, em função dos resultados não variarem consideravelmente e seu tempo de processamento ser menor que o da malha 1.

Figura 20 - Velocidade versus número de elementos I



Fonte: Autor (2022)

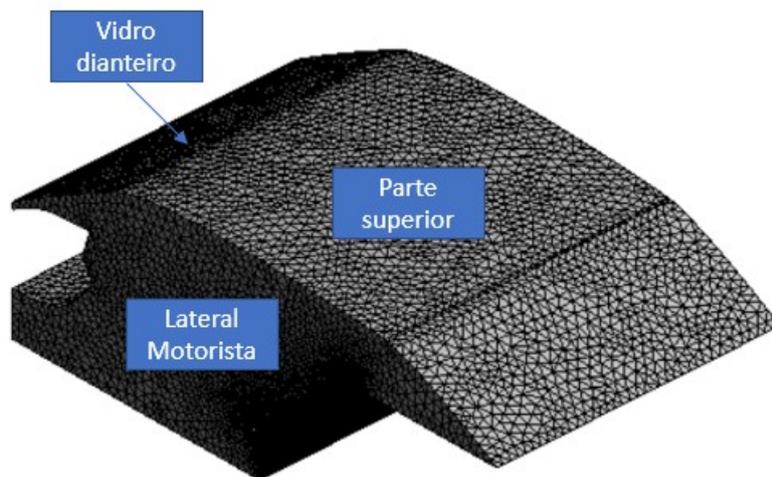
Figura 21 - Velocidade versus velocidade II



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 22 podemos observar a malha que será usada para a análise numérica em CFD.

Figura 22 – Vista isométrica da malha escolhida para a análise numérica



Fonte: Autor (2022)

#### 4.4. ANÁLISE EM DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

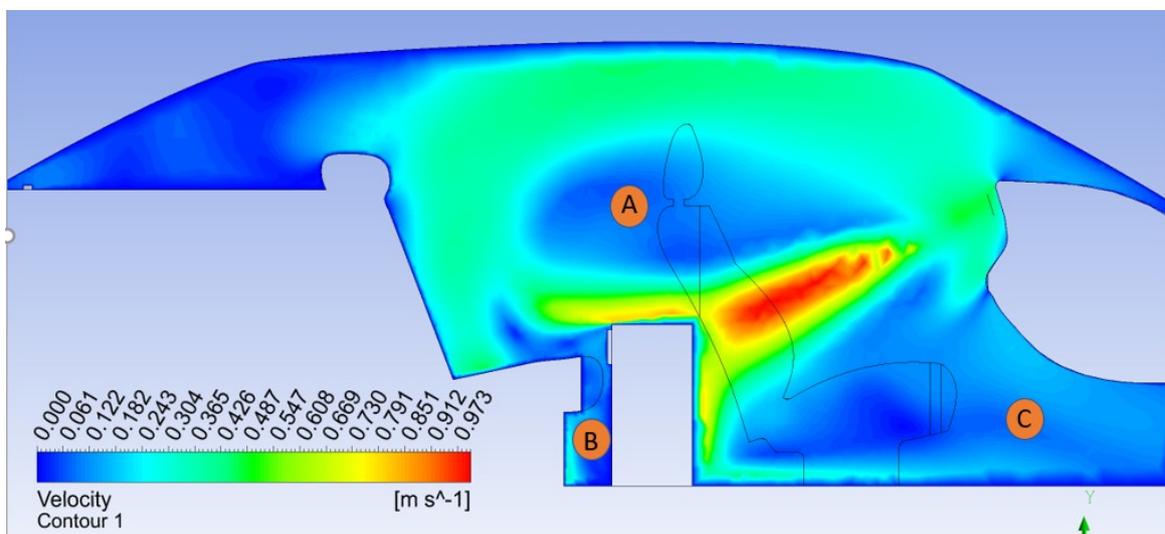
Nesta etapa iniciou-se a simulação do fluido no interior do veículo para o sistema convencional e para o sistema *Multizone*. Primeiramente foi feita uma análise apenas com as entradas de ar na parte dianteira – convencional -, onde o motorista e os passageiros se situam. Após isto foi realizada a simulação para o mesmo sistema, porém com condição de contorno de temperatura de Primeira Espécie - temperatura prescrita - nas paredes e temperatura do fluido que está entrando no veículo. Em seguida foi realizada uma simulação para o sistema *Multizone* acionando os difusores traseiros e seguidamente variaram-se as temperaturas dos fluidos de *inlet*. As condições operacionais estão descritas na Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6, seção 3.4.

#### 4.5. ANÁLISE DE DADOS

##### 4.5.1. Condição operacional I – Sistema convencional

Inicializou-se analisando o caso para condição operacional I, Tabela 3. Percebe-se, investigando a Figura 23, que mesmo sem os difusores traseiros a porção do automóvel possui alta circulação de ar na parte superior da cabine. Porém nas áreas “A”, “B” e “C” encontram-se zonas de recirculação.

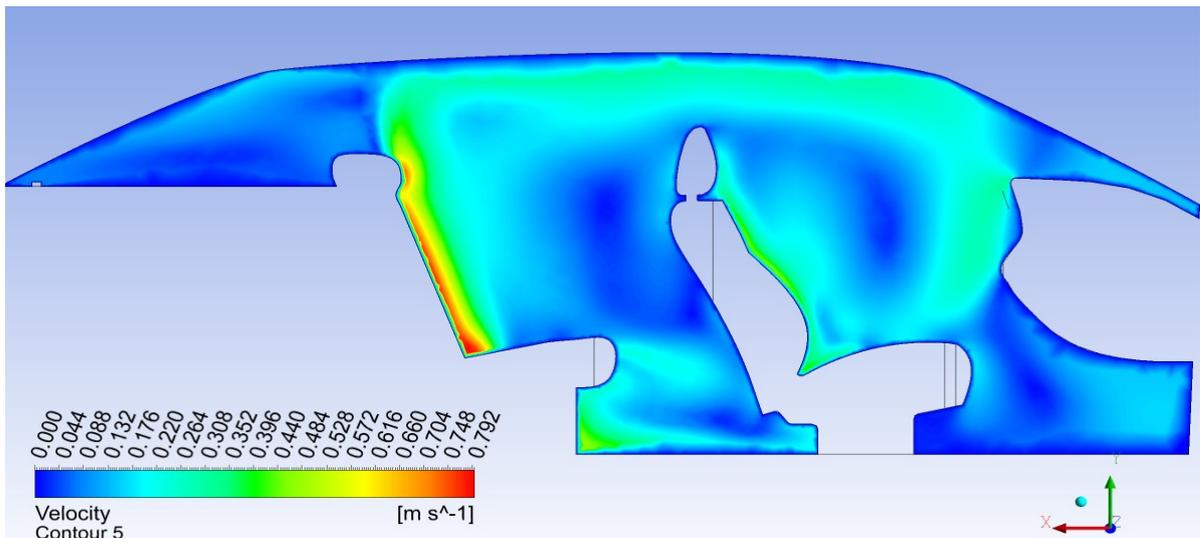
Figura 23 - Campo de velocidade sistema convencional plano central I



Fonte: Autor (2022)

Tomando um corte na parte central do banco do passageiro traseiro, Figura 24, é possível observar a circulação de ar na região dos bancos e uma velocidade relativamente alta no banco traseiro, isto se deve aos difusores mais próximos às portas possuírem maior velocidade comparada aos da porção central do veículo, como foi mostrado na Figura 18 anteriormente.

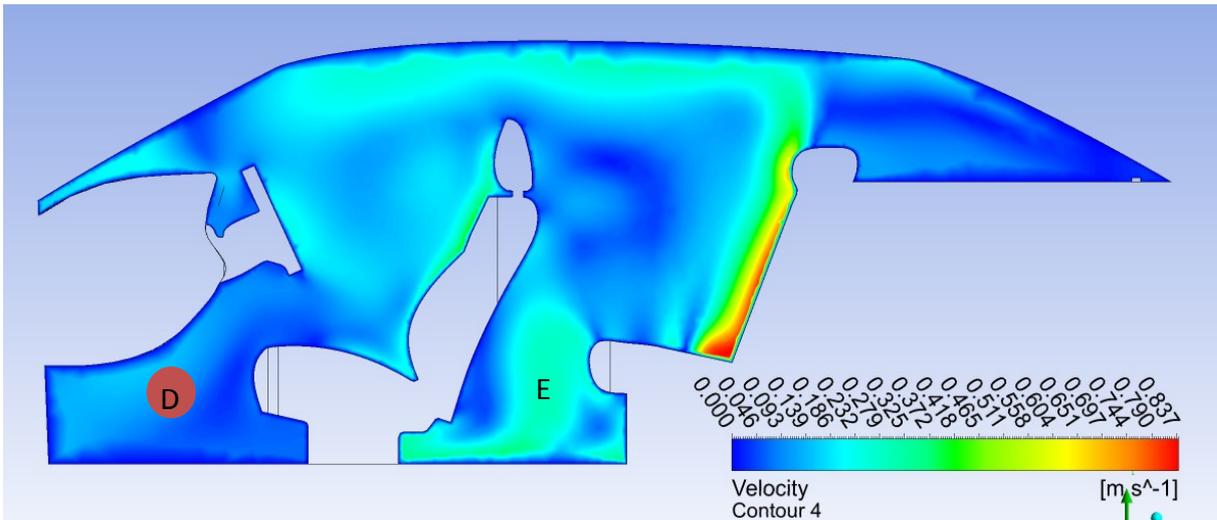
Figura 24 - Campo de velocidade sistema convencional passageiro I



Fonte: Autor (2022)

O mesmo acontece com a porção oposta, porém, observando do lado do motorista. Há uma variação no campo de velocidades na região do volante (D), que gera uma barreira para a movimentação do fluido. Outro ponto é a diferença de velocidade na região “E”, em comparação com a Figura 23. Esta divergência se deve a má distribuição do fluido no interior do veículo.

