

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**GUSTAVO MARTINHO SAMPAIO ITO**

**ANÁLISE DO ARREFECIMENTO DE UM GERADOR EÓLICO DE IMÃ  
PERMANENTE CONSIDERANDO TIPOS GEOMÉTRICOS DIFERENTES DA  
PARTE EXTERNA DO CARTER**

**PATO BRANCO**

**2025**

**GUSTAVO MARTINHO SAMPAIO ITO**

**ANÁLISE DO ARREFECIMENTO DE UM GERADOR EÓLICO DE IMÃ  
PERMANENTE CONSIDERANDO TIPOS GEOMÉTRICOS DIFERENTES DA  
PARTE EXTERNA DO CARTER**

**Analysis of the cooling of a permanent magnet wind generator considering  
different geometric types of the carter**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Francisco Augusto Aparecido Gomes

**PATO BRANCO**

**2025**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**GUSTAVO MARTINHO SAMPAIO ITO**

**ANÁLISE DO ARREFECIMENTO DE UM GERADOR EÓLICO DE IMÃ  
PERMANENTE CONSIDERANDO TIPOS GEOMÉTRICOS DIFERENTES DA  
PARTE EXTERNA DO CARTER**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título  
de Bacharel/ do Engenharia Mecânica da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Data de aprovação: 24 / fevereiro / 2025

---

Francisco Augusto Aparecido Gomes

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Fabiano Ostapiv

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Luiz Carlos Martinelli Junior

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PATO BRANCO**

**2025**

:

Dedico este trabalho a minha mãe Elen que sempre foi um exemplo pra mim e sempre me deu conselhos e apoio emocional durante minha jornada.

Dedico este trabalho a minhas tias e meus avós e avôs que me apoiaram e me incentivaram na busca de conhecimento e informação.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer ao Professor Prof. Dr. Francisco Augusto Aparecido Gomes pela proposta deste tema de trabalho, na qual proporcionou um grande aprendizado na área de transferência de calor e também o tempo cedido para sanar dúvidas.

Gostaria de agradecer ao Professor Dr. Thiago de Paula Machado Bazzo, que disponibilizou seu tempo para sanar dúvidas.

Gostaria de agradecer ao projeto Consolidação do FabLab – UTFPR-PB – Referência FINEP – 1333/22, pelo suporte computacional.

*“Cada horizonte é um novo começo”*

(DUNNE ,GAVIN. **Valhalla Calling**, 2020).

## RESUMO

Para a indústria da geração de energia eólica, a manutenção dos geradores eólicos é algo que se demanda muito tempo. Assim o dimensionamento de seu arrefecimento se torna um ponto chave, pois sem contar partes que contem movimento, sua vida útil é medida de acordo com o desgaste do isolante. Assim, alternando a geometria externa do carter para outros tipos de aletas e matrizes tubulares, muda-se sua efetividade em transferência de calor tornando o arrefecimento maior. Este trabalho tem como o objetivo otimizar o arrefecimento de um gerador de ímã permanente através do o método de volumes finitos (MVF) de forma que a mudança da geometria externa gere uma maior turbulência. As geometrias que serão abordadas por este trabalho são as de aleta retangular, triangular, matriz tubular alinhada e matriz tubular alternada no formato triangular. E por fim foi comparado com o modelo original determinando a porcentagem de diferença do arrefecimento. E todas as medidas presentes neste trabalho está no sistema internacional (SI).

Palavras-chave: Otimização: método de volumes finitos (MVF); Arrefecimento; Gerador eólico;

## **ABSTRACT**

For the wind power generation industry, maintaining wind generators is take a lot of time. Therefore, the sizing of its cooling becomes a key point, because without counting parts that contain movement, its useful life is measured according to the wear of the insulator. Thus, switching the external geometry of the carter to other types of fins and tubular matrices, will change its effectiveness in heat transfer, making cooling greater. This work aims to optimize the cooling of a permanent magnet generator with the finite volume method (FVM) so that the change in external geometry generates greater turbulence. The geometries that will be addressed by this work are the rectangular, triangular fin, aligned tubular matrix and alternating tubular matrix in a triangular shaped. Finally, a comparison will be made with the original model to determine the percentage of cooling difference. And all the measures present in this work are in the international system (IS).

