



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Jomar Araújo Magalhães

Análise da carga térmica de resfriamento de sistemas de condicionamento de ar automotivo utilizando método Projeto Robusto

Joinville

2024

Jomar Araújo Magalhães

Análise da carga térmica de resfriamento de sistemas de condicionamento de ar automotivo utilizando método Projeto Robusto

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Sistemas de Engenharia.

Orientador: Prof. Diogo Lôndero da Silva, Dr.

Joinville
2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela
BU/UFSC.

Dados inseridos pelo próprio autor.

Magalhães, Jomar Araújo

Análise da carga térmica de resfriamento de sistemas de condicionamento de ar automotivo utilizando método Projeto Robusto / Jomar Araújo Magalhães ; orientador, Diogo Lôndero da Silva, 2024.

114 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Sistema de Condicionamento de Ar. 3. Conforto Térmico. 4. Carga Térmica. 5. Projeto Robusto. I. da Silva, Diogo Lôndero. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas. III. Título.

Jomar Araújo Magalhães

**Análise da carga térmica de resfriamento de sistemas de condicionamento de ar
automotivo utilizando método Projeto Robusto**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, 08 de agosto de 2024,
pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Andrea Piga Carboni, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Leonel Rincón Cancino, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Enio Pedone Bandarra Filho, Dr.
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado
adequado para obtenção do título de Mestre em Pós-Graduação em Engenharia e Ciências
Mecânicas.

Insira neste espaço a
assinatura digital

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof. Diogo Lôndero da Silva, Dr.
Orientador

Joinville – SC, 2024.

Este trabalho é dedicado à minha família,
aos amigos e colegas de trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, cuja graça e sabedoria iluminaram cada passo desta jornada, sempre concedendo força e fé nos desafios enfrentados.

Aos meus pais, meu irmão e minhas filhas, eterna gratidão pelo amor e apoio incondicional. Cada palavra de incentivo, cada gesto de apoio foram fundamentais para que eu pudesse alcançar este objetivo.

Aos professores, em especial ao Prof. Dr. Diogo Lôndero da Silva, por sua inestimável orientação, paciência e suporte. Sua dedicação e conhecimento foram pilares fundamentais para realização deste trabalho. As sugestões valiosas que não apenas enriqueceram este trabalho, mas também contribuíram de maneira significativa para meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos amigos, colegas de trabalho, e todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos vocês, meu sincero agradecimento!

RESUMO

Os níveis de poluição ambiental registrados, resultantes da atividade humana, têm agravado nas últimas décadas. Tal situação motiva empresas e o meio acadêmico a buscarem processos e produtos sustentáveis, que minimizem a agressão e poluição do meio ambiente. Adicionalmente, a Agência Internacional de Energia estabeleceu metas de redução da emissão líquida de CO₂, que devem ser atingidas até o ano de 2050. Dentre as atividades que emitem CO₂, observa-se que os veículos privados e vans contribuíram com cerca de 10% das emissões globais. Por este motivo, o setor automotivo tem adotado medidas que levem à redução do consumo de combustível, como por exemplo a utilização de sistemas de condicionamento de ar mais eficientes. Diferentes estudos mostram que o entendimento das cargas térmicas encontradas na cabine de passageiros é um pré-requisito chave de um projeto eficiente de qualquer sistema de condicionamento de ar automotivo. Como os parâmetros de projeto e condições de operação de um veículo têm relação direta com a carga térmica de um automóvel e, conseqüentemente, com o seu consumo de energia este trabalho estabelece como objetivo analisar os efeitos de parâmetros geométricos, construtivos e operacionais de um veículo sobre a carga térmica do sistema de condicionamento de ar. Para tanto, foi escolhido um automóvel, objeto de estudo e desenvolvido um modelo matemático baseado em fundamentos termodinâmicos e de transferência de calor, capaz de estimar a carga térmica do sistema de condicionamento de ar automotivo. A partir do desenvolvimento do modelo, foram analisados os efeitos das interações entre os fatores de controle e de ruído, onde foi possível chegar a uma condição referência. Adicionalmente, o método projeto Robusto de produtos e a simulação de Monte Carlo foram empregados em conjunto com o modelo matemático para determinar o efeito de diferentes parâmetros de entrada do modelo e identificar oportunidades de redução da carga térmica, bem como da sua variabilidade. Em seguida, foram elaborados novos conceitos com objetivo de reduzir a média da carga térmica total no interior do veículo e sua variabilidade. O método ANOVA foi utilizado para avaliar a existência de diferenças significativas entre os conceitos propostos e a referência. Na construção dos conceitos foi observada uma redução de até 528 W, equivalente a 15,9% em relação a referência.

Palavras-chave: Sistema de Condicionamento de Ar; Conforto Térmico; Carga Térmica; Projeto Robusto; Monte Carlo.

ABSTRACT

The levels of environmental pollution recorded, resulting from human activity, have worsened in recent decades. This situation motivates companies and the academic community to seek sustainable processes and products that minimize environmental harm and pollution. Additionally, the International Energy Agency has established goals for reducing net CO₂ emissions to be achieved by the year 2050. Among the activities that emit CO₂, it is observed that private vehicles and vans contributed to approximately 10% of global emissions. For this reason, the automotive sector has adopted measures aimed at reducing fuel consumption, such as the use of more efficient air conditioning systems. Various studies show that understanding the thermal loads present in the passenger cabin is a key prerequisite for an efficient design of any automotive air conditioning system. Since the design parameters and operating conditions of a vehicle are directly related to the thermal load of a car and, consequently, its energy consumption, this work aims to analyze the effects of geometric, construction, and operational parameters of a vehicle on the thermal load of the air conditioning system. For this purpose, a mathematical model based on thermodynamic and heat transfer principles was developed, capable of estimating the thermal load of the automotive air conditioning system. Additionally, the Robust Design method and Monte Carlo simulation were employed in conjunction with the mathematical model to determine the effect of different input parameters and identify opportunities for reducing the thermal load, as well as its variability. Then, concepts were developed aiming to reduce the average of the total thermal load inside the vehicle and its variability. The ANOVA method was used to assess the existence of significant differences between the concepts and the reference. In the construction of the concepts, a reduction of up to 528 W was observed, equivalent to 15,9% compared to the reference concept.

Keywords: Air Conditioning System; Thermal Comfort; Thermal Load; Robust Design; Monte Carlo.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Fatores que influenciam na carga térmica dentro do veículo | 17 |
| Figura 2 - Evolução da publicação de artigos científicos. (a) Pesquisa por “carga térmica”. (b) Pesquisa por “carga térmica do sistema de condicionamento de ar automotivo”..... | 20 |
| Figura 3 - Principais conceitos associados ao sistema MAC. (a) Sistema VT-TL. (b) Sistema TO-AL..... | 22 |
| Figura 4 - Representação esquemática das cargas térmicas que atuam na cabine de um veículo..... | 29 |
| Figura 5 - Incidência de radiação solar nas superfícies do veículo | 36 |
| Figura 6 - Fluxograma do modelo matemático | 40 |
| Figura 7 - Diagrama P dos fatores que influenciam na carga térmica na cabine de um automóvel..... | 42 |
| Figura 8 - Representação esquemática da simulação de Monte Carlo | 43 |
| Figura 9 – Veículo utilizado como modelo..... | 46 |
| Figura 10 - Dimensões externas do veículo | 47 |
| Figura 11 - Representação esquemática das superfícies consideradas na cabine do automóvel..... | 48 |
| Figura 12 - Comparação das parcelas de Carga Térmica..... | 51 |
| Figura 13- Comparação Carga Térmica Total Sensível e Latente | 52 |
| Figura 14 - Representação gráfica da comparação da carga térmica total do modelo com estudos científicos similares | 54 |
| Figura 15 - Variação da Carga Térmica em relação a Temperatura Externa | 55 |
| Figura 16 - Variação da Carga Térmica em relação a Radiação Solar Direta..... | 56 |
| Figura 17 - Variação da Carga Térmica em relação a Radiação Difusa | 57 |
| Figura 18 - Variação da Carga Térmica em relação a Umidade Externa | 58 |
| Figura 19 - Variação da Carga Térmica em relação a Rotação do Motor | 59 |
| Figura 20 - Variação da Carga Térmica em relação a Espessura do Vidro | 60 |
| Figura 21 - Variação da Carga Térmica em relação a Transmissividade do vidro | 61 |
| Figura 22 - Variação da Carga térmica em relação a condutividade térmica da espuma | 62 |
| Figura 23 - Histograma da Carga térmica total após aplicação do método de Monte Carlo..... | 65 |

| | |
|---|----|
| Figura 24 - Histograma da Carga térmica sensível após aplicação do método de Monte Carlo..... | 65 |
| Figura 25 - Histograma da Carga térmica latente após aplicação do método de Monte Carlo..... | 66 |
| Figura 26 - Histograma da carga térmica total (matriz cruzada)..... | 72 |
| Figura 27 - Histograma da carga térmica sensível (matriz cruzada)..... | 73 |
| Figura 28 - Histograma da carga térmica latente (matriz cruzada)..... | 74 |
| Figura 29 – Resultados da Carga térmica total e combinação de fatores de controle e de ruídos | 76 |
| Figura 30 - Combinações com menor e maior desvio padrão para carga térmica total | 77 |
| Figura 31 - Resultados da Carga térmica sensível e combinações de fatores de controle e ruído | 78 |
| Figura 32 - Combinações com menor variação da carga térmica sensível | 79 |
| Figura 33 - Resultados da carga térmica latente e combinação de fatores de controle e de ruído | 80 |
| Figura 34 – Parcelas da carga térmica de radiação direta por superfície | 82 |
| Figura 35 - Superfícies de vidro do veículo | 83 |
| Figura 36 - Carga térmica total após alteração da transmissividade e refletividade do vidro | 84 |
| Figura 37 - Redução da largura do para-brisa..... | 85 |
| Figura 38 - Carga térmica total após redução da largura do para-brisa | 86 |
| Figura 39 - Ângulo entre a superfície normal e a posição do sol (θ) em relação ao para-brisa | 87 |
| Figura 40 - Carga térmica total após alteração no ângulo entre a superfície normal e posição do sol | 88 |
| Figura 41 - Carga térmica total após aplicação simultânea dos conceitos 1 e 3 (conceito 4)..... | 89 |
| Figura 42 - Comparação entre as médias da carga térmica total da referência com as propostas..... | 91 |
| Figura 43 - Diagrama de caixas da referência e conceitos propostos..... | 92 |
| Figura 44 - Comparação do logaritmo do desvio padrão | 95 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 - Histórico de estudos relacionados a modelos matemáticos e carga térmica e/ou conforto térmico..... | 27 |
| Tabela 2 - Cargas térmicas que atuam dentro da cabine de um automóvel | 31 |
| Tabela 3 - Dimensões externas do veículo | 47 |
| Tabela 4 – Propriedades da cabine..... | 48 |
| Tabela 5 - Propriedades radiativas das superfícies..... | 49 |
| Tabela 6 - Condições de operação de referência para simulação | 49 |
| Tabela 7 - Radiação direta das cidades de Manaus e Curitiba | 50 |
| Tabela 8 - Radiação difusa das cidades Manaus e Curitiba | 50 |
| Tabela 9 - Valores mínima e máximos adotados para os fatores de ruído | 52 |
| Tabela 10 – Comparação da carga térmica total do modelo com estudos científicos similares | 53 |
| Tabela 11 - Comparação dos resultados da Análise de Sensibilidade..... | 62 |
| Tabela 12 - Fatores de controle da cabine do automóvel | 64 |
| Tabela 13 - Fatores de controle e de ruído utilizados na matriz cruzada | 68 |
| Tabela 14 - Combinação dos fatores de controle selecionados..... | 69 |
| Tabela 15 - Combinação dos fatores de ruído selecionados | 70 |
| Tabela 16 - Combinações com menor média e desvio padrão para carga térmica sensível..... | 81 |
| Tabela 17 - Resultados da análise de interação entre os fatores de controle e fatores de ruído para a carga térmica | 81 |
| Tabela 18 - Alteração da transmissividade e refletividade do vidro..... | 83 |
| Tabela 19 - Redução da largura do para-brisa do veículo | 86 |
| Tabela 20 - Comparação da carga térmica total (W) entre a referência e os conceitos propostos..... | 93 |
| Tabela 21 - Análise de variância da carga térmica total..... | 93 |
| Tabela 22 – Resultados do Teste de Tukey..... | 94 |
| Tabela 23 - Carga térmica total para diferentes combinações de fatores de controle e ruído | 105 |
| Tabela 24 - Carga térmica sensível para diferentes combinações de fatores de controle e ruído | 106 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 25 - Carga térmica latente para diferentes combinações de fatores de controle e ruído | 107 |
| Tabela 26 - Resultados obtidos para o conceito 1 | 108 |
| Tabela 27 - Resultados obtidos para o conceito 2 | 109 |
| Tabela 28 - Resultados obtidos para o conceito 3 | 110 |
| Tabela 29 - Resultados obtidos para o conceito 4 | 111 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | | |
|-----------------|---|---|
| A_{du} | Área Dubois | [m ²] |
| c_s | Calor específico da Superfície | [J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹] |
| c_a | Calor específico do Ar | [J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹] |
| c_p | Capabilidade de Processo | - |
| c_{pk} | Capabilidade de Processo Ajustada | - |
| e_0 | Entalpia do ambiente | [kJ·kg ⁻¹] |
| e_i | Entalpia no interior da cabine | [kJ·kg ⁻¹] |
| h_0 | Coeficiente de convecção interno | [W·m ⁻² ·°C ⁻¹] |
| h_i | Coeficiente de convecção externo | [W·m ⁻² ·°C ⁻¹] |
| H | Altura | [m] |
| HBM | Método de Balanço Térmico | - |
| I_{dif} | Radiação difusa | [W·m ⁻²] |
| I_{dir} | Radiação direta | [W·m ⁻²] |
| I_{ref} | Radiação de reflexão | [W·m ⁻²] |
| k | Condutividade Térmica da superfície | [W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹] |
| LIE | Limite Inferior de Especificação | - |
| LSE | Limite Superior de Especificação | - |
| MAC | Sistema Condicionador de Ar | - |
| m_a | Massa de Ar da cabine | [kg] |
| m_s | Massa de Ar da Superfície | [kg] |
| \dot{m}_{ren} | Vazão de renovação | [m ³ ·s ⁻¹] |
| M_{sen} | Taxa de produção de calor metabólico sensível | [W·m ⁻¹] |
| M_{lat} | Taxa de produção de calor metabólico latente | [W·m ⁻¹] |
| P | Pressão atmosférica | [Pa] |
| P_s | Pressão de vapor saturado do ambiente | [Pa] |
| Q_{Amb} | Carga Térmica do Ambiente | [W] |
| Q_{dir} | Carga Térmica de Radiação Direta | [W] |
| Q_{Dif} | Carga Térmica de Radiação Difusa | [W] |
| Q_{Exh} | Carga Térmica dos Gases Exaustão | [W] |

| | | |
|------------------|---|---|
| Q_{Eng} | Carga Térmica do Compartimento do Motor | [W] |
| $Q_{met;sen}$ | Carga Térmica Metabólica Sensível | [W] |
| $Q_{met;lat}$ | Carga Térmica Metabólica Latente | [W] |
| Q_{Ref} | Carga Térmica de Reflexão | [W] |
| $Q_{Ren;sen}$ | Carga Térmica de Renovação Sensível | [W] |
| $Q_{Ren;lat}$ | Carga Térmica de Renovação Latente | [W] |
| $Q_{Tot;sen}$ | Carga Térmica Total Sensível | [W] |
| $Q_{Tot;lat}$ | Carga Térmica Total Latente | [W] |
| Q_{Trans} | Carga Térmica Transmitida | [W] |
| Q_{Abs} | Carga Térmica Absorvida | [W] |
| Q_{Refl} | Carga Térmica Refletida | [W] |
| $Q_{Amb;ext}$ | Carga Térmica do Ambiente Externo | [W] |
| $Q_{Amb;int}$ | Carga Térmica do Ambiente Interno | [W] |
| Q_{Rad} | Carga Térmica de Radiação | [W] |
| R | Resistência Térmica | [m ² ·°C·W ⁻¹] |
| RPM | Velocidade do motor | [rotações por minuto] |
| S | Área | [m ²] |
| SS_{Tot} | Soma Total dos Quadrados | - |
| $SS_{Regressão}$ | Soma dos Quadrados da Regressão | - |
| SS_{Erro} | Soma dos Quadrados do Erro | - |
| T | Temperatura do bulbo seco do ar | [°C] |
| T_{eng} | Temperatura do motor | [°C] |
| T_{exh} | Temperatura de exaustão | [°C] |
| T_s | Temperatura da Superfície | [°C] |
| T_i | Temperatura no interior da cabine | [°C] |
| U | Coefficiente de transferência de calor global | [W·m ⁻² ·°C ⁻¹] |
| UA | Umidade Absoluta | [kg _{água} · kg _{ar seco} ⁻¹] |
| V | Velocidade do automóvel | [m·s ⁻¹] |
| W | Peso | [kg] |
| WFM | Método de Fator de Ponderação | - |
| X | Taxa de umidade em gramas de água por gramas de ar seco | [g·kg ⁻¹] |

| | | |
|-----------|------------------|---|
| y_i | Valor individual | - |
| \bar{y} | Média de valores | - |
| \hat{y} | Valor previsto | - |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|-----------|---|-----|
| α | Elemento de absorção da superfície | - |
| β | Ângulo de Altitude em relação a posição e tempo | [°] |
| Σ | Ângulo de inclinação da superfície medido a partir da superfície horizontal | [°] |
| ρ | Refletividade | - |
| ρ_g | Refletividade do solo | - |
| τ | Transmissividade | - |
| λ | Espessura do elemento de superfície | [m] |
| θ | Ângulo entre a Superfície Normal e a posição do Sol | [°] |
| ϕ | Umidade relativa | [%] |
| σ | Desvio padrão | - |
| μ | Média da carga térmica | [W] |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 18 |
| 1.1.1 | Objetivo geral | 18 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 18 |
| 1.2 | ESTRUTURA DO TRABALHO..... | 18 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA | 20 |
| 2.1 | SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR AUTOMOTIVO (MAC) E CARGA TÉRMICA | 21 |
| 2.2 | CONFORTO TÉRMICO E CARGA TÉRMICA..... | 24 |
| 2.3 | MÉTODO PROJETO ROBUSTO..... | 26 |
| 3 | METODOLOGIA | 29 |
| 3.1 | DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO..... | 29 |
| 3.1.1 | Carga térmica metabólica | 31 |
| 3.1.2 | Carga térmica de radiação | 32 |
| 3.1.3 | Carga térmica do ambiente | 34 |
| 3.1.3.1 | <i>Cálculo das temperaturas de superfície submetidas à radiação solar.....</i> | <i>35</i> |
| 3.1.4 | Carga térmica dos gases de exaustão | 37 |
| 3.1.5 | Carga térmica do compartimento do motor | 38 |
| 3.1.6 | Carga térmica de renovação | 38 |
| 3.2 | IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO | 39 |
| 3.3 | MÉTODO PROJETO ROBUSTO E SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO | 41 |
| 3.4 | MÉTODO ANOVA..... | 43 |
| 4 | RESULTADOS | 46 |
| 4.1 | DIMENSÕES EXTERNAS DO VEÍCULO | 46 |
| 4.2 | CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DA CABINE | 47 |
| 4.3 | VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO..... | 50 |
| 4.4 | ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO | 54 |
| 4.4.1 | Temperatura Externa | 55 |
| 4.4.2 | Radiação solar direta | 56 |
| 4.4.3 | Radiação difusa | 56 |
| 4.4.4 | Umidade relativa externa | 57 |
| 4.4.5 | Rotação do motor | 58 |

| | | |
|--------------|--|------------|
| 4.4.6 | Espessura do vidro | 59 |
| 4.4.7 | Transmissividade do vidro | 60 |
| 4.4.8 | Condutividade térmica da espuma | 61 |
| 4.5 | EFEITO DA VARIABILIDADE DOS FATORES DE CONTROLE SOBRE A CARGA TÉRMICA | 63 |
| 4.6 | ANÁLISE DA INTERAÇÃO ENTRE OS FATORES DE CONTROLE E RUÍDO PARA DEFINIÇÃO DA CONDIÇÃO DE REFERÊNCIA | 66 |
| 4.7 | PROPOSTAS DE NOVOS CONCEITOS | 82 |
| 4.7.1 | Alteração da transmissividade e refletividade dos vidros (Conceito 1) 82 | |
| 4.7.2 | Redimensionamento do para-brisa (Conceito 2) | 85 |
| 4.7.3 | Alteração do ângulo do para-brisa (Conceito 3) | 87 |
| 4.7.4 | Redução da transmissividade e refletividade dos vidros alteração do ângulo do para-brisa (Conceito 4) | 88 |
| 4.7.5 | Comparação dos resultados dos conceitos propostos com o conceito referência | 90 |
| 4.8 | ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) | 93 |
| 5 | CONCLUSÕES | 96 |
| 5.1 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 97 |
| | REFERÊNCIAS | 99 |
| | APÊNDICE A - CARGA TÉRMICA TOTAL PARA DIFERENTES COMBINAÇÕES DE FATORES DE CONTROLE E RUÍDO | 105 |
| | APÊNDICE B - CARGA TÉRMICA SENSÍVEL PARA DIFERENTES COMBINAÇÕES DE FATORES DE CONTROLE E RUÍDO | 106 |
| | APÊNDICE C - CARGA TÉRMICA LATENTE PARA DIFERENTES COMBINAÇÕES DE FATORES DE CONTROLE E RUÍDO | 107 |
| | APÊNDICE D - RESULTADOS OBTIDOS PARA O CONCEITO 1 | 108 |
| | APÊNDICE E - RESULTADOS OBTIDOS PARA O CONCEITO 2 | 109 |
| | APÊNDICE F - RESULTADOS OBTIDOS PARA O CONCEITO 3 | 110 |
| | APÊNDICE G - RESULTADOS OBTIDOS PARA O CONCEITO 4 | 111 |

1 INTRODUÇÃO

O mundo se depara com uma crise climática e os níveis de poluição têm subido de forma muito rápida ao longo dos últimos anos (Vashisht; Rakshit, 2021). De acordo com a IEA - International Energy Agency (2023), veículos privados e vans contribuíram com cerca de 10% das emissões de CO₂ no ano de 2022. Neste cenário, foram estabelecidas metas de redução da emissão líquida de CO₂, que devem ser cumpridas até o ano de 2050. Com o intuito de atingir estas metas, o setor automotivo tem adotado medidas que levem à redução do consumo de combustível, como por exemplo a redução da carga térmica e a utilização de sistemas de condicionamento de ar mais eficientes. Destaca-se que em 2023, o Brasil foi classificado como o nono maior produtor de veículos automotivos no mundo (ANFAVEA, 2024, p. 135), com mais de dois milhões de unidades produzidas.

Não apenas devido ao clima tropical e subtropical brasileiro, mas também a fatores relacionados ao conforto e segurança dos usuários, observa-se que aproximadamente 100% dos veículos nacionais são fabricados com sistema de condicionamento de ar (Da Silva *et al.*, 2024; Da Silva; Melo, 2019). Como requisito de projeto, observa-se que o aumento da eficiência energética do sistema tem sido um tópico importante na indústria automotiva devido ao seu impacto direto na economia de combustível. Em comparação ao sistema de condicionamento de ar de uso residencial, o sistema de refrigeração utilizado em veículos possui duas características distintas, sendo a primeira: o volume e peso do sistema são parâmetros extremamente restritivos, pois tem relação direta com o consumo de combustível e espaço disponível para instalação, e a segunda: a carga térmica dentro da cabine muda constantemente, o que significa que o sistema deve ser projetado para operar dentro de uma ampla quantidade de condições (Lee *et al.*, 2016).

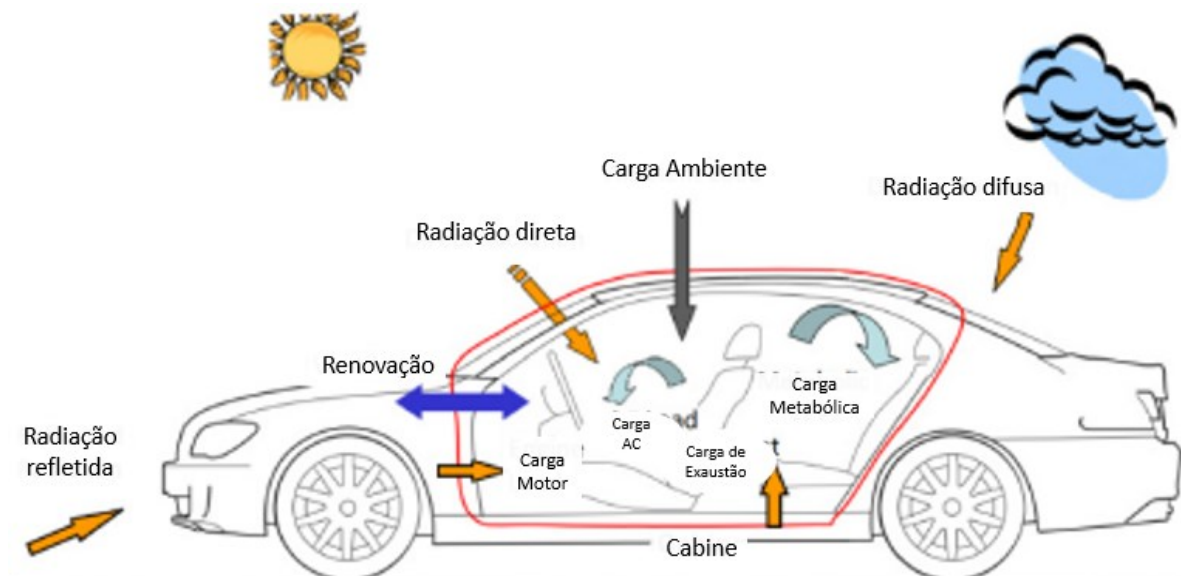
O compressor do sistema de condicionamento de ar pode aumentar entre 12 e 17% o consumo de combustível em automóveis de tamanho subcompactos até os de médio porte (Khayyam; Kouzani; Hu, 2009). Adicionalmente, observa-se que o sistema de condicionamento de ar automotivo é responsável pelo consumo de cerca de 1,5% do petróleo mundial, que equivale aproximadamente a 1,8 milhões de barris de petróleo por dia. Dependendo do clima, formas de condução, engarrafamentos, o consumo de energia do veículo pode variar de 3% a 20%, devido a variações observadas na carga térmica imposta ao sistema de condicionamento de ar. Este

aumento no consumo de energia torna o sistema de condicionamento de ar o segundo maior usuário de energia fóssil utilizado após o sistema de propulsão (Vashisht; Rakshit, 2021).

Observa-se que grande parte dos fabricantes do setor automotivo têm adotado diferentes tecnologias para atender exigências legais no sentido de reduzir o consumo de combustível e emissões de gases associados ao efeito estufa. Por exemplo, desde 2012, países da união europeia adotaram reduções nas dimensões do motor, redução da massa do automóvel, aumento da eficiência da aerodinâmica, utilização de sistemas de condicionamento de ar mais eficientes, tecnologia liga/desliga (*start-stop*), além da eletrificação e hibridização dos automóveis (Prabakaran *et al.*, 2022).

Adicionalmente, diferentes estudos mostram que o entendimento das cargas térmicas encontradas na cabine de passageiros é um pré-requisito chave de um projeto eficiente de qualquer sistema de condicionamento de ar automotivo. A Figura 1 mostra os vários fatores que influenciam a carga térmica do compartimento de passageiros de um automóvel, que por sua vez tem impacto direto na temperatura interna de um automóvel. Dentre as principais parcelas da carga térmica, são destacadas na Figura 1, as cargas térmicas: de radiação refletida, direta, radiação difusa, ambiente, metabólica, do motor, de exaustão, de renovação (Fayazbakhsh; Bahrami, 2013).

Figura 1 - Fatores que influenciam na carga térmica dentro do veículo



Fonte: Adaptado de Fayazbakhsh; Bahrami (2013)

Como os parâmetros de projeto e condições de operação de um veículo têm relação direta com a carga térmica do automóvel e, conseqüentemente, com o seu consumo de energia este trabalho estabelece os seguintes objetivos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho consiste em analisar os efeitos de parâmetros geométricos, construtivos e operacionais sobre a carga térmica do sistema de condicionamento de ar automotivo.

1.1.2 Objetivos específicos

- Identificar os fatores que influenciam na carga térmica de um veículo;
- Desenvolver e implementar um modelo matemático para estimativa da carga térmica de um sistema de condicionamento de ar automotivo;
- Identificar as variáveis de ruído que afetam a carga térmica do automóvel;
- Utilizar o método de Projeto Robusto para identificar oportunidades de redução da carga térmica, bem como da sua variabilidade.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho foi dividido em 6 capítulos. O primeiro contextualiza o trabalho, trazendo aspectos da literatura sobre as necessidades do setor automotivo em desenvolver sistemas condicionadores de ar mais eficientes e apresenta os principais fatores que influenciam na carga térmica de um veículo. No final do capítulo são apresentados os objetivos propostos no trabalho.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o sistema de condicionamento de ar automotivo, conforto térmico e carga térmica, por fim sobre o método Projeto Robusto. Estudos e publicações sobre desenvolvimento de modelos matemáticos para cálculo da carga térmica. Posteriormente foram apresentados estudos relacionados a modelos matemáticos e carga térmica e/ou conforto térmico.

No terceiro capítulo são apresentadas as equações utilizadas no modelo matemático para realizar o cálculo da carga térmica e implementação do programa computacional *Engineering Equation Solver* (EES). Em seguida, é apresentado o fluxograma com o procedimento utilizado para solução do modelo computacional. Na sequência são apresentados os fatores de controle e fatores de ruído que influenciam no resultado da carga térmica do veículo.

O capítulo quatro contém os resultados do trabalho, no qual são apresentadas as características construtivas da cabine do automóvel, a validação do modelo matemático por comparação com estudos científicos similares, a análise de sensibilidade do modelo matemático, a análise de variabilidade dos fatores de controle e em seguida, a análise da interação entre os fatores de controle e de ruído para determinar a condição de referência.

Na sequência, o quarto capítulo também apresenta novos conceitos propostos para reduzir a carga térmica do veículo, e sua variabilidade em relação aos fatores de ruído presentes durante a utilização do veículo.

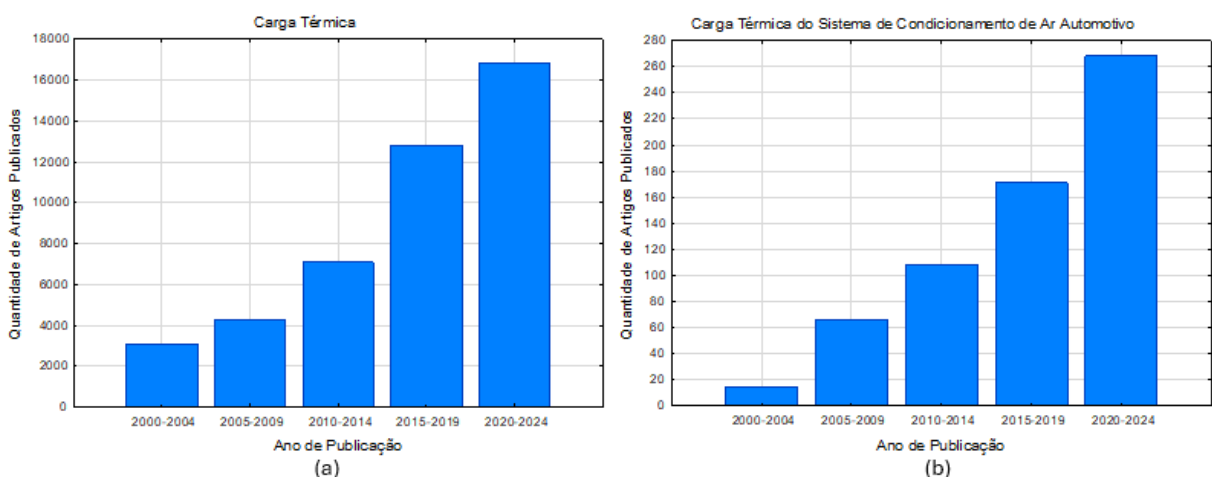
Por fim, o capítulo cinco apresenta as conclusões obtidas e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A relevância de estudos relacionados com a carga térmica não se restringe apenas aos veículos automotivos, mas abrange diversas aplicações, conforme evidenciado pelo aumento de publicações científicas nos periódicos. A Figura 2a apresenta a evolução de dessas publicações de acordo com a base de dados *Science Direct*. Utilizando como pesquisa o termo “*Thermal Load*” no período de 2000 a 2024, foi verificado que existem 44.088 artigos publicados, onde a cada período de 5 anos, observa-se uma tendência de crescimento de publicações científicas sobre o tema, em média de 60% ao ano (com exceção do período entre 2000 e 2004).

No entanto, mesmo com o aumento no número de publicações sobre Carga Térmica, constatou-se uma escassez de estudos (total de 628 artigos publicados) relacionados à Carga Térmica do sistema de condicionamento de ar dentro do setor automotivo durante o mesmo período, representado na Figura 2b. Embora estes estudos também tenham apresentado uma tendência de crescimento (60% ao ano, com exceção do período entre 2000 e 2004), eles representam atualmente apenas 1,42% do total de artigos científicos relacionados com carga térmica publicados nesse período.

Figura 2 - Evolução da publicação de artigos científicos. (a) Pesquisa por “carga térmica”. (b) Pesquisa por “carga térmica do sistema de condicionamento de ar automotivo”.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

2.1 SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR AUTOMOTIVO (MAC) E CARGA TÉRMICA

O sistema utilizado para o controle de temperatura no interior da cabine de um veículo deve garantir a visibilidade (desembaçar e descongelar os vidros) e o conforto térmico dos ocupantes. De modo geral, observa-se que o sistema de condicionamento de ar (MAC) é projetado para ser eficiente, compacto e operar sobre uma variedade de condições (Da Silva; Melo, 2019; Jabardo; Mamani; Ianella, 2002; Shah, 2009).