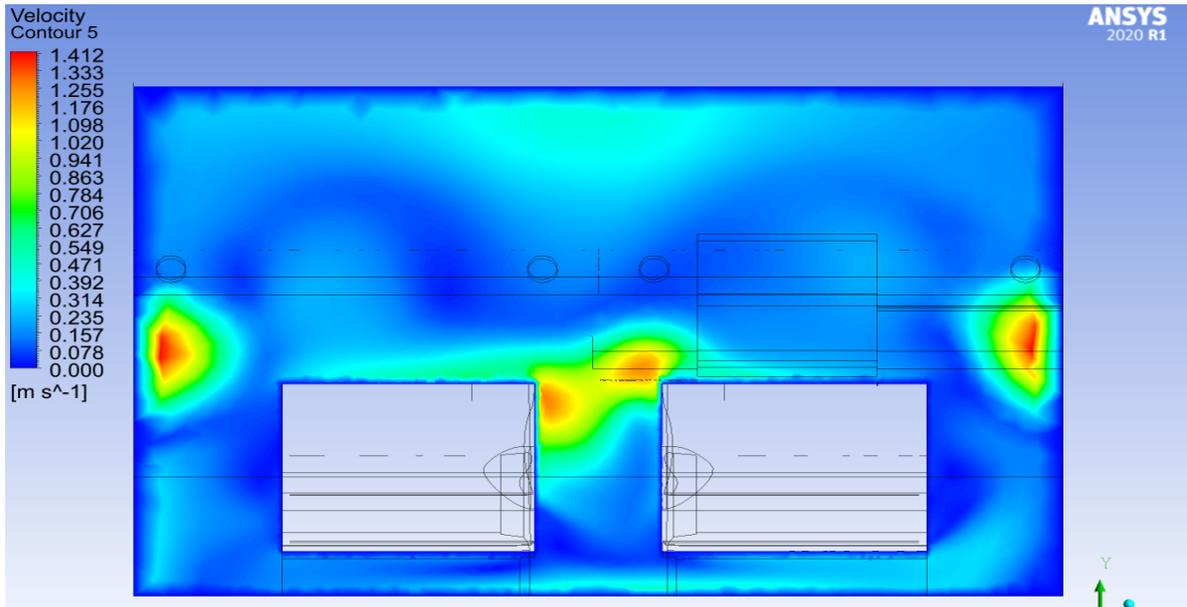
Figura 25 - Campo de velocidade sistema convencional motorista I



Fonte: Autor (2022)

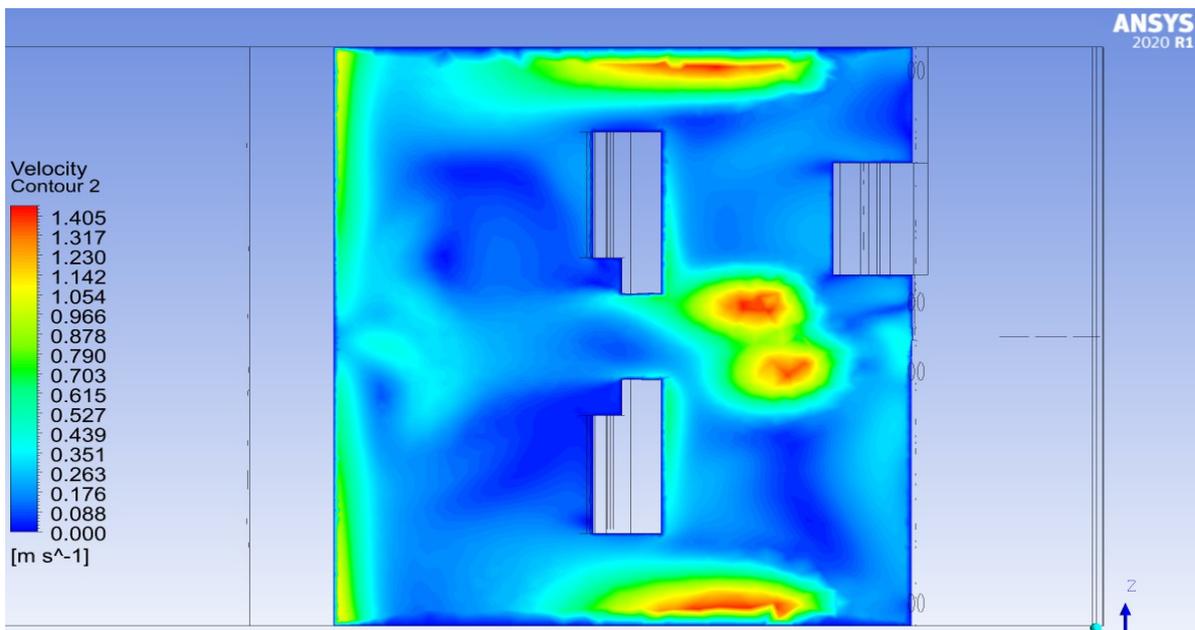
Esta diferença de distribuição do fluido no interior da cabine pode ser melhor evidenciada na Figura 26 e Figura 27. Na primeira percebe-se que há diferença no escoamento dos difusores centrais, uma das causas seria a não existência de barreiras na trajetória do fluido, como o volante, e a diferença de velocidades entre eles. Na segunda figura é mais evidente a diferença de distribuição e velocidade do fluido entre as adjacências do veículo. Acredita-se que a modelagem do volante fora subestimada e a não criação de uma geometria vazada possa ter sido uma das causas desta diferença.

Figura 26 - Campo de velocidade sistema convencional frontal I



Fonte: Autor (2022)

Figura 27 - Campo de velocidade sistema convencional superior I

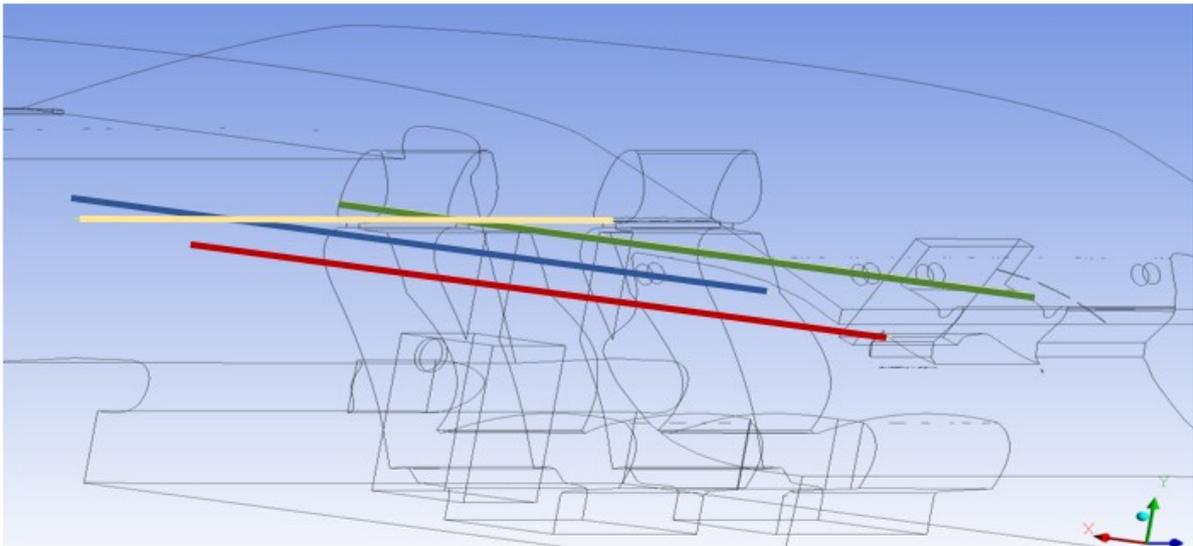


Fonte: Autor (2022)

Construiu-se Figura 29 e Figura 30 em função das velocidades, obtidas anteriormente, por uma distância adimensional  $\bar{X}$  e  $\bar{Z}$  que seria o comprimento da reta que captou os dados de pela distância do interior da cabine veículo para a direção X e para a direção Z. No eixo da abscissa para o gráfico de  $\bar{X}$ , o zero corresponde ao início da reta, portanto se refere a um ponto na superfície do painel,

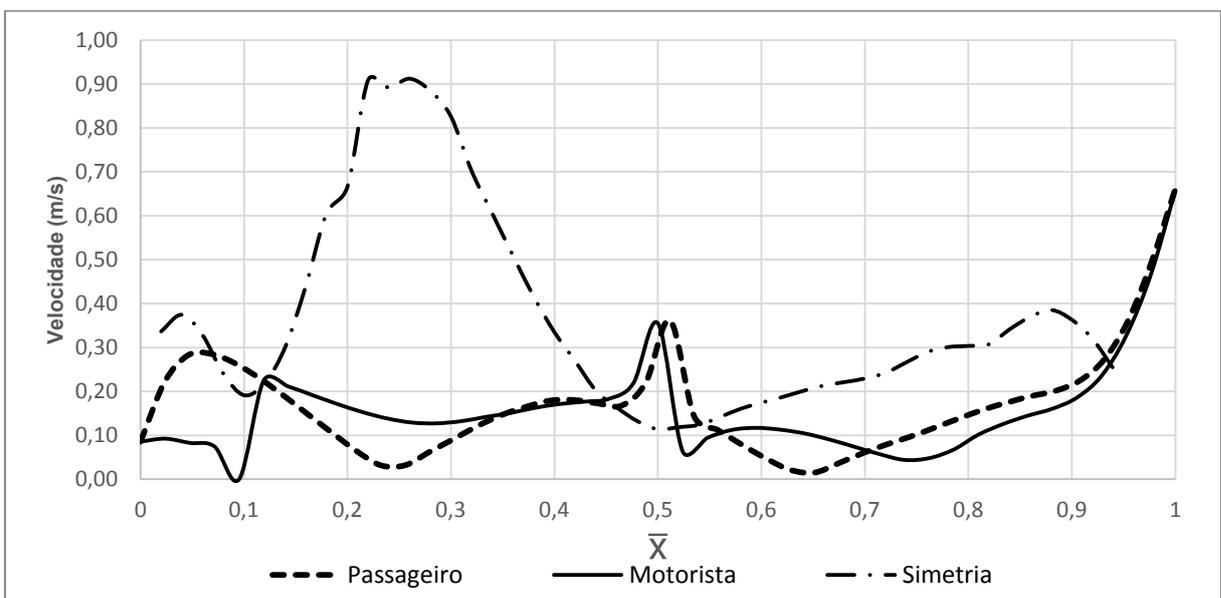
o ponto 0,5 corresponde a parte média do veículo em cima da reta e o valor 1 corresponde a um ponto na superfície do banco traseiro (reta vermelha, azul e verde). Para a análise em  $\bar{Z}$ , a abscissa nos valores máximos negativos corresponde a porta do lado do passageiro, o valor zero corresponde a parte central do banco traseiro e os valores máximos positivos equivalem a porta do lado do motorista (reta amarela). As retas de captação de dados podem ser encontradas na Figura 28.