Keywords: Optimization; finite volume method (FVM); Cooling; Wind generator.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Componentes do gerador eólico.....	18
Figura 2- Componentes do gerador elétrico.....	18
Figura 3 - Volume de controle para pontos internos.....	20
Figura 4 - Volume de controle para condição 2D.....	20
Figura 5 - Diferentes tipos de superfícies revestidas.....	22
Figura 6 - Gráfico de eficiência das aletas retangulares e triangulares.....	23
Figura 7 - Arranjo matrizes tubulares alinhada e variada.....	24
Figura 8 - Gerador elétrico modelo G1.....	28
Figura 9 - Gerador elétrico detalhes do dente do estator.....	29
Figura 10 - Gerador elétrico detalhes.....	30
Figura 11 - Dimensão aleta retangular modelo G1.....	32
Figura 12 - Representação malha 1.....	36
Figura 13 - Representação malha 2 e 3.....	37
Figura 14 - Representação da malha da aleta triangular vista frontal.....	39
Figura 15 - Representação da malha da aleta triangular vista lateral.....	40
Figura 16 - Representação da malha da aleta triangular vista isométrica.....	41
Figura 17 - Representação da malha da matriz tubular modelo alinhado vista frontal .....	43
Figura 18 - Representação da malha da matriz tubular modelo alinhado vista lateral .....	44
Figura 19 - Representação da malha da matriz tubular modelo alternado vista frontal .....	46
Figura 20 - Representação da malha da matriz tubular modelo alternado vista frontal .....	47
Figura 21 - Representação da malha da matriz tubular modelo alternado vista frontal .....	49
Figura 22 - Ponto de referência dos valores dos gráficos.....	50
Figura 23 - Gráfico de temperatura com aleta retangular de 13 mm.....	51
Figura 24 - Gráfico de temperatura com aleta retangular de 20 mm.....	52
Figura 25 - Gráfico de temperatura com aleta retangular de 30 mm.....	53
Figura 26 - Gráfico de temperatura com aleta retangular de 50 mm.....	54
Figura 27 - Gráfico de temperatura com aleta triangular de 13 mm.....	56
Figura 28 - Gráfico de temperatura com aleta triangular de 20 mm.....	56
Figura 29 - Gráfico de temperatura com aleta triangular de 30 mm.....	57
Figura 30 - Gráfico de temperatura com matriz tubular alinhado de 13 mm.....	58
Figura 31 - Gráfico de temperatura com matriz tubular alinhado de 20 mm.....	58
Figura 32 - Gráfico de temperatura com matriz tubular alternado de 13 mm.....	59
Figura 33 - Gráfico de temperatura com matriz tubular alternado de 15 mm.....	60
Figura 34 - Gráfico de temperatura com matriz tubular alternado de 20 mm.....	60
Figura 35 - Gráfico de temperatura ao longo do estator com aleta retangular uniforme.....	61
Figura 36 - Gráfico de temperatura ao longo do estator com aleta triangular uniforme. .....	62
Figura 37 - Gráfico de temperatura ao longo do estator com matriz tubular modelo alinhado.....	63