Shah (2009) indica que existem basicamente dois conceitos de sistema MAC utilizados pela indústria automotiva, sendo eles:

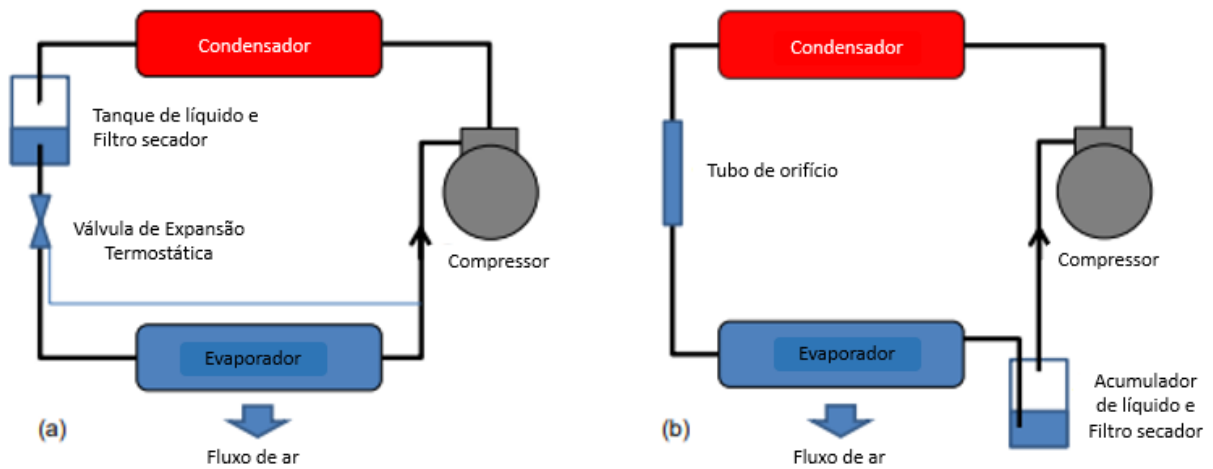
- i. A válvula de expansão termostática com tanque de líquido e filtro secador (VT-TL);
- ii. Tubo de orifício com acumulador de líquido e filtro secador (TO-AL).

O processo do sistema VT-TL se inicia com a compressão do fluido refrigerante na fase vapor que existe sai do evaporador (Figura 3a). Durante o processo de compressão, a temperatura do fluido refrigerante aumenta até um valor acima da temperatura ambiente, para que ocorra a sua condensação. Na sequência, o fluido refrigerante acumulado no tanque de líquido (TL) é expandido em uma válvula termostática (VT), que controla a vazão mássica em função do superaquecimento medido na saída do evaporador.

De forma diferente, no sistema TO-AL, apresentado na Figura 3b, um dispositivo de expansão com restrição fixa, denominado tubo de orifício (TO), é utilizado para realizar expansão. Neste conceito, há a necessidade de um acumulador de líquido (AL) na saída do evaporador para impedir o calço hidráulico no compressor.

Se o desempenho energético dos dois sistemas for comparado em diferentes condições, observa-se que o conceito VT-TL apresenta uma melhor eficiência. Isto ocorre pois ele é capaz de adequar-se a variações na carga térmica do sistema, por meio da regulagem da abertura da válvula termostática. No entanto, o sistema TO-AL ainda é muito utilizado em comparação ao VT-TL devido ao seu baixo custo (Shah, 2009).

Figura 3 - Principais conceitos associados ao sistema MAC. (a) Sistema VT-TL. (b) Sistema TO-AL.



Fonte: Adaptado de Shah (2009)

É importante salientar que, apesar do sistema de condicionamento de ar por compressão mecânica de vapor depender da utilização de fluidos refrigerantes, observa-se que tais substâncias estão relacionadas a problemas ambientais. Por este motivo, foram estabelecidos os Protocolos de Montreal e Kyoto, com o intuito de restringir a utilização de fluidos refrigerantes que contribuem para exaurir a camada de ozônio e agravar o efeito estufa, respectivamente. Observa-se que o sistema de condicionamento de ar dos automóveis é responsável por uma grande utilização de hidrofluorcarbonetos (HFC-134a), representando cerca de 70% do consumo total de HFC-134a em 2017 (Li *et al.*, 2019).

O sistema de MAC deve criar um ambiente confortável a para todos os passageiros. Para este fim, o ar (quente ou frio) é insuflado na cabine de passageiros de forma que atendam às necessidades fisiológicas de todos os ocupantes. Uma função adicional do sistema é manter a cabine de passageiros livre de odores desagradáveis e poluentes, além de estar relacionado a segurança com as funções de desembaçar e degelo do para-brisa e janelas laterais (Robert Bosch GmbH, 2022).

Os sistemas de condicionamento de ar são frequentemente utilizados para manter a qualidade do ar no interior em uma variedade de ambientes como edifícios residenciais, estabelecimentos comerciais, ambientes de trabalho, interior de veículos automotivos entre outros visando garantir um ótimo conforto térmico. Ao avaliar os veículos que estão mais presentes em nossa rotina diária, é essencial reconhecer que a qualidade do ar interno pode ser significativamente afetada pelas condições climáticas externas, devido ao design estrutural do veículo, o que torna fundamental

assegurar que a atmosfera interna dos automóveis seja otimizada para proporcionar uma experiência confortável aos ocupantes (Dibek; Agra, 2024).

A função do sistema MAC é compensar as mudanças contínuas de carga térmica dentro da cabine, para manter os passageiros dentro de uma zona de conforto térmica (Fayazbakhsh; Bahrami, 2013). A carga térmica de um sistema de condicionamento de ar é composta por duas parcelas, sendo uma sensível e outra latente. A parcela sensível é responsável pelas variações observadas na temperatura de bulbo seco do ambiente, enquanto a parcela latente é responsável pelas variações observadas na quantidade de umidade.

A carga térmica sensível é a parte da carga térmica total de um ambiente que causa uma mudança na temperatura de bulbo seco do ar, sem afetar significativamente a umidade absoluta (ASHRAE, 2021). A carga térmica sensível é resultante de várias fontes de carga térmica como radiação direta, compartimento do motor, equipamentos elétricos, ocupantes, iluminação, infiltração de ar externo, entre outros.

Por sua vez, a carga térmica latente é resultado da carga térmica gerada pela presença de umidade no ambiente. As principais fontes de carga térmica latente incluem a umidade gerada pelos ocupantes, evaporação de água e infiltração de ar externo úmido. Quando há aumento na umidade do ambiente, é necessário remover o calor latente para manter a umidade relativa dentro de limites aceitáveis, isso é especialmente importante em regiões de clima úmido, onde a umidade do ar pode afetar o conforto dos ocupantes e a qualidade do ar interior (ASHRAE, 2021).

Uma nova abordagem para desenvolvimento sustentável dentro da indústria automotiva tem sido oferecida por meio dos veículos elétricos. Comparados aos veículos de combustão, os sistemas de gerenciamento térmico de veículos elétricos não apenas precisam atender aos requisitos de carga térmica da cabine, mas também garantir que a bateria, o motor e os controles eletrônicos operem dentro de sua faixa de temperatura normal (Yang *et al.*, 2023).

As características e funções do sistema condicionador de ar fazem com que este se torne um componente essencial nos veículos elétricos, fazendo com que se aumente a atenção de fabricantes e consumidores no sistema. Entretanto, seu consumo de energia se torna um problema, principalmente durante o verão quando é utilizado para se resfriar o interior da cabine o que torna ainda mais necessário o desenvolvimento de uma estratégia de controle eficaz do sistema para ajudar a manter

o conforto na cabine, ao mesmo tempo em que reduz o consumo de energia (He *et al.*, 2024).

Um melhor controle sobre a carga térmica em um automóvel não apenas pode aumentar a eficiência térmica dos veículos, mas também contribuir para melhoria da economia de combustível, especialmente em regiões tropicais e subtropicais onde a diminuição das temperaturas nas cabines é crucial. Dessa forma, existem diversos meios para minimizar o aumento da carga térmica, incluindo a aplicação de vidros reflexivos e absorventes para reduzir as perdas de calor por radiação e convecção, o uso de vidros refletivos solares e tintas solares reflexivas para reduzir a carga térmica e prover a redução potencial na capacidade do sistema de condicionamento de ar (Sood *et al.*, 2021).

2.2 CONFORTO TÉRMICO E CARGA TÉRMICA

O conforto térmico é definido de forma geral como uma condição na qual uma pessoa expressa uma sensação de bem-estar considerando o ambiente térmico dentro de uma área ocupada (Paliaga *et al.*, 2014). Porém diferentes pessoas podem divergir sua opinião em relação a compreensão térmica. E este resultado diferente em termos de conforto térmico está correlacionado com o fato de que cada ser humano possui dois tipos de percepção neste caso: um relacionado a condição física e outra mental (Danca *et al.*, 2019).

No entanto, existe um interesse comum entre engenheiros e pesquisadores no desenvolvimento de modelos quantitativos para estimar, prever ou classificar o estado de conforto térmico dos indivíduos no interior de espaços ocupados. Observa-se que, a maioria dos modelos elaborados se baseia na ideia de equilíbrio de calor entre o ambiente térmico e o corpo humano, com base em diferentes suposições dos mecanismos fisiológicos que controlam a termorregulação do corpo humano e a sua reflexão mental (Ion-guță *et al.*, 2022).

O modelo de conforto térmico proposto por Fanger representa um voto previsto de sensação térmica obtida pela combinação de vários parâmetros que descrevem o ambiente térmico analisado, usando equações empíricas que definem a troca de calor entre o ambiente e o corpo humano, onde o estado individual de conforto térmico é alcançado quando o corpo humano é capaz de manter uma temperatura constante em torno de 36,7°C, sem uma inferência relevante dos mecanismos

termorreguladores. Os mecanismos termorreguladores são cruciais para vida humana e quando interrompidos podem levar a hipertermia ou hipotermia, e qualquer um desses estados pode causar efeitos nocivos nos sistemas do corpo humano. Por exemplo, a redução do fluxo sanguíneo pode levar a isquemia e conseqüentemente à falência dos órgãos (Nastase *et al.*, 2022).

Enquanto existe uma diversidade de modelos numéricos para estimativa do conforto térmico, também existe um desacordo entre esses modelos sobre qual a contribuição de diferentes parâmetros deveria ter, ou até mesmo quais os parâmetros a serem incluídos (Brusey *et al.*, 2018; Nastase *et al.*, 2022).

Para que o conforto térmico seja atingido, é necessário que a carga térmica do ambiente em questão seja conhecida e removida por um sistema de climatização. Existem duas metodologias que geralmente são mais utilizadas para se realizar o cálculo da carga térmica: o Método de Balanço Térmico (HBM) e o Método de Fator de Ponderação (WFM) (ASHRAE, 2021). O HBM é considerado cientificamente mais rigoroso e pode considerar mais detalhes com menos suposições. Uma das vantagens do HBM é que vários modelos fundamentais podem ser incorporados nos cálculos térmicos. Embora o HBM seja mais assertivo que WFM, é mais fácil implementar o WFM para o cálculo de carga de um passageiro em um veículo uma vez que neste método cada fonte de calor tem um fator de ponderação associado que reflete sua contribuição para carga térmica do ambiente, sendo um método útil para uma estimativa rápida e simplificada da carga térmica. No entanto, quanto mais informações sobre o automóvel e carga térmica estão disponíveis, o HBM é mais recomendável (Fayazbakhsh; Bahrami, 2013).

O Método de Balanço Térmico (HBM) permite a melhoria nos modelos de cálculo de carga pela aplicação de modelos empíricos e correlações. A essência deste método é a conservação de massa e energia térmica. Devido a este fato, muitas características geométricas e térmicas devem ser conhecidas antes de ser optada por uma das abordagens. Isso torna o HBM um método trabalhoso que é evitado em algumas aplicações de engenharia. Por outro lado, o método HBM é indicado quando há necessidade de um maior entendimento físico das variáveis envolvidas no computo da carga térmica (Barnaby; Spitler; Xiao, 2005).

2.3 MÉTODO PROJETO ROBUSTO

O método projeto robusto, também conhecido como método de Taguchi, tem como finalidade auxiliar no desenvolvimento de produtos capazes de manter o seu desempenho dentro de limites aceitáveis, mesmo quando submetidos a variabilidades causadas por fatores de ruído. Os fatores de ruído são aqueles que tem efeito sobre o desempenho de um produto, mas que geralmente não podem ser eliminados ou controlados (Taguchi; Chowdhury; Wu, 2007).

Dentre as suas vantagens, observa-se que o método projeto robusto reduz significativamente a quantidade de experimentos necessários para o desenvolvimento ou melhoria de produtos. Isto deve-se a utilização de uma estrutura composta por matrizes fracionadas, que proporciona grande redução de custos relativos à experimentação, podendo ser implementado em situações que envolvam produtos e/ou processos (Celani de Souza *et al.*, 2011; Rosa *et al.*, 2009).

Durante o planejamento experimental, são utilizadas matrizes ortogonais, genericamente designados por L_n , onde “n” representa o número de experiências a realizar. As matrizes mais utilizadas são as L_4 , L_8 , L_9 , L_{12} , L_{16} , L_{18} , L_{27} e L_{32} para fatores de dois e três níveis. As matrizes são utilizadas no projeto de experimentos, com a finalidade de estudar as variáveis significativas e suas interações, que ocorrem ao mesmo tempo (Celani de Souza *et al.*, 2011; Rosa *et al.*, 2009).

O método Taguchi também utiliza a razão Sinal – Ruído (S/R), que é uma função logarítmica usada para otimizar o processo ou projeto do produto, minimizando a variabilidade. Esta grandeza é derivada da indústria de comunicações, onde já tem sido utilizada por quase um século, representando a relação entre a sensibilidade e variabilidade de um dado sistema de medição, e podem ser apresentadas de três formas (Celani de Souza *et al.*, 2011):

- Menor é melhor (quanto menor o valor da resposta, melhor para o processo)
- Maior é melhor (quanto maior o valor da resposta, melhor para o processo)
- Nominal é melhor (quanto mais próximo da especificação, melhor para processo)

Destaca-se que a Simulação de Monte Carlo é frequentemente empregada em conjunto com o método Projeto Robusto. A simulação de Monte Carlo consiste em

estimar computacionalmente os resultados de um sistema empregando amostragem aleatória para os dados de entrada do modelo (Arnér, 2014). Tal modelo considera uma grande quantidade de variáveis de entrada que são tratadas como variáveis aleatórias. A partir deste princípio, são gerados resultados que apresentam comportamento aleatório, que por sua vez permite prever o comportamento do sistema em condições reais de uso, nas quais a presença de fatores de ruídos está presente. A precisão da simulação depende da qualidade do modelo matemático, das suposições feitas e da representatividade das distribuições de entrada usadas (Landau; Binder, 2014).

De um modo geral, os trabalhos analisados mostram que a carga térmica tem um impacto direto no projeto de um sistema de condicionamento de ar, no consumo de energia e no conforto térmico dos ocupantes. Adicionalmente, observa-se que o cálculo da carga térmica depende de muitas variáveis de projeto e operacionais, o que exige a utilização de ferramentas de análise estruturadas, como, por exemplo, o método projeto robusto. A Tabela 1 mostra uma relação de trabalhos científicos, publicados entre 1999 e 2024. Apesar da diversidade de estudos envolvendo modelos matemáticos para otimizar o sistema de condicionamento de ar veicular, nota-se uma carência de estudos abordando estudos específicos para a carga térmica, como os trabalhos de Marcos et al. (2014) e Gajanayake, Bandara e Sugathapala (2023). Além disso, observa-se que nenhum destes trabalhos utilizou o método Projeto Robusto para encontrar alternativas que melhorem o desempenho do sistema de condicionamento de ar automotivo. Tais características justificam a necessidade da realização do presente trabalho.

Tabela 1 - Histórico de estudos relacionados a modelos matemáticos e carga térmica e/ou conforto térmico

(continua)

| Autor | Origem dos Autores | Ano | Aplicação |
|---------------------------|---------------------------|------------|--|
| Arici e Yang | EUA | 1999 | Desenvolvimento de modelo para sistema de controle de clima de um automóvel |
| Jabardo, Mamani e Ianella | Brasil | 2002 | Modelagem e avaliação experimental de um sistema de condicionamento de ar automotivo |
| Johnson | EUA | 2002 | Influência do combustível no sistema de condicionamento de ar e conforto térmico |
| Barnaby, Spittler e Xiao* | EUA / China* | 2005 | Método do Equilíbrio Térmico para cálculo de aquecimento e resfriamento |
| Wang et al. | China | 2005 | Qualidade de vapor e desempenho de um sistema de condicionamento de ar automotivo |
| Hosoz e Direk | Turquia | 2006 | Avaliação de desempenho de um sistema integrado de ar-condicionado automotivo e bomba de calor |
| Khayyam, Kouzani e Hu* | Irã / China* | 2009 | Redução do consumo de energia do sistema condicionador de ar automotivo |

Tabela 1 - Histórico de estudos relacionados a modelos matemáticos e carga térmica e/ou conforto térmico

(conclusão)

| Autor | Origem dos Autores | Ano | Aplicação |
|------------------------------------|--------------------|------|---|
| Shah | Índia | 2009 | Sistemas de condicionamento de ar automotivo: desenvolvimento histórico, estado da tecnologia e tendências futuras |
| Wang e Xiang | China | 2009 | Simulação numérica do sistema condicionador de ar veicular usando dinâmica de fluidos computacional |
| Alkan e Hosoz, | Turquia | 2010 | Desempenho comparativo de um sistema condicionador de ar automotivo usando compressores de capacidade fixa e variável |
| Alahmer et al. | Jordânia | 2011 | Efeito da umidade e temperatura no conforto térmico da cabine de um automóvel |
| Fayazbakhsh e Bahrami | Irã | 2013 | Desenvolvimento de modelo para estimar carga térmica de sistema condicionador de ar automotivo |
| Marcos et al. | Espanha | 2014 | Desenvolvimento e validação de um modelo térmico para a cabine de um veículo |
| Torregrosa-Jaime et al. | Espanha | 2015 | Modelo térmico transiente de cabine de automóvel sob condições ambientais variáveis |
| Da Silva e Melo | Brasil | 2016 | Uma Perspectiva sobre atividades de P&D&I no mercado Brasileiro de condicionamento automotivo |
| Lee et al. | Coreia do Sul | 2016 | Performance do assistente dissecante do condicionador de ar |
| Da Silva e Medeiros de Cordova | Brasil | 2017 | Modelo Matemático de um Sistema de condicionamento de ar Automotivo em condições de regime estacionário |
| Brusey et al. | Inglaterra | 2018 | Aprendizado sobre controle do conforto térmico nas cabines de automóveis |
| Meng et al. | China | 2018 | Desempenho de mistura de baixo GWP R1234yf/R134a como substituto do R134a em sistemas condicionadores de ar automotivo |
| Da Silva et al. | Brasil | 2019 | Avaliação do Desempenho Térmico de Condensadores Forçados para Sistemas de condicionamento de ar de Ônibus |
| Danca et al. | Romênia | 2019 | Avaliação do conforto térmico para os ocupantes dentro de um veículo durante o verão |
| Li et al. | China | 2019 | Estimativa de tempo e mitigação de HFC |
| dos Santos Soares Pinto e Da Silva | Brasil | 2020 | Avaliação da carga térmica transitória de compartimentos de carga refrigerados |
| Sood et al. | Índia | 2021 | Análise numérica do gerenciamento térmico da cabine de um automóvel |
| Vashisht e Rakshit | Índia | 2021 | Avanços recentes e sustentáveis no sistema condicionador de ar automotivo |
| Yin et al. | China | 2021 | Efeito combinado das condições de operação e da carga de refrigerante no desempenho de um sistema condicionador de ar automotivo transcrito com CO ₂ |
| Ion-guță et al. | Romênia | 2022 | Modelo térmicos para conforto térmico em automóveis e construções |
| Nastase et al. | Romênia | 2022 | Teorias de conforto térmico do ponto de vista do design de Veículos Elétricos |
| Prabakaran et al. | Índia | 2022 | Desempenho experimental de sistema condicionador de ar automotivo utilizando dispositivo de armazenamento de energia térmica |
| Da Silva et al. | Brasil | 2023 | Avaliação de performance termal experimental do sistema condicionador de ar automotivo |
| Gajanayake, Bandara e Sugathapala | Sri Lanka | 2023 | Uma nova abordagem para estimar a demanda de potência de cargas de motores auxiliares de veículos leves |
| Jia et al. | China | 2023 | Avaliação abrangente da qualidade da água subterrânea com simulações de Monte Carlo |
| Yang et al. | China | 2023 | Avaliação do desempenho climático do ciclo de vida térmico do veículo elétrico |
| Dibek e Ağra | Turquia | 2024 | Modelagem do conforto térmico humano em veículos militares blindados: Um estudo experimental sobre remoção de calor com resfriamento localizado |
| He et al. | China | 2024 | Controle inteligente do sistema condicionador de ar de veículos elétricos |
| Autor | Brasil | 2024 | Análise da carga térmica de resfriamento de sistemas de condicionamento de ar automotivo utilizando método Projeto Robusto |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

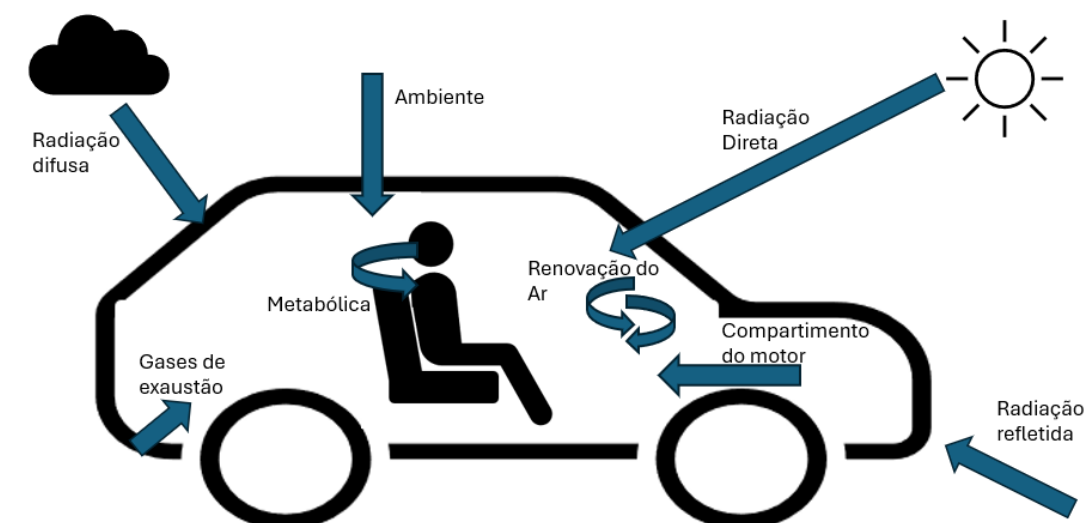
3 METODOLOGIA

Este capítulo é dividido em duas partes. Na primeira delas é apresentado o modelo matemático proposto para a estimativa da carga térmica de um sistema de condicionamento de ar automotivo. Na segunda parte, descreve-se como o método Projeto Robusto e a simulação de Monte Carlo são empregados para encontrar oportunidades de redução da carga térmica e sua variabilidade.

3.1 DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO

O desenvolvimento do modelo para se estimar o cálculo da carga térmica de resfriamento dentro da cabine do automóvel foi obtido com o uso do Método de Balanço Térmico (HBM). Tal método é baseado na utilização de princípios físicos de conservação de massa e energia, combinados com correlações empíricas (Fayazbakhsh; Bahrami, 2013). A Figura 4 apresenta, de forma esquemática, as categorias de cargas térmicas encontradas na cabine de um veículo, onde estão representadas as cargas térmicas: de radiação direta, radiação difusa, radiação refletida, ambiente, metabólica, do compartimento do motor, dos gases de exaustão e de renovação do ar.

Figura 4 - Representação esquemática das cargas térmicas que atuam na cabine de um veículo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Para o desenvolvimento do modelo foi considerada a condição de regime permanente e a geometria de um automóvel de passeio com capacidade para 5 ocupantes. Dessa forma, a carga térmica a ser removida pelo sistema de condicionamento de total pode ser expressa por

$$Q_{Tot} = Q_{Tot;sen} + Q_{Tot;lat} \quad (1)$$

onde $Q_{Tot;sen}$ e $Q_{Tot;lat}$ representam as cargas térmica total sensível e térmica total latente, respectivamente.

No presente modelo, a carga térmica total sensível da cabine é dividida em oito parcelas, sendo expressa por

$$Q_{Tot;sen} = Q_{Met;sen} + Q_{Dir} + Q_{Dif} + Q_{Ref} + Q_{Amb} + Q_{Exh} + Q_{Eng} + Q_{Ren;sen} \quad (2)$$

onde todos os valores de Q são expressos em Watts, e cada parcela da carga térmica sensível (detalhadas na Tabela 2) é calculada assumindo uma condição estacionária.

Por sua vez, a soma de todos os tipos de cargas térmicas latentes é expressa por

$$Q_{Tot;lat} = Q_{Ren;Lat} + Q_{Met;Lat} \quad (3)$$

onde $Q_{Ren;Lat}$ se refere a taxa de transferência de calor relacionada à umidade que deve ser adicionada ou removida em um ambiente devido à entrada ou saída de ar externo úmido durante o processo de renovação de ar.

Quando ocorre a renovação de ar no interior da cabine, seja por meio da abertura de janelas ou pelo funcionamento do sistema de ventilação, ocorre a troca do ar interno pelo ar externo. Essa troca pode trazer umidade, o que afeta a carga térmica latente no ambiente. Se o ar externo é mais úmido do que o ar interno, a entrada desse ar aumentará a carga térmica latente. Por outro lado, se o ar externo é mais seco do que o ar interno, a entrada desse ar resultará em uma redução da carga térmica latente (ASHRAE, 2021).

A carga metabólica latente ($Q_{Met;Lat}$) expressa a taxa de transferência de calor relacionado à umidade dissipado pelo metabolismo humano. Esta carga térmica é

proveniente principalmente da transpiração, ou seja, a liberação de vapor de água através da pele. Quando os ocupantes transpiram, a carga térmica é dissipada pelo processo de evaporação da umidade da pele, resultando no resfriamento do corpo. É necessário projetar sistemas de climatização adequados para lidar com a carga térmica metabólica latente (Gajanayake; Bandara; Sugathapala, 2023). Os tipos de carga térmica latente estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Cargas térmicas que atuam dentro da cabine de um automóvel

| Tipo de Carga Térmica | Descrição |
|-----------------------|---|
| $Q_{Met;sen}$ | Carga térmica metabólica sensível |
| $Q_{Met,lat}$ | Carga térmica metabólica latente |
| Q_{Dir} | Carga térmica de radiação direta |
| Q_{Dif} | Carga térmica de radiação difusa |
| Q_{Ref} | Carga térmica de radiação refletida |
| Q_{Amb} | Carga térmica do ambiente |
| Q_{Exh} | Carga térmica dos gases de exaustão |
| Q_{Eng} | Carga térmica do compartimento do motor |
| $Q_{Ren;sen}$ | Carga térmica de renovação sensível |
| $Q_{Ren,lat}$ | Carga térmica de renovação latente |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Na sequência, são apresentados os detalhes referentes aos cálculos das parcelas de carga térmica sensível e latente que compõem a carga térmica total do sistema de condicionamento de ar em um automóvel, conforme apresentado pelas equações 2 e 3.

3.1.1 Carga térmica metabólica

As atividades metabólicas dentro do corpo humano geram constantemente carga térmica e umidade (por exemplo, na transpiração). Esta carga térmica passa pelos tecidos do corpo até o momento que é liberado dentro da cabine do automóvel. A carga metabólica possui dois componentes principais: a carga latente e a carga sensível e pode ser estimada como (Gajanayake; Bandara; Sugathapala, 2023)

$$Q_{Met} = Q_{Met;sen} + Q_{Met,lat} \quad (4)$$

A carga térmica metabólica sensível ($Q_{Met;sen}$) se refere a taxa de transferência de calor emitida pelo corpo humano por convecção e radiação, considerando que a carga térmica metabólica latente ($Q_{Met;lat}$) se refere a carga térmica dissipada por meio da evaporação. De acordo com Gajanayake; Bandara; Sugathapala (2023), essas cargas podem ser expressas por

$$Q_{Met;sen} = \sum_{Passageiros} M_{sen} A_{du} \quad (5)$$

$$Q_{Met;lat} = \sum_{Passageiros} M_{lat} A_{du} \quad (6)$$

onde M é a taxa de produção de calor metabólico de cada passageiro. Seus valores são tabulados pela norma ISO 8996 de acordo com os critérios de atividade e ocupação. Para as cargas sensíveis e latentes seus valores são estimados em 105 e 155 ($W \cdot m^{-2}$) respectivamente. Por sua vez, a área de DuBois (A_{du}) é uma estimativa da área da superfície corporal em função do Peso (W) e Altura (H) dos passageiros, sendo expressa da seguinte forma

$$A_{du} = 0,202 \cdot W^{0,425} \cdot H^{0,725} \quad (7)$$

3.1.2 Carga térmica de radiação

O ganho de carga térmica causado pela radiação solar contribui significativamente para a carga de resfriamento de um veículo. De acordo com ASHRAE (2021), a carga térmica associada à radiação solar (Q_{Rad}) pode ser dividida em três parcelas denominadas: direta, difusa e de reflexão, sendo estas expressas por

$$Q_{Rad} = Q_{Dir} + Q_{Dif} + Q_{Ref} \quad (8)$$

A radiação direta (Q_{Dir}) é a parte da radiação solar incidente que atinge diretamente a superfície do veículo, expressa por

$$Q_{Dir} = \sum_{Superfícies} S \cdot \tau \cdot I_{dir} \cdot \cos\theta \quad (9)$$

onde I_{dir} é o ganho de carga térmica por radiação direta por unidade área e θ é o ângulo entre uma superfície normal e a posição do Sol em relação ao céu. τ o elemento de transmissividade da superfície e S é a área da superfície, respectivamente. Antes no nascer do Sol e depois do pôr do Sol, nenhuma carga por radiação é considerada. O ganho de carga térmica por radiação direta é estimado por

$$I_{Dir} = \frac{A}{\exp\left(\frac{B}{\sin\beta}\right)} \quad (10)$$

na qual A e B são valores constantes encontrados em ASHRAE (2021). E a radiação difusa (Q_{Dif}) é parte da radiação solar resultante da radiação indireta da luz do dia na superfície. Durante um dia nublado, a maior parte da radiação entra na cabine do veículo na forma de radiação difusa. O ganho de carga térmica por este tipo de radiação é obtido por

$$Q_{Dif} = \sum_{Superfícies}(S \cdot \tau \cdot I_{Dif}) \quad (11)$$

De forma similar, I_{dif} é o ganho de carga térmica pela radiação difusa por área expressada a partir da equação

$$I_{Dif} = C \cdot I_{Dir} \cdot \frac{1+\cos\Sigma}{2} \quad (12)$$

onde Σ é o ângulo de inclinação da superfície medido a partir da superfície horizontal e os valores de C , tabulados no ASHRAE (1988).

A radiação de reflexão (Q_{Ref}) se refere a parte do ganho de carga térmica por radiação solar que primeiro atinge o solo e superfícies vizinhas ao veículo, para na sequência ser refletida até as superfícies do veículo, ela é estimada como

$$Q_{Ref} = \sum_{Superfícies}(S \cdot \tau \cdot I_{Ref}) \quad (13)$$

sendo I_{ref} o ganho de carga térmica refletido por unidade de área, calculado da seguinte forma

$$I_{Ref} = (I_{Dir} + I_{Dif}) \cdot \rho_g \cdot \frac{1 - \cos \Sigma}{2} \quad (14)$$

Na equação 14 ρ_g é o coeficiente de refletividade do chão. Baseado na absorção de cada elemento de superfície em particular, um percentual da carga de radiação incidente pode ser absorvido pela superfície, e por isso sua temperatura aumenta. A taxa de transferência de calor líquido de cada elemento de superfície pode, então, ser expressa por:

$$Q_{S,Rad} = S \cdot \alpha \cdot (I_{Dir} \cdot \cos \theta + I_{Dif} + I_{Ref}) \quad (15)$$

onde α é a absorptividade da superfície.

3.1.3 Carga térmica do ambiente

A carga térmica do ambiente (Q_{Amb}) é a contribuição da carga térmica transferida para o ar da cabine do veículo devido a diferença de temperatura entre o ambiente externo e o ar presente no interior da cabine. A convecção exterior, a condução através do corpo do painel e a convecção interior são envolvidas na transferência total entre o ambiente e a cabine, sendo que o modelo da carga do ambiente pode ser expresso por

$$Q_{Amb} = \sum_{Superfícies} S \cdot U \cdot (T_s - T_i) \quad (16)$$

onde U é o coeficiente de transferência de calor global, T_s e T_i são a temperatura média da superfície externa e temperatura média do ar no interior da cabine, respectivamente. A variável U é composta por diferentes componentes que consideram o coeficiente de convecção interna, a condução de calor através da superfície e o coeficiente de convecção externa, pode ser representado matematicamente da seguinte forma

$$U = \frac{1}{R}, \text{ onde } R = \frac{1}{h_o} + \frac{\lambda}{k} + \frac{1}{h_i} \quad (17)$$

sendo R a resistência global por unidade de área, h_o e h_i são os coeficientes de convecção externa e interna, k é a condutividade térmica da superfície e λ é a espessura do elemento de superfície.

Por sua vez, os coeficientes de convecção dependem da velocidade do ar, podendo ser estimados como (Fayazbakhsh; Bahrami, 2013; Gajanayake; Bandara; Sugathapala, 2023):

$$h = 0,6 + 6,64 \sqrt{v} \quad (18)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor de convecção em $W \cdot m^{-2} \cdot C^{-1}$ e v é a velocidade em $m \cdot s^{-1}$. O ar da cabine é assumido como estacionário e a velocidade do ar ambiente é considerado igual a velocidade do veículo.

Similar à carga de radiação mencionada anteriormente, uma porção da carga térmica ambiente é absorvida pelas superfícies do veículo. O ganho ou perda de carga térmica de cada elemento de superfície corresponde à diferença entre a carga térmica adquirida do ambiente através da superfície e a carga térmica liberado para o ar da cabine. Assim, podemos representar a taxa líquida de transferência de calor absorvida como

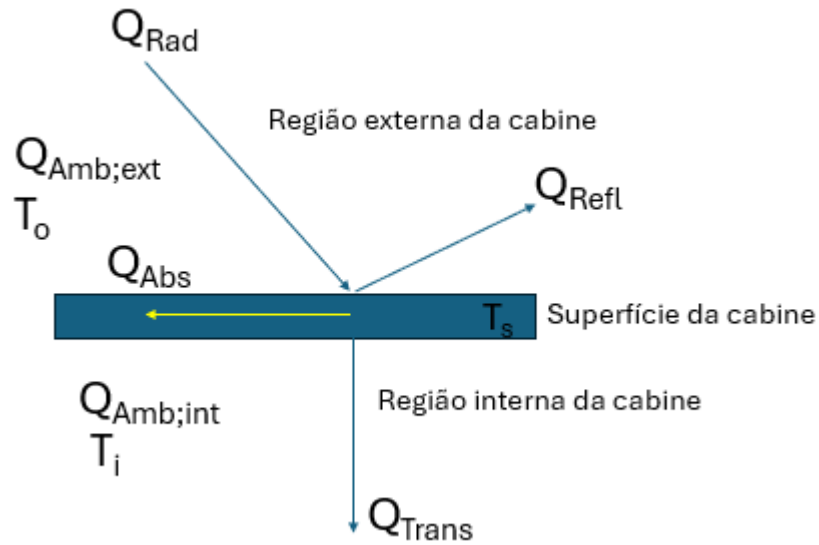
$$Q_{S,Amb} = S \cdot U \cdot (T_o - 2T_s + T_i) \quad (19)$$

onde T_o , T_i e T_s são as temperaturas médias do ambiente, da cabine e da superfície respectivamente, onde T_o e T_i são informados como dados de entrada do modelo.