Figura 28 - Linhas para captação de dados



Fonte: Autor (2022)

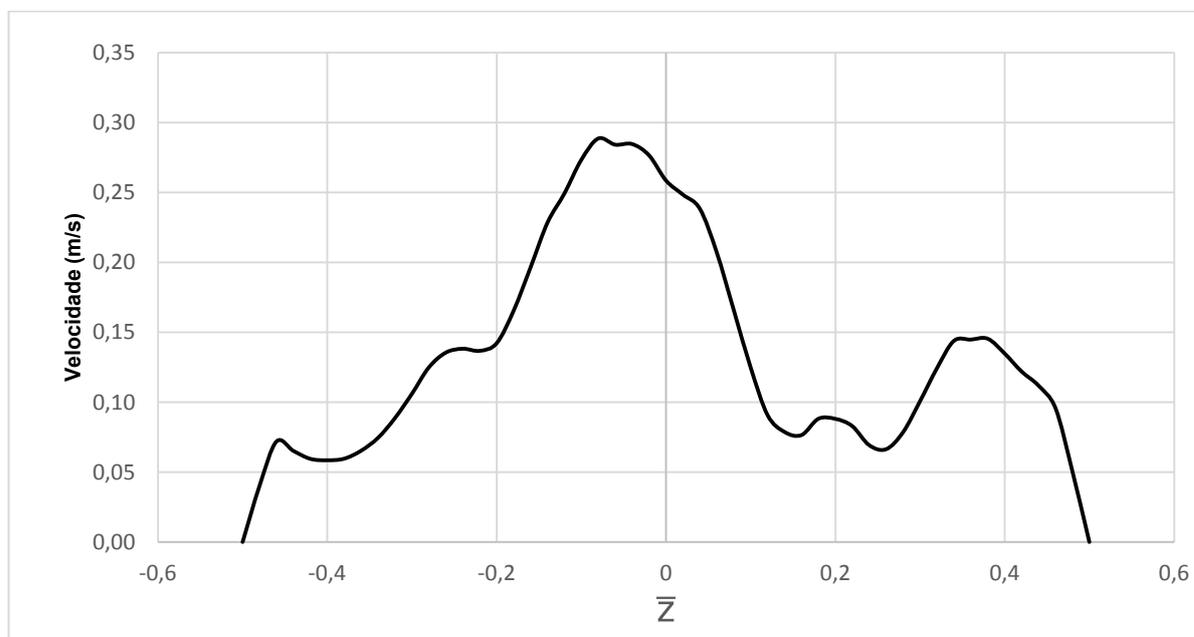
Figura 29 – Velocidade sistema convencional versus comprimento adimensional  $\bar{X}$



Fonte: Autor (2022)

Nota-se que entre 0,1 e 0,4 m é onde ocorre a maior diferença entre as curvas, isto se dá pelas curvas do passageiro e motorista passarem por seus respectivos bancos, enquanto que no plano de simetria o fluido escoar sem barreiras.

Figura 30 – Velocidade sistema convencional versus comprimento adimensional  $\bar{z}$



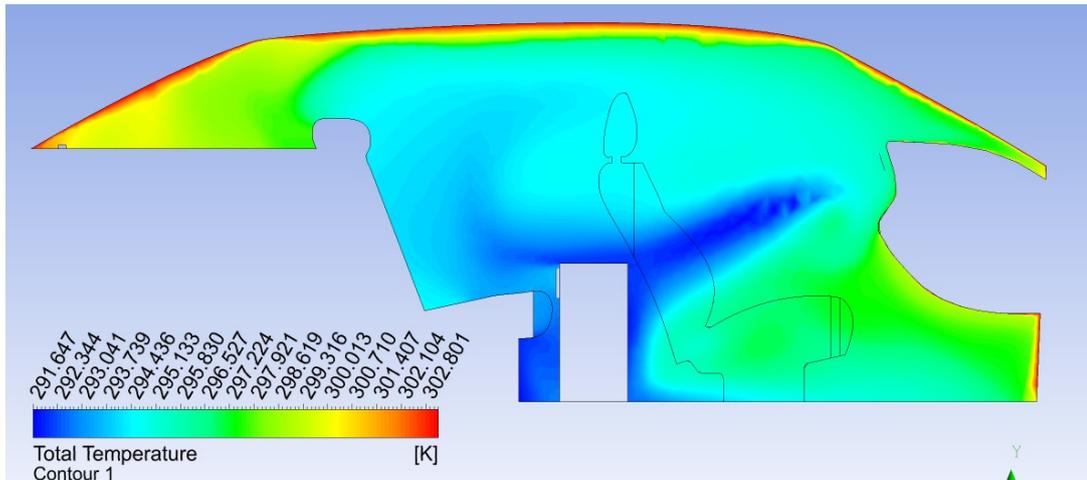
Fonte: Autor (2022)

Observa-se na Figura 30, velocidade em relação a direção  $\bar{z}$ , que temos as maiores velocidades localizadas nas extremidades do banco possuindo pontos máximos de 0,65 e 0,7 m/s, sendo que a velocidade na porção na parte positiva de  $\bar{z}$  – lado do motorista – é maior do que em relação ao passageiro, corroborando com o que foi mencionado antes sobre a velocidade do difusor do motorista ser maior.

#### 4.5.2. Condição operacional II – Sistema convencional

Prosseguindo para a condição operacional II, Tabela 4, que é a adição da equação da energia na condição I. Nota-se a distribuição de temperatura pelo plano central do veículo, Figura 31. Percebe-se que na parte central do veículo na porção posterior a distribuição de temperatura é diferente comparada com a da frente devido à disposição do escoamento, atingindo um  $\sim \Delta T = 3^\circ C$ .

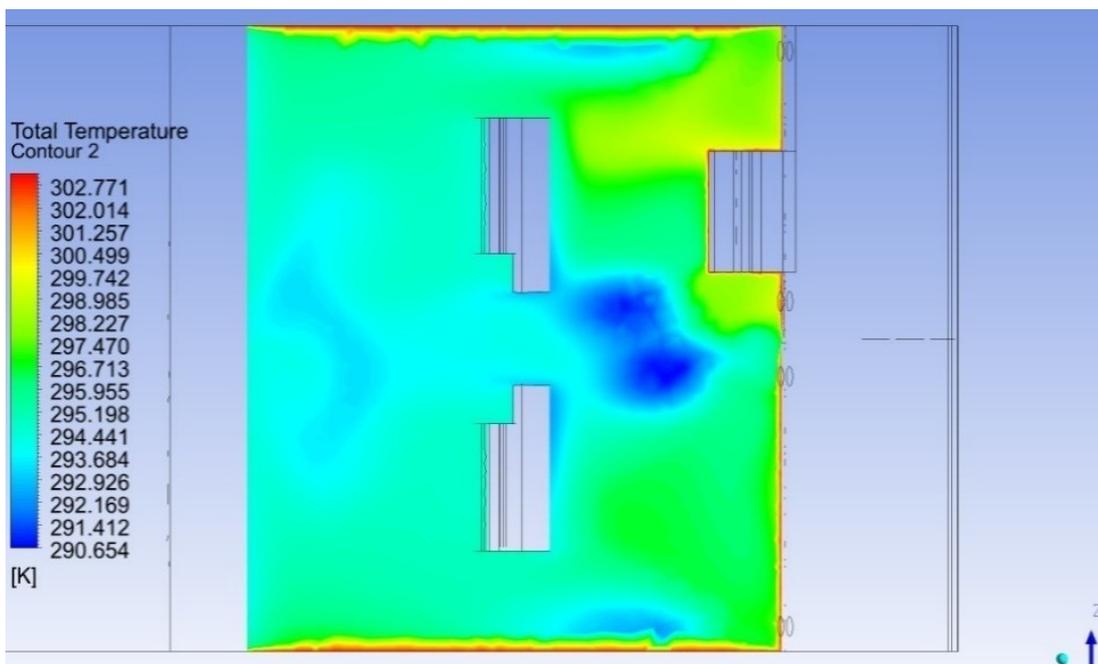
Figura 31 - Campo de temperatura sistema convencional plano central I



Fonte: Autor (2022)

A Figura 32 mostra-nos o plano superior, onde percebe-se a diferença de temperatura da parte frontal com a parte posterior do veículo. Isto se deve a circulação de ar estar mais presente na parte traseira do automóvel, em razão do posicionamento dos difusores e o fluido escoar pela totalidade do banco traseiro, fazendo assim com que quantidade de calor troca por convecção é maior que no banco dianteiro.

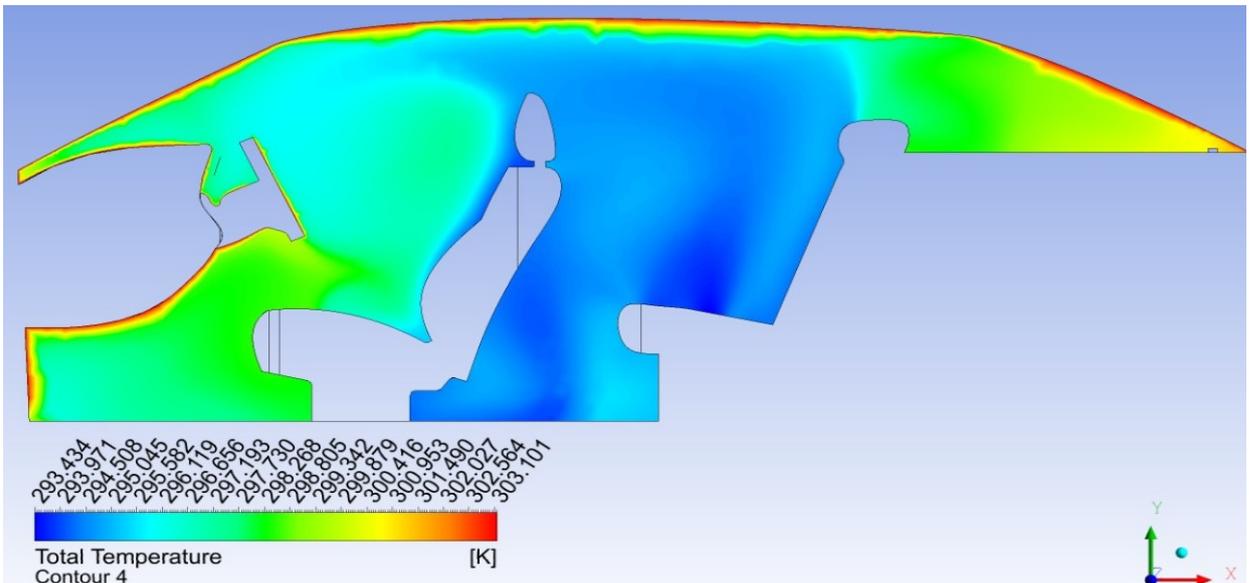
Figura 32 - Campo de temperatura sistema convencional plano superior I



Fonte: Autor (2022)