Figura 38 - Gráfico de temperatura ao longo do estator com matriz tubular modelo alternado.....	64
Figura 39 - Linha de referência para dados dos gráficos.....	66
Figura 40 - Gráfico de temperatura ao longo da aleta retangular.....	67
Figura 41 - Gráfico de temperatura ao longo da aleta triangular.....	67
Figura 42 - Gráfico de temperatura ao longo da matriz tubular alternado.....	68
Figura 43 - Gráfico de temperatura ao longo da matriz tubular alinhado.....	68
Figura 44 - Linha de referência para dados dos gráficos.....	69
Figura 45 - Gráfico de temperatura no dente do estator com aleta retangular.....	70
Figura 46 - Gráfico de temperatura no dente do estator com aleta triangular.....	70
Figura 47 - Gráfico de temperatura no dente do estator com matriz tubular alinhado.....	71
Figura 48 - Gráfico de temperatura no dente do estator com matriz tubular alternado.....	71
Figura 49 - Aleta retangular 13 mm modelo.....	76
Figura 50 - Aleta retangular 20 mm modelo vista frontal.....	77
Figura 51 - Aleta retangular 20 mm modelo vista isométrica.....	78
Figura 52 - Aleta retangular 30 mm modelo vista frontal.....	79
Figura 53 - Aleta retangular 30 mm modelo vista isométrica.....	80
Figura 54 - Aleta retangular 50 mm modelo vista frontal.....	81
Figura 55 - Aleta retangular 50 mm modelo vista isométrica.....	82
Figura 56 - Aleta triangular 30 mm modelo vista frontal.....	83
Figura 57 - Aleta triangular 30 mm modelo vista isométrica.....	84
Figura 58 - Matriz tubular modelo alinhado 15 mm de comprimento vista frontal.....	85
Figura 59 - Matriz tubular modelo alinhado 15 mm de comprimento vista isométrica.....	86
Figura 60 - Matriz tubular modelo alinhado 20 mm de comprimento vista frontal.....	87
Figura 61 - Matriz tubular modelo alinhado 20 mm de comprimento vista isométrica.....	88
Figura 62 - Matriz tubular modelo alternado 15 mm de comprimento vista frontal....	89
Figura 63 - Matriz tubular modelo alternado 15 mm de comprimento vista isométrica.....	90
Figura 64 - Matriz tubular modelo alternado 20 mm de comprimento vista frontal....	91
Figura 65 - Matriz tubular modelo alternado 20 mm de comprimento vista isométrica.....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características da turbina eólica adotada.....	17
Tabela 2 - Constante das equações 2.23 2.24 para escoamento de ar sobre matriz tubular de 10 ou mais colunas.....	25
Tabela 3 - Fator de correção C2 para a equação 2.25.....	25
Tabela 4 - Dimensão do Gerador elétrico otimizado para minimização do custo de materiais.....	27
Tabela 5 - Condições de contorno de temperatura.....	31
Tabela 6 - Condições de contorno de temperatura modelo G1.....	32
Tabela 7 - Dimensões de comprimento retangular.....	33
Tabela 8 - Dimensões de comprimento aleta triangular.....	33
Tabela 9 - Dimensões da geometria do trocador de calor de matriz tubular alinhado.....	34
Tabela 10 - Dimensões da geometria do trocador de calor de matriz tubular alternada.....	34
Tabela 11 - Malha (1) para a aleta retangular de diferentes comprimentos.....	38
Tabela 12 - Malha (2) para a aleta retangular de diferentes comprimentos.....	38
Tabela 13 - Malha (3) para a aleta retangular de diferentes comprimentos.....	38
Tabela 14 - Malha (4) para a aleta triangular de diferentes comprimentos.....	42
Tabela 15 - Malha (5) para a aleta triangular de diferentes comprimentos.....	42
Tabela 16 - Malha (6) para a aleta triangular de diferentes comprimentos.....	42
Tabela 17 - Malha (7) para a trocador de calor no formato de matriz tubular no modelo alinhado de diferentes comprimentos.....	45
Tabela 18 - Malha (8) para a trocador de calor no formato de matriz tubular no modelo alinhado de diferentes comprimentos.....	45
Tabela 19 - Malha (9) para a trocador de calor no formato de matriz tubular no modelo alinhado de diferentes comprimentos.....	45
Tabela 20 - Malha (10) para a trocador de calor no formato de matriz tubular no modelo alternado de diferentes comprimentos.....	47
Tabela 21 - Malha (11) para a trocador de calor no formato de matriz tubular no modelo alternado de diferentes comprimentos.....	48
Tabela 22 - Malha 12.....	49
Tabela 23 - Porcentagem de redução de temperatura comparado com.....	65

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 Justificativa.....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 Objetivos.....</b>	<b>16</b>
1.2.1 Geral.....	16
1.2.2 Específicos.....	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Gerador síncrono.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 Método de volume finito.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3 Aletas.....</b>	<b>22</b>
<b>2.4 Trocador de calor no formato de matrizes tubulares.....</b>	<b>23</b>
<b>2.5 Geração de malha.....</b>	<b>25</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 Especificação do gerador eólico.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2 Condições de contorno.....</b>	<b>30</b>
<b>3.3 Superfícies estendidas.....</b>	<b>31</b>
3.3.1 Aletas.....	31
3.3.1.1 Aleta retangular.....	32
3.3.1.2 Aleta triangular.....	33
3.3.2 Matriz Tubular.....	33
3.3.2.1 Matriz tubular alinhado.....	34
3.3.2.2 Matriz tubular alternado.....	34
<b>4 RESULTADOS OBTIDOS.....</b>	<b>35</b>
<b>4.1 Estudo de convergência de malha.....</b>	<b>35</b>
4.1.1 Aleta retangular.....	35
4.1.2 Aleta triangular.....	39
4.1.3 Trocador de calor no formato matriz tubular modelo alinhado.....	43
4.1.4 Trocado de calor no formato de matriz tubular modelo alternado.....	46
<b>4.2 Efeito do rotor sobre o estator.....</b>	<b>50</b>
<b>4.3 Comparação de temperatura com diferentes malhas.....</b>	<b>51</b>
<b>4.4 Comparação de temperatura entre altura das geometrias.....</b>	<b>61</b>
4.4.1 Gráficos de temperatura na carcaça.....	66