3.1.3.1 *Cálculo das temperaturas de superfície submetidas à radiação solar*

A Figura 5 representa de forma esquemática a incidência de radiação solar nas superfícies do veículo e as cargas térmicas refletida, transmitida, absorvida, do ambiente interno e ambiente externo, estas envolvidas na obtenção da temperatura nas superfícies (para-brisa, vidros laterais dianteiros e traseiros, vidro traseiro, teto e portas laterais dianteiras e traseiras) do veículo. Devido a incidência da radiação solar torna-se necessário o cálculo das temperaturas de superfícies, conforme será detalhado a seguir.

Figura 5 - Incidência de radiação solar nas superfícies do veículo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A temperatura de superfície (T_s) pode ser obtida por meio de um balanço de energia aplicado nas superfícies sujeitas a incidência de radiação solar, conforme apresentado na Figura 5. Observa-se que a carga térmica de radiação (Q_{Rad}) que chega nas superfícies do veículo (para-brisa, vidros laterais dianteiros e traseiros, vidro traseiro, teto e portas laterais dianteiras e traseiras) são decompostas nas cargas térmicas refletida (Q_{Refl}), transmitida (Q_{Trans}), absorvida (Q_{Abs}), apresentadas nas equações 21, 22 e 23 respectivamente. A carga térmica do ambiente interno ($Q_{Amb;int}$) e carga térmica do ambiente externo ($Q_{Amb;ext}$) também fazem parte do balanço de energia para cada superfície. O balanço de energia aplicado nas superfícies pode ser representado matematicamente como

$$Q_{Rad} = Q_{Refl} + Q_{Trans} + Q_{Abs} + Q_{Amb;int} + Q_{Amb;ext} \quad (20)$$

onde Q_{Refl} , Q_{Trans} , Q_{Abs} , $Q_{Amb;int}$ e $Q_{Amb;ext}$ são expressos por

$$Q_{Refl} = \rho \cdot Q_{Rad} \quad (21)$$

$$Q_{Trans} = \tau \cdot Q_{Rad} \quad (22)$$

$$Q_{Abs} = \alpha \cdot Q_{Rad} \quad (23)$$

$$Q_{Amb,int} = h_i \cdot S_{Superfície} \cdot (T_s - T_i) \quad (24)$$

$$Q_{Amb,ext} = h_o \cdot S_{Superfície} \cdot (T_s - T_o) \quad (25)$$

Este conjunto de equações deve ser resolvido iterativamente até que a temperatura de superfície (T_s), que atende o balanço de energia da equação 20, seja encontrada. Para superfícies opacas entende-se que carga térmica transmitida (Q_{Trans}) é considerada nula.

3.1.4 Carga térmica dos gases de exaustão

Os veículos convencionais e elétricos híbridos possuem um motor de combustão interna (MCI) que produz gases de exaustão. A temperatura do gás de exaustão pode chegar até 1000°C, isso devido à alta temperatura atingida durante o processo de combustão (Çengel; Ghajar, 2012). A carga térmica gerado pelo gás de exaustão pode ser transferida para o interior da cabine através do assoalho do veículo. Considerando S_{Exh} como a área do fundo da superfície em contato com o tubo de escape, a carga de térmica dos gases de exaustão (Q_{Exh}) entrando na cabine pode ser escrita como

$$Q_{Exh} = S_{Exh} \cdot U \cdot (T_{Exh} - T_i) \quad (26)$$

na qual S_{Exh} é a superfície próxima ao tubo de escape e U é o coeficiente global de transferência de calor do elemento de superfície próximo ao tubo de escape. Destaca-se que o espaço preenchido com ar entre o tubo de escape e a base do assoalho do veículo deve ser considerado no cálculo do U .

Por sua vez, T_{Exh} é a temperatura do gás de exaustão, em grau Celsius estimada em função da rotação (RPM) do motor como (Fayazbakhsh; Bahrami, 2013)

$$T_{Exh} = 0,138 \cdot RPM - 17 \quad (27)$$

3.1.5 Carga térmica do compartimento do motor

Similar à carga de exaustão, a temperatura elevada do motor de um carro convencional ou híbrido pode também contribuir com o ganho térmico dentro da cabine, sendo a carga térmica do compartimento do motor (Q_{Eng}) obtida pela seguinte forma

$$Q_{Eng} = S_{Eng} \cdot U \cdot (T_{Eng} - T_i) \quad (28)$$

sendo S_{Eng} a área de superfície exposta a temperatura do motor e a temperatura do motor (T_{Eng}), que é obtida em função da rotação (RPM) do motor por

$$T_{Eng} = -2 \cdot 10^{-6} \cdot RPM + 0,0355 \cdot RPM + 77,5 \quad (29)$$

3.1.6 Carga térmica de renovação

No projeto de um veículo é permitida a entrada do ar fresco para dentro da cabine para manter a qualidade do ar para os passageiros. Enquanto os passageiros respiram, a quantidade de CO_2 aumenta de forma linear ao longo do tempo. Assim, um fluxo mínimo de ar fresco deve ser fornecido para cabine a fim de manter o conforto dos passageiros (Fayazbakhsh; Bahrami, 2013).

Devido à operação do sistema de condicionamento de ar, a pressão dentro da cabine é normalmente um pouco maior que a do ambiente externo. Por isso, a carga térmica de renovação (Q_{Ren}) deve levar em consideração a taxa de renovação do ar associada a esta diferença de pressão.

De acordo com os conceitos psicrométricos, o ganho de carga térmica por ventilação consiste em parcelas sensíveis e latentes. Para contabilizar ambas as parcelas, assumindo uma taxa conhecida de ar de renovação entrando na cabine, a quantidade de ganho de carga térmica pode ser expressa como

$$Q_{Ren} = m_{Ren} \cdot (e_o - e_i) \quad (30)$$

onde m_{Ren} é a taxa do fluxo da massa de ventilação, e_o e e_i são as entalpias do ar no ambiente externo e no interior da cabine, respectivamente.

As entalpias do ar são estimadas como

$$e = 1006 \cdot T + (2,501 \cdot 10^6 + 1770 \cdot T) \cdot UA \quad (31)$$

sendo T a temperatura de bulbo seco do ar e UA a umidade absoluta do ar expressa em gramas de vapor de água por grama de ar seco. A umidade absoluta (UA) é calculada como uma função da umidade relativa do ar por

$$UA = 0,62198 \cdot \frac{\phi \cdot P_S}{100P - \phi \cdot P_S} \quad (32)$$

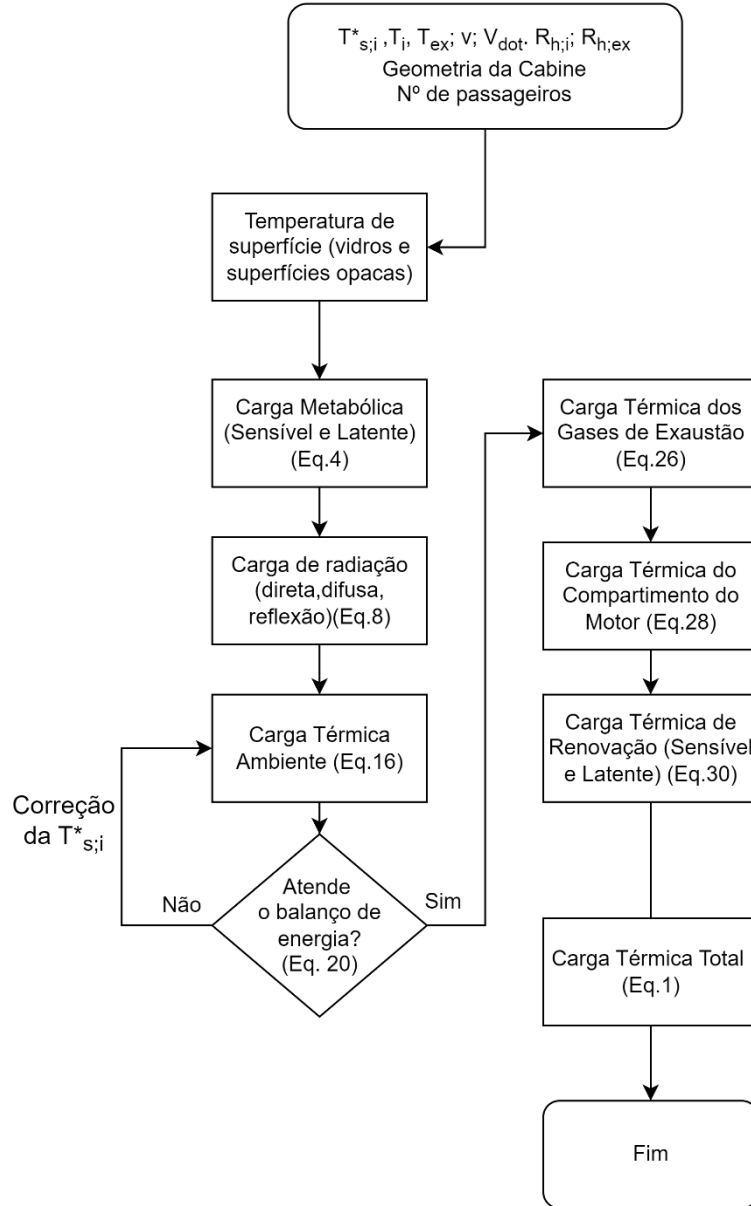
na qual ϕ é a umidade relativa, P é a pressão do ar, e P_S é a pressão de saturação da água a uma temperatura T.

3.2 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático foi implementado com auxílio do programa computacional *Engineering Equation Solver* (EES). A Figura 6 apresenta as principais etapas envolvidas no cálculo da carga térmica do veículo. O fluxograma inicia com o fornecimento dos dados de entrada do modelo como a geometria da cabine, Temperatura interna do ar (T_i) e Temperatura externa do ar (T_{ex}). Na sequência, as cargas metabólicas são calculadas com a equação (4), seguidas das cargas de radiação utilizando a equação (8) e a carga ambiente utilizando a equação (16), Em seguida verificado se o balanço de energia está sendo atendido, se não é realizada a correção nas temperaturas de superfícies, onde i representa cada uma das superfícies do veículo (para-brisa, vidros laterais dianteiros e traseiros, teto, portas dianteiras e traseiras e vidro traseiro). O método computacional Newton-Raphson foi empregado neste trabalho para determinar iterativamente a temperatura das superfícies expostas à radiação solar (Burden; Faires, 2008). Durante os cálculos, o intervalo de busca dessa temperatura foi limitado entre 0°C e 100°C. Após adequação do balanço de energia, é calculada a carga térmica de exaustão dos gases, pela equação (26), em seguida a equação (28) é utilizada para calcular a carga do compartimento do motor,

e a carga térmica de renovação é calculada pela equação (30). Após o cálculo de todas as parcelas de carga térmica, a carga térmica total é calculada utilizando a equação (1).

Figura 6 - Fluxograma do modelo matemático



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Após a realização das etapas envolvidas no cálculo das cargas térmicas sensíveis e latentes, será aplicado o método Monte Carlo para gerar uma maior quantidade de resultados para carga térmica total, sensível e latente. Em seguida, a análise de sensibilidade para identificar quais variáveis afetam a carga térmica do

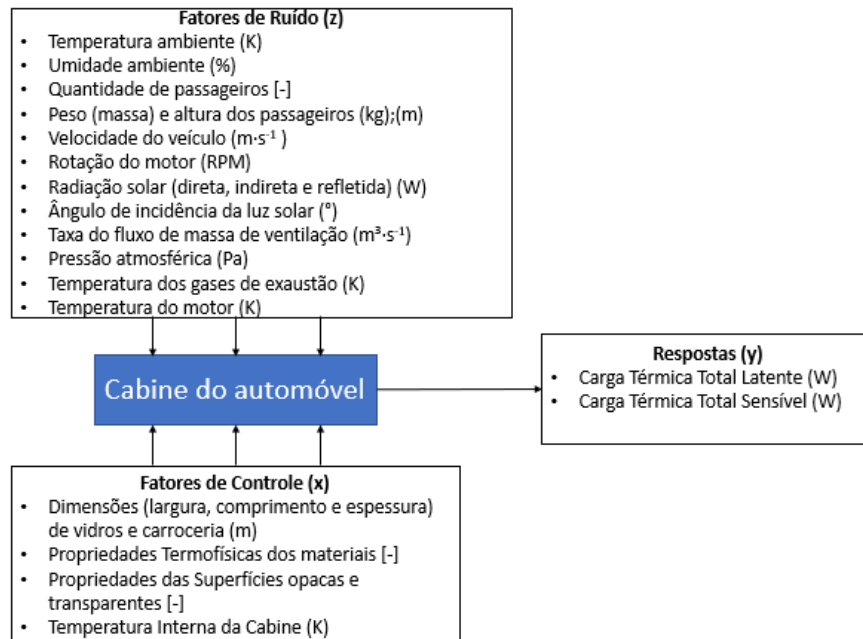
automóvel. Por fim, a utilização do método Projeto Robusto para identificar oportunidades de redução da carga térmica e sua variabilidade.

3.3 MÉTODO PROJETO ROBUSTO E SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

O método Projeto Robusto e a Simulação de Monte Carlo serão empregados em conjunto com o modelo matemático descrito no item 3.1, para analisar a sensibilidade da carga térmica em relação a diferentes fontes de variabilidade, também conhecidas como fatores de ruído.

O diagrama-P, ferramenta empregada no projeto Robusto, será utilizado para identificar e classificar as variáveis que influenciam a carga térmica do automóvel, bem como a sua variabilidade. A Figura 7 mostra o diagrama P, onde estão representados a variável resposta (y), os fatores de controle (x) e os fatores de ruído (z). Como pode ser observado, os fatores de controle identificados são as dimensões dos vidros e carroceria do automóvel, as propriedades termo físicas dos materiais e as propriedades das superfícies opacas e transparentes. Por sua vez, os principais fatores de ruído são a temperatura e umidade ambiente, além da variabilidade presente nas características geométricas e propriedades dos materiais utilizados no automóvel, representados pela variável (z). Destaca-se que os fatores classificados como de controle (x) também podem se comportar como fatores de ruído quando assumirem valores diferentes do valor nominal.

Figura 7 - Diagrama P dos fatores que influenciam na carga térmica na cabine de um automóvel



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Após as principais variáveis terem sido identificadas e classificadas, elas terão seus valores nominais especificados juntamente com os seus correspondentes limites. Tais grandezas são relacionadas pela capacidade, que é definida por

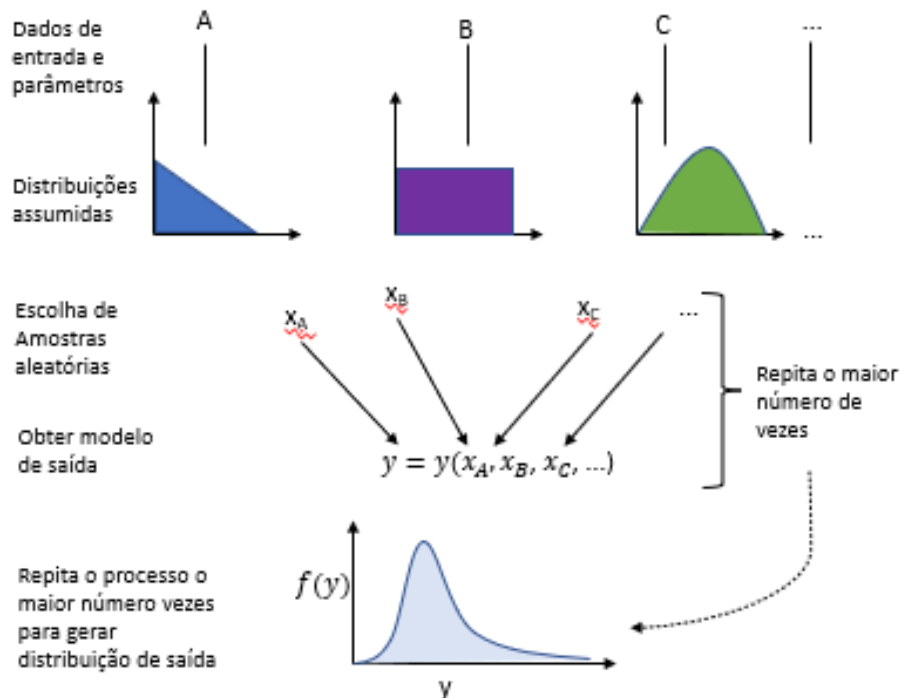
$$Cp = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (33)$$

onde σ é o desvio padrão e LIE e LSE os limites superiores e inferiores especificados para o processo, respectivamente. Desta forma, estabelecendo valores para Cp e os limites LSI e LSE , é possível estimar o desvio padrão (σ) de cada variável.

Para quantificar o efeito da variabilidade dos fatores de entrada do modelo em sua resposta, será empregada a simulação de Monte Carlo, que consiste em uma técnica computacional probabilística amplamente utilizada na análise de sistemas complexos (Jia *et al.*, 2023). Tal técnica trata os parâmetros de entrada de um modelo matemático como variáveis aleatórias, permitindo que o modelo matemático gere muitos resultados esperados para a variável resposta, bem como a sua distribuição (Landau; Binder, 2014). Apesar da simulação de Monte e Carlo e a análise de sensibilidade apresentarem semelhanças, a simulação de Monte Carlo concentra-se na estimativa de probabilidades e intervalos de resultados sob incerteza, enquanto a análise de sensibilidade se concentra na compreensão da sensibilidade dos

resultados do modelo às mudanças nas variáveis de entrada. A Figura 8 mostra uma representação esquemática do procedimento da Simulação de Monte Carlo. Nela, observa-se que os parâmetros de entrada do modelo, representados pelas variáveis A, B e C, são tratados simultaneamente como variáveis aleatórias, que podem apresentar diferentes distribuições estatísticas. Tais variáveis aleatórias serão alimentadas simultaneamente no modelo matemático descrito no item 3.1, para então gerar um conjunto de resultados esperados para a carga térmica do automóvel (variável resposta).

Figura 8 - Representação esquemática da simulação de Monte Carlo



Fonte: Adaptado de Landau e Binder (2014)

3.4 MÉTODO ANOVA

A variabilidade na carga térmica será então analisada empregando o método ANOVA, que permite quantificar e comparar o efeito de cada fator de ruído. Desta forma, será possível identificar quais parâmetros de entrada do modelo são os mais influentes.

O método ANOVA permite analisar a variação média dos resultados e demonstrar quais são os fatores que possuem efeito estatisticamente significativo

para resposta do sistema. Os resultados obtidos serão utilizados para decompor a soma de quadrados

$$SS_{TOT} = \sum(y_i - \bar{y})^2 \quad (34)$$

que pode ser decomposta em duas parcelas,

$$SS_{TOT} = SS_{Regressão} + SS_{Erro} \quad (35)$$

sendo elas a soma de quadrados de regressão

$$SS_{Regressão} = \sum(\hat{y} - \bar{y})^2 \quad (36)$$

e a soma de quadrados de erro (Arnér, 2014):

$$SS_{Erro} = \sum(y_i - \hat{y})^2 \quad (37)$$

Destaca-se que a soma de quadrados de erro representa a variação não capturada pelo modelo ou pelos fatores em estudo, também conhecida como variação residual.

As equações 34 a 37 permitem quantificar a variabilidade total dos dados, a variabilidade explicada pelo modelo e a variabilidade não explicada pelo modelo. A partir dessas informações, é possível realizar a análise de variância, calcular os graus de liberdade associados a cada fonte de variação, calcular os quadrados médios e, por fim, realizar o teste F para determinar se há diferenças significativas entre as médias dos grupos comparados (Arnér, 2014).

Ao aplicar o método ANOVA na análise de variabilidade da carga térmica, será possível quantificar e comparar o efeito de cada fator de ruído sobre a resposta do sistema. Isso permitirá identificar quais parâmetros de entrada do modelo serão mais influentes e têm um impacto significativo na carga térmica. Essas informações podem ser extremamente valiosas na tomada de decisões, no aprimoramento do sistema e no desenvolvimento de estratégias para reduzir a variabilidade e melhorar o desempenho do sistema.

Para avaliar se a variabilidade da carga térmica se mantém dentro de um limite de especificação, será utilizada a capacidade de processo real (Cpk) expressa por

$$Cp_k = \text{mín}\left(\frac{LIE - \mu}{3\sigma}, \frac{LSE - \mu}{3\sigma}\right) \quad (38)$$

onde μ é a média do processo, LIE e LSE os limites inferior e superior de especificação, e σ é o desvio padrão. Dessa forma, com os valores Cpk estabelecidos, é possível determinar o quanto um processo é capaz de se manter dentro dos limites de especificação, considerando as variações do processo quanto a centralização do processo em relação aos limites de especificação.

4 RESULTADOS

Na sequência são apresentados resultados obtidos para carga térmica no interior da cabine de um automóvel, com o uso do modelo matemático descrito na seção 3.1 onde a partir de uma condição de operação de referência será realizada a validação do modelo matemático por meio de uma comparação aos valores apresentados por outros autores. Em seguida, será apresentada a análise de sensibilidade para analisar dos fatores que influenciam na carga térmica no interior do veículo. Na sequência será analisado o efeito da variabilidade dos fatores de controle sobre a carga térmica. Após será apresentada como a interação entre os fatores de controle e fatores de ruído influenciam a carga térmica que será a referência para identificar quais as combinações apresentam maior média e desvio padrão para carga térmica para comparação com os novos conceitos que serão propostos.

4.1 DIMENSÕES EXTERNAS DO VEÍCULO

Para representar a cabine do automóvel foi selecionado um automóvel modelo Ford Ka, ano 2019, com cinco portas ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Veículo utilizado como modelo



Fonte: Site do fabricante (2024)

O automóvel pertence a categoria de carros compactos, utilizado para deslocamentos urbanos, suas dimensões externas são apresentadas na Figura 10 e Tabela 3.

Figura 10 - Dimensões externas do veículo



Fonte: Manual do proprietário (2020)

Tabela 3 - Dimensões externas do veículo

| Item | Descrição | Dimensões (m) |
|------|-----------------------|---------------|
| A | Comprimento máximo | 3,95 |
| B | Largura total | 1,91 |
| C | Altura total | 1,57 |
| D | Distância entre eixos | 2,49 |
| E | Bitola dianteira | 1,50 |
| E | Bitola traseira | 1,48 |

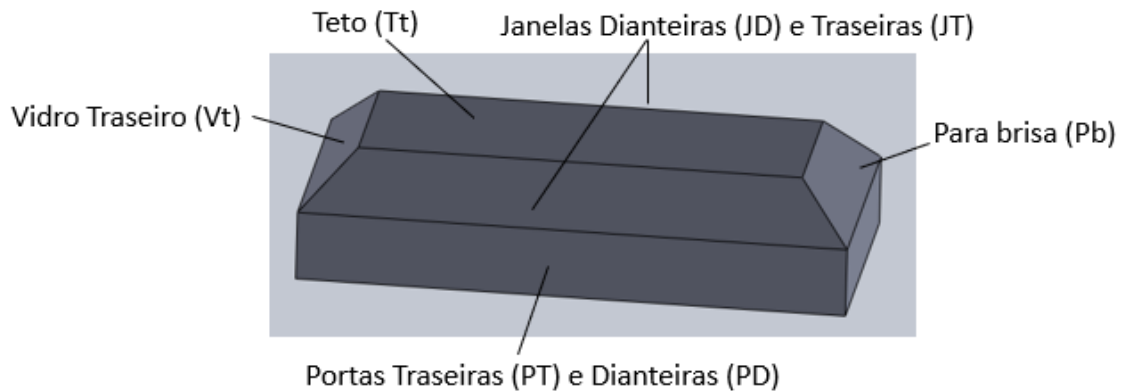
Fonte: Manual do proprietário (2020)

As dimensões necessárias para a modelagem que não estão na Tabela 3, foram obtidas do próprio veículo e estão descritas na seção 4.2.

4.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DA CABINE

As superfícies externas e internas da cabine utilizadas para desenvolver o modelo foram simplificadas, considerando todas as superfícies como planas, como apresentado na Figura 11. Essa prática foi adotada para simplificar criação do modelo já foi realizada com sucesso em outros estudos, sendo utilizada para se estimar as áreas das superfícies consideradas na cabine do automóvel (para-brisa, janelas dianteiras e traseiras, teto, vidro traseiro e portas dianteiras e traseiras).

Figura 11 - Representação esquemática das superfícies consideradas na cabine do automóvel



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

As especificações para cada superfície (dimensões e condutividade) utilizadas no cálculo da carga térmica da cabine são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades da cabine

| Região da cabine | Largura (m) | Comprimento (m) | Espessura (m) | Área (m ²) | Material | Condutividade (W/m·°C) |
|-------------------------|-------------|-----------------|---------------|------------------------|--------------------------------|------------------------|
| Para-brisa (Pb) | 1,35 | 0,90 | 0,004 | 1,25 | Vidro temperado | 1,40 |
| Janelas dianteiras (JD) | 0,40 | 0,75 | 0,004 | 0,60 | | |
| Janelas traseiras (JT) | 0,40 | 0,75 | 0,004 | 0,60 | | |
| Vidro Traseiro (Vt) | 1,25 | 0,42 | 0,004 | 1,05 | | |
| Teto (Tt) | 1,55 | 1,10 | 0,0005 | 1,71 | Aço (SAE 1020) Ar Espuma | 14,90 |
| Portas dianteiras (PD) | 1,05 | 0,80 | 0,0001 | 1,68 | | 26,3·10 ⁻³ |
| Portas traseiras (PT) | 1,00 | 0,80 | 0,005 | 1,60 | | 0,06 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Adicionalmente, as propriedades radiativas das superfícies são mostradas na Tabela 5 e foram utilizadas para estimar as cargas térmicas associadas à radiação solar, para determinação das parcelas direta, difusa e de reflexão, sendo respeitado o devido balanço de radiação é expresso por

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad (39)$$

onde α corresponde a absorvidade, τ a transmissividade e ρ a refletividade para cada superfície (semitransparente ou opaca) do veículo respectivamente. Como esperado, observa-se que as superfícies opacas são caracterizadas pela transmissividade (τ) nula.

Tabela 5 - Propriedades radiativas das superfícies

| Região | ϵ | P | τ | α |
|---|------------|-----|--------|----------|
| Para-brisa | 0,9 | 0,2 | 0,4 | 0,4 |
| Vidro Traseiro | | | | |
| Janelas Laterais (dianteiros e traseiros) | | | | |
| Teto e Portas (dianteiros e traseiros) | 0,9 | 0,7 | 0 | 0,3 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Para a realização das simulações, foram adotadas condições de operação de referência, apresentadas na Tabela 6. Tais condições são representativas para aplicações automotivas e foram empregadas como dados de entrada do modelo matemático, como por exemplo a massa e altura do motorista, velocidade do veículo, rotação do motor, temperatura ambiente, temperatura no interior da cabine, vazão de renovação, umidade relativa do ambiente e umidade relativa no interior da cabine. Uma quantidade mínima de vazão de ventilação foi adotada para atender aos requisitos de ar fresco, conforme utilizada em estudos similares. Vale ressaltar que este é um cenário arbitrário considerado neste estudo, pois na prática, o passageiro tem liberdade de alterar a vazão de ventilação.

Tabela 6 - Condições de operação de referência para simulação

| Especificação | Valor |
|--|--------------------------------------|
| Motorista (massa) | 70 kg |
| Motorista (altura) | 1,70 m |
| Velocidade | 11,11 m·s ⁻¹ |
| Rotação | 3500 rpm |
| Temperatura ambiente | 35°C |
| Temperatura interior da cabine | 23°C |
| Vazão de renovação | 0,01 m ³ ·s ⁻¹ |
| Umidade relativa do ambiente | 70% |
| Umidade relativa no interior da cabine | 50% |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Para se estimar os valores de radiação direta (I_{Dir}) e radiação difusa (I_{Dif}), foram utilizadas como base os valores das médias das tabelas Ashrae (2009) das cidades brasileiras de Manaus-AM e Curitiba-PR, representando ambientes com diferentes condições climáticas ao norte e ao sul do país, as quais são apresentadas nas Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7 - Radiação direta das cidades de Manaus e Curitiba

| Local | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | Média (W/m ²) |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------------------------|
| Manaus | 908 | 908 | 894 | 885 | 854 | 859 | 847 | 790 | 784 | 776 | 779 | 836 | 882 |
| Curitiba | 974 | 958 | 944 | 914 | 890 | 854 | 874 | 873 | 893 | 916 | 980 | 973 | |

Fonte: Adaptado de Ashrae (2009)

Tabela 8 - Radiação difusa das cidades Manaus e Curitiba

| Local | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | Média (W/m ²) |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------------------------|
| Manaus | 137 | 137 | 138 | 122 | 123 | 109 | 123 | 182 | 208 | 225 | 222 | 185 | 137 |
| Curitiba | 118 | 115 | 104 | 96 | 85 | 91 | 92 | 121 | 143 | 153 | 120 | 128 | |

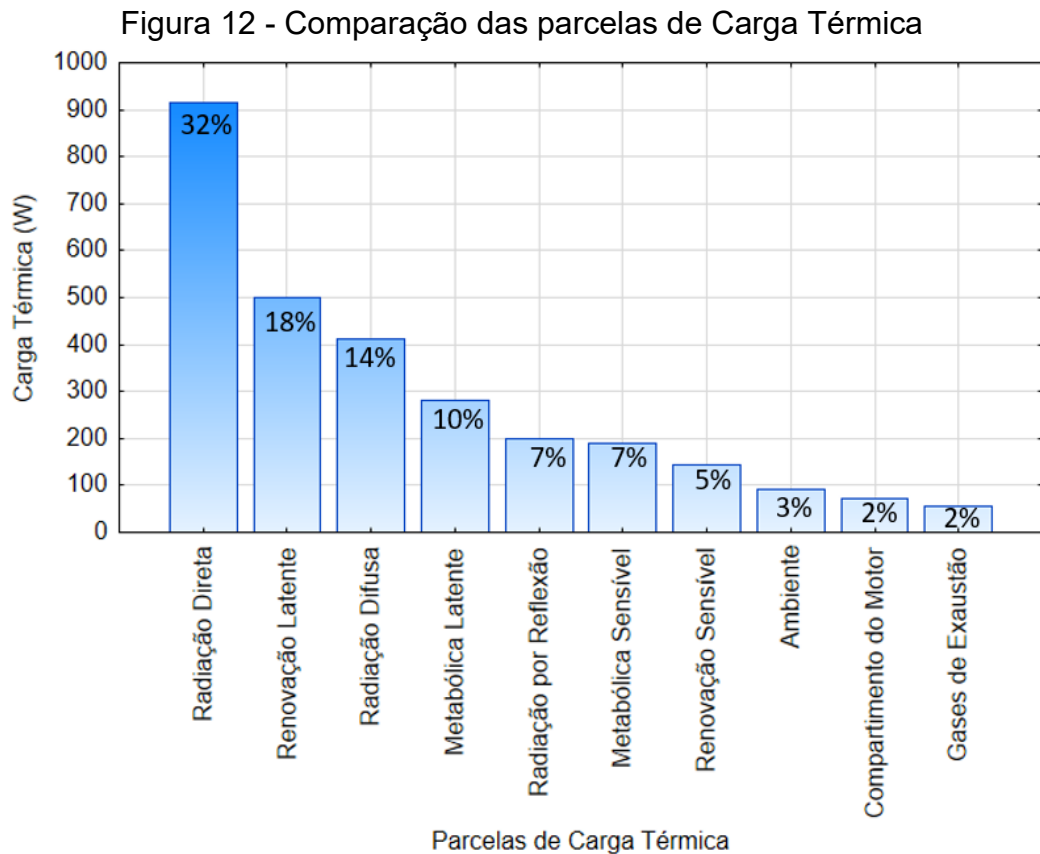
Fonte: Adaptado de Ashrae (2009)

4.3 VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Nesta seção será realizada a validação do modelo matemático apresentado nas seções 3.1 e 3.2, considerando os dados de entrada das condições de referência da Tabela 6. Os resultados obtidos para a carga térmica serão então comparados com dados disponíveis na literatura e com a capacidade de refrigeração de catálogo de compressores para aplicações de condicionamento de ar automotivo.

Com o uso desses dados, foram estimadas as cargas térmicas sensíveis e latentes no interior da cabine do automóvel, com seus resultados parciais mostrados na Figura 12, apresentando em ordem decrescente qual a contribuição de cada parcela na carga térmica total no interior da cabine. Observa-se que as parcelas mais significativas são as cargas térmicas de radiação direta, determinada pela equação 9, a carga térmica de renovação latente (equação 30) e de radiação difusa (equação 11) que juntas representam 64% em relação a carga térmica total, determinada pela equação 1. A carga térmica de radiação direta (equação 9) leva em consideração a exposição do veículo aos raios solares e contribui com cerca de 916 W da carga total (equação 1). A carga térmica de renovação latente (equação 30) contribui com 501 W

da carga térmica total dentro da cabine. A carga térmica de radiação difusa (equação 11) considera a exposição do veículo a radiação indireta da luz na superfície, contribuindo com 413 W da carga térmica total. Em contraste, as cargas térmicas relacionadas com o compartimento do motor, determinada pela equação 28 e dos gases de exaustão (equação 26), são as menos significativas.