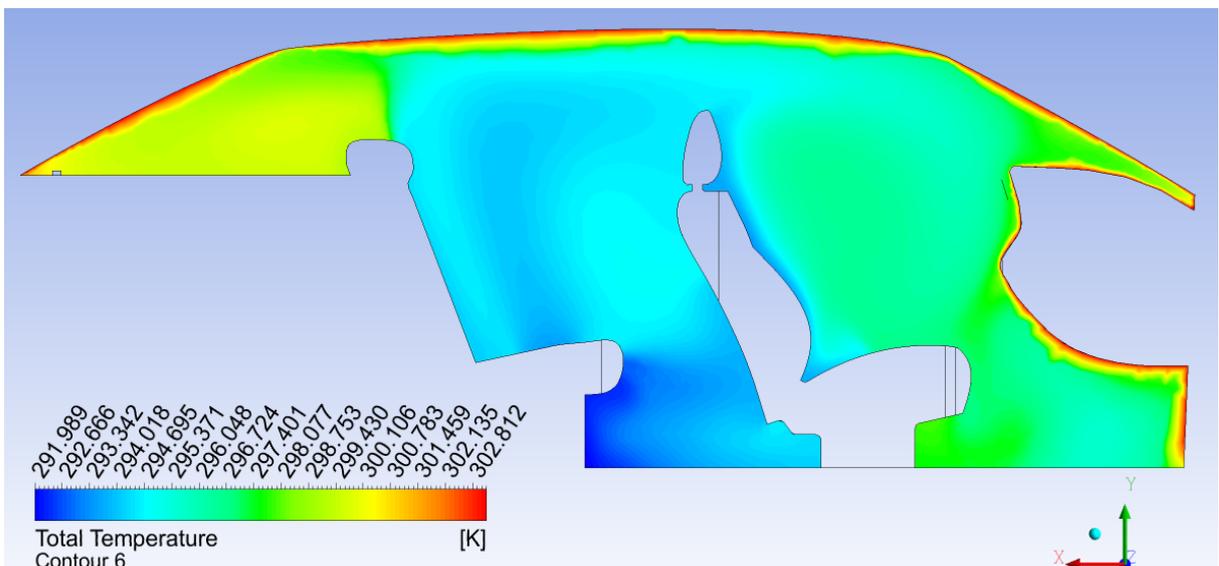
Observa-se na Figura 33 e Figura 34 as temperaturas em relação ao plano do motorista e passageiro. Podemos perceber com maior evidência a diferença no campo de temperatura, chegando a uma variação em até 6 °C. Nota-se que a temperatura na parte traseira do veículo é relativamente menor que a da frente, isto se dá pelo encontro das correntes de fluidos na região do passageiro traseiro.

Figura 33 - Campo de temperatura sistema convencional motorista I



Fonte: Autor (2022)

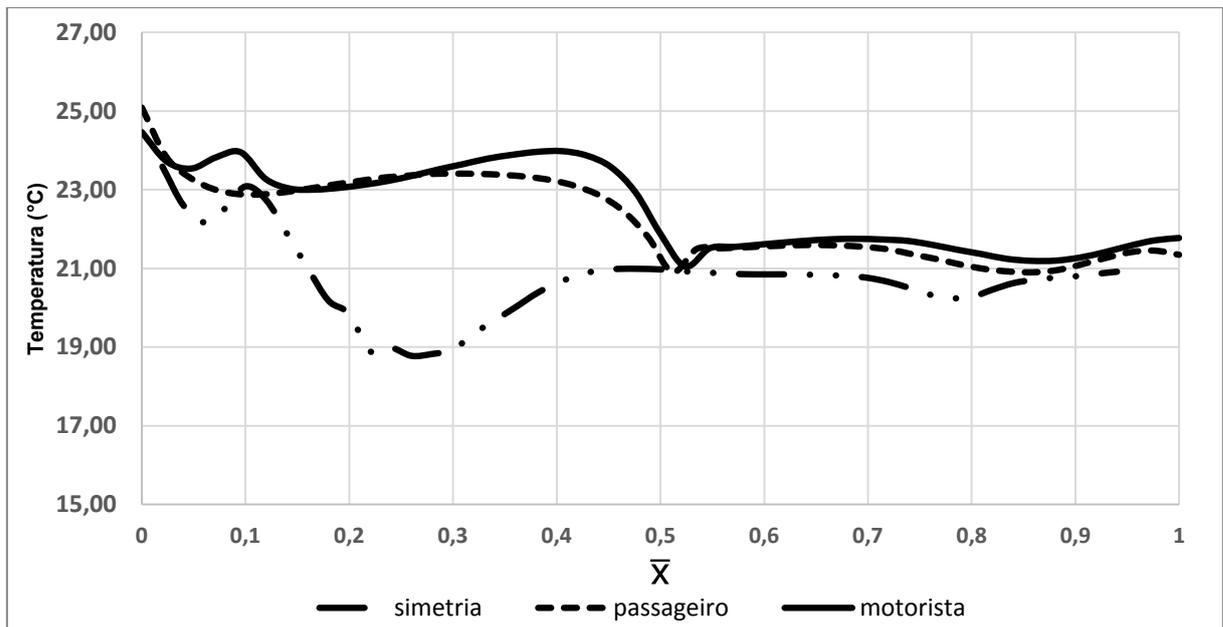
Figura 34 - Campo de temperatura sistema convencional passageiro I



Fonte: Autor (2022)

Como feito para as velocidades, foi construído a Figura 35 onde nos mostra a temperatura em função de  $\bar{X}$ . Percebe-se um perfil similar ao do campo de velocidades, porém com uma queda da temperatura na região de simetria, isto se deve ao fluido não possuir barreiras significativas com temperatura prescrita como o fluido que sai dos difusores laterais que entram em contato com as portas e os bancos.

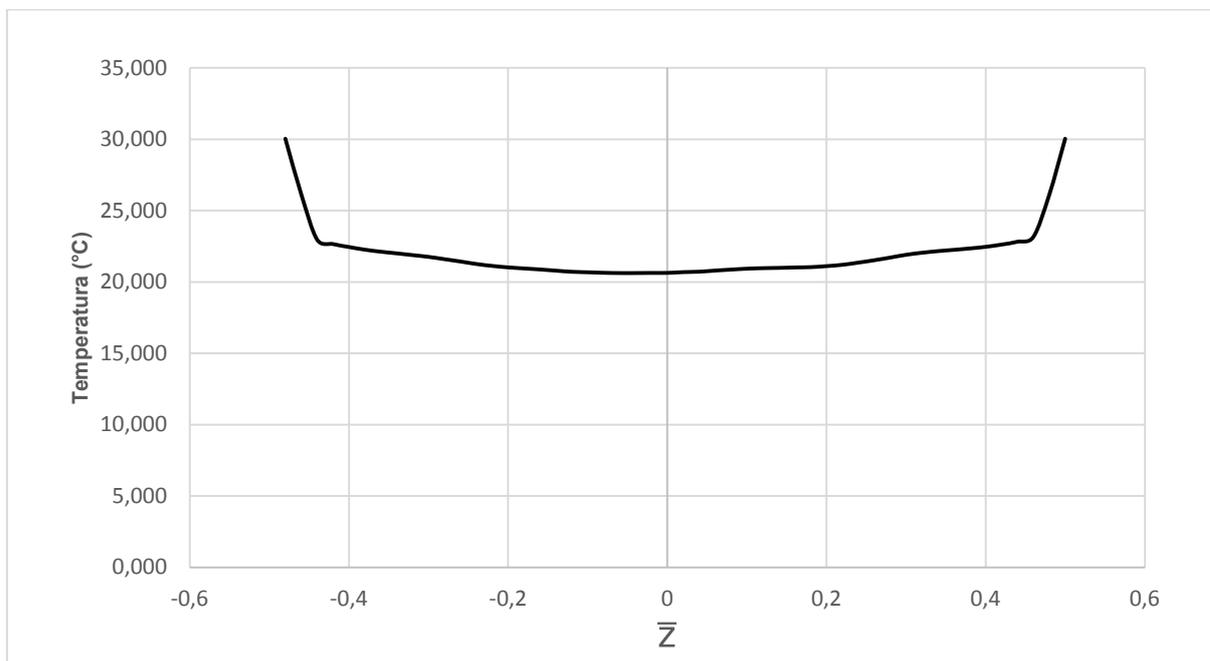
Figura 35 – Temperatura sistema convencional versus  $\bar{X}$



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 36, podemos observar o perfil de temperatura na região do banco traseiro, nota-se que a temperatura se manteve relativamente estável na direção  $\bar{Z}$ , apresentando uma média de 22 °C.

Figura 36 - Temperatura sistema convencional versus  $\bar{z}$

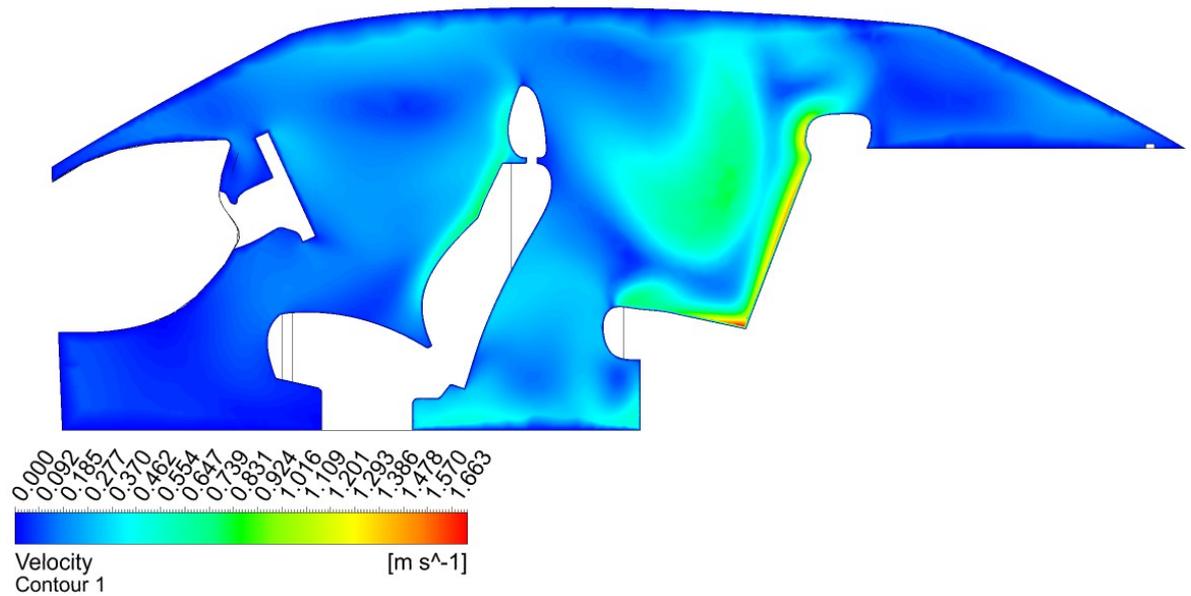


Fonte: Autor (2022)

#### 4.5.3. Condição operacional III – Sistema *multizone*

Em paralelo, foi feita a análise do escoamento do fluido para o sistema *Multizone*, Tabela 5. Nota-se a maior circulação de ar na parte traseira e uma melhor circulação de ar na parte dianteira, como se pode observar na Figura 25. Nota-se também que a zona de recirculação localizada nos pés do passageiro traseiro, comentada também na Figura 25, não existe mais.