4.4.2 Gráficos de temperatura no estator.....	69
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>73</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE - RESULTADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NO GERADOR.....</b>	<b>75</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de geradores eólico vem se destacando muito no ramo de geração de energia. E em relação a geração de energia [Bazzo \(2017\)](#) comenta que a geração de energia elétrica, algumas fontes primárias disponíveis no planeta foram e continuam sendo utilizadas num ritmo muito superior ao necessário para sua reposição natural, sendo conhecidas, por este motivo, como fontes esgotáveis ou não renováveis. Dentre estas fontes se destacam os combustíveis fósseis como carvão mineral, petróleo e gás natural, largamente utilizados em geração de eletricidade e transporte. No entanto, a utilização indiscriminada destes recursos confronta com dois fatos importantes: trata-se de fontes esgotáveis e são poluentes. Assim aerogeradores sendo uma fonte de menos poluente, vem se destacando dependendo apenas da condição do vento para gerar energia.

Mas mesmo os geradores eólicos serem vantajosos por não poluírem tanto, ele demanda de manutenção e o tempo exigido para manutenção é alto. No gerador se não considerarmos as partes moveis como a caixa de engrenagens, a vida útil é determinada pelo isolante. Segundo [Taras et al. \(2022\)](#) o aumento da temperatura de um isolante acima do valor da classe pode levar a redução da vida útil do isolamento ou mesmo à falha. Ele também comenta sobre uma regra geral que para cada aumento de 10 °C acima em relação ao valor da classe do isolante, a vida útil do isolamento diminui pela metade. Como as perdas em Joule nos enrolamentos são significativos, é crucial escolher o sistema de isolamento correto e permanecer dentro dos limites térmicos de segurança durante a vida útil da máquina.

Assim ter um arrefecimento ideal para o gerador eólico impactará diretamente sua vida útil. E [Bergman; Lavine \(2019\)](#) comentam que a aleta é a forma mais comum para arrefecimento pois aumenta a transferência de calor por convecção para um fluido adjacente. Além de determinar as distribuições de temperatura e taxas de transferência de calor correspondente. Mudar a geometria externa do gerador elétrico terá impacto em sua eficiente como por exemplo a eficiência de transferência de calor da aleta triangular é maior que a retangular assim a perda de energia em forma de calor para o ambiente seria menor.

Geometrias mais complexas utilizadas para arrefecimento como, por exemplo, aletas nos formatos matrizes tubulares alinhado e alternado no formato triangular de

60°, segundo [Holman \(2010\)](#) devem ser testadas sob condições próximas ou reais condições de operação para determinar seu desempenho com confiabilidade aceitável.

O formato geométrico de matriz tubular é caracterizado por gerar uma grande turbulência, mas não é comum ser utilizada aletas no formato de matriz tubular para escoamento externo e segundo [Bergman; Lavine \(2019\)](#) as aletas no formato de matriz tubular é mais aplicada na indústria de geração de vapor em caldeiras e resfriamento de ar em serpentina de ar-condicionado, em forma de um escoamento cruzado onde um fluido escoará pelos tubos e haverá outro fluido que escoará na superfície dos tubos.

Para fazer a pesquisa sobre esses tipos de geometrias citadas para o escoamento externo é necessário fazer um estudo sobre o fluxo de ar que percorrerá elas. Assim [White \(2002\)](#) comenta que como o fluxo de fluidos é um ramo da mecânica dos fluidos, ele satisfaz um conjunto de bem leis básicas documentadas e, portanto, uma grande quantidade de tratamento teórico está disponível. Como sempre, a teoria é muitas vezes frustrante, porque se aplica principalmente a situações idealizadas o que pode ser inválido em problemas práticos. Os principais obstáculos a uma solução viável são geometria, viscosidade, turbulência e compressibilidade. As equações básicas do movimento dos fluidos são muito difíceis ao analisar geométricas arbitrarias.