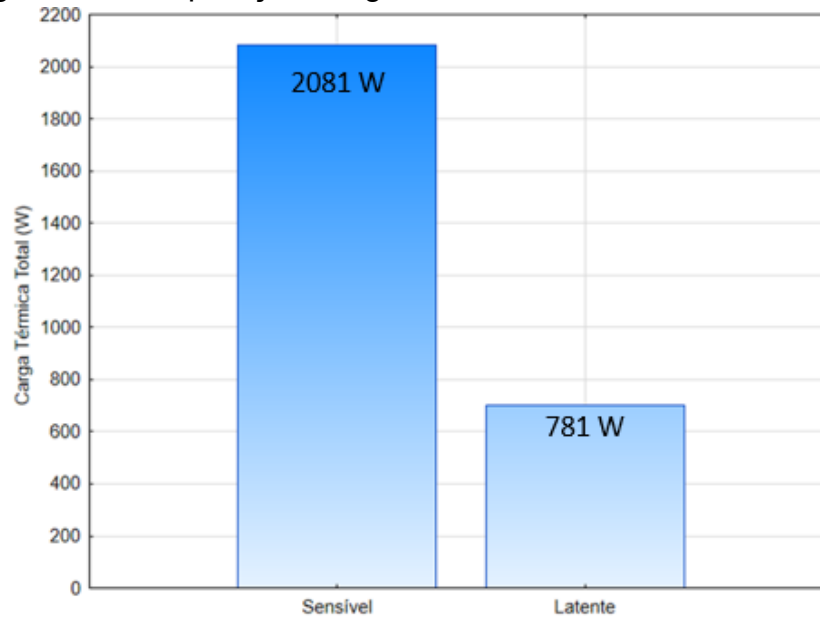


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Figura 13 apresenta as cargas térmicas totais sensível e latente, sendo a primeira predominante com aproximadamente 2081 W da carga total, e carga térmica latente representando 781 W da carga total. A carga térmica total dentro da cabine do automóvel, objeto de estudo foi de 2862 W, sendo esta adotada como a carga térmica de referência do modelo.

Nesta condição o fator de calor sensível (FCS), obtido pela razão entre a carga térmica sensível e a carga térmica total, é equivalente à 0,73.

Figura 13- Comparação Carga Térmica Total Sensível e Latente



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os resultados de carga térmica apresentados anteriormente foram considerados como referência para validação do modelo. Em seguida, foram realizadas variações nos valores de alguns fatores específicos para se estimar a faixa de variação da carga térmica no interior da cabine. Para realizar este procedimento foram selecionados alguns fatores de ruído a partir do diagrama-P (Figura 7) e apresentados na Tabela 9. Os valores obtidos mostram que as variações adotadas para os fatores de ruído resultaram em cargas térmicas distribuídas em uma faixa entre 1884 W até 4269 W. Destaca-se que fatores de ruído são aqueles que apresentam influência sobre a carga térmica, mas não podem ser controlados durante a utilização do automóvel.

Tabela 9 - Valores mínima e máximos adotados para os fatores de ruído

| Fator de ruído | Mínimo | Referência | Máximo |
|--------------------------------------|--------|------------|--------|
| Temperatura externa (°C) | 28 | 35 | 42 |
| Umidade externa (%) | 40 | 70 | 90 |
| Radiação direta ($W \cdot m^{-2}$) | 776 | 882 | 980 |
| Radiação difusa ($W \cdot m^{-2}$) | 85 | 137 | 225 |
| Rotação (rpm) | 800 | 3500 | 6000 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

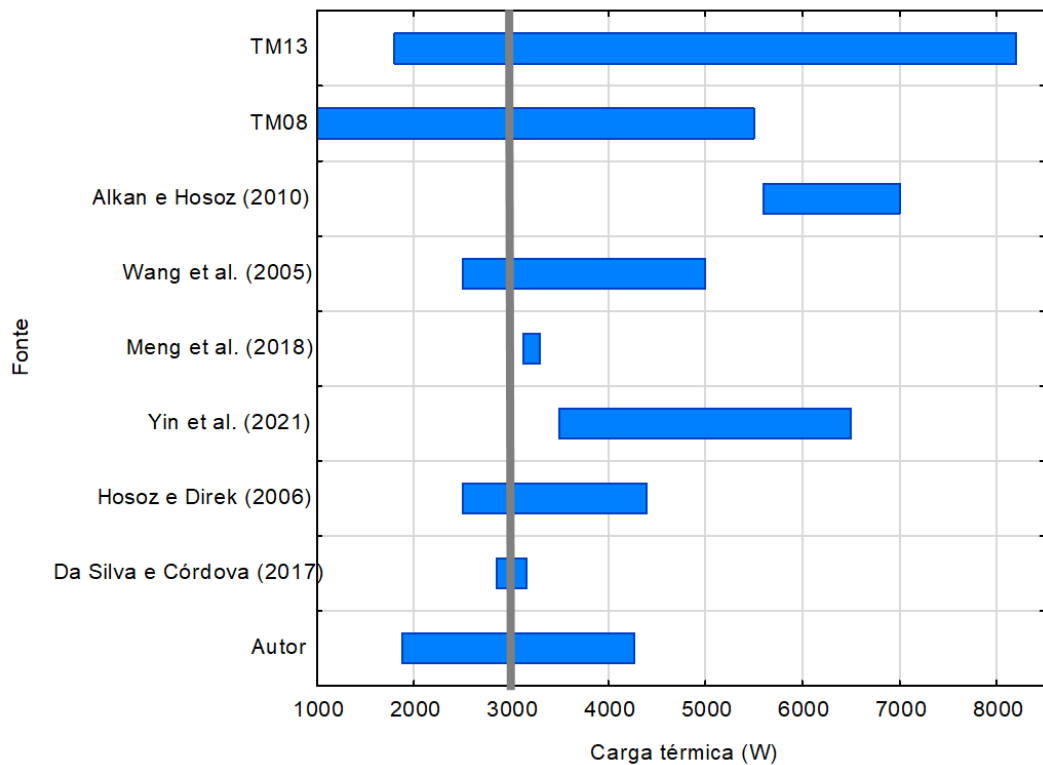
Os resultados obtidos com o modelo proposto, empregando os dados da Tabela 9, também foram comparados com valores de carga térmica disponíveis na literatura (onde foram apresentados os resultados para carga térmica de veículos compactos e de médio porte), como observado na Tabela 10. A Figura 14 apresenta a faixa de valores de carga térmica obtidos com o modelo matemático em comparação aos valores apresentados por outros autores, enquanto a linha vertical cinza mostra a carga térmica obtida utilizando os dados de operação de referência que constam nas Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8. Adicionalmente, os dados de capacidade de resfriamento de dois compressores do representante Valeo (TM08 e TM13) utilizados em automóveis de passeio são apresentados nas últimas duas linhas da Tabela 10. De um modo geral, observa-se que os resultados de carga térmica obtidos com o modelo matemático proposto, apresenta interseção com todos os demais trabalhos e modelos de compressores. Tal fato mostra que o modelo proposto é capaz de estimar cargas térmicas tipicamente observadas em aplicações automotivas.

Tabela 10 – Comparação da carga térmica total do modelo com estudos científicos similares

| Fonte | Carga térmica (W) | |
|---------------------------|-------------------|--------|
| | Mínimo | Máximo |
| Autor | 1884 | 4269 |
| Da Silva e Córdova (2017) | 2850 | 3160 |
| Hosoz e Direk (2006) | 2500 | 4400 |
| Yin et al. (2021) | 3500 | 6500 |
| Meng et al. (2018) | 3130 | 3300 |
| Wang et al. (2005) | 2500 | 5000 |
| Alkan e Hosoz (2010) | 5600 | 7000 |
| TM08 | 1000 | 5500 |
| TM13 | 1800 | 8200 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 14 - Representação gráfica da comparação da carga térmica total do modelo com estudos científicos similares



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Após a comparação da carga térmica obtida com o modelo matemático e comparação com as faixas de variações de outros, será realizada análise de sensibilidade para melhor compreensão de quais são os fatores (variáveis de entrada) considerados no modelo proposto que possuem maior impacto na variação da carga térmica no interior da cabine.

4.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO

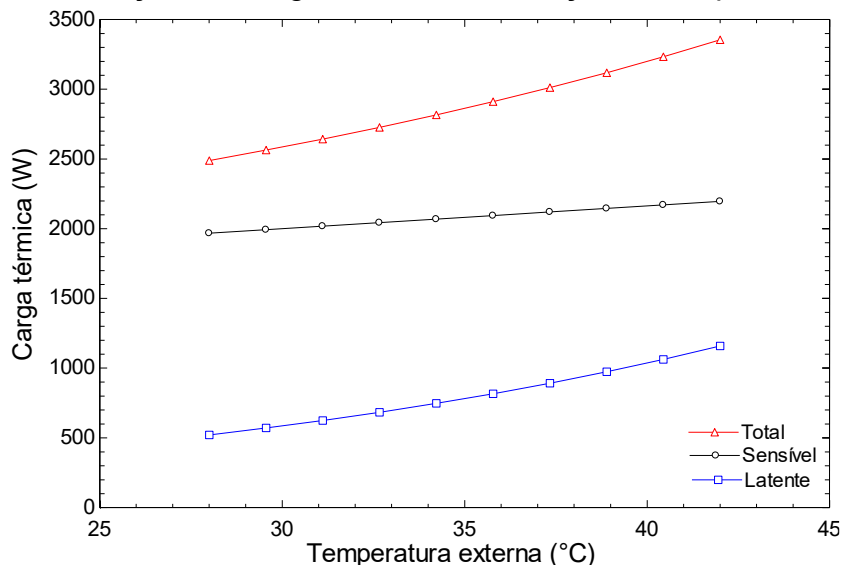
Nesta seção serão analisados os efeitos dos principais fatores que influenciam a carga térmica total no interior da cabine do veículo considerados neste estudo. Os fatores selecionados para a realização da análise de sensibilidade foram: temperatura externa, radiação direta, radiação difusa, umidade externa, rotação do motor, espessura do vidro, transmissividade do vidro e condutividade térmica da espuma. Os valores máximo e mínimo para temperatura externa, radiação direta, radiação difusa, umidade externa, rotação do motor foram apresentadas na Tabela 9. Para espessura do vidro, transmissividade do vidro e condutividade térmica da

espuma, os valores de máximo e mínimo foram obtidos por meio da simulação de Monte Carlo.

4.4.1 Temperatura Externa

A temperatura externa está relacionada com a carga térmica total vindas das parcelas das cargas térmica de renovação latente e sensível, com faixa de variação entre 28°C e 42°C. A Figura 15 mostra que o aumento da temperatura externa (ambiente) provoca um aumento na carga térmica sensível, devido ao efeito combinado da carga térmica de renovação com a parcela de carga térmica ambiente representadas no modelo matemático pelas equações 30 e 16, respectivamente. Adicionalmente observa-se na Figura 15 um aumento na carga térmica latente, também justificado por um aumento da carga térmica de renovação, que por sua vez considera a maior capacidade de absorção de vapor de água que o ar atmosférico apresenta com o aumento da temperatura externa. Conseqüentemente o aumento simultâneo das cargas térmicas sensíveis e latente resulta no aumento da carga térmica total, de 2500 W para 3300 W. Em contraste, o aumento da temperatura externa proporciona uma redução do fator de calor sensível (FCS) de 0,80 para 0,63, uma vez que a parcela de carga térmica sensível aumenta em uma proporção menor em relação à carga térmica latente e o fator de calor sensível é obtido pela razão da carga térmica sensível pela carga térmica total.

Figura 15 - Variação da Carga Térmica em relação a Temperatura Externa

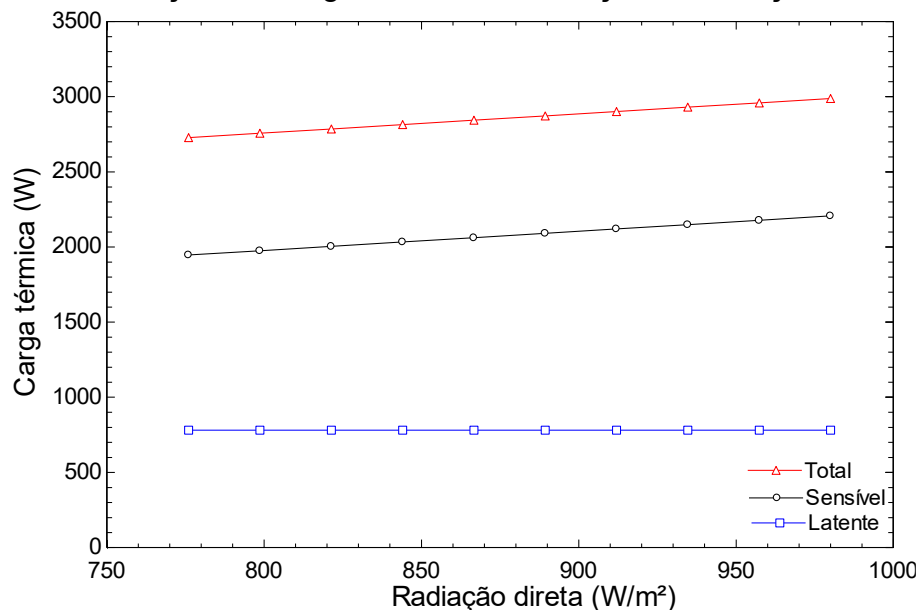


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.4.2 Radiação solar direta

A radiação solar direta corresponde a parcela referente a carga térmica de radiação solar. A Figura 16 apresenta o resultado da carga térmica para uma faixa de radiação solar entre 776 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) e 882 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) onde é gerado um aumento da carga térmica sensível, pois o aumento de intensidade da radiação direta solar sobre a superfície do veículo, provoca um aumento na absorção de energia solar pela cabine, aumentando a carga térmica de radiação direta e na carga térmica de radiação, representadas no modelo matemático pelas equações 9 e 8, respectivamente. Na Figura 16 nota-se na medida que a radiação direta não influencia no aumento da parcela latente, uma vez que não ocorre variação desta parcela com o aumento da radiação direta. Também pode-se observar que o aumento da radiação direta provoca um aumento na carga térmica total de 2700 W para 2900 W, e apresenta FCS médio de 0,73.

Figura 16 - Variação da Carga Térmica em relação a Radiação Solar Direta



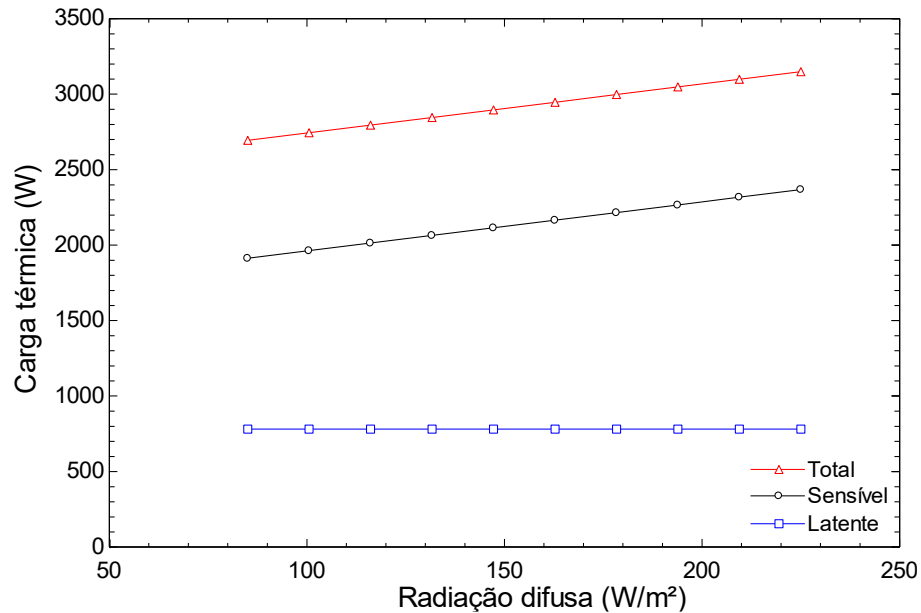
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.4.3 Radiação difusa

Assim como a radiação direta, a radiação difusa está relacionada com a parcela referente a carga térmica de radiação. A Figura 17 mostra o resultado da carga térmica para uma variação da radiação difusa entre 85 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) e 137 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) que

resulta no aumento da carga térmica sensível, de 1900 W para 2100 W. Em comparação com a radiação direta, a radiação difusa tende a ser menos intensa em termos de energia, uma vez que resulta da dispersão da luz solar pelas partículas da atmosfera, criando uma fonte de luz difusa em todas as direções. Nota-se que apesar do aumento da radiação difusa, esta não gera efeito na carga térmica latente.

Figura 17 - Variação da Carga Térmica em relação a Radiação Difusa

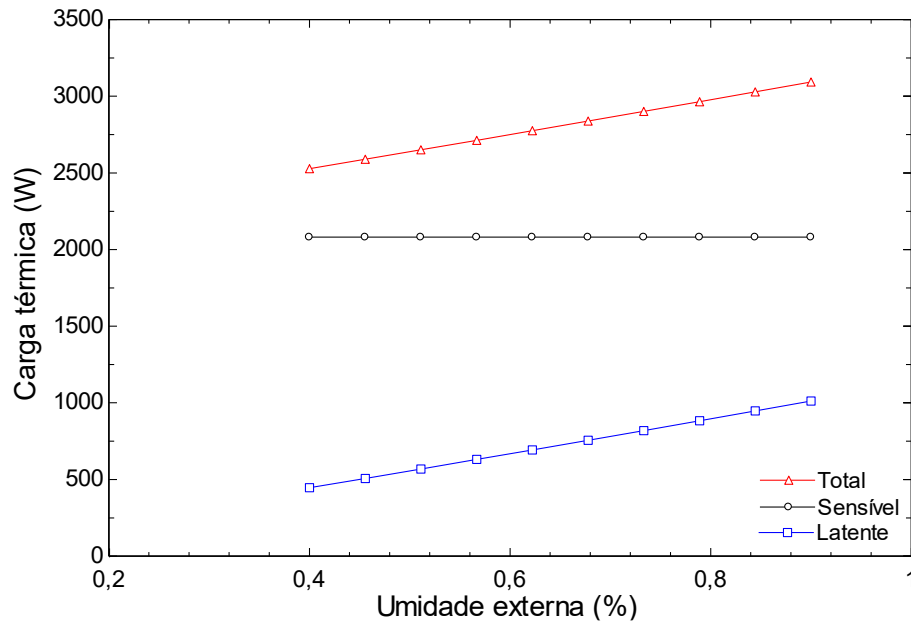


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.4.4 Umidade relativa externa

A umidade relativa externa está relacionada a carga térmica total originária da carga térmica de renovação latente. A Figura 18 mostra que o aumento da umidade externa (entre 40% e 90%), gera um aumento na carga térmica latente, devido ao seu efeito na carga térmica de renovação latente. Isto ocorre, uma vez que o aumento da umidade externa provoca a transferência de umidade para o interior da cabine, aumentando a carga térmica latente. Esta alteração também exige que o sistema de condicionamento de ar opere de maneira para intensa para retirar o excesso de umidade e manter um nível de conforto aceitável. A Figura 18 também mostra que a parcela referente a carga térmica sensível não sofre efeito em relação ao aumento da umidade externa, permanecendo constante (2100 W), enquanto a carga térmica total varia na faixa de 2500 W a 3000 W.

Figura 18 - Variação da Carga Térmica em relação a Umidade Externa

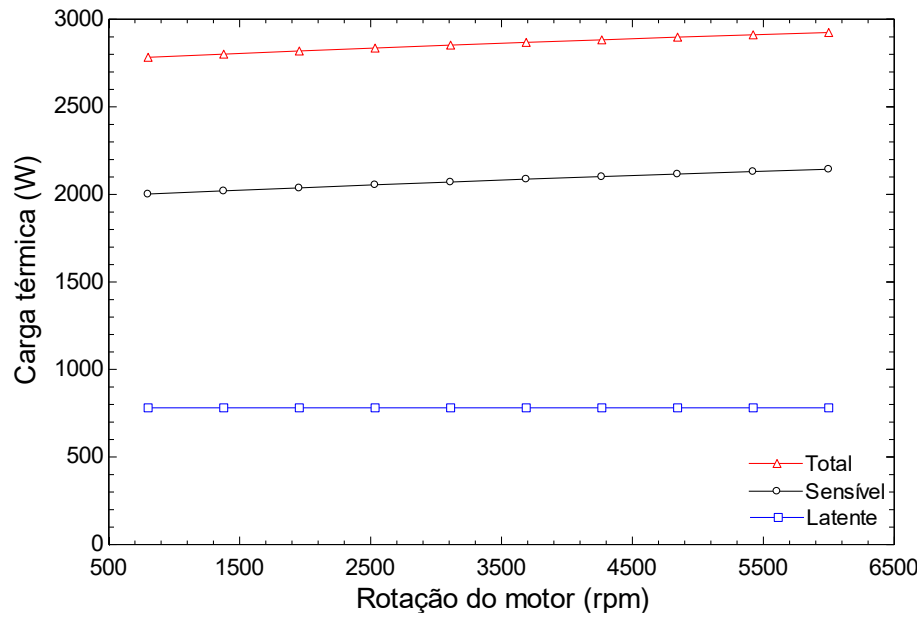


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.4.5 Rotação do motor

A rotação do motor está relacionada a parcela referente a carga térmica sensível do interior da cabine. Na Figura 19 observa-se que o aumento da rotação do motor (entre 800 rpm e 6000 rpm) provoca o aumento na carga térmica sensível, isso devido ao seu efeito na carga térmica do compartimento do motor mostrado nas equações 2 e 28 respectivamente. O aumento da rotação do motor provoca um aumento na temperatura do motor mostrado pela equação 29, onde parte dessa carga térmica pode ser transferida para o interior da cabine. Nota-se na Figura 19 que o aumento da rotação do motor não causa impacto na carga térmica latente, uma vez que não está diretamente correlacionada a nenhuma de suas parcelas, em contrapartida a mesma leva a um aumento de 2800 W para 2900 W.

Figura 19 - Variação da Carga Térmica em relação a Rotação do Motor



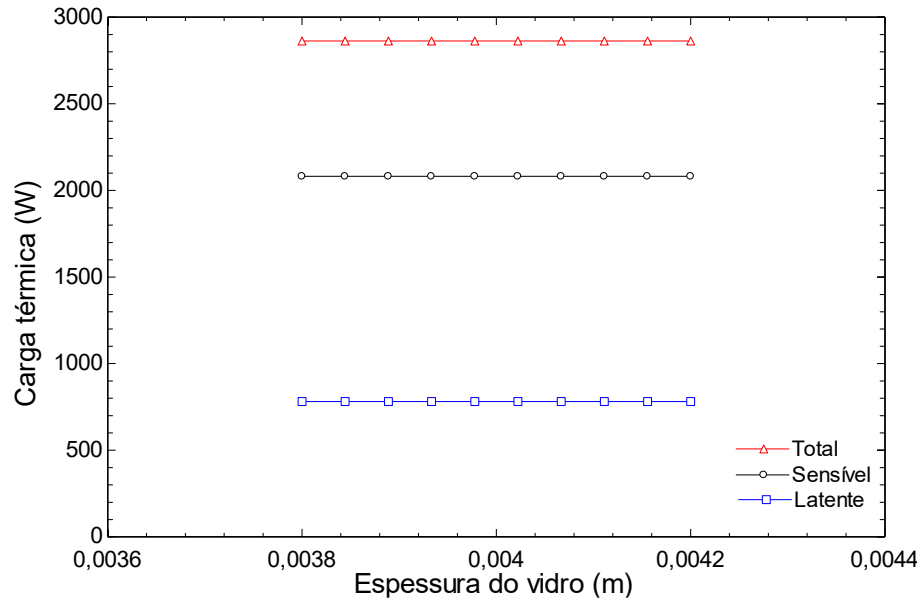
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.4.6 Espessura do vidro

A espessura do vidro está relacionada à resistência térmica, que por sua vez é utilizada para se obter o coeficiente de calor global utilizado para determinar a carga térmica ambiente como mostram as equações 17 e 16. A Figura 20 mostra que o aumento da espessura do vidro não gera efeito significativo sobre as cargas térmica sensível e nenhum efeito sobre a latente. Isso ocorre devido ao seu impacto muito pequeno em comparação a outros fatores. Foi considerado que todas as regiões envidraçadas possuem a mesma espessura para uso no modelo com variação entre 0,0038m e 0,0042m.

Apesar de serem de materiais e dimensões diferentes, o mesmo comportamento ocorre quando variada a espessura da chapa metálica utilizados no teto e portas (dianteiras e traseiras) do veículo.

Figura 20 - Variação da Carga Térmica em relação a Espessura do Vidro

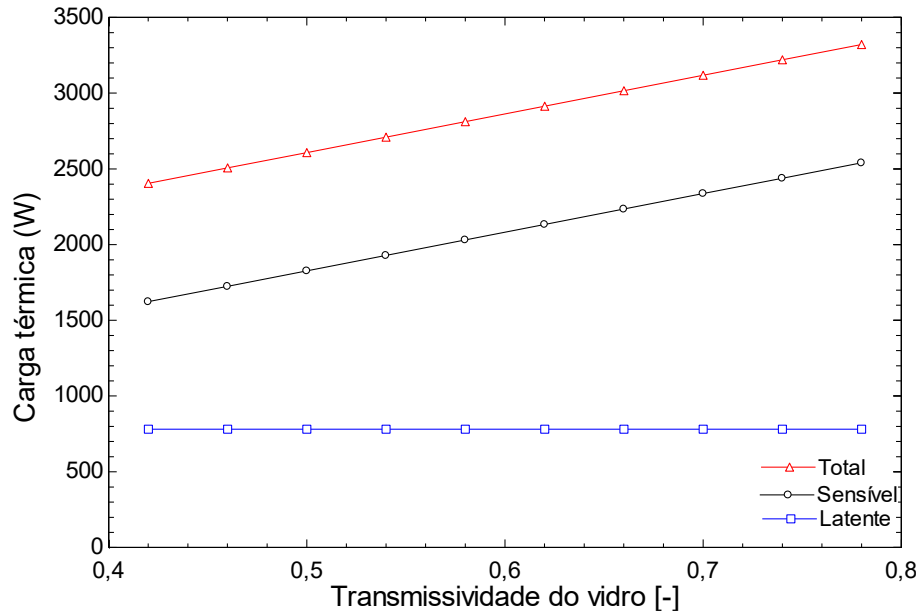


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.4.7 Transmissividade do vidro

A transmissividade do vidro está relacionada com a parcela referente à carga térmica de radiação. A Figura 21 mostra que o aumento de transmissividade do vidro (dentro de uma faixa de 0,42 a 0,78) gera um aumento na carga térmica sensível, devido seu efeito na carga térmica de radiação, como pode ser visto no modelo matemático nas equações 9, 11, 13 e 8 respectivamente. O aumento da transmissividade permite a passagem de mais de radiação solar através do vidro, o que resulta em um expressivo aumento da carga térmica sensível, de 1600 W para 2300 W. Na Figura 21 também se observa que o aumento da transmissividade do vidro não provoca o aumento da carga térmica latente, uma vez que não está relacionada a nenhuma de suas parcelas, permanecendo esta constante na faixa de 780 W.

Figura 21 - Variação da Carga Térmica em relação a Transmissividade do vidro

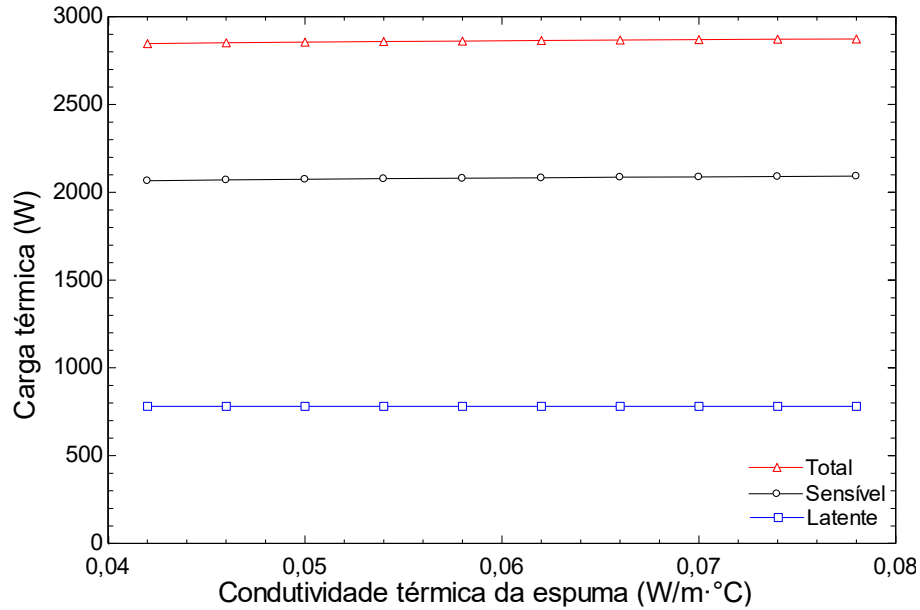


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.4.8 Condutividade térmica da espuma

A condutividade térmica da espuma está relacionada com a parcela referente à carga térmica do ambiente. Na Figura 22 observa-se que o aumento na condutividade térmica da espuma (entre $0,042 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ e $0,078 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$) provoca um aumento na carga térmica sensível. Seu efeito apesar de não estar diretamente relacionado a carga térmica do ambiente, pode ser observado por meio do coeficiente de transferência térmica global e resistência térmica apresentado no modelo matemático pela equação 17. Apesar do aumento gerado na parcela de carga térmica sensível de 2060 W para 2090 W (nota-se uma pequena variação), dentro do contexto do automóvel, o forro do teto e espumas de isolamento térmico são usados para criar uma barreira que reduz a transferência de calor entre o interior da cabine e o ambiente externo.

Figura 22 - Variação da Carga térmica em relação a condutividade térmica da espuma



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Tabela 11 mostra os resultados obtidos com a análise de sensibilidade, onde são apresentados os valores mínimos e máximo de cada fator, a variação da carga térmica total, juntamente com as respectivas variações correspondentes. Observa-se que os fatores que obtiveram maior influência na variação da carga térmica total foram a transmissividade do vidro (917 W), a temperatura externa (866 W) e a umidade relativa externa (566 W). Em contrapartida, as variações da rotação do motor, da condutividade térmica da espuma e da espessura do vidro, resultaram em uma influência baixa no resultado da carga térmica total.

Tabela 11 - Comparação dos resultados da Análise de Sensibilidade

| Fatores | Mínimo | Máximo | Variação da carga térmica (W) | Variação percentual da carga térmica (W) |
|--|--------|--------|-------------------------------|--|
| Temperatura externa (°C) | 28 | 42 | 866 | 35% |
| Radiação solar direta (W/m ²) | 776 | 980 | 260 | 10% |
| Radiação difusa (W/m ²) | 85 | 225 | 455 | 17% |
| Umidade relativa externa (%) | 40 | 90 | 566 | 22% |
| Rotação do motor (rpm) | 800 | 6000 | 142 | 5% |
| Espessura do vidro (m) | 0,0038 | 0,0042 | 0 | 0% |
| Transmissividade do vidro [-] | 0,42 | 0,78 | 917 | 38% |
| Condutividade térmica da espuma (W/m ² ·°C) | 0,0042 | 0,078 | 26 | 1% |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Após os fatores que exercem maior efeito sobre a carga térmica do veículo terem sido identificados, será aplicado o método de Monte Carlo para entender como a combinação da variabilidade presente nos fatores de controle afeta a variabilidade da carga térmica do veículo em estudo.

4.5 EFEITO DA VARIABILIDADE DOS FATORES DE CONTROLE SOBRE A CARGA TÉRMICA

Apesar das especificações de engenharia serem definidas nas etapas finais do projeto de um produto, observa-se que o processo de fabricação dos seus componentes sempre estará sujeito a variações que resultam em alterações nas características de desempenho do produto. Para considerar tais características, empregou-se o método de Monte Carlo ao modelo matemático descrito na seção 3.1 deste trabalho.

Para realizar a simulação de Monte Carlo foram utilizados como referência os dados de entrada das condições de operação descritos na Tabela 6 e os valores de radiações direta e difusa apresentados na Tabela 9. Adicionalmente, os valores de referência para os fatores de controle foram obtidos da Tabela 4 e Tabela 5. A Tabela 12 apresenta os fatores de controle empregados na simulação de Monte Carlo e suas respectivas localizações na cabine do veículo.

A variabilidade em torno dos valores de referência foi obtida considerando a distribuição normal, que é tipicamente observada em componentes do setor automotivo. Por sua vez, os limites superior e inferior de cada variável foram estabelecidos considerando uma variação de 5% em relação valor nominal.

Com base nestes valores de referência e seus respectivos limites, utilizou-se a definição de capacidade, apresentada na equação 33, para estimativa do desvio padrão (σ) de cada variável de entrada do modelo. Durante os cálculos, empregou-se o valor de $C_p = 1,33$, que é observado em processos considerados como estáveis.

Tabela 12 - Fatores de controle da cabine do automóvel

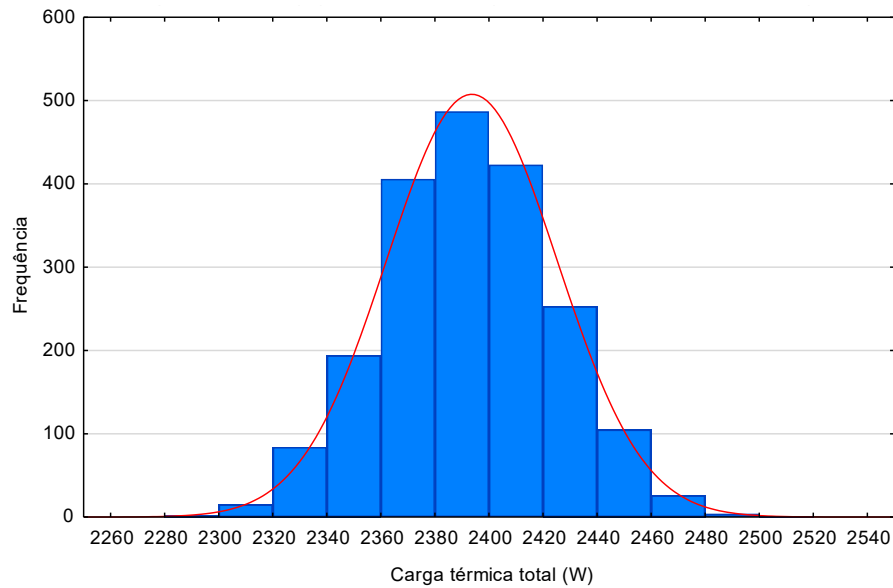
| Região da cabine | Material | Propriedades da cabine | Propriedades de radiação |
|-------------------------|--------------------------------|--|--|
| Para-brisa (Pb) | Vidro temperado | Largura Comprimento Espessura Condutividade | Transmissividade Refletividade Absortividade |
| Janelas dianteiras (JD) | | | |
| Janelas traseiras (JT) | | | |
| Vidro Traseiro (Vt) | | | |
| Teto (Tt) | Aço (SAE 1020) Ar Espuma | | |
| Portas dianteiras (PD) | | | |
| Portas traseiras (PT) | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Após a definição das variáveis de entrada do modelo e suas respectivas distribuições, foram geradas 2000 (duas mil) combinações aleatórias. Os resultados obtidos para a carga térmica total, sensível e latente são apresentados pela Figura 23, Figura 24 e Figura 25 respectivamente.