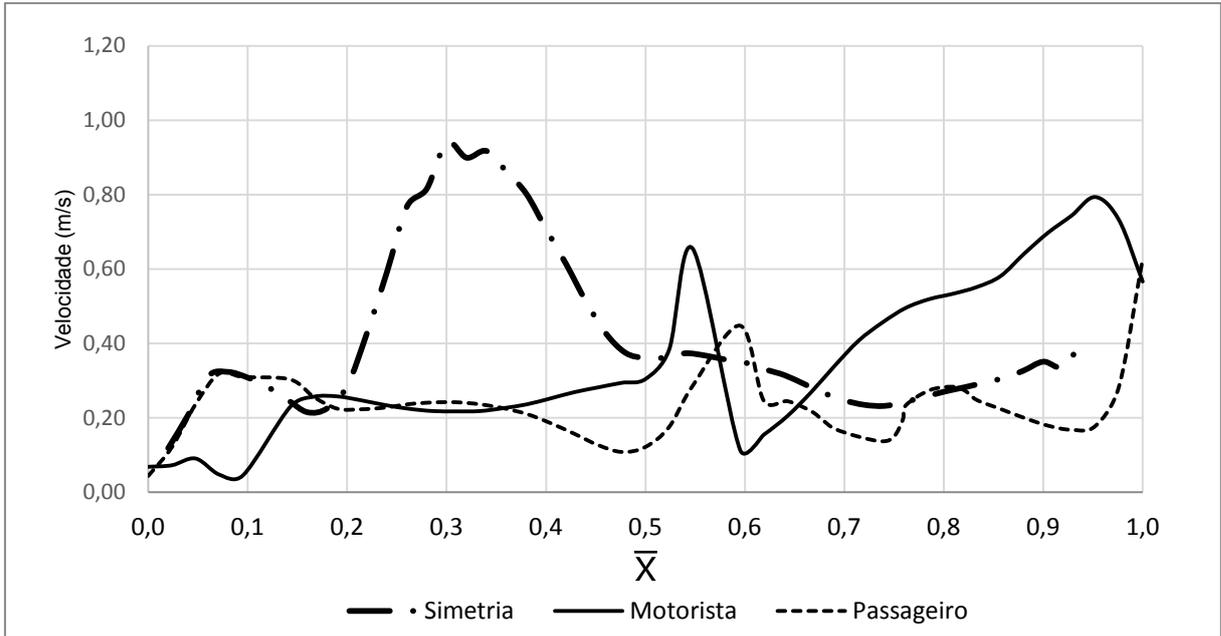
Figura 37 - Campo de velocidade sistema *multizone* motorista II



Fonte: Autor (2022)

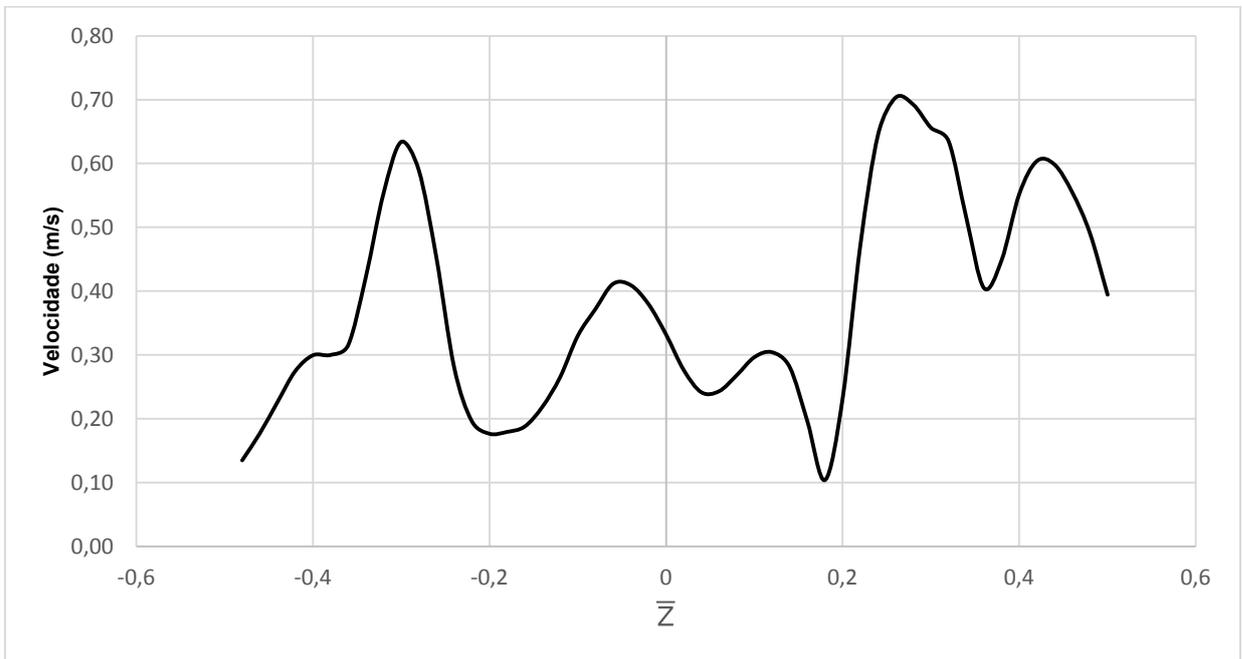
Na Figura 38 é possível observar a diferença da velocidade em relação à condição de contorno I – sistema convencional. É possível perceber que na parte posterior do veículo houve um aumento de velocidade devido a adição de outro difusor e houve um aumento da turbulência, comparado com a condição de contorno I, na região de encontro dos fluidos no banco traseiro. Pode-se notar isto mais facilmente na Figura 39.

Figura 38 – Velocidade sistema *multizone* versus  $\bar{X}$



Fonte: Autor (2022)

Figura 39 – Velocidade sistema *multizone* versus  $\bar{Z}$

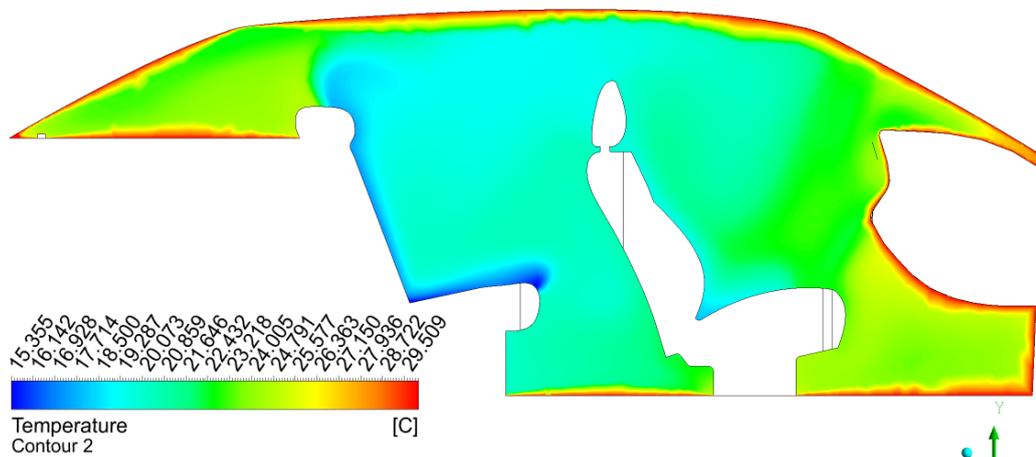


Fonte: Autor (2022)

#### 4.5.4. Condição operacional IV - Sistema *Multizone*

Nesta etapa analisou-se a variação de temperatura no interior do veículo conforme a condição operacional IV, Tabela 6, para o sistema *Multizone*. Podemos observar que com as diferentes temperaturas de saída dos difusores, o gradiente de temperatura interno é maior quando comparado com a condição de operação II do sistema convencional. Nota-se uma zona de aproximadamente 21 °C na periferia do banco do passageiro dianteiro e uma temperatura de 18 °C no banco traseiro, conforme Figura 40.

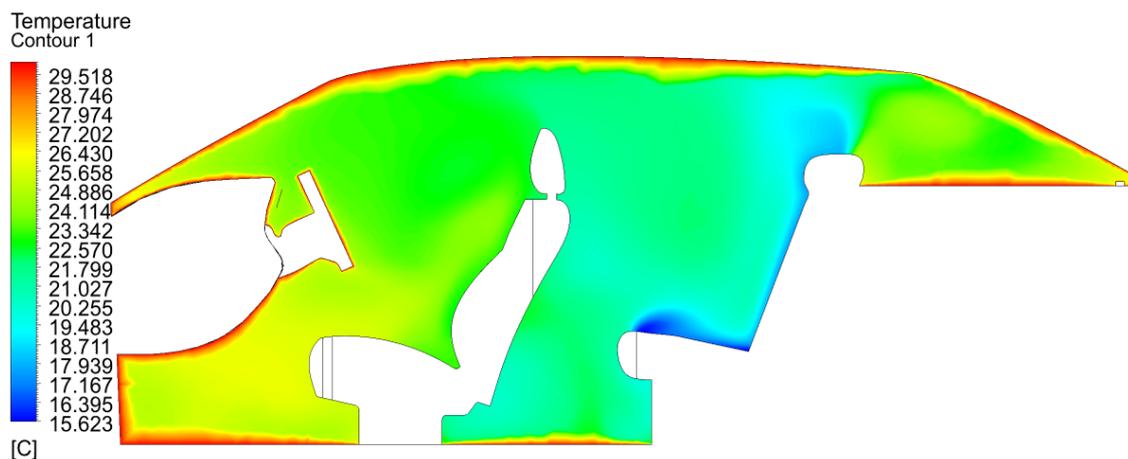
Figura 40 - Campo de temperatura sistema *multizone* passageiro II



Fonte: Autor (2022)

Observando o lado do motorista podemos perceber uma temperatura maior, em torno dos 25 °C, isto já nos mostra uma variação de temperatura entre o banco do passageiro dianteiro e motorista em torno de 3 °C, segundo Figura 41.