E como as geometrias citadas são complexas se tornam um obstáculo a uma solução viável sendo necessário uma solução computacional. E para ter uma solução mais precisa a dinâmica de fluidos computacional (CFD) para geometrias mais complexas pode chegar a uma solução muito próxima a real. Segundo [Blomquist \(2018\)](#) a dinâmica de fluidos computacional (CFD) usa métodos numéricos para simular fenômenos de transferência de calor e fluxo de fluidos. Esse número de simulações requerem a solução de grandes sistemas algébricos lineares que surgem da discretização das equações governantes e o número de nós na malha discretizada é diretamente relacionado à precisão da simulação. Uma malha mais fina, com mais nós, resulta em melhor precisão numérica. No entanto, os recursos computacionais necessários para resolver os sistemas lineares e o tempo geral de solução da simulação aumenta com um aumento do número de nós. À medida que os profissionais continuam a desenvolver simulações que requerem malhas finas, a necessidade de melhores métodos para resolver sistemas lineares

torna-se particularmente importante. E segundo [Blazek \(2001\)](#) as metodologias CFD são rotineiramente empregadas nas áreas de projetos de turbo máquinas, automóveis e navios. Além disso, também é aplicado em meteorologia, oceanografia, astrofísica, biologia e recuperação de petróleo. E está se tornando uma ferramenta de design cada vez mais importante em engenharia, e uma importante ferramenta de pesquisa em diversas ciências.

Assim um estudo sobre as geometrias aletas retangular, triangular e matriz tubular sobre um escoamento externo poderá ter um grande impacto sobre o gerador eólico podendo aumentar sua vida útil que também afetará seu tempo de manutenção. Mas devido à complexidade das geometrias uma solução numérica se torna necessária para ter uma solução mais próxima de real.

## **1.1 Justificativa**

Este trabalho de conclusão de curso tem como base a tese de doutorado de [Bazzo \(2017\)](#) na qual foi utilizada uma condição de contorno convectiva de forma simplificada, que desconsiderou efeitos térmicos que poderiam ter ocorrido devido à influência do rotor. O gerador eólico de ímã permanentes que foi utilizado é um padrão comercial sendo muito utilizado para a geração de energia devido sua vantagem de ser acoplado diretamente a turbina. Mesmo com essa vantagem de ser acoplado diretamente a turbina a manutenção do gerador eólico demanda tempo. E como foi citado se não incluirmos as partes que possuem movimento, a vida útil do gerador é determinada pelo isolante. Portanto, a otimização do sistema de arrefecimento do gerador impactará diretamente na vida útil do mesmo, assim como, no estabelecimento de suas condições operacionais. E com a mudança da geometria externa do carter a redução na temperatura pode ser obtido sem a necessidade de um arrefecimento forçado como por exemplo, sem ter a necessidade de utilizar de ventiladores interno. E com essa mudança poderá reduzir o número de equipamentos de arrefecimento assim como a periodicidade de manutenção.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Geral

O objetivo geral desta pesquisa é otimizar do arrefecimento de um gerador eólico de ímãs permanentes através da alteração da geometria externa do carter.

### 1.2.2 Específicos

- Alterar geometria externa do carter;
- Analisar a transferência de calor influenciada pelo rotor sobre os componentes mais externos;
- Analisar o insuflamento de ar sobre o gerador para o arrefecimento;
- Analisar a influência do escoamento sobre os perfis aleta e matriz tubular para o arrefecimento do estator.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Gerador síncrono

Segundo [Bazzo \(2017\)](#) geradores síncronos com grande número de polos é uma opção comum em aerogeradores de médio e grande porte e, muitas vezes possuindo excitação por ímãs permanentes. E por possuírem muitos polos, sua rotação é baixa. O que permite um acoplamento direto com a turbina eólica sem a necessidade de uma caixa multiplicado de velocidade.