A Figura 23 mostra o histograma referente à carga térmica total após a aplicação dos casos gerados no modelo matemático, nela é possível verificar a distribuição da frequência em que os valores para carga térmica total ocorrem em diferentes faixas de valores. Ao analisar o histograma observa-se uma distribuição normal, que apresenta valor médio e desvio padrão de 2392 W e ± 31 W, respectivamente. Destaca-se que tais resultados se encontram dentro da faixa de valores observados no setor de condicionamento de ar automotivo, como apresentados na Tabela 10.

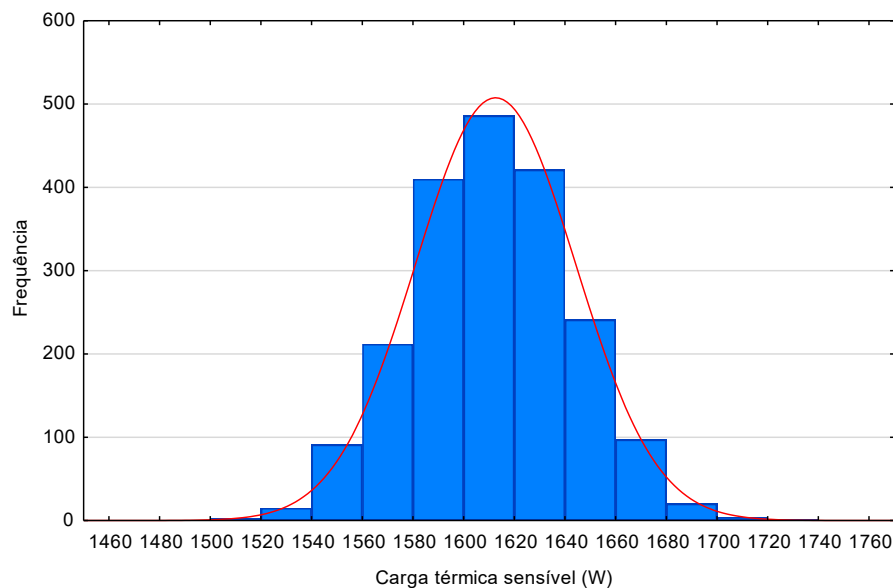
Figura 23 - Histograma da Carga térmica total após aplicação do método de Monte Carlo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O histograma referente a parcela da carga térmica sensível é apresentado na Figura 24 onde ao se examinar o histograma observa-se uma distribuição normal e que a distribuição dos dados é relativamente simétrica em torno da faixa central. A média e desvio padrão encontrados para carga térmica sensível foram 1611 W e ± 31 W respectivamente, com FCS de 0,73.

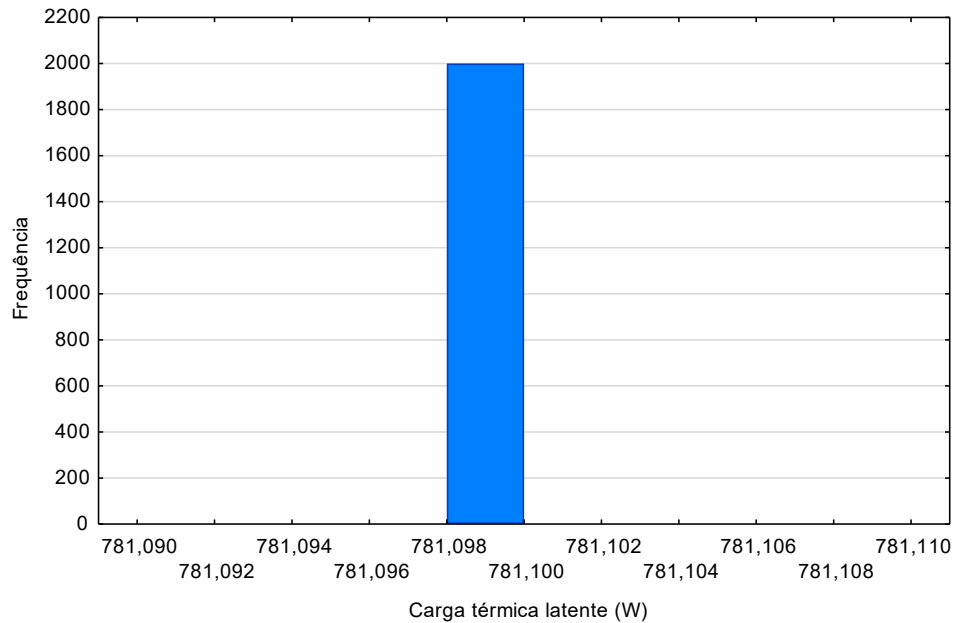
Figura 24 - Histograma da Carga térmica sensível após aplicação do método de Monte Carlo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Figura 25 apresenta o histograma referente a carga térmica latente onde observa-se que seu resultado permaneceu constante durante as simulações. Tal comportamento já era esperado, uma vez que os fatores de controle utilizados na análise de Monte Carlo (ver Tabela 12) não apresentam efeito a carga térmica latente.

Figura 25 - Histograma da Carga térmica latente após aplicação do método de Monte Carlo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Após a análise de Monte Carlo ter sido empregada para identificar a variabilidade da carga térmica total e suas componentes sensível e latente, será analisado como a interação entre a variação dos fatores de controle e dos fatores de ruído podem influenciar as cargas térmica no interior da cabine de um automóvel. Para isso, será elaborada uma matriz cruzada a ser apresentada na seção seguinte.

4.6 ANÁLISE DA INTERAÇÃO ENTRE OS FATORES DE CONTROLE E RUÍDO PARA DEFINIÇÃO DA CONDIÇÃO DE REFERÊNCIA

Nesta seção será realizada a análise da interação entre os fatores de controle e ruído da cabine do automóvel objeto de estudo, cujas principais características estão apresentadas na seção 4.2. Destaca-se que os fatores de controle são especificados na etapa de projeto de um produto, enquanto os fatores de ruído são aqueles de difícil ou impossível controle, mas que estão presentes durante a utilização de um produto.

Esta análise tem como objetivo avaliar o impacto desta interação sobre a carga térmica que será imposta ao sistema de condicionamento de ar de um automóvel. Adicionalmente, esta análise servirá de referência para comparação com os novos conceitos relacionados ao projeto térmico da cabine, que serão propostos na seção 4.7.

Para isso foi elaborada uma matriz de condições combinando os fatores de controle com os fatores de ruído. Tal matriz é conhecida como matriz cruzada, pois combina uma matriz interna que contém os fatores de controle com uma matriz externa que contém os fatores de ruído. Nesta análise utilizou-se uma matriz interna com 10 (dez) fatores de controle em 2 níveis sendo elaborado um plano experimental fracionário 2^{10-4} , totalizando 64 combinações. Para matriz externa foram empregados 4 fatores de ruído em 2 níveis, totalizando 16 combinações. Desta forma, foram geradas 1024 combinações. A Tabela 13 mostra quais os fatores de controle e fatores de ruído foram selecionados para serem utilizados na matriz cruzada, na qual os valores dos fatores de controle foram obtidos a partir das combinações aleatórias geradas para analisar o efeito da variabilidade dos fatores de controle sobre a carga térmica (seção 4.5), onde para cada fator de controle foi selecionado seu valor mínimo e máximo. Os valores mínimos e máximos dos fatores de ruídos (temperatura externa, umidade externa e radiação direta) foram obtidos da Tabela 9 e o número de pessoas de acordo com a ocupação máxima permitida para veículo objeto de estudo.

As combinações dos fatores de controle que deram origem a matriz interna são apresentadas na Tabela 14, que representa as combinações em 2 níveis (mínimo e máximo) dos fatores de controle selecionados. Onde cada coluna representa um fator de controle mencionado na Tabela 13.

Tabela 13 - Fatores de controle e de ruído utilizados na matriz cruzada

| | Legenda | Característica | Mínimo | Máximo |
|----------|----------------|---|---------------|---------------|
| Controle | C1 | Espessura das superfícies opacas (m) | 0,00046 | 0,00054 |
| | C2 | Espessura do vidro (m) | 0,0036 | 0,0043 |
| | C3 | Espessura da espuma (m) | 0,045 | 0,054 |
| | C4 | Condutividade do vidro ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$) | 1,305 | 1,52 |
| | C5 | Condutividade das superfícies opacas ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$) | 13,33 | 16,01 |
| | C6 | Condutividade da espuma ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$) | 0,055 | 0,065 |
| | C7 | Largura do para-brisa (m) | 1,25 | 1,44 |
| | C8 | Refletividade do vidro [-] | 0,045 | 0,054 |
| | C9 | Transmissividade do vidro [-] | 0,56 | 0,64 |
| | C10 | Refletividade das superfícies opacas [-] | 0,69 | 0,79 |
| Ruído | N1 | Temperatura externa ($^\circ C$) | 28 | 42 |
| | N2 | Umidade externa (%) | 40 | 90 |
| | N3 | Radiação direta ($W \cdot m^2$) | 776 | 980 |
| | N4 | Número de pessoas [-] | 1 | 5 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 14 - Combinação dos fatores de controle selecionados

| Contagem | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 |
|----------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|
| 1 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,79 |
| 2 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,69 |
| 3 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,69 |
| 4 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,79 |
| 5 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,69 |
| 6 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,79 |
| 7 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,79 |
| 8 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,69 |
| 9 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,79 |
| 10 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,69 |
| 11 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,69 |
| 12 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,79 |
| 13 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,69 |
| 14 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,79 |
| 15 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,79 |
| 16 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,69 |
| 17 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,69 |
| 18 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,79 |
| 19 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,79 |
| 20 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,69 |
| 21 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,79 |
| 22 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,69 |
| 23 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,69 |
| 24 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,79 |
| 25 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,69 |
| 26 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,79 |
| 27 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,79 |
| 28 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,69 |
| 29 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,79 |
| 30 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,69 |
| 31 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,69 |
| 32 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,79 |
| 33 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,79 |
| 34 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,69 |
| 35 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,69 |
| 36 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,79 |
| 37 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,69 |
| 38 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,79 |
| 39 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,79 |
| 40 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,69 |
| 41 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,79 |
| 42 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,69 |
| 43 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,69 |
| 44 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,79 |
| 45 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,69 |
| 46 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,79 |
| 47 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,79 |
| 48 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,69 |
| 49 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,69 |
| 50 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,79 |
| 51 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,79 |
| 52 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,69 |
| 53 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,79 |
| 54 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,69 |
| 55 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,69 |
| 56 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,79 |
| 57 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,69 |
| 58 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,79 |
| 59 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,79 |
| 60 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,69 |
| 61 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,79 |
| 62 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,69 |
| 63 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,69 |
| 64 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,79 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

As combinações dos fatores de ruído que representam a matriz externa elaborada para análise da interação entre os fatores de controle e de ruído são apresentadas na Tabela 15, onde cada coluna representa os fatores de ruído mencionados na Tabela 13.

Tabela 15 - Combinação dos fatores de ruído selecionados

| Combinação | N1 (°C) | N2 (%) | N3 (W·m²) | N4 [-] |
|-------------------|----------------|---------------|-----------------------------|---------------|
| 1 | 28 | 0,4 | 776 | 1 |
| 2 | 28 | 0,4 | 776 | 5 |
| 3 | 42 | 0,4 | 776 | 1 |
| 4 | 42 | 0,4 | 776 | 5 |
| 5 | 28 | 0,9 | 776 | 1 |
| 6 | 28 | 0,9 | 776 | 5 |
| 7 | 42 | 0,9 | 776 | 1 |
| 8 | 42 | 0,9 | 776 | 5 |
| 9 | 28 | 0,4 | 980 | 1 |
| 10 | 28 | 0,4 | 980 | 5 |
| 11 | 42 | 0,4 | 980 | 1 |
| 12 | 42 | 0,4 | 980 | 5 |
| 13 | 28 | 0,9 | 980 | 1 |
| 14 | 28 | 0,9 | 980 | 5 |
| 15 | 42 | 0,9 | 980 | 1 |
| 16 | 42 | 0,9 | 980 | 5 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Todas as 1024 combinações da matriz cruzada foram geradas a partir da aplicação das 16 combinações dos fatores de ruído em cada uma das 64 linhas de combinação dos fatores de controle. Todo este conjunto de dados foi inserido no modelo matemático para simular os resultados das cargas térmicas total, sensível e latente da matriz cruzada.

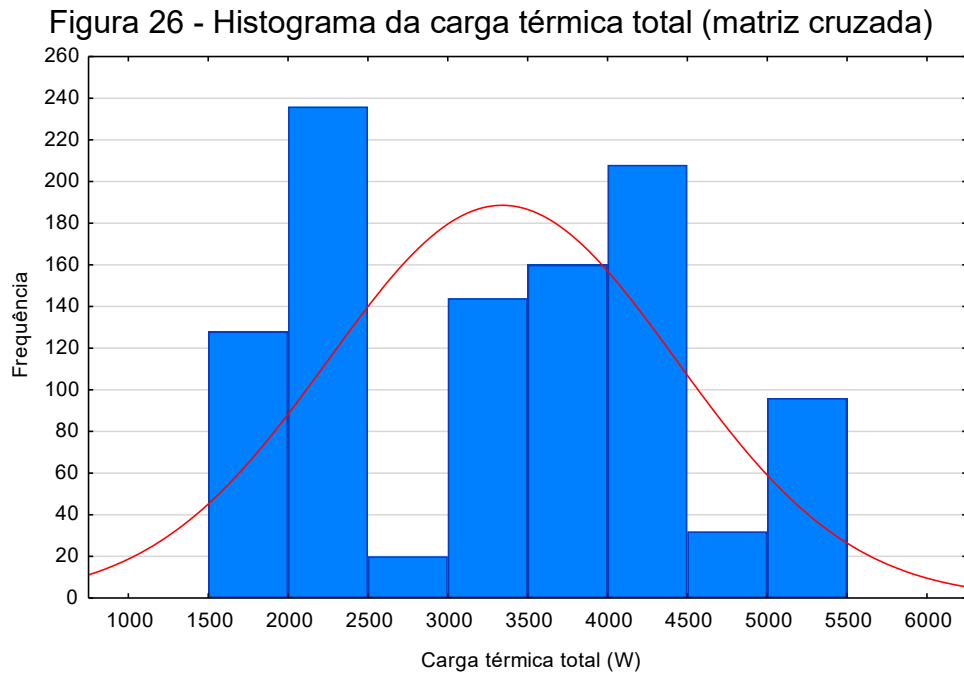
A faixa entre 4000 W e 4500 W apresenta o mesmo resultado onde a temperatura externa (N1) se apresenta em seu nível máximo (42°C), a umidade relativa externa (N2) se apresenta em seu nível mínimo (40%), ou de forma contrária, temperatura externa em seu nível mínimo (28°C) e umidade relativa externa em seu nível (90%), porém considerando 5 pessoas (N4) no interior da cabine. Desta forma observa-se que a combinação do número de ocupantes presentes no veículo e a

temperatura ambiente, podem praticamente dobrar o valor da carga térmica do sistema de condicionamento de ar.

Figura 26 apresenta o histograma da carga térmica total após a aplicação das combinações no modelo matemático onde o eixo x representa os valores da carga térmica total e o eixo y representa a frequência que os resultados foram obtidos. No gráfico observa-se que o histograma não apresenta o comportamento de uma distribuição normal, aparentemente um comportamento bimodal em vista das duas faixas de valores que aparecem com maior frequência, as faixas de 2000 W a 2500 W e de 4000 W a 4500W.

A faixa entre 2000 W e 2500 W apresenta o resultado das combinações considerando 1 pessoa (N4) no interior da cabine, onde quando a temperatura externa (N1) se encontra em seu nível mínimo (28°C) a umidade relativa externa (N2) em seu nível máximo (90%), sendo também observado que quando a temperatura externa se encontra em seu nível máximo (42°C), a umidade relativa externa se apresentou em seu nível mínimo (40%).

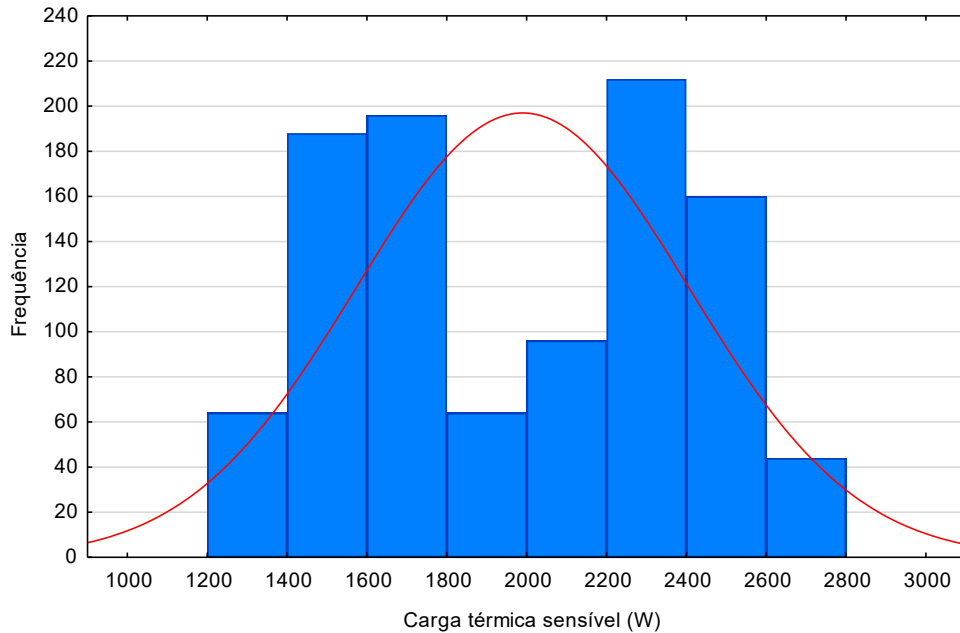
A faixa entre 4000 W e 4500 W apresenta o mesmo resultado onde a temperatura externa (N1) se apresenta em seu nível máximo (42°C), a umidade relativa externa (N2) se apresenta em seu nível mínimo (40%), ou de forma contrária, temperatura externa em seu nível mínimo (28°C) e umidade relativa externa em seu nível (90%), porém considerando 5 pessoas (N4) no interior da cabine. Desta forma observa-se que a combinação do número de ocupantes presentes no veículo e a temperatura ambiente, podem praticamente dobrar o valor da carga térmica do sistema de condicionamento de ar.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Figura 27 mostra os resultados da carga térmica sensível, onde novamente observa-se que os resultados não apresentam uma distribuição normal, aparentemente com uma característica bimodal, onde a maior concentração dos resultados encontrados está nas faixas de 1600 W a 1800W e de 2200 W a 2400 W respectivamente, resultantes da interação entre as variações dos fatores de controle e de ruído selecionados. Onde a primeira faixa (entre 1600 W e 1800 W) apresentam combinações considerando 1 pessoa (N4) no interior da cabine, e a segunda faixa (entre 2200 W e 2400 W) apresentam os resultados para carga térmica sensível considerando 5 pessoas (N4) no interior da cabine.

Figura 27 - Histograma da carga térmica sensível (matriz cruzada)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

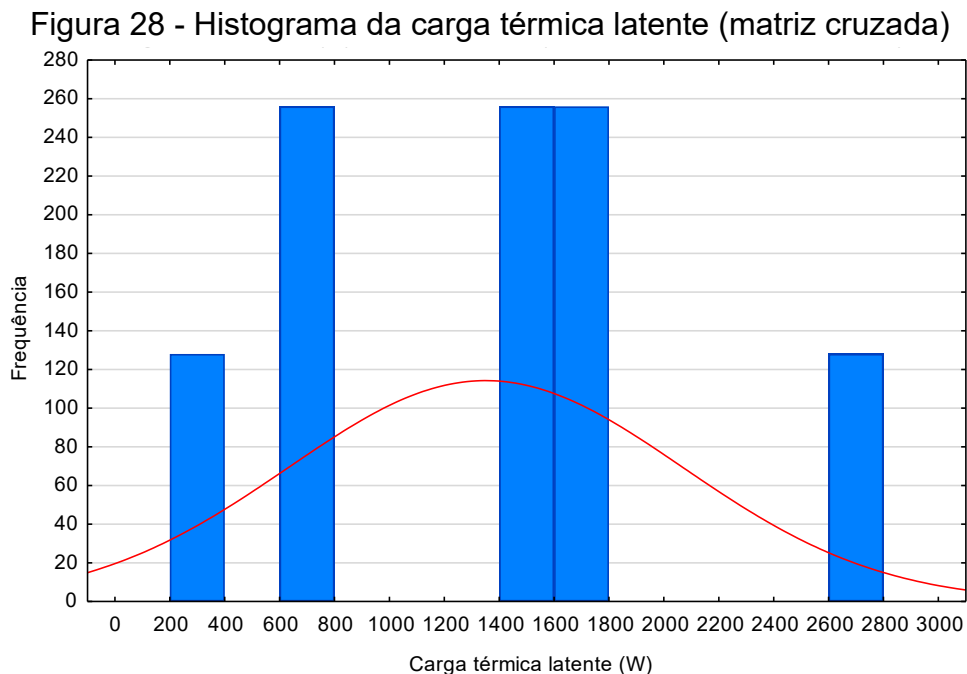
A Figura 28 apresenta os resultados da carga térmica latente para a interação entre os fatores de controle e de ruído. Neste caso, o gráfico apresenta 5 faixas de valores com os resultados da carga térmica latente para as 1024 combinações da matriz cruzada onde se destacam com o maior número de repetições (256 vezes) os resultados nas faixas de 600 W a 800 W, 1400 W a 1600 W e 1600 W a 1800 W respectivamente.

A faixa entre 600 W e 800 W apresenta os resultados em dois momentos, o primeiro resultante das combinações considerando 1 pessoa (N4) no interior do veículo e temperatura externa (N1) de 42°C com resultado para carga térmica latente de 650 W. E o segundo momento, onde a carga térmica latente obteve o valor de 670 W, resultante das combinações com 1 pessoa (N4) no interior do veículo e umidade externa (N2) em 90%.

A segunda faixa que apresentou o maior número de repetições com resultados para carga térmica latente entre 1400 W e 1600 W, assim como a faixa anterior apresenta dois resultados principais para a carga térmica latente, o primeiro (1420 W) resultante das combinações contendo 5 pessoas (N4) no interior da cabine, temperatura externa (N1) e umidade relativa externa (N2) em seus níveis mínimos, 28°C e 40% respectivamente. E o segundo com a carga térmica latente de 1510 W, referente as combinações com 1 pessoa (N4) no interior do veículo, e tanto

temperatura externa (N1) quanto umidade externa (N2) em seus níveis máximos, 42°C e 90% respectivamente.

A terceira faixa apresenta os valores obtidos para carga térmica entre 1600 W e 1800 W, onde em um primeiro momento são representadas pelas combinações com 5 pessoas (N4) no interior da cabine, temperatura externa (N1) de 42°C e umidade externa (N2) de 40% onde foi obtido o resultado de 1770 W para carga térmica latente. E em um segundo momento a carga térmica latente obteve o resultado de 1790 W que foram obtidas por meio das combinações considerando 5 pessoas (N4) no interior do veículo, temperatura externa (N1) de 28°C e umidade externa (N2) de 90%.



Para avaliar a robustez e identificar quais das 64 combinações de fatores de controle investigadas apresentaram menor resultado para carga térmica (total, sensível e latente) e menor variabilidade, foi elaborada uma matriz que correlaciona cada uma das combinações aos resultados da média das cargas térmicas (total, sensível e latente), desvio padrão, o coeficiente de variação e o logaritmo do desvio padrão, onde seus respectivos valores estão disponíveis na seção Apêndice.

Durante a análise da carga térmica total, observou-se que a combinação 16 apresentou menor resultado para média da carga térmica total (3204,31 W), enquanto as combinações 6 e 21 apresentaram menor resultado para o desvio padrão ($\pm 1113,26$ W). Observa-se também que as combinações com menor desvio padrão

apresentam em comum os seguintes fatores de controle em seu nível mínimo: espessura do vidro (C2), condutividade do vidro (C4), largura do para-brisa (C7) e transmissividade do vidro (C9). Também são identificadas em comum, porém em seu nível máximo, as seguintes características: espessura da espuma (C3), condutividade da espuma (C6) e refletividade das superfícies opacas (C10). Os valores obtidos pelas simulações das 64 combinações de fatores de controle, sob o efeito dos fatores de ruído para carga térmica total, estão disponíveis no APÊNDICE A.

A Figura 29 apresenta o gráfico de dispersão dos 1024 resultados de carga térmica total, obtidos pela combinação dos fatores de controle e fatores de ruído. No eixo y estão representadas as 64 combinações dos fatores de controle descritas na Tabela 14. Para cada uma dessas 64 combinações de fatores de controle, foram obtidos 16 valores de carga térmica, sendo cada uma delas correspondente às combinações de fatores de ruído apresentados na Tabela 15. Esta representação gráfica é empregada, pois um maior agrupamento de pontos em uma mesma linha horizontal indica menor variabilidade de uma dada combinação dos fatores de controle em relação aos fatores de ruído. No entanto, observa-se que todas as 64 combinações apresentam variabilidade muito semelhante, indicando a baixa robustez deste conceito a em relação aos fatores de ruído.

Na Figura 29 observa-se o agrupamento dos dados em três faixas distintas de carga térmica, sendo que a primeira faixa corresponde aos valores encontrados para carga térmica total entre 1500 W e 2600 W, a segunda faixa entre 3000 W e 4400 W e a terceira faixa entre 4800 W e 5400 W. Os motivos para esta separação dos resultados serão discutidos a seguir.

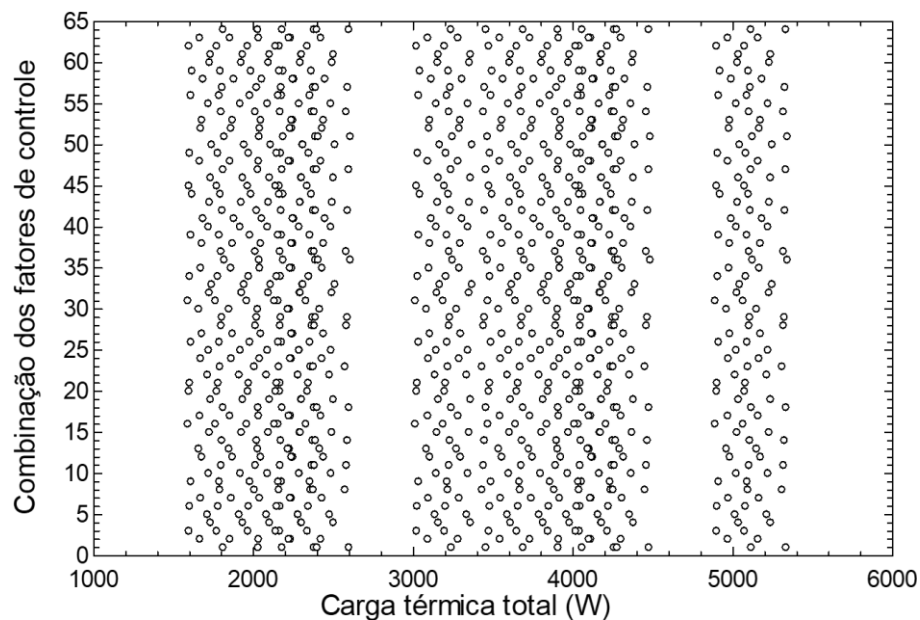
Na primeira faixa (1500 W a 2600 W), apesar de todas as combinações realizadas, todas consideravam apenas 1 pessoa (N4) no interior da cabine e também não continha nenhuma combinação em que a temperatura externa (N1) e umidade externa (N2) estavam em seus níveis máximos.

Na segunda faixa (3000 W a 4400 W), nota-se um espaçamento entre a primeira e segunda faixas. Esse espaçamento ocorreu devido ao aumento da temperatura externa (42°C) e umidade externa (90%) o que resultou no aumento carga térmica latente de 600 W para 1400 W e como consequência ocorreu a mudança de faixa da carga térmica para 3000 W. A partir deste valor, são apresentadas as combinações contendo 1 pessoa no interior da cabine e temperatura

externa e umidade externa em seus níveis máximos até a carga térmica total atingir a faixa de 3400 W onde passa a ser considerado 5 pessoas no interior da cabine.

Após a carga térmica total chegar ao valor de 3400 W, os resultados são gerados pelas combinações de fatores de controle e de ruído contendo 5 pessoas no interior da cabine, de forma que novamente após a temperatura externa e umidade externa alcançarem seus níveis máximos, 42°C e 90% respectivamente, que resulta no aumento da carga térmica latente em consequência no aumento da carga térmica total para a terceira faixa a partir de 4800 W.

Figura 29 – Resultados da Carga térmica total e combinação de fatores de controle e de ruídos



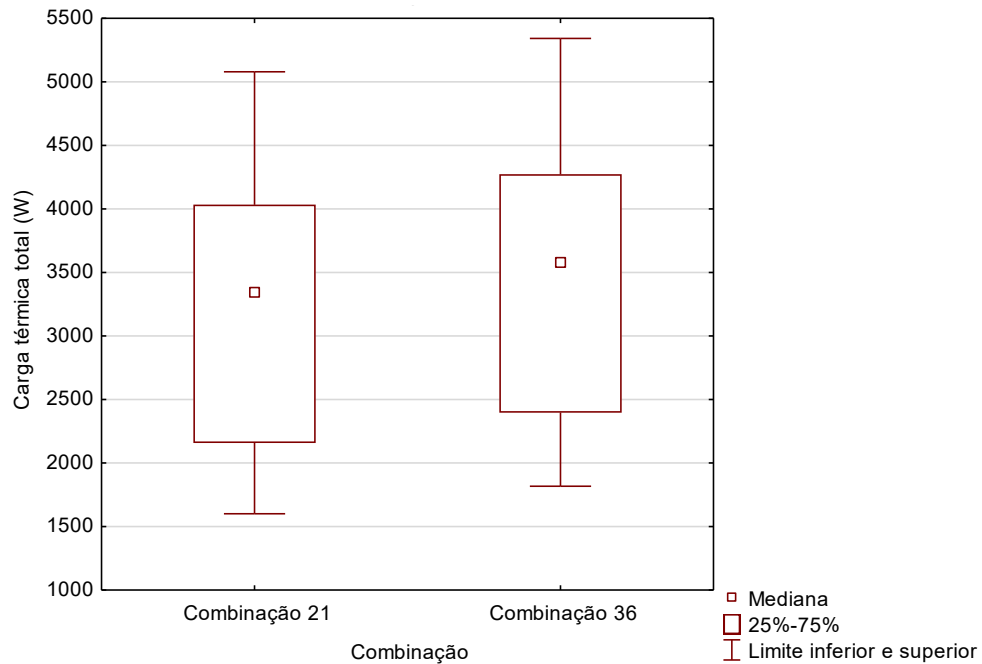
Média da carga térmica total: 3227 W

Desvio padrão: 1083 W

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Com base nos dados utilizados na Figura 29, que estão disponíveis no APÊNDICE A, elaborou-se a Figura 30 que compara apenas as combinações que apresentaram o maior e o menor desvio padrão na carga térmica, equivalentes a $\pm 1116,38$ W e $\pm 1113,26$ W, respectivamente. Esta pequena diferença entre os casos extremos comprova a baixa robustez deste conceito referência em relação aos fatores de ruído considerados.

Figura 30 - Combinações com menor e maior desvio padrão para carga térmica total



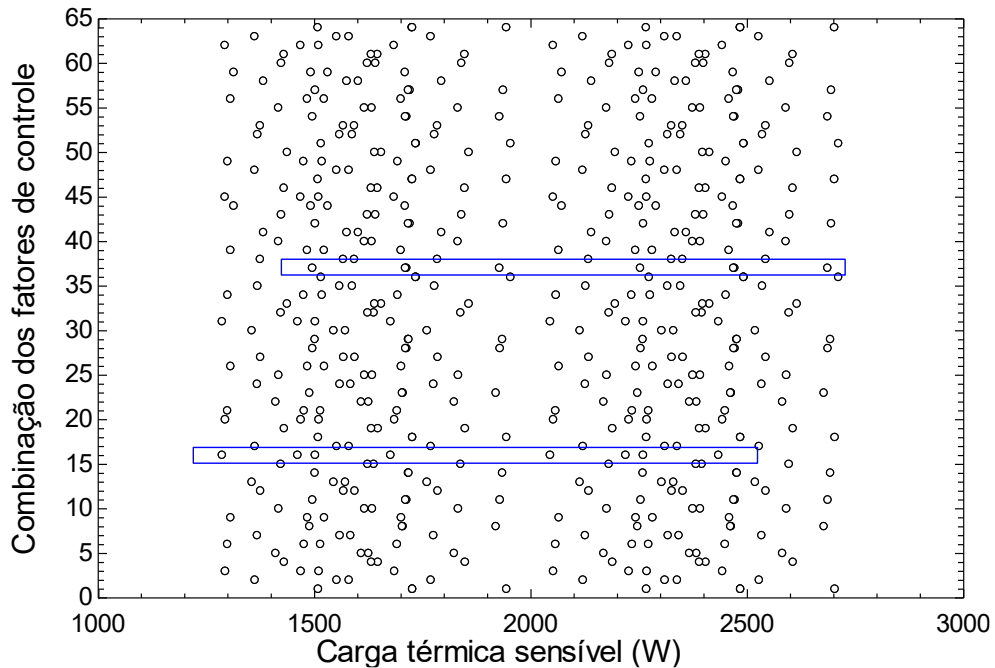
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A análise de robustez da matriz elaborada para carga térmica sensível mostra que as combinações 16 e 31 apresentaram o menor resultado tanto para média da carga térmica sensível (1860,88 W) quanto para o desvio padrão ($\pm 417,03$ W). Observa-se que essas duas combinações possuem em seu nível mínimo, os seguintes fatores de controle: condutividade da espuma (C6), largura do para-brisa (C7), transmissividade do vidro (C9) e refletividade das superfícies opacas (C10). Estas combinações também apresentam no nível máximo em comum as seguintes características: espessura do vidro (C2), espessura da espuma (C3) e condutividade do vidro (C4). Os valores obtidos pelas simulações das 64 combinações de fatores de controle, sob o efeito dos fatores de ruído para carga térmica sensível, estão disponíveis no APÊNDICE B.