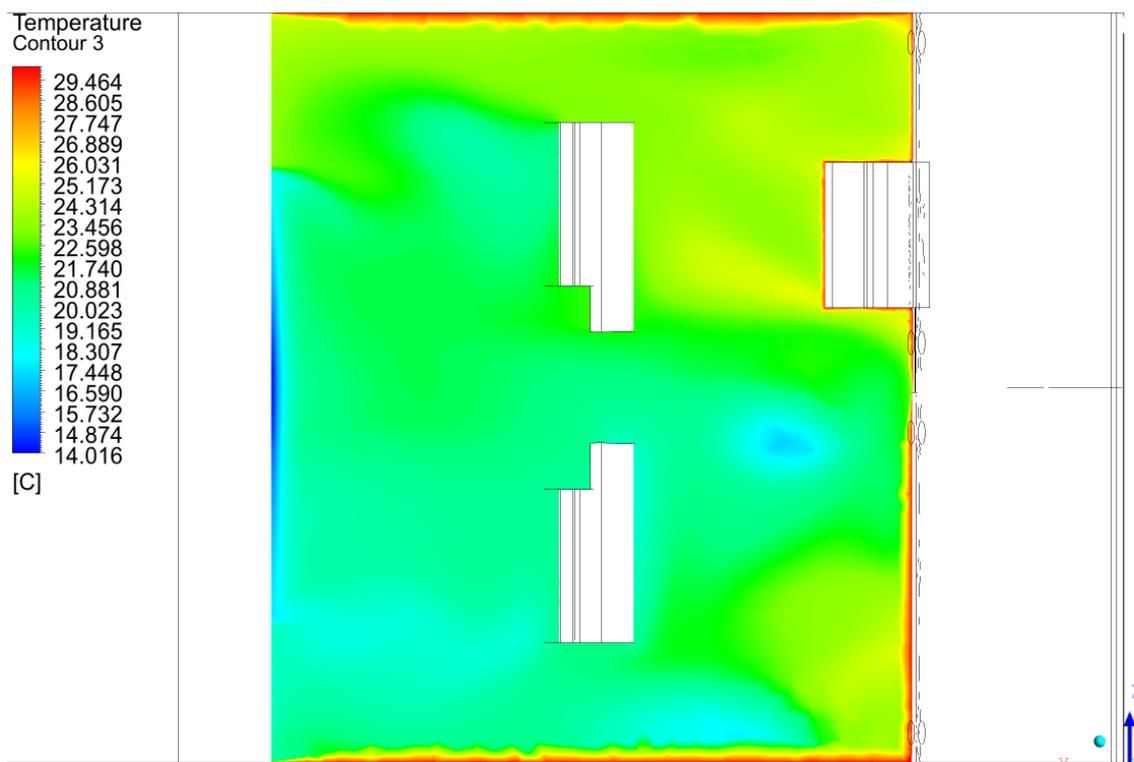
Figura 41 - Campo de temperatura sistema *multizone* motorista II



Fonte: Autor (2022)

Por meio da Figura 42 é possível observar com mais clareza as três zonas de temperatura dentro do veículo.

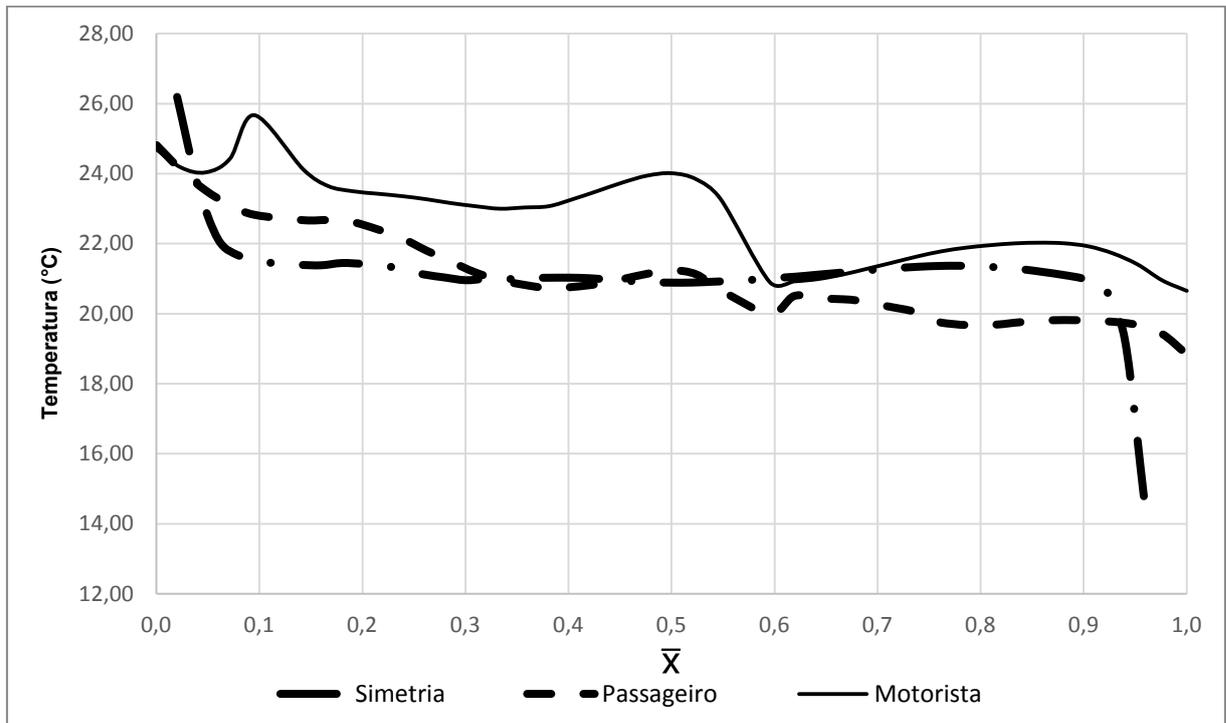
Figura 42 - Campo de temperatura sistema *multizone* plano superior II



Fonte: Autor (2022)

Para melhor comparação, foi feita uma análise, Figura 43, nos mesmos moldes dos anteriores. Nota-se que na região dianteira do carro a temperatura da porção do motorista é mais elevada em relação ao passageiro dianteiro, em torno de 2 °C

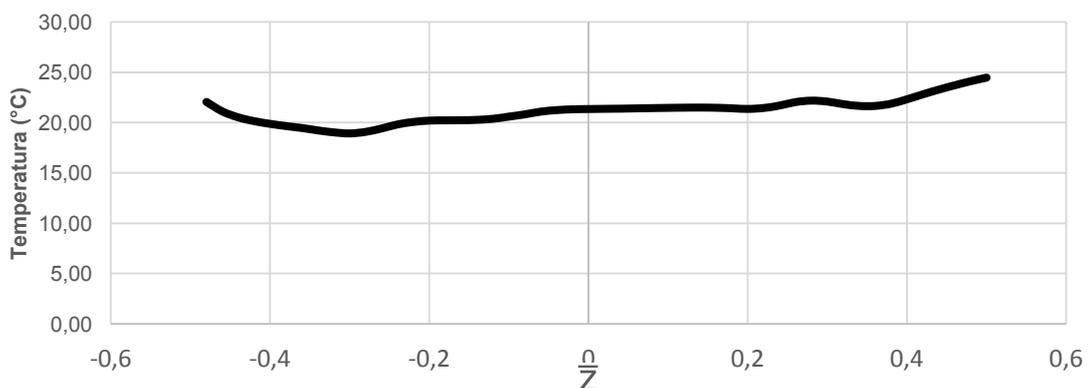
Figura 43 - Temperaturas sistema *multizone* versus  $\bar{X}$



Fonte: Autor (2022)

Pode-se observar na Figura 44 a temperatura da seção traseira do veículo, como do lado do passageiro dianteiro a temperatura é menor, por volta de 22 °C, devido ao fluido que escoou pela porta do veículo.

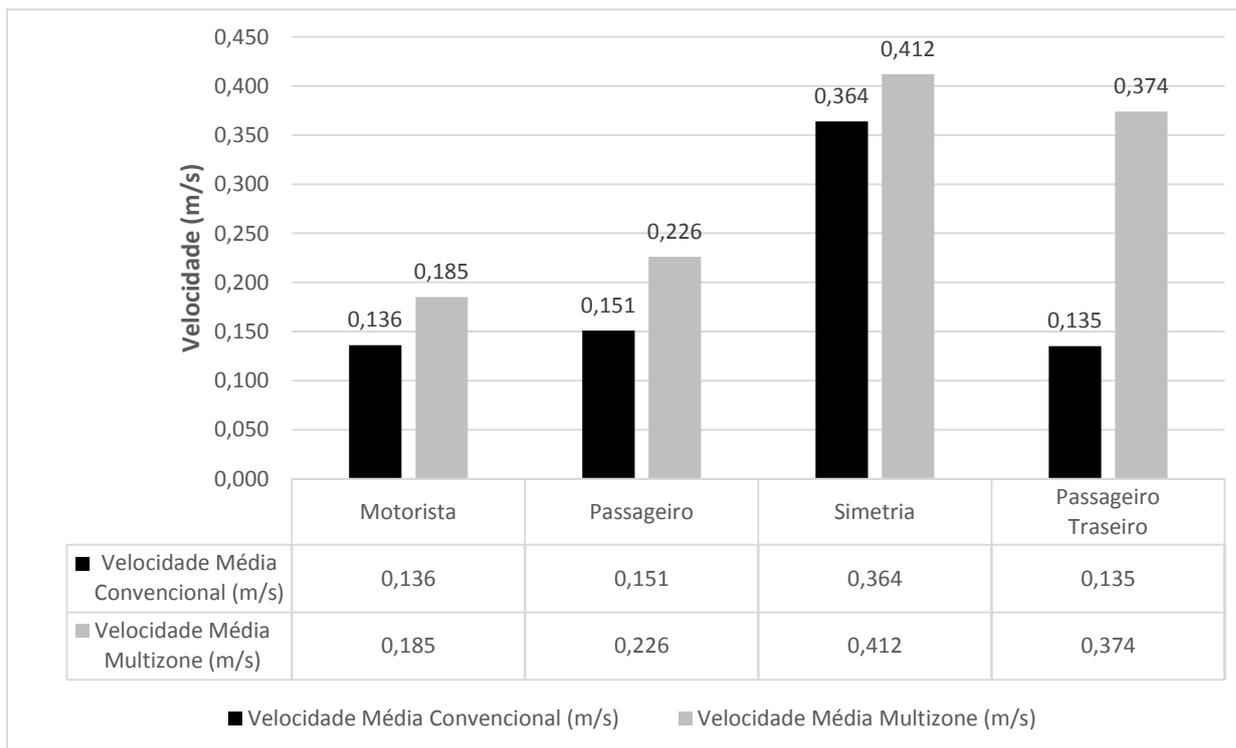
Figura 44 – Temperatura sistema *multizone* versus  $\bar{Z}$



Fonte: Autor (2022)

A Figura 45 apresenta os dados comparativos das velocidades médias entre o sistema convencional e o sistema Multizone. Percebe-se que para o sistema *Multizone* (condição de operação IV) há uma melhor circulação do ar no interior do veículo e as zonas de recirculação diminuem.