A turbina eólica neste trabalho, foi baseado no trabalho feito por [Bazzo \(2017\)](#), na qual adota turbinas com potência de 50 kW. E tendo a velocidade nominal do vento  $V_{nom}$  igual a 11 m/s e o coeficiente de velocidade específico  $\lambda$  igual a 6,09. Assim sua rotação nominal é dada pela equação 2.1.

$$n_{nom} = \frac{\lambda \cdot V_{nom} \cdot 60}{\pi \cdot D} \quad (2.1)$$

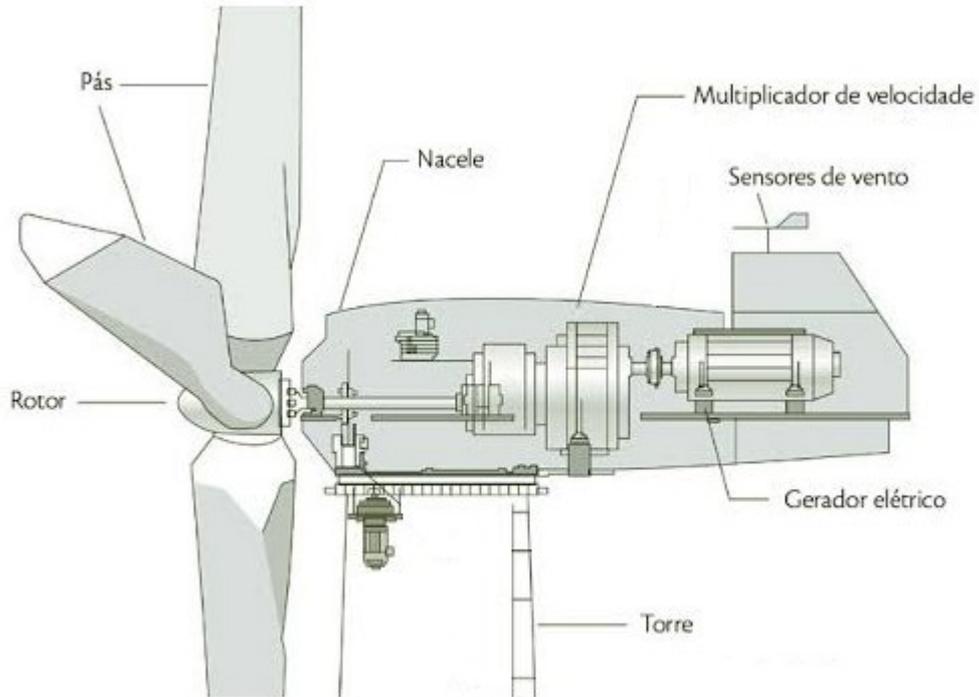
Assim, as principais características do gerador eólico de ímãs permanentes, estão listadas na tabela 1. E os componentes do gerador eólico são apresentados na figura 1 e os componentes do gerador elétrico estão na figura 2

**Tabela 1 - Principais características da turbina eólica adotada**

<b>Diâmetro – D(m)</b>	15,6
<b>Potência nominal no eixo – <math>P_{m,nom}</math> (kW)</b>	54,5
<b>Rotação nominal – <math>n_{nom}</math> (rpm)</b>	82,0
<b>Velocidade de vento nominal – <math>V_{nom}</math> (m/s)</b>	11
<b>Valor máximo de Coef. de potência - <math>C_p</math></b>	0,35