Os resultados para carga térmica sensível para cada combinação de fatores de controle e fatores de ruído estão representados na Figura 31. Onde o eixo y do gráfico representa cada uma das combinações geradas pelos fatores de controle e o eixo x representa a carga térmica sensível. Para cada combinação de fatores há 16 representações gráficas indicadas por círculos, que representam as 16 combinações de fatores de ruído utilizadas nas simulações. Apesar da grande quantidade de dados, neste caso observa-se que algumas combinações apresentaram menor variabilidade que outras. Por exemplo, a combinação 16, destacada na Figura 31, apresenta uma

menor variabilidade, indicando sua robustez em relação aos fatores de ruído. Já a combinação 36 apresenta uma alta variabilidade em relação as demais, indicando sua baixa robustez.

Figura 31 - Resultados da Carga térmica sensível e combinações de fatores de controle e ruído

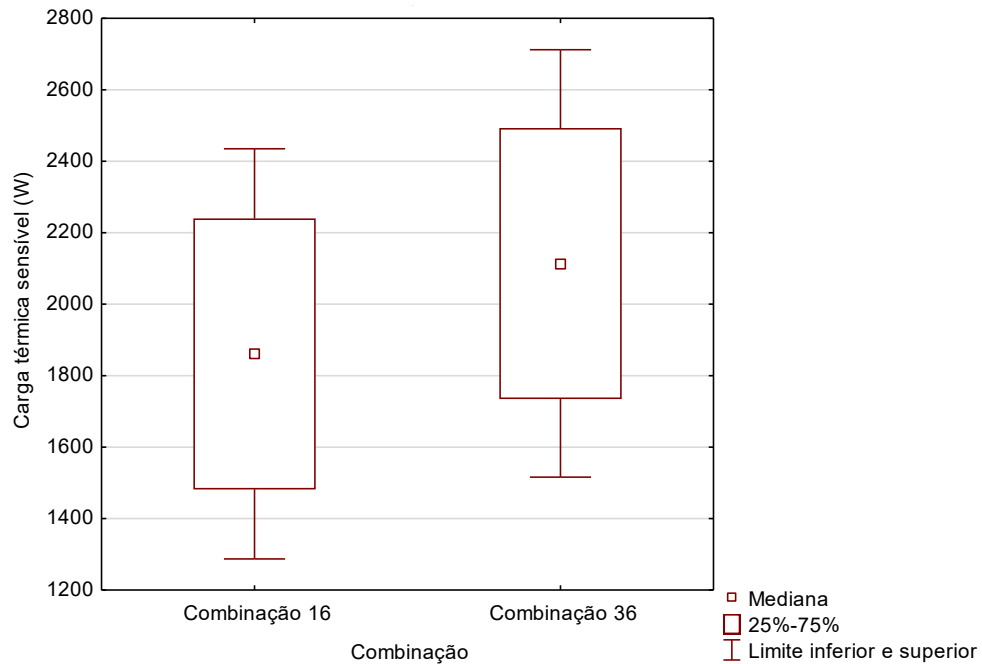


Média da carga térmica sensível: 1984 W
Desvio padrão: 415 W

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Com base no dados utilizados na Figura 31, que estão disponíveis no APÊNDICE B, elaborou-se a Figura 32 que compara as combinações que apresentaram o maior e o menor desvio padrão na carga térmica sensível, equivalentes a $\pm 423,01$ W e $\pm 417,03$ W, respectivamente. Portanto, para a parcela de carga térmica sensível, observa-se que a combinação 16 apresentou maior robustez em relação aos fatores de ruído considerados.

Figura 32 - Combinações com menor variação da carga térmica sensível

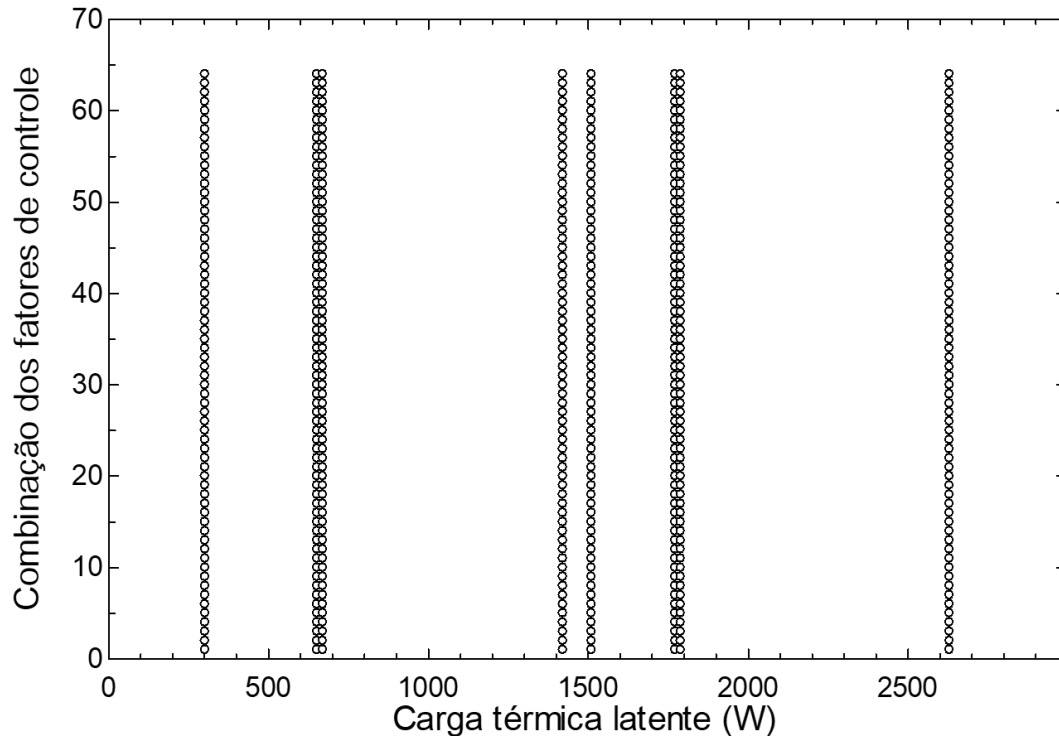


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Para a avaliação da carga térmica latente, foi elaborada uma matriz que correlaciona as combinações dos fatores de controle influenciados pelos fatores de ruídos com os resultados das médias da carga térmica latente, além do seu desvio padrão, o coeficiente de variação e o logaritmo do desvio padrão. Sendo observado que mesmo com as variações de fatores de controle e de ruído realizadas foram mantidas a média, o desvio padrão, o coeficiente de variação e o logaritmo do desvio padrão.

A Figura 33 apresenta os resultados da carga térmica latente pela combinação de fatores de controle e de ruído. Por meio dela pode ser observada a dispersão ocorrida ao longo das combinações de fatores de controle e de ruído, além disso, nota-se que não houve variações para carga térmica latente apesar das diferentes combinações, seus resultados para média da carga térmica latente foram de 1343,53 W e desvio padrão de $\pm 738,36$ W. Este resultado é justificado pelo fator dos fatores de controle considerados não exercerem efeito sobre a carga térmica latente, uma vez que ela é considerada pelo modelo por meio dos fatores de ruído número de passageiros e umidade do ar ambiente. Os valores obtidos pelas simulações das 64 combinações de fatores de controle, sob o efeito dos fatores de ruído para carga térmica sensível, estão disponíveis no APÊNDICE C.

Figura 33 - Resultados da carga térmica latente e combinação de fatores de controle e de ruído



Média da carga térmica latente: 1343 W

Desvio padrão: 715 W

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

De acordo com as análises realizadas entre as combinações de fatores de controle e de ruído e os resultados encontrados para a carga térmica total, sensível e latente nota-se que as combinações que representam menor desvio padrão para a carga térmica sensível foram as combinações 16 e 31, respectivamente. Para a carga térmica latente, todas as combinações realizadas geraram o mesmo resultado, com variação entre 300 W até 2600 W. Esta elevada amplitude na carga térmica latente, quando comparada a menor amplitude na carga térmica sensível, justifica a semelhança observada entre todos os resultados da carga térmica total, apresentados na Figura 29.

Com base nesta análise, também foram identificados os níveis dos fatores de controle que apresentaram a menor carga térmica sensível e a menor variação na carga térmica sensível, cujos valores estão apresentados na Tabela 16. Nela estão representados por (-1) os fatores com seu nível mínimo e por (+1) os fatores seu nível máximo, os valores para cada fator de controle estão apresentados entre parênteses, sendo os mesmos mostrados na Tabela 13. Nota-se que a condutividade da espuma,

a largura do para-brisa, a transmissividade do vidro e refletividade das superfícies opacas estavam em seus níveis mínimos, e a espessura do vidro, espessura da espuma e condutividade do vidro em seu nível máximo em todas as combinações.

Tabela 16 - Combinações com menor média e desvio padrão para carga térmica sensível

| Característica | Combinação | |
|---|-----------------|-----------------|
| | 16 | 31 |
| Espessura das superfícies opacas (m) | +1 (0,00054) | -1 (0,00046) |
| Espessura do vidro (m) | +1 (0,0043) | +1 (0,0043) |
| Espessura da espuma (m) | +1 (0,054) | +1 (0,054) |
| Condutividade do vidro (W/m·°C) | +1 (1,52) | +1 (1,52) |
| Condutividade das superfícies opacas (W/m·°C) | -1 (13,33) | +1 (16,01) |
| Condutividade da espuma (W/m·°C) | -1 (0,055) | -1 (0,055) |
| Largura do para-brisa (m) | -1 (1,25) | -1 (1,25) |
| Refletividade do vidro [-] | -1 (0,045) | +1 (0,054) |
| Transmissividade do vidro [-] | -1 (0,56) | -1 (0,56) |
| Refletividade das superfícies opacas [-] | -1 (0,69) | -1 (0,69) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Tabela 17 mostra um resumo dos resultados da análise de interação entre os fatores de controle e fatores de ruído para a carga térmica onde são apresentados os valores mínimo, máximo, média e desvio padrão encontrados para as cargas térmicas (total, sensível e latente).

Tabela 17 - Resultados da análise de interação entre os fatores de controle e fatores de ruído para a carga térmica

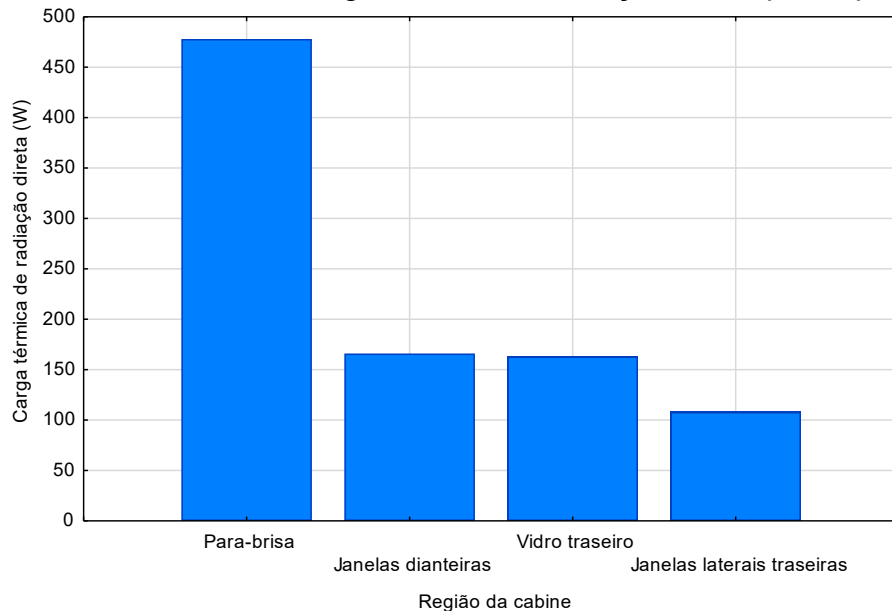
| Carga térmica (W) | Mínimo | Máximo | Média | Desvio padrão |
|-------------------|--------|--------|-------|---------------|
| Total | 1589 | 5342 | 3327 | ± 1083 |
| Sensível | 1287 | 2712 | 1984 | ± 415 |
| Latente | 301,4 | 2630 | 1343 | ± 715 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.7 PROPOSTAS DE NOVOS CONCEITOS

Com base nos resultados obtidos a partir das análises apresentadas na seção 4.6, foram propostos novos conceitos para o projeto do veículo. Estes novos conceitos têm como objetivo reduzir a carga térmica do veículo, bem como a sua variabilidade em relação aos fatores de ruído presentes durante a utilização do veículo. Ao longo das análises realizadas e do que foi apresentado na Figura 12, nota-se que a maior parcela de carga térmica total no interior do veículo é proveniente da radiação solar direta. Em vista disso, foram identificadas quais as regiões do veículo que contribuem com esta parcela. A Figura 34 apresenta tais parcelas, onde se observa que maior parte da carga térmica de radiação é proveniente do para-brisa do veículo, sendo esta responsável por aproximadamente 17% da carga térmica total. Dessa forma foram elaboradas propostas que visam a redução da carga térmica total pela minimização da parcela referente a radiação direta que incide sobre o para-brisa, sem considerar os custos de aplicação e implementação de cada proposta.

Figura 34 – Parcelas da carga térmica de radiação direta por superfície



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.7.1 Alteração da transmissividade e refletividade dos vidros (Conceito 1)

De acordo com a análise de sensibilidade apresentada na Tabela 11 um dos fatores que contribui com o aumento da carga térmica total no interior da cabine é a

transmissividade dos vidros do veículo, conforme apresentado na seção 4.4. Assim, o Conceito 1 consiste na redução de 30% da transmissividade e aumento do mesmo valor (30%) da refletividade dos vidros do veículo (para-brisa, janelas laterais (dianteiras e traseiras) e vidro traseiro), como apresentado na Figura 35. Este novo conceito será então submetido aos mesmos fatores de ruído, para avaliar seu desempenho em relação à carga térmica total. A Tabela 18 apresenta as alterações no nível máximo e mínimo que foram realizadas na transmissividade e refletividade do vidro utilizado no para-brisa.

Figura 35 - Superfícies de vidro do veículo



Fonte: Adaptado do manual do proprietário (2024)

Tabela 18 - Alteração da transmissividade e refletividade do vidro

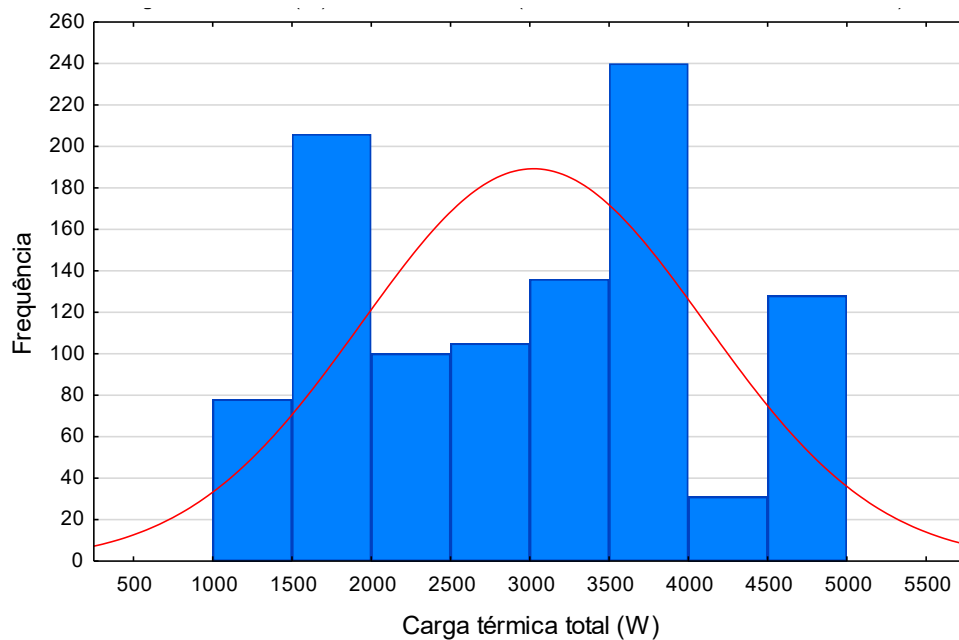
| Característica | Nível | De | Para |
|-----------------------|--------------|-----------|-------------|
| Transmissividade | Mínimo | 0,56 | 0,39 |
| | Máximo | 0,045 | 0,058 |
| Refletividade | Mínimo | 0,045 | 0,058 |
| | Máximo | 0,054 | 0,07 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

As modificações apresentadas na Tabela 18 foram aplicadas na matriz interna (Tabela 14) que representa as combinações dos fatores de controle que foi utilizada no cálculo da carga térmica resultante da interação entre os fatores de controle e de ruído. A Figura 36 apresenta os resultados da carga térmica total após os ajustes realizados na matriz cruzada, onde as faixas com maior frequência de repetição se encontram entre 3500 W e 4000 W, e entre 1500 W e 2000 W.

A faixa de valores para carga térmica total que varia de 1500 W a 2000 W representam as simulações com 1 pessoa no interior do veículo e temperatura externa, umidade externa e radiação direta em seu nível máximo de forma alternada. A faixa entre 3500 W e 4000 W representa a mesma variação alternada em seus níveis máximos para temperatura e umidade externa, e radiação direta, porém com 5 pessoas no interior do veículo.

Figura 36 - Carga térmica total após alteração da transmissividade e refletividade do vidro



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Para análise dos resultados do Conceito 1, foi elaborada uma matriz que correlaciona os fatores de controle com a média da carga térmica total, o desvio padrão, o coeficiente de variação e o logaritmo do desvio padrão das simulações após alteradas a refletividade (C8) e transmissividade (C9) dos vidros, onde a análise mostra que a combinação 54 é a que apresenta o menor desvio padrão encontrado ($\pm 1104,64$ W) onde a transmissividade se encontra em seu nível máximo (0,45) e refletividade em seu nível mínimo (0,058). Também foram analisadas quais as combinações apresentam a menor média para carga térmica total sendo essas as combinações 16 e 31 com média de 2916,50 W (9% menor em relação ao valor mínimo encontrado para carga térmica total do Conceito referência). As duas combinações apresentam em comum em seu nível mínimo: a largura do para-brisa (C7), a condutividade da espuma (C6), a transmissividade do vidro (C9) e refletividade

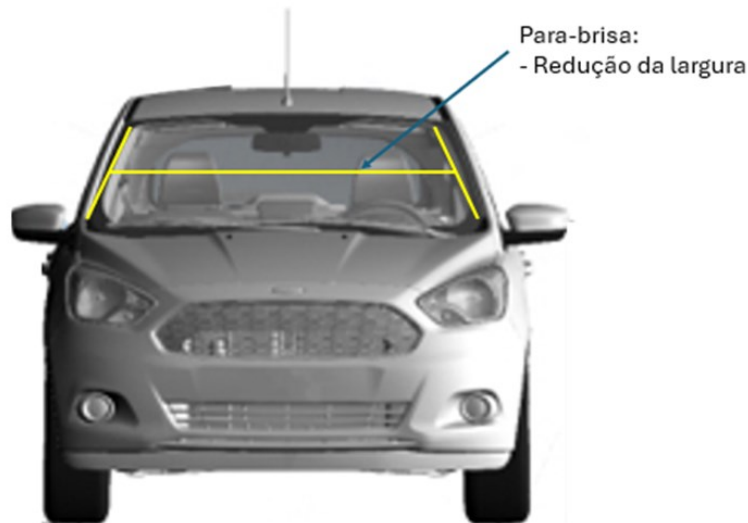
das superfícies opacas (C10). Os mesmos valores em seus níveis máximo foram observados para a espessura do vidro (C2), espessura da espuma (C3) e condutividade do vidro (C4). Os resultados obtidos para carga térmica total do Conceito 1 estão disponíveis no APÊNDICE D.

Em comparação ao histograma de referência para a carga térmica total apresentado na Figura 26, verifica-se que após a alteração da transmissividade e da refletividade mencionados ocorreu uma redução nos limites superior e inferior, e ainda uma redução na média da carga térmica total de 3327 W para 3009 W, ou seja, uma redução de 9,56% em relação a referência para a carga térmica total, para o desvio padrão, a redução foi de ± 1083 W para ± 1079 W (0,36% em relação a referência).

4.7.2 Redimensionamento do para-brisa (Conceito 2)

De acordo com o observado na Figura 34, a maior parcela de radiação que contribui com o aumento da carga térmica no interior da cabine de um veículo está relacionada com o para-brisa do veículo. Dessa forma, o Conceito 2 se dá pela redução de 25% da largura do para-brisa apresentado na Figura 37. A Tabela 19 apresenta os valores atualizados para largura do para-brisa, onde os valores de mínimo e máximo (origem para redução) são os mesmos apresentados na seção 4.6 (nível mínimo de 1,25 m e nível máximo 1,44 m).

Figura 37 - Redução da largura do para-brisa



Fonte: Adaptado do manual do proprietário (2024)

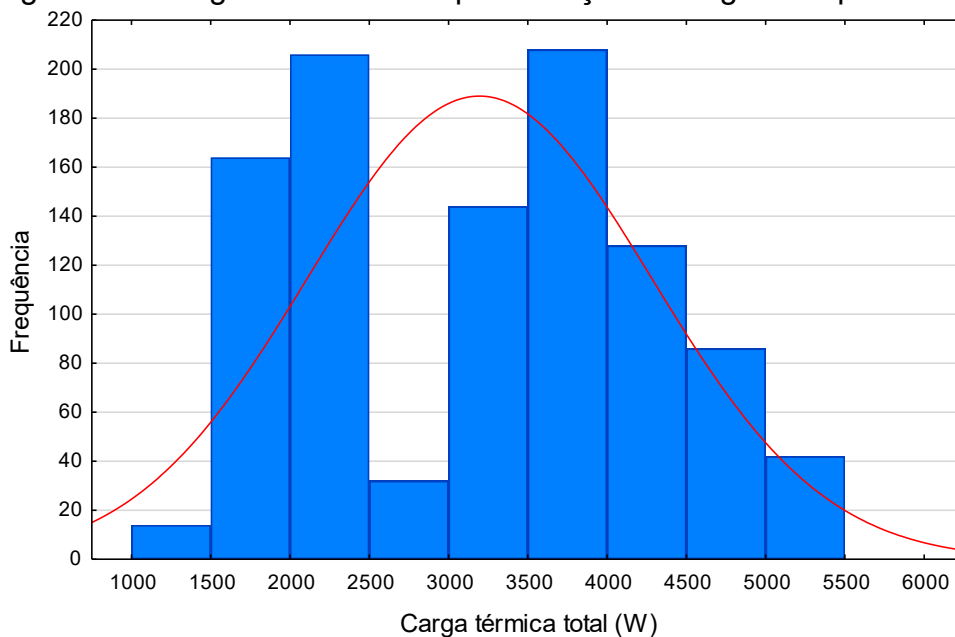
Tabela 19 - Redução da largura do para-brisa do veículo

| Característica | Nível | De | Para |
|---------------------------|--------|------|------|
| Largura do para-brisa (m) | Mínimo | 1,25 | 0,98 |
| | Máximo | 1,44 | 1,08 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os novos valores para os níveis mínimo e máximo foram aplicados na matriz interna (Tabela 14) e posteriormente na matriz cruzada de referência. A Figura 38 apresenta o histograma desta nova condição, onde foi observada a redução da média da carga térmica total em 3,43% (de 3327 W para 3213 W) e no desvio padrão de 0,27% (de ± 1083 W para ± 1080 W). As duas faixas de valores para carga térmica total nesta condição são representadas pelas combinações contendo 1 pessoa no interior da cabine (2000 W a 2500 W) e 5 pessoas no interior da cabine (3500 W a 4000 W).

Figura 38 - Carga térmica total após redução da largura do para-brisa



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A análise dos resultados do Conceito 2 mostrou que as combinações 16 e 31 apresentaram a menor média para a carga térmica total (3079,25 W) e tiveram em comum em nível mínimo a condutividade da espuma (C6), a largura do para-brisa (C7), a transmissividade do vidro (C9) e refletividade das superfícies opacas (C10). Também tiveram em comum, porém em seu nível máximo: a espessura do vidro (C2), a espessura da espuma (C3) e a condutividade do vidro (C4). A combinação 64

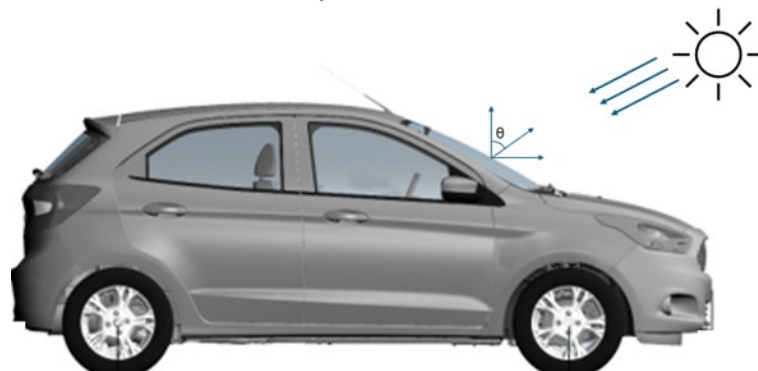
apresentou o menor desvio padrão ($\pm 1031,73$ W). Os valores para carga média, desvio padrão, coeficiente de variação e logaritmo do desvio padrão após a redução da largura do para-brisa (C7) são apresentados no APÊNDICE E.

Em relação a matriz cruzada utilizada como referência, a diminuir em 25% da largura do para-brisa proporcionou uma redução na média da carga térmica total de 3327 W para 3213 W, ou seja, a proposta foi 3,43% menor em relação a referência para a carga térmica total. Para o desvio padrão, a redução foi de ± 1083 W para ± 1080 W (0,27% em relação a referência).

4.7.3 Alteração do ângulo do para-brisa (Conceito 3)

Este conceito consiste em alterar o posicionamento do para-brisa do automóvel, por meio da mudança da sua inclinação, de forma que ocorra uma redução da incidência de radiação solar para o interior do veículo. Neste conceito considera-se que o para-brisa está posicionado no veículo tal que o ângulo entre a superfície normal e a posição sol (θ) visto na equação 9 e apresentado na Figura 39 seja alterado de 45° para 80° e os demais dados, os mesmos utilizados na referência apresentados na Tabela 14 e Tabela 15. Não foram consideradas neste conceito, alterações na área do teto e de outras superfícies do veículo, sendo utilizados os mesmos da seção 4.6 deste trabalho. Também não foi considerada alteração na aerodinâmica do veículo.

Figura 39 - Ângulo entre a superfície normal e a posição do sol (θ) em relação ao para-brisa

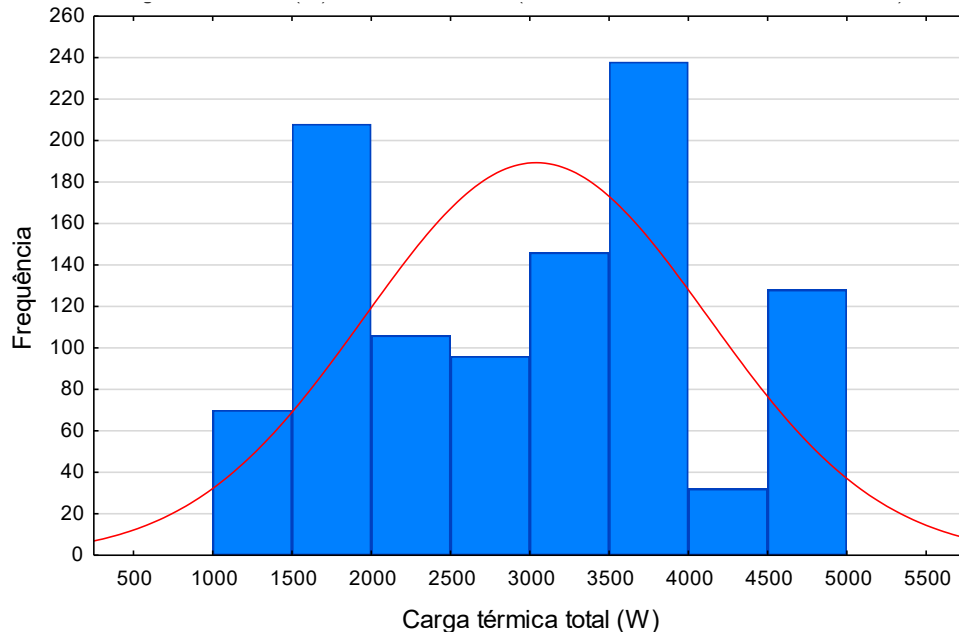


Fonte: Adaptado do manual do proprietário (2024)

A Figura 40 apresenta o histograma da carga térmica total das simulações realizadas no EES após implementação desta condição, onde observa-se uma

redução nos limites inferior e superior em relação a referência de 1500 W e 5500 W (Figura 26) para 1000 W e 5000 W, respectivamente.

Figura 40 - Carga térmica total após alteração no ângulo entre a superfície normal e posição do sol



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os resultados obtidos para o Conceito 3 mostra que as combinações que apresentaram o menor resultado para a média da carga térmica total foram as combinações 16 e 31, ambos com 2943,25 W, e a combinação com o menor desvio padrão foi a 64, com $\pm 1033,13$ W. Em comparação com a referência, esta configuração apresentou uma redução de 9,05%. Os valores para média da carga térmica total, desvio padrão, coeficiente de variação e logaritmo do desvio padrão do Conceito 3, estão disponíveis no APÊNDICE F.

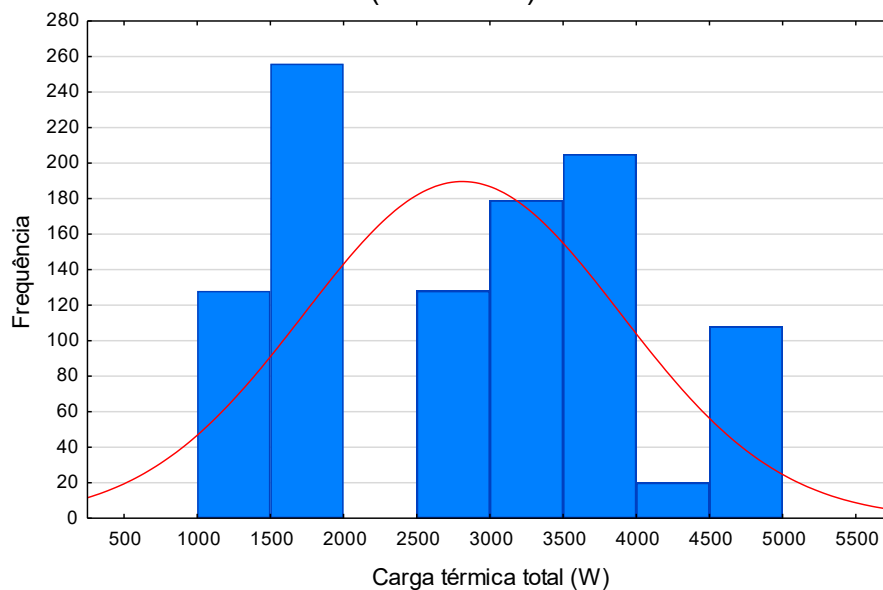
4.7.4 Redução da transmissividade e refletividade dos vidros alteração do ângulo do para-brisa (Conceito 4)

Este conceito tem como proposta minimizar a carga térmica total e sua variabilidade por meio da aplicação simultânea dos conceitos 1 e 3 no modelo matemático, ou seja, foram reduzidas a transmissividade e refletividade dos vidros, bem como alterado o ângulo do para-brisa. A Figura 41 apresenta o histograma da

carga térmica total, onde percebe-se que esta combinação proporciona uma redução dos valores mínimo e máximo, 1000 W e 5000 W, respectivamente, em comparação com a referência apresentado na Figura 26 (1500 W e 5500 W). Também foi observada uma redução na média deste novo conceito, cujo resultado foi 2799 W, o equivalente a 15,87% de redução em relação a referência.

A matriz de resultados elaborada para o Conceito 4 mostra que o menor resultado para a média da carga térmica total foi de 2734,63 W encontrado nas combinações 16 e 31. As duas combinações tiveram como resultado para o desvio padrão de $\pm 1101,63$ W. Neste conceito, a combinação 54 apresentou o menor resultado para o desvio padrão ($\pm 1105,83$ W) enquanto sua média para carga térmica total foi de 2786,13 W. Em relação às características que as combinações 16 e 31 possuem em comum, foram observadas que a espessura do vidro, espessura da espuma, condutividade do vidro e condutividade da espuma estavam em seus respectivos níveis máximos, enquanto que a largura do para-brisa, transmissividade do vidro e refletividade das superfícies opacas estavam em seus níveis mínimos. Os resultados obtidos com as simulações realizadas para o Conceito 4, estão disponíveis no APÊNDICE G.

Figura 41 - Carga térmica total após aplicação simultânea dos conceitos 1 e 3 (conceito 4)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

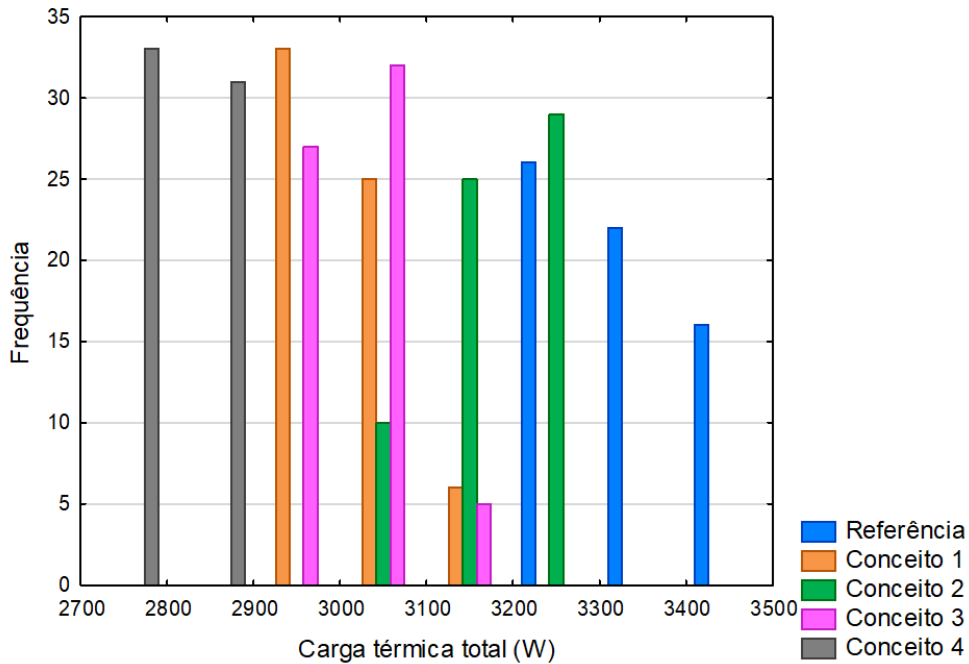
4.7.5 Comparação dos resultados dos conceitos propostos com o conceito referência

Nesta seção será realizada a comparação dos resultados do conceito referência, apresentados na seção 4.6, com os novos conceitos propostos (seção 4.7), com a finalidade de se identificar qual apresentou menor resultado para carga térmica total e para o desvio padrão.