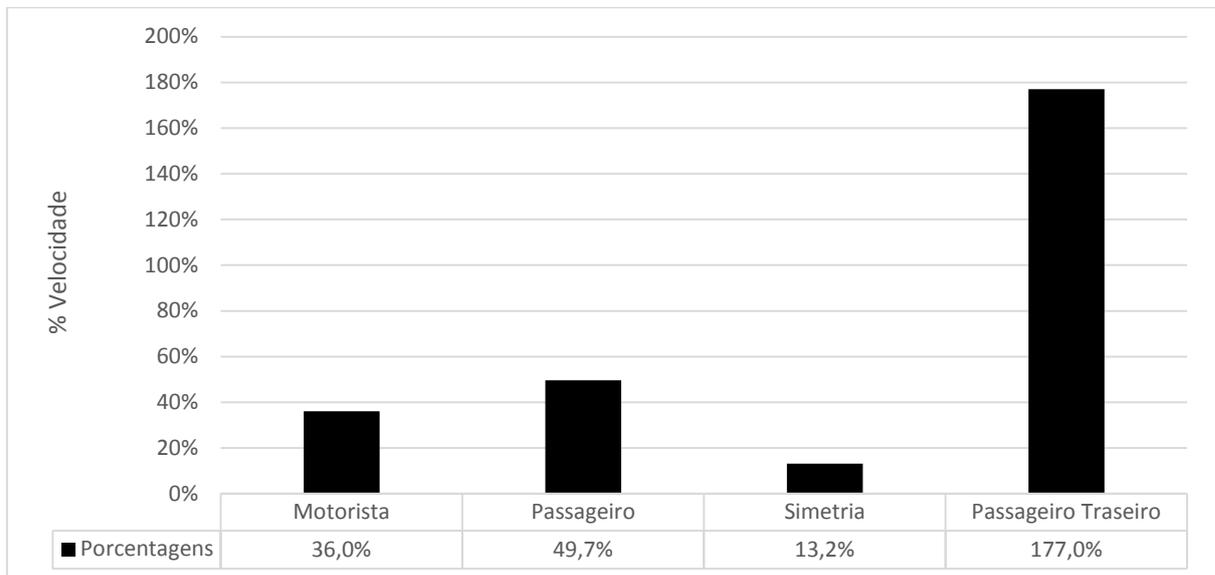
Figura 45 - Velocidades médias sistema convencional e *multizone*



Fonte: Autor (2022)

Pode-se explorar os dados na forma percentual conforme a Figura 46, onde nela é possível observar que no sistema *Multizone* há um aumento significativo na velocidade do ar. Este aumento corrobora com a análise de que neste sistema a circulação de ar é mais eficiente.

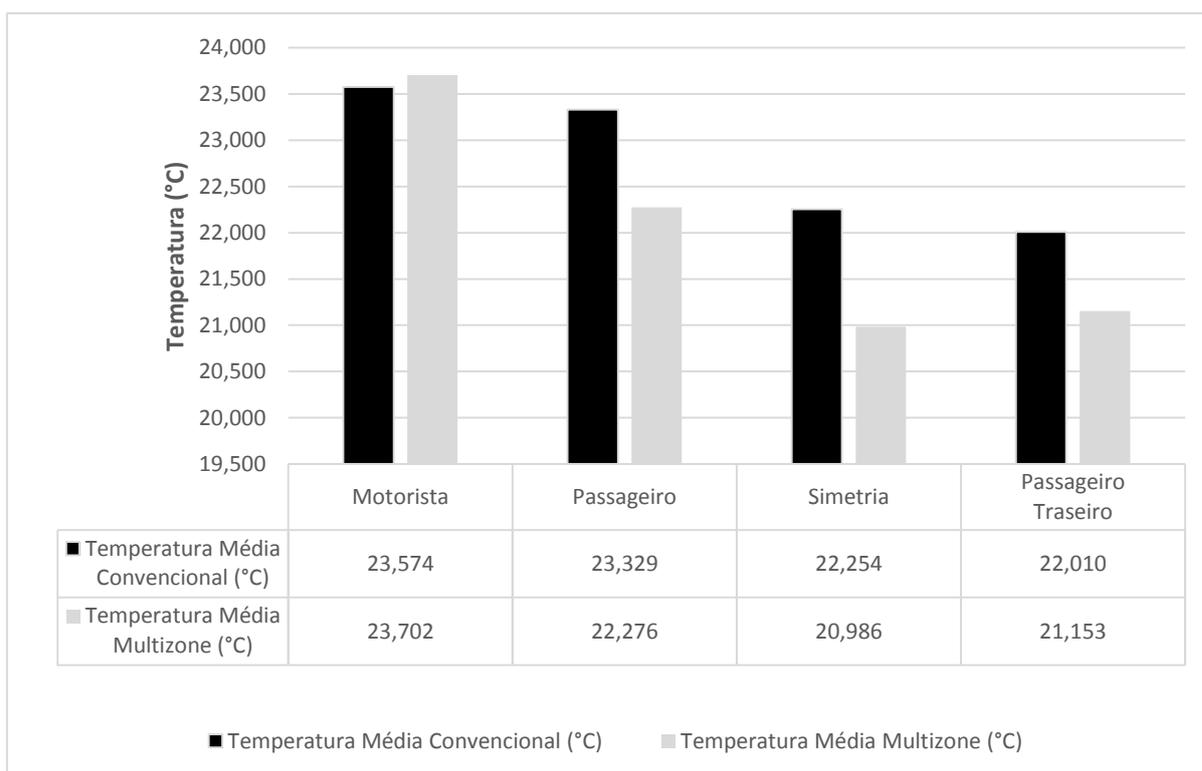
Figura 46 - Diferença de velocidade em porcentagem do sistema convencional para o *Multizone*



Fonte: Autor (2022)

Em relação à temperatura, a Figura 47 mostra-nos um comparativo da temperatura do sistema convencional com o sistema Multizone. Há uma melhor distribuição de temperatura no sistema *Multizone* do que no convencional mesmo com a diferença na temperatura de saída de ar nos difusores – motorista e passageiro dianteiro com 20°C e passageiro traseiro com 10°C - há a geração de microclimas nestas regiões e enquanto que no sistema convencional - condição de operação II - o banco traseiro permaneceu significativamente com temperatura menor, possuindo em seus pontos máximos uma variação de 5 a 6 °C, como pode ser visto na Figura 35 e em média uma variação de 1,5 °C.

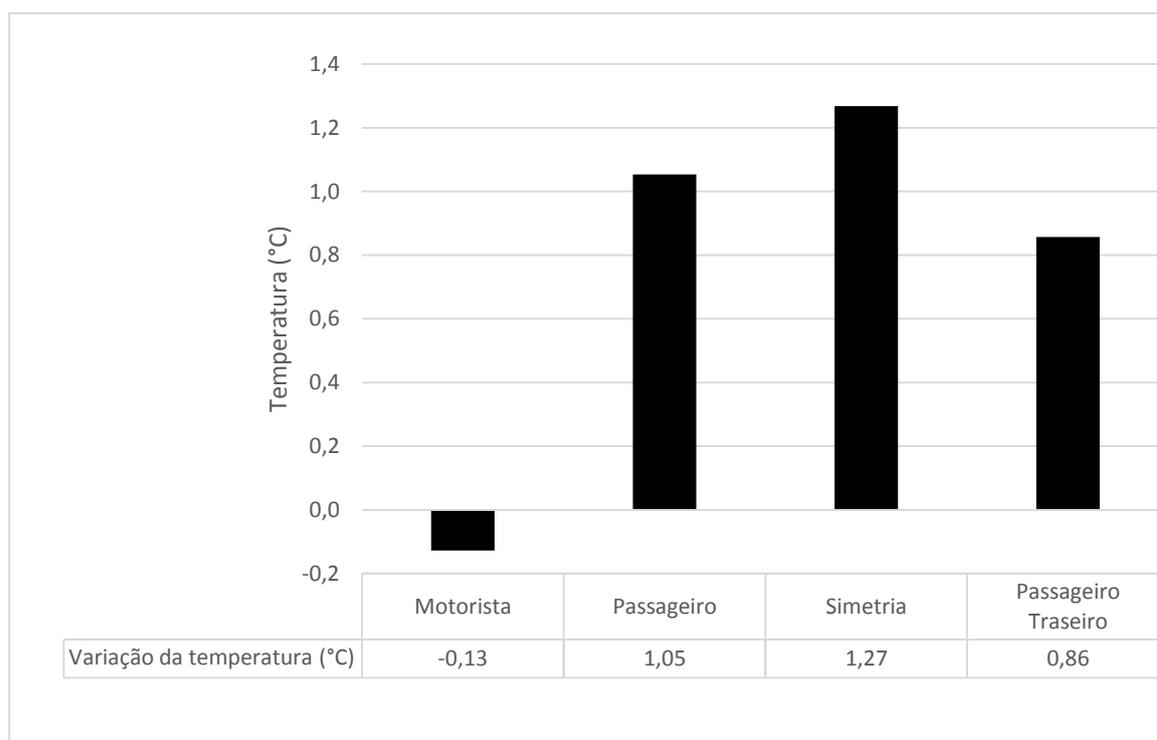
Figura 47 - Temperaturas médias sistema convencional e *Multizone*



Fonte: Autor (2022)

A Figura 48 nos mostra a variação em das médias das temperaturas entre o sistema convencional e o *Multizone*. Nota-se que, houve um aumento em relação ao motorista, isto devido a temperatura do ar na saída de seu difusor, observa-se que em relação ao passageiro dianteiro e o traseiro houveram queda de temperatura em torno de 1,05 °C e 0,86 °C o que nos certificam da geração dos microclimas no interior da cabine do veículo.