A Figura 42 apresenta a comparação entre as médias da carga térmica total das combinações, considerando o Conceito referência e os outros 4 Conceitos propostos neste trabalho. O eixo x representa a carga térmica total e o eixo y a frequência em que os resultados foram observados.

Por meio da Figura 42 nota-se que o conceito que apresentou os menores resultados para a carga térmica total foi o Conceito 4 (2750 W a 2950W), em segundo o Conceito 1 (2900 W a 3050 W), seguido do Conceito 3 (2950 W a 3100 W). Em seguida, o Conceito 2, com uma faixa de variação de 3050 W a 3300 W, por fim a referência que apresentou na comparação os maiores valores para a carga térmica total (3200 W a 3500 W). Além disso, o Conceito 4 apresenta menor quantidade de barras em relação ao Conceito referência e aos demais, o que mostra que o Conceito 4 apresenta uma distribuição mais concentrada em menos intervalos, ou seja, seus resultados são mais consistentes e uniformes.

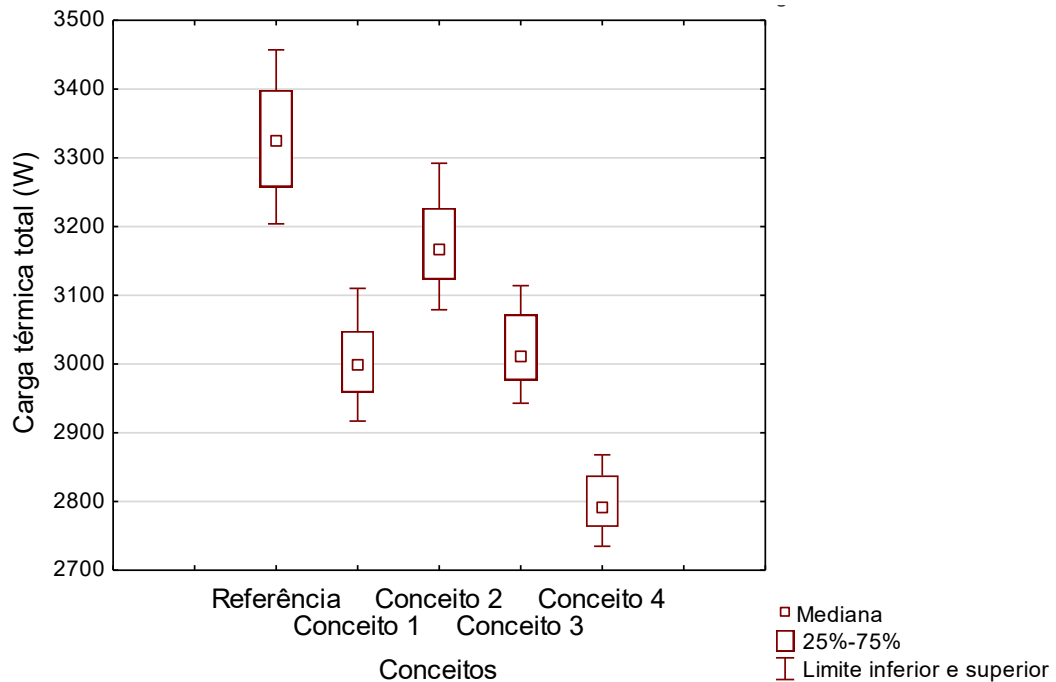
Figura 42 - Comparação entre as médias da carga térmica total da referência com as propostas



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Figura 43 compara os resultados em forma de diagrama de caixas onde o eixo x representa os diferentes conceitos analisados e o eixo y os valores para a carga térmica total. O diagrama de caixas permite comparar o valor médio e a dispersão de cada conceito, que confirma um melhor desempenho do Conceito 4 em relação aos demais. Adicionalmente, verifica-se que o conceito referência tem baixa robustez, pois apresenta maior distância entre seu limite superior e inferior. Observa-se também que as medianas do Conceito referência e do Conceito 1 se encontram próximas da região central da caixa, o que significa que a maior concentração dos seus resultados se encontra próximos as suas respectivas médias. Por sua vez, as medianas dos Conceitos 2, 3 e 4 apresentam suas medianas abaixo da região central da caixa, indicando que uma maior concentração dos seus resultados, abaixo das suas respectivas médias. Também pela análise da mediana, pode-se dizer que o Conceito referência e o Conceito 1 aparentam ter um comportamento simétrico enquanto os conceitos 2, 3 e 4 aparentam um comportamento assimétrico positivo (mediana mais próxima do primeiro quartil).

Figura 43 - Diagrama de caixas da referência e conceitos propostos



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Em complemento as representações gráficas, a Tabela 20 apresenta os resultados globais para a média da carga térmica total, o desvio padrão, a redução da carga térmica total de cada conceito proposto e o índice de capacidade de processo (Cpk) apresentado na equação 38. Observa-se que o Conceito 4 obteve o menor resultado para a média da carga térmica total (2799 W), assim houve uma redução de 528 W, o que representa 15,87% em relação ao Conceito referência. Em segundo, o Conceito 1 que apresentou uma redução de 318 W (9,56%) seguido do Conceito 3 com média de 3026 W e redução de 301 W (9,05%) em relação a referência e por último o Conceito 2 com redução de 114 W (3,43%). E ainda, pela análise de capacidade de processo, em que um resultado igual ou superior a 1,33 é frequentemente aceito como um ponto de referência significativo, observa-se que a referência apresentou o menor resultado (0,62) o que pode implicar em uma necessidade de melhoria de processo, entretanto todos os conceitos propostos apresentaram resultado superior a 1,33 onde se destaca o Conceito 4 com Cpk de 5,14 que representa não só uma eficiência operacional mas também baixo risco de defeitos e insatisfação do cliente.

Tabela 20 - Comparação da carga térmica total (W) entre a referência e os conceitos propostos

| Condição | Média da carga térmica total (W) | Desvio padrão (σ) | Redução da carga térmica total (W) | Redução da carga térmica total (%) | Cpk |
|-----------------|---|--|---|---|------------|
| Referência | 3327 | ± 1083 | - | - | 0,62 |
| Conceito 1 | 3009 | ± 1079 | 318 | 9,56% | 2,43 |
| Conceito 2 | 3213 | ± 1080 | 114 | 3,43% | 1,39 |
| Conceito 3 | 3026 | ± 1078 | 301 | 9,05% | 2,61 |
| Conceito 4 | 2799 | ± 1077 | 528 | 15,87% | 5,14 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.8 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

A análise de variância (ANOVA) foi utilizada para confirmar se as diferenças identificadas na seção 4.8 possuem significância estatística. A Tabela 21 mostra o resultado da análise de variância de um único fator, sendo este a carga térmica total considerando um nível de confiança de 95%.

Tabela 21 - Análise de variância da carga térmica total

| Fonte da variação | Grau de liberdade | Soma dos quadrados | Quadrado médio | F | valor-P |
|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|----------|----------------|
| Conceito | 4 | 10094409,731 | 2523602,433 | 635,71 | 0,00 |
| Erro | 315 | 1250467,481 | 3969,738 | | |
| Total | 319 | 11344877,212 | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os resultados da Tabela 21 mostram que o valor-p apresentou resultado menor que 0,05, confirmando que há uma diferença significativa entre a média dos grupos analisados.

Para se identificar quais conceitos possuem média significativamente diferente entre si, foi realizado teste de Tukey onde foram comparadas as médias da carga térmica total da referência e dos conceitos propostos. A Tabela 22 mostra os resultados do teste de Tukey, onde são apresentadas as médias para a carga térmica total da referência e de cada conceito proposto, e a coluna resultados, onde cada letra representa quais dos conceitos possuem diferença para carga térmica total entre si,

sendo que letras iguais mostram que os conceitos não apresentam diferenças significativas estatisticamente e letras diferentes representam que existem diferenças significativas entre os conceitos. Pode ser observado que, com exceção dos Conceitos 1 e 3, todos os demais apresentaram diferenças significativas. Tal resultado comprova o melhor desempenho do Conceito 4 em relação aos demais.

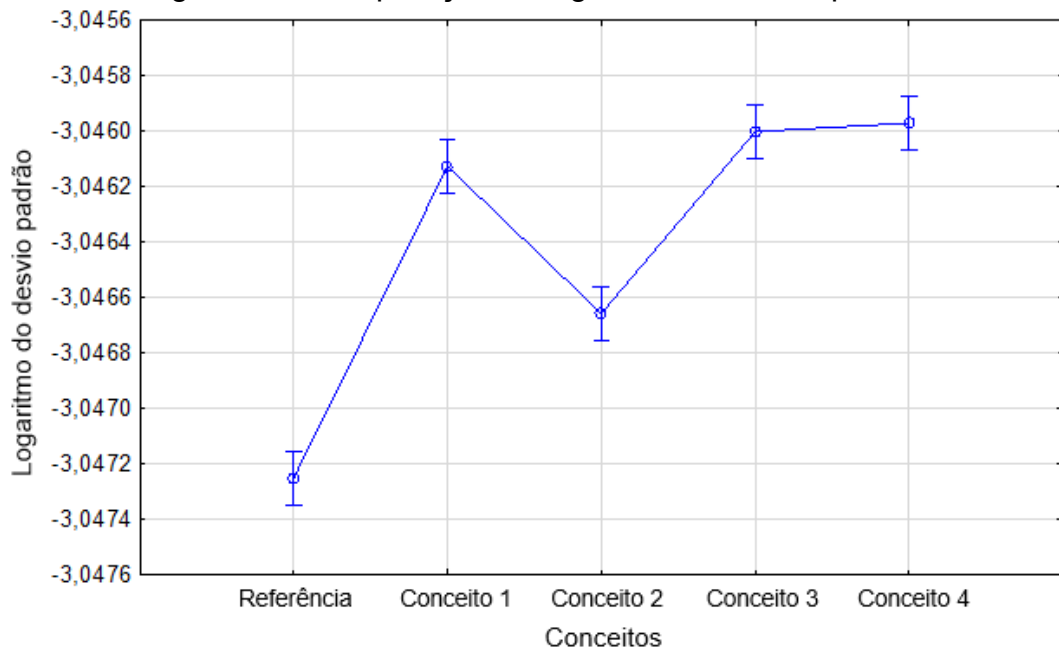
Tabela 22 – Resultados do Teste de Tukey

| Conceito | Média da carga térmica total (W) | Resultados | | | |
|-----------------|---|-------------------|---|---|---|
| Conceito 4 | 2799 | | b | | |
| Conceito 1 | 3009 | a | | | |
| Conceito 3 | 3026 | a | | | |
| Conceito 2 | 3213 | | | c | |
| Referência | 3327 | | | | d |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Para se avaliar qual dos conceitos pode ser considerado mais robusto Figura 44 apresenta o logaritmo do desvio padrão da do conceito referência com os demais conceitos elaborados, onde o eixo y apresentam os resultados encontrados para o logaritmo do desvio padrão de forma global para cada conceito e o eixo x apresenta os conceitos que foram elaborados. O logaritmo do desvio padrão é geralmente utilizado para avaliar a robustez de um projeto de forma que quanto maior seu resultado melhor a robustez do projeto, assim observa-se na que o Conceito 4 é o que apresenta o maior resultado, quando comparado aos demais. Por tal motivo, o Conceito 4 foi considerado o mais robusto, ou seja, aquele que apresenta menor variabilidade nos seus resultados para a carga térmica total quando submetido ao efeito dos fatores de ruído considerados neste estudo.

Figura 44 - Comparação do logaritmo do desvio padrão



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Portanto, a partir das propostas elaboradas e das análises apresentadas para cada conceito, nota-se que o Conceito 4 foi aquele que apresentou menor carga térmica total e variabilidade. Adicionalmente, observou-se que o método de Projeto Robusto se mostrou eficaz para identificar e comparar diferenças conceitos para o projeto da cabine do veículo, levando-se em consideração a combinação de fatores de controle e ruído.

5 CONCLUSÕES

Apesar da ampla gama de estudos que utilizam modelo matemático para se otimizar o sistema de condicionamento de ar veicular, nota-se uma carência de estudos para carga térmica, além de não ter sido encontrado nenhum estudo que utilizou o método Projeto Robusto para encontrar alternativas que melhorem o sistema de condicionamento de ar automotivo, essa foi a principal motivação do presente trabalho que propôs analisar a carga térmica de resfriamento de condicionamento de ar automotivo utilizando método Projeto Robusto.

Na análise preliminar, foram identificados os fatores que influenciam na carga térmica total no interior da cabine, onde foram apresentadas as cargas térmicas sensível e latente com suas respectivas parcelas. Em seguida, foi implementado o modelo matemático para estimar a carga térmica de um veículo, onde o modelo foi validado por meio de comparação dos resultados com outros estudos similares e com compressores de catálogo.

Foi observado que as parcelas mais significativas foram as cargas térmicas de radiação direta, de renovação latente, de radiação difusa e metabólica latente que representaram juntas 74% em relação ao total. Além disso, foi verificado que o fator de calor sensível (FCS), obtido pela razão entre a carga térmica sensível e a carga térmica total é equivalente à 0,73, ou seja, a carga térmica sensível possui maior representatividade em relação a carga térmica latente no interior da cabine veicular.

Dentre os fatores de ruído, apresentados no diagrama P, foram considerados na análise de robustez: a temperatura ambiente, umidade relativa ambiente, quantidade de passageiros e a radiação solar. Dos fatores de controle, foram selecionados para a análise: a espessura das superfícies opacas, do vidro e da espuma, a condutividade térmica (das superfícies opacas, do vidro e da espuma, a largura do para-brisa (m), a refletividade e transmissividade do vidro, e a refletividade das superfícies opacas.

Para avaliar a interação entre os fatores de controle e os fatores de ruído, foi elaborada uma matriz de condições, onde por meio dos seus resultados foi possível identificar quais as combinações apresentavam a menor média para a carga térmica e o menor desvio padrão, bem como quais fatores de controle e de ruído em comum entre as combinações, onde foram observados que a condutividade da espuma, a

largura do para-brisa e a transmissividade do vidro estavam em seus níveis mínimos, e a espessura da espuma em seu nível máximo.

A partir dessa análise, foram apresentadas alternativas para ser reduzir a média da carga térmica no interior do veículo e sua variabilidade. Foram consideradas como alternativas: a alteração da transmissividade e refletividade dos vidros (1), o redimensionamento do Para-brisa (2) e a alteração do ângulo do para-brisa (3). Após a simulação e comparação dos resultados, foram comparadas a média da carga térmica total, a dispersão, a mediana e concentração dos resultados, onde foi observado para o Conceito 3 uma redução de até 9,05% na média da carga térmica total, o equivalente a 301 W em comparação com a referência.

Por fim, para se mostrar o quanto é possível se obter de redução na carga térmica total, o Conceito 1 (alteração da transmissividade e refletividade dos vidros) foi combinado simultaneamente com o Conceito 3 (alteração do ângulo do para-brisa) e aplicados no modelo matemático, este novo Conceito (4) apresentou como resultado uma redução ainda maior do que cada proposta aplicada separadamente, com uma redução de 528 W (15,87%) em relação ao conceito referência.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização deste trabalho, foram observados alguns tópicos que podem dar continuidade aos estudos referentes a análise da carga térmica de resfriamento no interior da cabine de um veículo:

- Validação experimental do modelo matemático;
- Aprimoramento do modelo de superfícies translúcidas para considerar as diferentes faixas de frequência do espectro da luz solar;
- Construção de protótipos considerando as soluções propostas;
- Análise dos custos dos materiais e do processo de manufatura.
- Adaptação do modelo matemático para carga térmica de aquecimento

Em resumo, o método Projeto Robusto é uma ferramenta utilizada na indústria para se aprimorar produtos e processos, reduzir custos e minimizar a variabilidade na produção. A utilização do método mostrou-se eficiente para identificar oportunidades de redução da carga térmica e da sua variabilidade. Dessa forma, ao empregar o

método foi alcançado o objetivo geral deste trabalho que consistia em analisar os efeitos de parâmetros geométricos, construtivos e operacionais sobre a carga térmica do sistema de condicionamento de ar automotivo.

REFERÊNCIAS

ALAHMER, A. *et al.* Effect of relative humidity and temperature control on in-cabin thermal comfort state: Thermodynamic and psychometric analyses. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], v. 31, n. 14–15, p. 2636–2644, 2011.

ALKAN, Alpaslan; HOSOZ, Murat. Comparative performance of an automotive air conditioning system using fixed and variable capacity compressors. **International Journal of Refrigeration**, [s. l.], v. 33, n. 3, p. 487–495, 2010.

ANFAVEA. Anuário da Indústria Automobilística Brasileira. **Revista dos Transportes Públicos - ANTP**, [s. l.], p. 1–148, 2024.

ARICI, Öner; YANG, Song-lin. Computer Model for Automobile Climate Control System Simulation and Application. **International Journal of Thermodynamics**, [s. l.], v. 2, n. 2, 1999.

ARNÉR, Magnus. **Statistical Robust Design: An Industrial Perspective**. [S. l.: s. n.], 2014. v. 9781118625033

ASHRAE. **1998 ASHRAE Handbook Refrigeration**. [S. l.]: ASHRAE, 1988.

ASHRAE. **2021 ASHRAE® Handbook - Fundamentals (SI Edition)**. [S. l.]: ASHRAE, 2021.

BARNABY, Chartes S.; SPITLER, Jeffrey D.; XIAO, Dongyi. The residential heat balance method for heating and cooling load calculations. *In:* , 2005. **ASHRAE Transactions**. [S. l.: s. n.], 2005.

BRUSEY, James *et al.* Reinforcement learning-based thermal comfort control for vehicle cabins. **Mechatronics**, [s. l.], v. 50, 2018.

BURDEN, Richard L.; FAIRES, J. Douglas. **Análise Numérica**. 8. ed. São Paulo: CENGAGE Learning, 2008.

CELANI DE SOUZA, Helder Jose *et al.* Molecular assay optimized by Taguchi experimental design method for venous thromboembolism investigation. **Molecular and Cellular Probes**, [s. l.], v. 25, n. 5–6, p. 231–237, 2011.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 4. ed. [S. l.: s. n.], 2012.

DA SILVA, Diogo Lôndero *et al.* EVALUATION OF THE THERMAL PERFORMANCE OF FORCED CONDENSERS FOR BUS AIR-CONDITIONING SYSTEMS. *In:* , 2019. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2019.

DA SILVA, Diogo Lôndero *et al.* Experimental Thermal Performance Evaluation of an Automotive Air Conditioning System. *In:* , 2024. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2024.

DA SILVA, Helder Antônio; DA SILVA, Messias Borges. Aplicação de um projeto de experimentos (DOE) na soldagem de tubos de zircaloy-4. **REVISTA PRODUÇÃO E ENGENHARIA**, [s. l.], v. 1, n. 1, 2016.

DA SILVA, Diogo Lôndero; MEDEIROS DE CORDOVA, Guilherme. Mathematical Model of an Automotive Air-Conditioning System under Steady-State Conditions. *In:* , 2018. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2018.

DA SILVA, Diogo Lôndero; MELO, Claudio. A PERSPECTIVE ON R&D&I ACTIVITIES IN THE BRAZILIAN MOBILE AIR CONDITIONING MARKET. *In:* , 2019. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2019.

DANCA, P. *et al.* Evaluation of the thermal comfort for its occupants inside a vehicle during summer. *In:* , 2019. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. [S. l.: s. n.], 2019.

DIBEK, Burak; AĞRA, Özden. Modelling of human thermal comfort in armored military vehicles: An experimental study of removing heat with spot cooling. **Thermal Science and Engineering Progress**, [s. l.], v. 49, 2024.

DOS SANTOS SOARES PINTO, Igor; DA SILVA, Diogo Lôndero. Transient thermal load evaluation of refrigerated cargo compartments. *In:* , 2020. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2020.

FAYAZBAKSH, Mohammad Ali; BAHRAMI, Majid. Comprehensive modeling of vehicle air conditioning loads using heat balance method. *In:* , 2013. **SAE Technical Papers**. [S. l.: s. n.], 2013.

GAJANAYAKE, Surath; BANDARA, Saman; SUGATHAPALA, Thusitha. A novel approach to estimate power demand of auxiliary engine loads of light duty vehicles. **Frontiers in Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 8, 2023.

HE, Liange *et al.* Intelligent control of electric vehicle air conditioning system based on deep reinforcement learning. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], v. 245, 2024.

HOSOZ, M.; DIREK, M. Performance evaluation of an integrated automotive air conditioning and heat pump system. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 47, n. 5, p. 545–559, 2006.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Cars and Vans**. [S. l.], 2023.

ION-GUȚĂ, Dragoș Daniel *et al.* Advanced Thermal Manikin for Thermal Comfort Assessment in Vehicles and Buildings. **Applied Sciences (Switzerland)**, [s. l.], v. 12, n. 4, 2022.

JABARDO, J.; MAMANI, W.; IANELLA, M. R. Modeling experimental evaluation of an automotive air conditioning system with a variable capacity compressor. **International Journal of Refrigeration**, [s. l.], v. 25, n. 8, 2002.

JIA, Changlin *et al.* Comprehensive assessment on groundwater quality, pollution characteristics, and ecological health risks under seasonal thaws: Spatial insights with Monte Carlo simulations. **Groundwater for Sustainable Development**, [s. l.], v. 22, 2023.

JOHNSON, Valerie H. Fuel used for vehicle air conditioning: A state-by-state thermal comfort-based approach. *In:* , 2002. **SAE Technical Papers**. [S. l.: s. n.], 2002.

KHAYYAM, Hamid; KOUZANI, Abbas Z.; HU, Eric J. Reducing energy consumption of vehicle air conditioning system by an energy management system. *In:* , 2009. **2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium**. [S. l.]: IEEE, 2009. p. 752–757.

LANDAU, David P.; BINDER, Kurt. **A Guide to Monte Carlo Simulations in Statistical Physics**. [S. l.: s. n.], 2014.

LEE, Hoseong *et al.* Performance investigation on solid desiccant assisted mobile air conditioning system. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], v. 103, p. 1370–1380, 2016.

LI, Yi-Xi *et al.* The estimated schedule and mitigation potential for hydrofluorocarbons phase-down in China. **Advances in Climate Change Research**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 174–180, 2019.

MARCOS, David *et al.* The development and validation of a thermal model for the cabin of a vehicle. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], v. 66, n. 1–2, 2014.

MENG, Zhaofeng *et al.* Performance of low GWP R1234yf/R134a mixture as a replacement for R134a in automotive air conditioning systems. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [s. l.], v. 116, p. 362–370, 2018.

NASTASE, Ilinca *et al.* **A regard on the thermal comfort theories from the standpoint of Electric Vehicle design — Review and perspectives**. [S. l.: s. n.], 2022.

PALIAGA, Gwelen *et al.* ANSI/ASHRAE Addendum b to ANSI/ASHRAE Standard 55-2013 Thermal environmental conditions for human occupancy. **ASHRAE Standard**, [s. l.], v. 8400, n. STANDARD 55, 2014.

PRABAKARAN, Rajendran *et al.* Experimental performance of a mobile air conditioning unit with small thermal energy storage for idle stop/start vehicles. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [s. l.], v. 147, n. 8, 2022.

ROBERT BOSCH GMBH. **Automotive Handbook**. 11. ed. [S. l.]: Wiley, 2022.

ROSA, J. L. *et al.* Electrodeposition of copper on titanium wires: Taguchi experimental design approach. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 209, n. 3, 2009.

SHAH, Ramesh K. Automotive air-conditioning systems-historical developments, the state of technology, and future trends. **Heat Transfer Engineering**, [s. l.], v. 30, n. 9, 2009.

SOOD, Divyanshu *et al.* Numerical analysis of an automobile cabin thermal management using passive phase change material. **Thermal Science and Engineering Progress**, [s. l.], v. 25, 2021.

TAGUCHI, Genichi; CHOWDHURY, Subir; WU, Yui. **Taguchi's Quality Engineering Handbook**. [S. l.: s. n.], 2007.

TORREGROSA-JAIME, Bárbara *et al.* Transient thermal model of a vehicle's cabin validated under variable ambient conditions. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], v. 75, p. 45–53, 2015.

VASHISHT, Sagar; RAKSHIT, Dibakar. **Recent advances and sustainable solutions in automobile air conditioning systems**. [S. l.: s. n.], 2021.

WANG, Shujun *et al.* Vapor quality and performance of an automotive air conditioning system. **Experimental Thermal and Fluid Science**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 59–66, 2005.

WANG, Hanqing; XIANG, Liping. Numerical simulation of air conditioning vehicle using computational fluid dynamics. *In:* , 2009. **Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC**. [S. l.: s. n.], 2009.

YANG, Huaiyu *et al.* Life cycle climate performance evaluation of electric vehicle thermal management system under Chinese climate and driving condition. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], v. 228, 2023.

YIN, Xiang *et al.* Coupled effect of operation conditions and refrigerant charge on the performance of a transcritical CO₂ automotive air conditioning system. **International Journal of Refrigeration**, [s. l.], v. 123, p. 72–80, 2021.

APÊNDICE A - Carga térmica total para diferentes combinações de fatores de controle e ruído

Tabela 23 - Carga térmica total para diferentes combinações de fatores de controle e ruído

| Combinação | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 | Média | Desvio padrão (σ) | Coefficiente de variação | Log σ |
|------------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|---------|----------------------------|--------------------------|--------------|
| 1 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3449,31 | 1116,13 | 0,32 | -3,0477 |
| 2 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 3288,75 | 1114,82 | 0,34 | -3,0472 |
| 3 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 3212,38 | 1113,84 | 0,35 | -3,0468 |
| 4 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3362,13 | 1115,03 | 0,33 | -3,0473 |
| 5 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3339,75 | 1114,65 | 0,33 | -3,0471 |
| 6 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 3217,75 | 1113,26 | 0,35 | -3,0466 |
| 7 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 3294,25 | 1114,41 | 0,34 | -3,0470 |
| 8 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3427,06 | 1115,66 | 0,33 | -3,0475 |
| 9 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 3226,69 | 1113,87 | 0,35 | -3,0468 |
| 10 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3347,75 | 1114,74 | 0,33 | -3,0472 |
| 11 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3435,19 | 1115,67 | 0,32 | -3,0475 |
| 12 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 3303,25 | 1114,95 | 0,34 | -3,0473 |
| 13 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 3280,88 | 1114,35 | 0,34 | -3,0470 |
| 14 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3440,63 | 1115,74 | 0,32 | -3,0476 |
| 15 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3353,25 | 1114,79 | 0,33 | -3,0472 |
| 16 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 3204,31 | 1113,34 | 0,35 | -3,0466 |
| 17 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 3288,75 | 1114,82 | 0,34 | -3,0472 |
| 18 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3449,31 | 1116,13 | 0,32 | -3,0477 |
| 19 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3362,13 | 1115,03 | 0,33 | -3,0473 |
| 20 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 3212,38 | 1113,84 | 0,35 | -3,0468 |
| 21 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 3217,75 | 1113,26 | 0,35 | -3,0466 |
| 22 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3339,75 | 1114,65 | 0,33 | -3,0471 |
| 23 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3427,06 | 1115,66 | 0,33 | -3,0475 |
| 24 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 3294,25 | 1114,41 | 0,34 | -3,0470 |
| 25 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3347,75 | 1114,74 | 0,33 | -3,0472 |
| 26 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 3226,69 | 1113,87 | 0,35 | -3,0468 |
| 27 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 3303,25 | 1114,95 | 0,34 | -3,0473 |
| 28 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3435,19 | 1115,67 | 0,32 | -3,0475 |
| 29 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3440,63 | 1115,74 | 0,32 | -3,0476 |
| 30 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 3280,88 | 1114,35 | 0,34 | -3,0470 |
| 31 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 3204,38 | 1113,27 | 0,35 | -3,0466 |
| 32 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3353,25 | 1114,79 | 0,33 | -3,0472 |
| 33 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3369,75 | 1114,97 | 0,33 | -3,0473 |
| 34 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 3219,31 | 1113,78 | 0,35 | -3,0468 |
| 35 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 3295,88 | 1114,98 | 0,34 | -3,0473 |
| 36 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3457,19 | 1116,38 | 0,32 | -3,0478 |
| 37 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3434,63 | 1115,90 | 0,32 | -3,0476 |
| 38 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 3302,44 | 1114,69 | 0,34 | -3,0472 |
| 39 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 3226,00 | 1114,02 | 0,35 | -3,0469 |
| 40 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3347,13 | 1114,87 | 0,33 | -3,0472 |
| 41 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 3311,00 | 1115,12 | 0,34 | -3,0473 |
| 42 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3442,13 | 1116,21 | 0,32 | -3,0477 |
| 43 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3354,75 | 1115,28 | 0,33 | -3,0474 |
| 44 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 3234,25 | 1114,33 | 0,34 | -3,0470 |
| 45 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 3211,63 | 1113,74 | 0,35 | -3,0468 |
| 46 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3361,44 | 1115,06 | 0,33 | -3,0473 |
| 47 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3448,81 | 1115,88 | 0,32 | -3,0476 |
| 48 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 3288,31 | 1114,39 | 0,34 | -3,0470 |
| 49 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 3219,31 | 1113,78 | 0,35 | -3,0468 |
| 50 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3369,75 | 1114,97 | 0,33 | -3,0473 |
| 51 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3457,19 | 1116,38 | 0,32 | -3,0478 |
| 52 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 3295,88 | 1114,98 | 0,34 | -3,0473 |
| 53 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 3302,44 | 1114,69 | 0,34 | -3,0472 |
| 54 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3434,63 | 1115,90 | 0,32 | -3,0476 |
| 55 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3347,13 | 1114,87 | 0,33 | -3,0472 |
| 56 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 3226,00 | 1114,02 | 0,35 | -3,0469 |
| 57 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3442,13 | 1116,21 | 0,32 | -3,0477 |
| 58 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 3311,00 | 1115,12 | 0,34 | -3,0473 |
| 59 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 3234,25 | 1114,33 | 0,34 | -3,0470 |
| 60 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3354,75 | 1115,28 | 0,33 | -3,0474 |
| 61 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3361,44 | 1115,06 | 0,33 | -3,0473 |
| 62 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 3211,63 | 1113,74 | 0,35 | -3,0468 |
| 63 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 3288,31 | 1114,39 | 0,34 | -3,0470 |
| 64 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3448,81 | 1115,88 | 0,32 | -3,0476 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

APÊNDICE B - Carga térmica sensível para diferentes combinações de fatores de controle e ruído

Tabela 24 - Carga térmica sensível para diferentes combinações de fatores de controle e ruído

| Combinação | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 | Média | Desvio padrão (σ) | Coefficiente de variação | Log σ |
|------------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|---------|-------------------|--------------------------|---------|
| 1 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 2106,00 | 422,57 | 0,20 | -2,6259 |
| 2 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 1945,50 | 418,83 | 0,22 | -2,6220 |
| 3 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 1869,00 | 417,18 | 0,22 | -2,6203 |
| 4 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 2018,63 | 420,22 | 0,21 | -2,6235 |
| 5 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 1996,50 | 419,52 | 0,21 | -2,6228 |
| 6 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 1874,25 | 417,18 | 0,22 | -2,6203 |
| 7 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 1951,00 | 419,16 | 0,21 | -2,6224 |
| 8 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 2083,75 | 422,05 | 0,20 | -2,6254 |
| 9 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 1883,25 | 417,27 | 0,22 | -2,6204 |
| 10 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 2004,38 | 419,91 | 0,21 | -2,6232 |
| 11 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 2091,75 | 422,33 | 0,20 | -2,6256 |
| 12 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 1960,00 | 419,19 | 0,21 | -2,6224 |
| 13 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 1937,50 | 418,55 | 0,22 | -2,6217 |
| 14 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 2097,38 | 422,34 | 0,20 | -2,6257 |
| 15 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 2009,88 | 419,96 | 0,21 | -2,6232 |
| 16 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 1860,88 | 417,03 | 0,22 | -2,6202 |
| 17 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 1945,50 | 418,83 | 0,22 | -2,6220 |
| 18 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 2106,00 | 422,57 | 0,20 | -2,6259 |
| 19 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 2018,63 | 420,22 | 0,21 | -2,6235 |
| 20 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 1869,00 | 417,18 | 0,22 | -2,6203 |
| 21 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 1874,25 | 417,18 | 0,22 | -2,6203 |
| 22 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 1996,50 | 419,52 | 0,21 | -2,6228 |
| 23 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 2083,75 | 422,05 | 0,20 | -2,6254 |
| 24 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 1951,00 | 419,16 | 0,21 | -2,6224 |
| 25 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 2004,38 | 419,91 | 0,21 | -2,6232 |
| 26 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 1883,25 | 417,27 | 0,22 | -2,6204 |
| 27 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 1960,00 | 419,19 | 0,21 | -2,6224 |
| 28 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 2091,75 | 422,33 | 0,20 | -2,6256 |
| 29 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 2097,38 | 422,34 | 0,20 | -2,6257 |
| 30 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 1937,50 | 418,55 | 0,22 | -2,6217 |
| 31 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 1860,88 | 417,03 | 0,22 | -2,6202 |
| 32 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 2009,88 | 419,96 | 0,21 | -2,6232 |
| 33 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 2026,25 | 420,61 | 0,21 | -2,6239 |
| 34 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 1875,75 | 417,37 | 0,22 | -2,6205 |
| 35 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 1952,50 | 419,09 | 0,21 | -2,6223 |
| 36 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 2113,75 | 423,01 | 0,20 | -2,6264 |
| 37 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 2091,25 | 422,33 | 0,20 | -2,6256 |
| 38 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 1959,13 | 419,25 | 0,21 | -2,6225 |
| 39 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 1882,63 | 417,33 | 0,22 | -2,6205 |
| 40 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 2003,75 | 419,96 | 0,21 | -2,6232 |
| 41 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 1967,63 | 419,52 | 0,21 | -2,6227 |
| 42 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 2098,75 | 422,60 | 0,20 | -2,6259 |
| 43 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 2011,50 | 420,06 | 0,21 | -2,6233 |
| 44 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 1891,00 | 417,54 | 0,22 | -2,6207 |
| 45 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 1868,38 | 417,05 | 0,22 | -2,6202 |
| 46 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 2018,00 | 420,41 | 0,21 | -2,6237 |
| 47 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 2105,38 | 422,55 | 0,20 | -2,6259 |
| 48 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 1944,75 | 419,00 | 0,22 | -2,6222 |
| 49 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 1875,75 | 417,37 | 0,22 | -2,6205 |
| 50 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 2026,25 | 420,61 | 0,21 | -2,6239 |
| 51 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 2113,75 | 423,01 | 0,20 | -2,6264 |
| 52 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 1952,50 | 419,09 | 0,21 | -2,6223 |
| 53 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 1959,13 | 419,25 | 0,21 | -2,6225 |
| 54 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 2091,25 | 422,33 | 0,20 | -2,6256 |
| 55 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 2003,75 | 419,96 | 0,21 | -2,6232 |
| 56 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 1882,63 | 417,33 | 0,22 | -2,6205 |
| 57 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 2098,75 | 422,60 | 0,20 | -2,6259 |
| 58 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 1967,63 | 419,52 | 0,21 | -2,6227 |
| 59 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 1891,00 | 417,54 | 0,22 | -2,6207 |
| 60 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 2011,50 | 420,06 | 0,21 | -2,6233 |
| 61 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 2018,00 | 420,41 | 0,21 | -2,6237 |
| 62 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 1868,38 | 417,05 | 0,22 | -2,6202 |
| 63 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 1944,75 | 419,00 | 0,22 | -2,6222 |
| 64 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 2105,38 | 422,55 | 0,20 | -2,6259 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

APÊNDICE C - Carga térmica latente para diferentes combinações de fatores de controle e ruído

Tabela 25 - Carga térmica latente para diferentes combinações de fatores de controle e ruído

| Combinação | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 | Média | Desvio padrão (σ) | Coefficiente de variação | Log σ |
|------------|---------|--------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|---------|----------------------------|--------------------------|--------------|
| 1 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,06 | 1,44 | 0,05 | 0,64 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 2 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,06 | 1,44 | 0,05 | 0,56 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 3 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,06 | 1,25 | 0,05 | 0,56 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 4 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,06 | 1,25 | 0,05 | 0,64 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 5 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,06 | 1,25 | 0,05 | 0,64 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 6 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,06 | 1,25 | 0,05 | 0,56 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 7 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,06 | 1,44 | 0,05 | 0,56 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 8 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,06 | 1,44 | 0,05 | 0,64 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 9 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,06 | 1,25 | 0,05 | 0,56 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 10 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,06 | 1,25 | 0,05 | 0,64 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 11 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,06 | 1,44 | 0,05 | 0,64 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 12 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,06 | 1,44 | 0,05 | 0,56 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 13 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,06 | 1,44 | 0,05 | 0,56 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 14 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,06 | 1,44 | 0,05 | 0,64 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 15 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,06 | 1,25 | 0,05 | 0,64 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 16 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,06 | 1,25 | 0,05 | 0,56 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 17 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,06 | 1,44 | 0,05 | 0,56 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 18 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,06 | 1,44 | 0,05 | 0,64 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 19 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,06 | 1,25 | 0,05 | 0,64 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 20 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,06 | 1,25 | 0,05 | 0,56 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 21 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,06 | 1,25 | 0,05 | 0,56 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 22 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,06 | 1,25 | 0,05 | 0,64 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 23 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,06 | 1,44 | 0,05 | 0,64 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 24 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,06 | 1,44 | 0,05 | 0,56 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 25 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,06 | 1,25 | 0,05 | 0,64 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 26 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,06 | 1,25 | 0,05 | 0,56 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 27 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,06 | 1,44 | 0,05 | 0,56 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 28 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,06 | 1,44 | 0,05 | 0,64 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 29 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,06 | 1,44 | 0,05 | 0,64 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 30 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,06 | 1,44 | 0,05 | 0,56 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 31 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,06 | 1,25 | 0,05 | 0,56 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 32 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,06 | 1,25 | 0,05 | 0,64 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 33 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,07 | 1,25 | 0,05 | 0,64 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 34 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,07 | 1,25 | 0,05 | 0,56 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 35 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,07 | 1,44 | 0,05 | 0,56 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 36 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,07 | 1,44 | 0,05 | 0,64 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 37 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,07 | 1,44 | 0,05 | 0,64 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 38 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,07 | 1,44 | 0,05 | 0,56 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 39 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,07 | 1,25 | 0,05 | 0,56 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 40 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,07 | 1,25 | 0,05 | 0,64 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 41 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,07 | 1,44 | 0,05 | 0,56 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 42 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,07 | 1,44 | 0,05 | 0,64 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 43 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,07 | 1,25 | 0,05 | 0,64 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 44 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,07 | 1,25 | 0,05 | 0,56 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 45 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,07 | 1,25 | 0,05 | 0,56 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 46 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,07 | 1,25 | 0,05 | 0,64 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 47 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,07 | 1,44 | 0,05 | 0,64 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 48 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,07 | 1,44 | 0,05 | 0,56 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 49 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,07 | 1,25 | 0,05 | 0,56 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 50 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,07 | 1,25 | 0,05 | 0,64 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 51 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,07 | 1,44 | 0,05 | 0,64 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 52 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,07 | 1,44 | 0,05 | 0,56 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 53 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,07 | 1,44 | 0,05 | 0,56 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 54 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,07 | 1,44 | 0,05 | 0,64 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 55 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,07 | 1,25 | 0,05 | 0,64 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 56 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,07 | 1,25 | 0,05 | 0,56 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 57 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,07 | 1,44 | 0,05 | 0,64 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 58 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,07 | 1,44 | 0,05 | 0,56 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 59 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,07 | 1,25 | 0,05 | 0,56 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 60 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,07 | 1,25 | 0,05 | 0,64 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 61 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,07 | 1,25 | 0,05 | 0,64 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 62 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,07 | 1,25 | 0,05 | 0,56 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 63 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,07 | 1,44 | 0,05 | 0,56 | 0,69 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |
| 64 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,07 | 1,44 | 0,05 | 0,64 | 0,79 | 1343,53 | 738,36 | 0,55 | -2,8683 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

APÊNDICE D - Resultados obtidos para o conceito 1

Tabela 26 - Resultados obtidos para o conceito 1

| Combinação | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 | Média | Desvio Padrão (σ) | Coefficiente de variação | Log (σ) |
|------------|---------|--------|-------|------|-------|-------|------|-------|------|------|---------|----------------------------|--------------------------|------------------|
| 1 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,30 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,070 | 0,45 | 0,79 | 3102,25 | 1113,45 | 0,36 | -3,0467 |
| 2 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,30 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,058 | 0,39 | 0,69 | 2978,25 | 1112,69 | 0,37 | -3,0464 |
| 3 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,30 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,070 | 0,39 | 0,69 | 2924,50 | 1111,86 | 0,38 | -3,0461 |
| 4 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,30 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,058 | 0,45 | 0,79 | 3040,44 | 1112,60 | 0,37 | -3,0463 |
| 5 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,30 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,058 | 0,45 | 0,69 | 3018,00 | 1112,13 | 0,37 | -3,0462 |
| 6 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,30 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,070 | 0,39 | 0,79 | 2929,94 | 1111,71 | 0,38 | -3,0460 |
| 7 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,30 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,058 | 0,39 | 0,79 | 2983,69 | 1112,32 | 0,37 | -3,0462 |
| 8 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,30 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,070 | 0,45 | 0,69 | 3079,75 | 1112,95 | 0,36 | -3,0465 |
| 9 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,52 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,058 | 0,39 | 0,79 | 2939,00 | 1111,95 | 0,38 | -3,0461 |
| 10 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,52 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,070 | 0,45 | 0,69 | 3026,00 | 1112,44 | 0,37 | -3,0463 |
| 11 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,52 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,058 | 0,45 | 0,69 | 3087,94 | 1113,19 | 0,36 | -3,0466 |
| 12 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,52 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,070 | 0,39 | 0,79 | 2992,75 | 1112,79 | 0,37 | -3,0464 |
| 13 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,52 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,070 | 0,39 | 0,69 | 2970,13 | 1112,23 | 0,37 | -3,0462 |
| 14 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,52 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,058 | 0,45 | 0,79 | 3093,38 | 1112,99 | 0,36 | -3,0465 |
| 15 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,52 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,070 | 0,45 | 0,79 | 3031,69 | 1112,40 | 0,37 | -3,0463 |
| 16 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,52 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,058 | 0,39 | 0,69 | 2916,50 | 1111,56 | 0,38 | -3,0459 |
| 17 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,30 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,070 | 0,39 | 0,69 | 2978,25 | 1112,69 | 0,37 | -3,0464 |
| 18 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,30 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,058 | 0,45 | 0,79 | 3102,25 | 1113,45 | 0,36 | -3,0467 |
| 19 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,30 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,070 | 0,45 | 0,79 | 3040,44 | 1112,60 | 0,37 | -3,0463 |
| 20 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,30 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,058 | 0,39 | 0,69 | 2924,50 | 1111,86 | 0,38 | -3,0461 |
| 21 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,30 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,058 | 0,39 | 0,79 | 2929,94 | 1111,71 | 0,38 | -3,0460 |
| 22 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,30 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,070 | 0,45 | 0,69 | 3018,00 | 1112,13 | 0,37 | -3,0462 |
| 23 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,30 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,058 | 0,45 | 0,69 | 3079,75 | 1112,95 | 0,36 | -3,0465 |
| 24 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,30 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,070 | 0,39 | 0,79 | 2983,69 | 1112,32 | 0,37 | -3,0462 |
| 25 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,52 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,058 | 0,45 | 0,69 | 3026,00 | 1112,44 | 0,37 | -3,0463 |
| 26 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,52 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,070 | 0,39 | 0,79 | 2939,00 | 1111,95 | 0,38 | -3,0461 |
| 27 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,52 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,058 | 0,39 | 0,79 | 2992,75 | 1112,79 | 0,37 | -3,0464 |
| 28 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,52 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,070 | 0,45 | 0,69 | 3087,94 | 1113,19 | 0,36 | -3,0466 |
| 29 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,52 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,070 | 0,45 | 0,79 | 3093,38 | 1112,99 | 0,36 | -3,0465 |
| 30 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,52 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,058 | 0,39 | 0,69 | 2970,13 | 1112,23 | 0,37 | -3,0462 |
| 31 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,52 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,070 | 0,39 | 0,69 | 2916,50 | 1111,56 | 0,38 | -3,0459 |
| 32 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,52 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,058 | 0,45 | 0,79 | 3031,69 | 1112,40 | 0,37 | -3,0463 |
| 33 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,30 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,058 | 0,45 | 0,79 | 3048,06 | 1112,87 | 0,37 | -3,0464 |
| 34 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,30 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,070 | 0,39 | 0,69 | 2931,50 | 1112,17 | 0,38 | -3,0462 |
| 35 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,30 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,058 | 0,39 | 0,69 | 2985,13 | 1112,84 | 0,37 | -3,0464 |
| 36 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,30 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,070 | 0,45 | 0,79 | 3110,00 | 1113,56 | 0,36 | -3,0467 |
| 37 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,30 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,070 | 0,45 | 0,69 | 3087,13 | 1113,21 | 0,36 | -3,0466 |
| 38 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,30 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,058 | 0,39 | 0,79 | 2991,75 | 1112,79 | 0,37 | -3,0464 |
| 39 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,30 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,070 | 0,39 | 0,79 | 2938,06 | 1112,05 | 0,38 | -3,0461 |
| 40 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,30 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,058 | 0,45 | 0,69 | 3025,50 | 1112,44 | 0,37 | -3,0463 |
| 41 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,52 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,070 | 0,39 | 0,79 | 3000,25 | 1112,87 | 0,37 | -3,0464 |
| 42 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,52 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,058 | 0,45 | 0,69 | 3094,75 | 1113,57 | 0,36 | -3,0467 |
| 43 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,52 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,070 | 0,45 | 0,69 | 3033,06 | 1112,76 | 0,37 | -3,0464 |
| 44 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,52 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,058 | 0,39 | 0,79 | 2946,50 | 1112,26 | 0,38 | -3,0462 |
| 45 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,52 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,058 | 0,39 | 0,69 | 2923,94 | 1111,94 | 0,38 | -3,0461 |
| 46 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,52 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,070 | 0,45 | 0,79 | 3039,69 | 1112,62 | 0,37 | -3,0463 |
| 47 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,52 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,058 | 0,45 | 0,79 | 3101,44 | 1113,30 | 0,36 | -3,0466 |
| 48 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,52 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,070 | 0,39 | 0,69 | 2977,44 | 1112,44 | 0,37 | -3,0463 |
| 49 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,30 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,058 | 0,39 | 0,69 | 2931,50 | 1112,17 | 0,38 | -3,0462 |
| 50 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,30 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,070 | 0,45 | 0,79 | 3048,06 | 1112,87 | 0,37 | -3,0464 |
| 51 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,30 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,058 | 0,45 | 0,79 | 3110,00 | 1113,56 | 0,36 | -3,0467 |
| 52 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,30 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,070 | 0,39 | 0,69 | 2985,13 | 1112,84 | 0,37 | -3,0464 |
| 53 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,30 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,070 | 0,39 | 0,79 | 2991,75 | 1112,79 | 0,37 | -3,0464 |
| 54 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,30 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,058 | 0,45 | 0,69 | 2997,19 | 1104,64 | 0,37 | -3,0432 |
| 55 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,30 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,070 | 0,45 | 0,69 | 3025,50 | 1112,44 | 0,37 | -3,0463 |
| 56 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,30 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,058 | 0,39 | 0,79 | 2938,06 | 1112,05 | 0,38 | -3,0461 |
| 57 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,52 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,070 | 0,45 | 0,69 | 3094,75 | 1113,57 | 0,36 | -3,0467 |
| 58 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,52 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,058 | 0,39 | 0,79 | 3000,25 | 1112,87 | 0,37 | -3,0464 |
| 59 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,52 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,070 | 0,39 | 0,79 | 2946,50 | 1112,26 | 0,38 | -3,0462 |
| 60 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,52 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,058 | 0,45 | 0,69 | 3033,06 | 1112,76 | 0,37 | -3,0464 |
| 61 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,52 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,058 | 0,45 | 0,79 | 3039,69 | 1112,62 | 0,37 | -3,0463 |
| 62 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,52 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,070 | 0,39 | 0,69 | 2923,94 | 1111,94 | 0,38 | -3,0461 |
| 63 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,52 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,058 | 0,39 | 0,69 | 2977,44 | 1112,44 | 0,37 | -3,0463 |
| 64 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,52 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,070 | 0,45 | 0,79 | 3101,44 | 1113,30 | 0,36 | -3,0466 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

APÊNDICE E - Resultados obtidos para o conceito 2

Tabela 27 - Resultados obtidos para o conceito 2

| Combinação | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 | Média | Desvio Padrão (σ) | Coefficiente de variação | Log (σ) |
|------------|---------|--------|-------|------|-------|-------|------|-------|------|------|---------|----------------------------|--------------------------|------------------|
| 1 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,31 | 13,33 | 0,055 | 1,08 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3284,06 | 1114,03 | 0,34 | -3,0469 |
| 2 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,31 | 13,33 | 0,055 | 1,08 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 3143,75 | 1113,10 | 0,35 | -3,0465 |
| 3 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,31 | 13,33 | 0,055 | 0,94 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 3087,44 | 1112,44 | 0,36 | -3,0463 |
| 4 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,31 | 13,33 | 0,055 | 0,94 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3219,63 | 1113,35 | 0,35 | -3,0466 |
| 5 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,31 | 13,33 | 0,055 | 0,94 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3197,25 | 1113,07 | 0,35 | -3,0465 |
| 6 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,31 | 13,33 | 0,055 | 0,94 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 3092,88 | 1112,24 | 0,36 | -3,0462 |
| 7 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,31 | 13,33 | 0,055 | 1,08 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 3149,25 | 1112,98 | 0,35 | -3,0465 |
| 8 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,31 | 13,33 | 0,055 | 1,08 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3261,63 | 1113,62 | 0,34 | -3,0467 |
| 9 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,52 | 13,33 | 0,055 | 0,94 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 3101,69 | 1112,56 | 0,36 | -3,0463 |
| 10 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,52 | 13,33 | 0,055 | 0,94 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3205,25 | 1113,24 | 0,35 | -3,0466 |
| 11 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,52 | 13,33 | 0,055 | 1,08 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3269,63 | 1113,93 | 0,34 | -3,0469 |
| 12 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,52 | 13,33 | 0,055 | 1,08 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 3158,13 | 1113,14 | 0,35 | -3,0466 |
| 13 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,52 | 13,33 | 0,055 | 1,08 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 3135,75 | 1112,87 | 0,35 | -3,0464 |
| 14 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,52 | 13,33 | 0,055 | 1,08 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3275,25 | 1113,90 | 0,34 | -3,0468 |
| 15 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,52 | 13,33 | 0,055 | 0,94 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3210,75 | 1113,19 | 0,35 | -3,0466 |
| 16 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,52 | 13,33 | 0,055 | 0,94 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 3079,25 | 1112,30 | 0,36 | -3,0462 |
| 17 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,31 | 16,01 | 0,055 | 1,08 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 3143,75 | 1113,10 | 0,35 | -3,0465 |
| 18 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,31 | 16,01 | 0,055 | 1,08 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3284,06 | 1114,03 | 0,34 | -3,0469 |
| 19 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,31 | 16,01 | 0,055 | 0,94 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3219,63 | 1113,35 | 0,35 | -3,0466 |
| 20 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,31 | 16,01 | 0,055 | 0,94 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 3087,44 | 1112,44 | 0,36 | -3,0463 |
| 21 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,31 | 16,01 | 0,055 | 0,94 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 3092,88 | 1112,24 | 0,36 | -3,0462 |
| 22 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,31 | 16,01 | 0,055 | 0,94 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3197,25 | 1113,07 | 0,35 | -3,0465 |
| 23 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,31 | 16,01 | 0,055 | 1,08 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3261,63 | 1113,62 | 0,34 | -3,0467 |
| 24 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,31 | 16,01 | 0,055 | 1,08 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 3149,25 | 1112,98 | 0,35 | -3,0465 |
| 25 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,52 | 16,01 | 0,055 | 0,94 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3205,25 | 1113,24 | 0,35 | -3,0466 |
| 26 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,52 | 16,01 | 0,055 | 0,94 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 3101,69 | 1112,56 | 0,36 | -3,0463 |
| 27 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,52 | 16,01 | 0,055 | 1,08 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 3158,13 | 1113,14 | 0,35 | -3,0466 |
| 28 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,52 | 16,01 | 0,055 | 1,08 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3269,63 | 1113,93 | 0,34 | -3,0469 |
| 29 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,52 | 16,01 | 0,055 | 1,08 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3275,25 | 1113,90 | 0,34 | -3,0468 |
| 30 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,52 | 16,01 | 0,055 | 1,08 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 3135,75 | 1112,87 | 0,35 | -3,0464 |
| 31 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,52 | 16,01 | 0,055 | 0,94 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 3079,25 | 1112,30 | 0,36 | -3,0462 |
| 32 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,52 | 16,01 | 0,055 | 0,94 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3210,75 | 1113,19 | 0,35 | -3,0466 |
| 33 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,31 | 13,33 | 0,065 | 0,94 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3227,25 | 1113,52 | 0,35 | -3,0467 |
| 34 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,31 | 13,33 | 0,065 | 0,94 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 3094,31 | 1112,82 | 0,36 | -3,0464 |
| 35 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,31 | 13,33 | 0,065 | 1,08 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 3150,75 | 1113,49 | 0,35 | -3,0467 |
| 36 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,31 | 13,33 | 0,065 | 1,08 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3291,69 | 1114,18 | 0,34 | -3,0470 |
| 37 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,31 | 13,33 | 0,065 | 1,08 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3268,88 | 1113,93 | 0,34 | -3,0469 |
| 38 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,31 | 13,33 | 0,065 | 1,08 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 3157,38 | 1113,14 | 0,35 | -3,0466 |
| 39 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,31 | 13,33 | 0,065 | 0,94 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 3101,06 | 1112,50 | 0,36 | -3,0463 |
| 40 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,31 | 13,33 | 0,065 | 0,94 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3204,44 | 1113,13 | 0,35 | -3,0465 |
| 41 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,52 | 13,33 | 0,065 | 1,08 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 3165,81 | 1113,29 | 0,35 | -3,0466 |
| 42 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,52 | 13,33 | 0,065 | 1,08 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3276,63 | 1114,25 | 0,34 | -3,0470 |
| 43 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,52 | 13,33 | 0,065 | 0,94 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3212,25 | 1113,69 | 0,35 | -3,0468 |
| 44 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,52 | 13,33 | 0,065 | 0,94 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 3109,56 | 1112,81 | 0,36 | -3,0464 |
| 45 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,52 | 13,33 | 0,065 | 0,94 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 3086,75 | 1112,49 | 0,36 | -3,0463 |
| 46 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,52 | 13,33 | 0,065 | 0,94 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3218,88 | 1113,35 | 0,35 | -3,0466 |
| 47 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,52 | 13,33 | 0,065 | 1,08 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3283,25 | 1114,14 | 0,34 | -3,0469 |
| 48 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,52 | 13,33 | 0,065 | 1,08 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 3143,06 | 1112,87 | 0,35 | -3,0464 |
| 49 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,31 | 16,01 | 0,065 | 0,94 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 3094,31 | 1112,82 | 0,36 | -3,0464 |
| 50 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,31 | 16,01 | 0,065 | 0,94 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3227,25 | 1113,52 | 0,35 | -3,0467 |
| 51 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,31 | 16,01 | 0,065 | 1,08 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3291,69 | 1114,18 | 0,34 | -3,0470 |
| 52 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,31 | 16,01 | 0,065 | 1,08 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 3150,75 | 1113,49 | 0,35 | -3,0467 |
| 53 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,31 | 16,01 | 0,065 | 1,08 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 3157,38 | 1113,14 | 0,35 | -3,0466 |
| 54 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,31 | 16,01 | 0,065 | 1,08 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3268,88 | 1113,93 | 0,34 | -3,0469 |
| 55 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,31 | 16,01 | 0,065 | 0,94 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3204,44 | 1113,13 | 0,35 | -3,0465 |
| 56 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,31 | 16,01 | 0,065 | 0,94 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 3101,06 | 1112,50 | 0,36 | -3,0463 |
| 57 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,52 | 16,01 | 0,065 | 1,08 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3276,63 | 1114,25 | 0,34 | -3,0470 |
| 58 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,52 | 16,01 | 0,065 | 1,08 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 3165,81 | 1113,29 | 0,35 | -3,0466 |
| 59 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,52 | 16,01 | 0,065 | 0,94 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 3109,56 | 1112,81 | 0,36 | -3,0464 |
| 60 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,52 | 16,01 | 0,065 | 0,94 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3212,25 | 1113,69 | 0,35 | -3,0468 |
| 61 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,52 | 16,01 | 0,065 | 0,94 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3218,88 | 1113,35 | 0,35 | -3,0466 |
| 62 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,52 | 16,01 | 0,065 | 0,94 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 3086,75 | 1112,49 | 0,36 | -3,0463 |
| 63 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,52 | 16,01 | 0,065 | 1,08 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 3143,06 | 1112,87 | 0,35 | -3,0464 |
| 64 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,52 | 16,01 | 0,065 | 1,08 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3283,25 | 1114,14 | 0,34 | -3,0469 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

APÊNDICE F - Resultados obtidos para o conceito 3

Tabela 28 - Resultados obtidos para o conceito 3

| Combinação | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 | Média | Desvio padrão (σ) | Coefficiente de variação | Log σ |
|------------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|---------|----------------------------|--------------------------|--------------|
| 1 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3105,88 | 1112,68 | 0,36 | -3,0464 |
| 2 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 2988,25 | 1112,21 | 0,37 | -3,0462 |
| 3 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 2951,38 | 1111,69 | 0,38 | -3,0460 |
| 4 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3064,00 | 1112,08 | 0,36 | -3,0461 |
| 5 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3041,50 | 1111,68 | 0,37 | -3,0460 |
| 6 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 2956,94 | 1111,28 | 0,38 | -3,0458 |
| 7 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 2993,75 | 1111,76 | 0,37 | -3,0460 |
| 8 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3083,56 | 1112,16 | 0,36 | -3,0462 |
| 9 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 2965,75 | 1111,95 | 0,37 | -3,0461 |
| 10 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3049,50 | 1111,98 | 0,36 | -3,0461 |
| 11 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3091,50 | 1112,45 | 0,36 | -3,0463 |
| 12 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 3002,75 | 1112,29 | 0,37 | -3,0462 |
| 13 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 2980,25 | 1111,67 | 0,37 | -3,0460 |
| 14 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3097,00 | 1112,24 | 0,36 | -3,0462 |
| 15 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3054,88 | 1111,89 | 0,36 | -3,0461 |
| 16 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 2943,25 | 1111,48 | 0,38 | -3,0459 |
| 17 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 2988,25 | 1112,21 | 0,37 | -3,0462 |
| 18 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3105,88 | 1112,68 | 0,36 | -3,0464 |
| 19 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3064,00 | 1112,08 | 0,36 | -3,0461 |
| 20 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 2951,38 | 1111,69 | 0,38 | -3,0460 |
| 21 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 2956,94 | 1111,28 | 0,38 | -3,0458 |
| 22 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3041,50 | 1111,68 | 0,37 | -3,0460 |
| 23 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3083,56 | 1112,16 | 0,36 | -3,0462 |
| 24 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 2993,75 | 1111,76 | 0,37 | -3,0460 |
| 25 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3049,50 | 1111,98 | 0,36 | -3,0461 |
| 26 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 2965,75 | 1111,95 | 0,37 | -3,0461 |
| 27 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 3002,75 | 1112,29 | 0,37 | -3,0462 |
| 28 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3091,50 | 1112,45 | 0,36 | -3,0463 |
| 29 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3097,00 | 1112,24 | 0,36 | -3,0462 |
| 30 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 2980,25 | 1111,67 | 0,37 | -3,0460 |
| 31 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 2943,25 | 1111,48 | 0,38 | -3,0459 |
| 32 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3054,88 | 1111,89 | 0,36 | -3,0461 |
| 33 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3071,56 | 1112,40 | 0,36 | -3,0463 |
| 34 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 2958,31 | 1112,00 | 0,38 | -3,0461 |
| 35 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 2995,25 | 1112,29 | 0,37 | -3,0462 |
| 36 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3113,50 | 1112,85 | 0,36 | -3,0464 |
| 37 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3091,00 | 1112,45 | 0,36 | -3,0463 |
| 38 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 3001,81 | 1112,20 | 0,37 | -3,0462 |
| 39 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 2965,00 | 1111,63 | 0,37 | -3,0460 |
| 40 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3048,94 | 1112,05 | 0,36 | -3,0461 |
| 41 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 3010,38 | 1112,43 | 0,37 | -3,0463 |
| 42 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3098,56 | 1112,78 | 0,36 | -3,0464 |
| 43 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3056,50 | 1112,29 | 0,36 | -3,0462 |
| 44 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 2973,44 | 1111,99 | 0,37 | -3,0461 |
| 45 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 2950,75 | 1111,68 | 0,38 | -3,0460 |
| 46 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3063,13 | 1112,23 | 0,36 | -3,0462 |
| 47 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3105,19 | 1112,51 | 0,36 | -3,0463 |
| 48 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 2987,50 | 1111,88 | 0,37 | -3,0461 |
| 49 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 2958,31 | 1112,00 | 0,38 | -3,0461 |
| 50 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3071,56 | 1112,40 | 0,36 | -3,0463 |
| 51 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3113,50 | 1112,85 | 0,36 | -3,0464 |
| 52 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 2995,25 | 1112,29 | 0,37 | -3,0462 |
| 53 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 3001,81 | 1112,20 | 0,37 | -3,0462 |
| 54 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3091,00 | 1112,45 | 0,36 | -3,0463 |
| 55 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3048,94 | 1112,05 | 0,36 | -3,0461 |
| 56 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 2965,00 | 1111,63 | 0,37 | -3,0460 |
| 57 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 3098,56 | 1112,78 | 0,36 | -3,0464 |
| 58 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 3010,38 | 1112,43 | 0,37 | -3,0463 |
| 59 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 2973,44 | 1111,99 | 0,37 | -3,0461 |
| 60 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 3056,50 | 1112,29 | 0,36 | -3,0462 |
| 61 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 3063,13 | 1112,23 | 0,36 | -3,0462 |
| 62 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 2950,75 | 1111,68 | 0,38 | -3,0460 |
| 63 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 2987,50 | 1111,88 | 0,37 | -3,0461 |
| 64 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 3105,19 | 1112,51 | 0,36 | -3,0463 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

APÊNDICE G - Resultados obtidos para o conceito 4

Tabela 29 - Resultados obtidos para o conceito 4

| Combinação | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 | Média | Desvio padrão (σ) | Coefficiente de variação | Log σ |
|------------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|---------|-------------------|--------------------------|---------|
| 1 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 2860,75 | 1111,71 | 0,39 | -3,0460 |
| 2 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 2768,75 | 1111,40 | 0,40 | -3,0459 |
| 3 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 2742,81 | 1110,83 | 0,40 | -3,0456 |
| 4 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 2830,75 | 1111,11 | 0,39 | -3,0458 |
| 5 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 2808,38 | 1110,64 | 0,40 | -3,0456 |
| 6 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 2748,25 | 1110,78 | 0,40 | -3,0456 |
| 7 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 2774,31 | 1111,02 | 0,40 | -3,0457 |
| 8 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 2838,25 | 1111,25 | 0,39 | -3,0458 |
| 9 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 2757,00 | 1110,86 | 0,40 | -3,0457 |
| 10 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 2816,38 | 1111,17 | 0,39 | -3,0458 |
| 11 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 2846,25 | 1111,64 | 0,39 | -3,0460 |
| 12 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 2783,25 | 1111,46 | 0,40 | -3,0459 |
| 13 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 2760,81 | 1110,98 | 0,40 | -3,0457 |
| 14 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 2851,75 | 1111,27 | 0,39 | -3,0458 |
| 15 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 2821,94 | 1110,86 | 0,39 | -3,0457 |
| 16 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 2734,63 | 1110,63 | 0,41 | -3,0456 |
| 17 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 2768,75 | 1111,40 | 0,40 | -3,0459 |
| 18 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 2860,75 | 1111,71 | 0,39 | -3,0460 |
| 19 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 2830,75 | 1111,11 | 0,39 | -3,0458 |
| 20 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 2742,81 | 1110,83 | 0,40 | -3,0456 |
| 21 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 2748,25 | 1110,78 | 0,40 | -3,0456 |
| 22 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 2808,38 | 1110,64 | 0,40 | -3,0456 |
| 23 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 2838,25 | 1111,25 | 0,39 | -3,0458 |
| 24 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 2774,31 | 1111,02 | 0,40 | -3,0457 |
| 25 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 2816,38 | 1111,17 | 0,39 | -3,0458 |
| 26 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 2757,00 | 1110,86 | 0,40 | -3,0457 |
| 27 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 2783,25 | 1111,46 | 0,40 | -3,0459 |
| 28 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 2846,25 | 1111,64 | 0,39 | -3,0460 |
| 29 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 2851,75 | 1111,27 | 0,39 | -3,0458 |
| 30 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 2760,81 | 1110,98 | 0,40 | -3,0457 |
| 31 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 2734,63 | 1110,63 | 0,41 | -3,0456 |
| 32 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,055 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 2821,94 | 1110,86 | 0,39 | -3,0457 |
| 33 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 2838,25 | 1111,64 | 0,39 | -3,0460 |
| 34 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 2749,75 | 1111,32 | 0,40 | -3,0458 |
| 35 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 2775,81 | 1111,56 | 0,40 | -3,0459 |
| 36 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 2868,38 | 1111,81 | 0,39 | -3,0460 |
| 37 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 2845,56 | 1111,45 | 0,39 | -3,0459 |
| 38 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 2782,50 | 1111,23 | 0,40 | -3,0458 |
| 39 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 2756,44 | 1110,92 | 0,40 | -3,0457 |
| 40 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 2815,75 | 1111,04 | 0,39 | -3,0457 |
| 41 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 2790,75 | 1111,66 | 0,40 | -3,0460 |
| 42 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 2853,25 | 1111,86 | 0,39 | -3,0460 |
| 43 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 2823,50 | 1111,34 | 0,39 | -3,0458 |
| 44 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 2764,75 | 1111,40 | 0,40 | -3,0459 |
| 45 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 2742,06 | 1110,91 | 0,41 | -3,0457 |
| 46 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 2830,00 | 1111,10 | 0,39 | -3,0458 |
| 47 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 2859,81 | 1111,62 | 0,39 | -3,0460 |
| 48 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 13,33 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 2768,13 | 1111,23 | 0,40 | -3,0458 |
| 49 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 2749,75 | 1111,32 | 0,40 | -3,0458 |
| 50 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 2838,25 | 1111,64 | 0,39 | -3,0460 |
| 51 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 2868,38 | 1111,81 | 0,39 | -3,0460 |
| 52 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 2775,81 | 1111,56 | 0,40 | -3,0459 |
| 53 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 2782,50 | 1111,23 | 0,40 | -3,0458 |
| 54 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 2786,13 | 1105,83 | 0,40 | -3,0437 |
| 55 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 2815,75 | 1111,04 | 0,39 | -3,0457 |
| 56 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,305 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 2756,44 | 1110,92 | 0,40 | -3,0457 |
| 57 | 0,00046 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,69 | 2853,25 | 1111,86 | 0,39 | -3,0460 |
| 58 | 0,00054 | 0,0036 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,79 | 2790,75 | 1111,66 | 0,40 | -3,0460 |
| 59 | 0,00046 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,79 | 2764,75 | 1111,40 | 0,40 | -3,0459 |
| 60 | 0,00054 | 0,0043 | 0,045 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,69 | 2823,50 | 1111,34 | 0,39 | -3,0458 |
| 61 | 0,00046 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,045 | 0,64 | 0,79 | 2830,00 | 1111,10 | 0,39 | -3,0458 |
| 62 | 0,00054 | 0,0036 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,25 | 0,054 | 0,56 | 0,69 | 2742,06 | 1110,91 | 0,41 | -3,0457 |
| 63 | 0,00046 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,045 | 0,56 | 0,69 | 2768,13 | 1111,23 | 0,40 | -3,0458 |
| 64 | 0,00054 | 0,0043 | 0,054 | 1,520 | 16,01 | 0,065 | 1,44 | 0,054 | 0,64 | 0,79 | 2859,81 | 1111,62 | 0,39 | -3,0460 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)