Figura 48 - Diferença de temperatura entre o sistema convencional e o *Multizone*



Fonte: Autor (2022)

## 5. CONCLUSÕES

O estudo do sistema de condicionamento de ar é um fenômeno complexo que contém inúmeras variáveis como geometria do veículo e seu interior e otimização dos dutos internos do automóvel. O presente estudo analisou quatro condições de contorno de um sistema simplificado de condicionamento de ar.

A comparação dos resultados nos levou a concluir que há uma diferença significativa em circulação de ar no interior da cabine quando se acionam quatro difusores (sistema convencional) ou cinco difusores (sistema *Multizone*), sendo o último caso possuindo a melhor circulação. Com o acionamento de todos os difusores há menor quantidade de zonas de recirculação no interior da cabine o que gera um melhor aproveitamento do sistema de condicionamento de ar - pode-se notar isto analisando os gráficos de velocidade das condições de operação II e III, na primeira os três perfis de velocidade medidos estão, em alguns pontos, relativamente próximos de velocidade zero (zonas de recirculação) e enquanto na segunda a sua média é entorno de 0,2 m/s. A velocidade média aumentou em torno de 69% entre o sistema convencional para o sistema *Multizone*.

Também foram avaliadas as temperaturas no interior da cabine com o intuito da análise do sistema *Multizone*. Com o sistema convencional há a geração de zonas de temperatura, mas o conforto térmico dos passageiros traseiros fica comprometido devido a variação de temperatura entre a parte frontal e dianteira do veículo – entre 3 a 4 °C nos pontos máximos e em média uma disparidade de 1,5 °C. Com o sistema *Multizone* acionado (condição de operação IV) percebeu-se um melhor equilíbrio entre as temperaturas, porém com diferenças entre si, atingindo em média uma variação entre o motorista e os passageiros traseiros de aproximadamente 2,5 °C e entre o passageiro dianteiro e os traseiros por volta de 1 °C o que atende a cada passageiro em questão quando comparados com o sistema convencional. O importante é notar, na região do motorista, que no sistema convencional a temperatura do ar foi selecionada para 10 °C em todo veículo e para o sistema *Multizone* a 20 °C e nesta região os dois sistemas estão com temperaturas equiparadas, o que nos mostra a ineficiência do sistema convencional.

Propõe-se que as seguintes adaptações sejam aplicadas à análise de modo que a modelagem se aproxime ao caso real e resultados mais robustos sejam adquiridos:

- Contabilizar o efeito do volante
- Aprimorar dutos de distribuição internos do veículo
- Adicionar função de desembaçador
- Adicionar dutos que distribuem fluxos de fluido nos pés dos passageiros
- Adicionar carga solar, geração de calor dos passageiros, material dos bancos.
- Contabilizar a umidade relativa do ar.

## Bibliografia

ANSYS, I. ANSYS Meshing User's Guide, Canonsburg, Novembro 2010.

BEJAN, A. **Convection Heat Transfer**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013.

DALY, S. **Automotive Air Conditioning and Climate Control Systems**. Burlington: Elsevier, v. 1, 2006.

DONATI, D. C. X. **ANÁLISE NUMÉRICA DA INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA DE TROCADORES DE CALOR DO TIPO PSHE**. Tese (Graduação) - Curso de Graduação em Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville. 2019.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Rio de Janeiro: Performa, 2010.

HALL, T. J.; FANTIN, J. **MULTI-ZONE TEMPERATURE CONTROL SYSTEM FOR HVAC AIR-HANDLING ASSEMBLY**. 6.415.851, 9 Julho 2002.

HINDSBO, M. <https://www.ansys.com/content/dam/company/advantage>, 20 Maio 2022. Disponível em: <<https://www.ansys.com/content/dam/company/advantage/ansys-advantage-digital-exploration-aa-v11-i2.pdf>>.

INCROPERA, F.; DEWITT, D. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6. ed. Rio Janeiro: Editora Nacional, 2008.

KINMARTIN, J. C.; FALZONE, F. C.; HOFFMAN, D. E. **METHOD OF ASSEMBLY OF SINGLE AND MULTI-ZONE VEHICLE HEATING AND A/C SYSTEM**. 5.101.883, 7 Abril 1992.

MALISKA, C. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Coordenadas Generalizadas**. 2ª. ed. Florianópolis: LTC, 2017.

MCDOWALL, R. **Fundamentals of HVAC Systems**. New York: Elsevier Science, 2007. ISBN 9780123739988.

MORENO, T. Cnn Brasil Business. **CNN BRASIL**, 2022. Disponível em: <[https://www.cnnbrasil.com.br/business/veja-quais-foram-os-10-carros-mais-vendidos-do-brasil-em-2021/#:~:text=A%20Fenabreve%20\(Federação%20Nacional%20da,foram%20adquiridas%201.950.754%20unidades.>](https://www.cnnbrasil.com.br/business/veja-quais-foram-os-10-carros-mais-vendidos-do-brasil-em-2021/#:~:text=A%20Fenabreve%20(Federação%20Nacional%20da,foram%20adquiridas%201.950.754%20unidades.>)>. Acesso em: 15 jul. 2022.

NIETZSCHE, F. **Ecce Homo**. [S.l.]: [s.n.], 1908.

NISHIMURA, M.; MORI, M.; YOSHIMI, A. **ZONE AIR-CONDITIONING CONTROL SYSTEM FOR MOTOR VEHICLE COMPARTMENT**. 4.537.245, 27 Agosto 1985.

POSSAMAI, T. S. **ANÁLISE TÉRMICA E MODELAGEM NUMÉRICA DE UM FORNO DE FUSÃO DE MATERIAL VÍTREO A GÁS NATURAL**. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2014.

REDAÇÃO. Estadão - Jornal do Carro. **Estadão**, 2019. Disponível em: <<https://jornaldocarro.estadao.com.br/carros/carros-sem-ar-condicionado-sumiram/#:~:text=Por%20muito%20tempo%20o%20ar,podem%20vir%20sem%20ar-condicionado.>>. Acesso em: 15 Julho 2022.

SCOCCIA, A. **AUTOMOTIVE HEATING, AIR SYSTEM WITH COMBINED MODE DOOR AND DUAL TEMPERATURE SENSOR**. 5.927.380 , 27 Julho 1999.

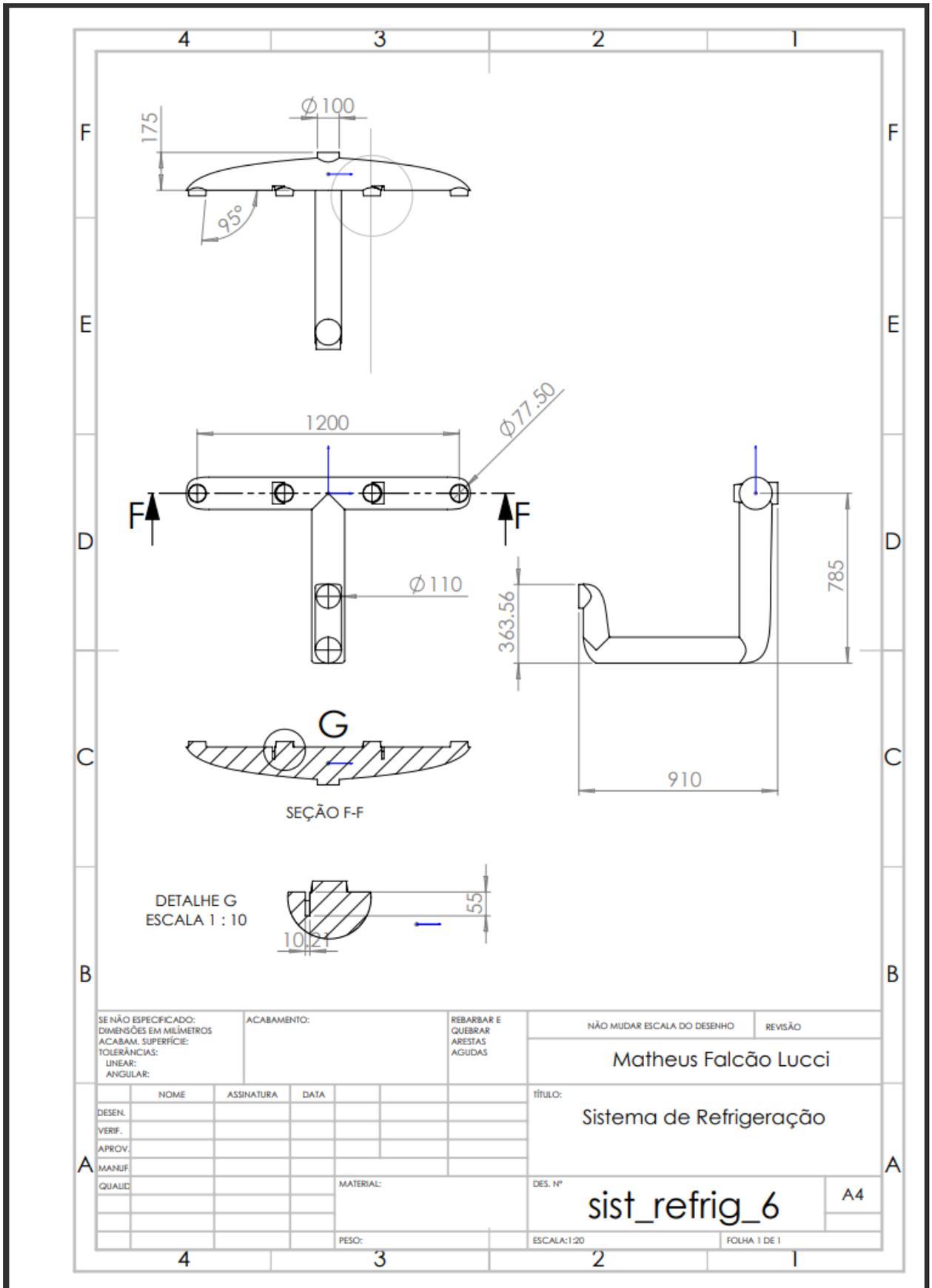
SOUZA, J. F. A. et al. Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. **Revista Brasileira de Geofísica**, 2011.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W. **Refrigeração e Ar Condicionado**. New York: McGraw-Hill, 1985.

TAN, L.; YUAN, Y. Computational fluid dynamics simulation and performance optimization of an electrical vehicle Air-conditioning system. **Elsevier**, 1 Maio 2021. 1-328.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. 2ª. ed. Essex: Pearson Education Limited, 2006.

## ANEXO A – Desenho Técnico da geometria do duto de refrigeração



## ANEXO B – Geometria referência para Audi Q7