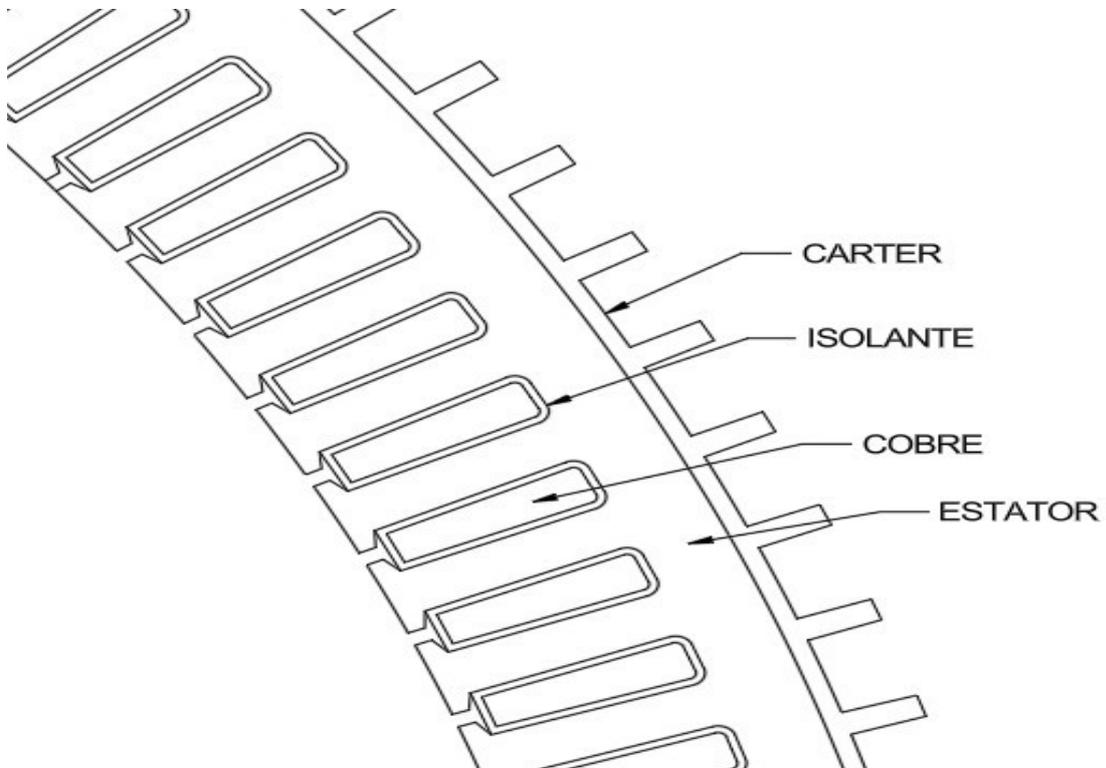
Fonte: Adaptado de [Bazzo \(2017\)](#)

**Figura 1- Componentes do gerador eólico**



Fonte: Windbox

**Figura 2- Componentes do gerador elétrico**



Fonte: Autoria própria (2024)

O carter é a estrutura externa do gerador eólico, desempenha um papel de auxiliar o resfriamento dos componentes internos através do aumento da superfície de contato com a utilização de aletas. E devido a geometria complexa, é geralmente fabricado através do processo de fundição com ferro fundido cinzento. Neste trabalho, será focado o aprimoramento dessa peça, visando melhorar sua eficiência para o arrefecimento dos componentes internos do gerador eólico.

Na tese de [Bazzo \(2017\)](#), o isolante utilizado é uma classe H, com um limite de temperatura de 180 °C. Esse tipo de isolante é amplamente empregado em geradores eólicos devido à sua notável resistência térmica, sendo uma escolha frequente para garantir o desempenho confiável desses sistemas.

## 2.2 Método de volume finito

[Patankar \(1980\)](#) explica a discretização das equações para a construção da solução numérica em um regime permanente. Utilizando assim de condições de contorno na qual haverá transferência de calor em condução e convecção. Para a transferência de calor por convecção, serão utilizadas as equações 2.7 e 2.8, na qual é demonstrada na figura 3, metade do volume de controle será utilizado. As condições de condução será o volume de controle inteiro, apresentado na figura 4.

E [Patankar \(1980\)](#) ressalta a importância da malha. É necessária muita operação computacional para se ter um resultado mais próximo do real. Assim uma malha fina seria a mais ideal para se ter um resultado verdadeiro.

Sendo,  $k$  o coeficiente de condutividade,  $h$  o coeficiente de convecção

$$q_B - q_i + (S_c + S_p T_B) \Delta x = 0 \quad (2.2)$$

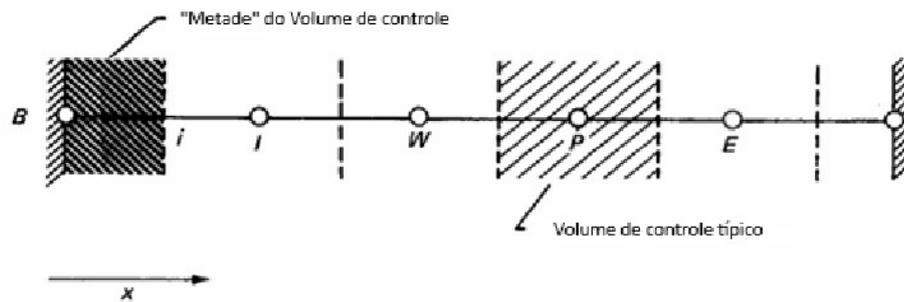
$$a_B T_B = a_I T_I + b \quad (2.3)$$

$$a_I = \frac{k_I}{(\delta x)_i} \quad (2.4)$$

$$b = S_c \Delta x + q_B \quad (2.5)$$

$$a_B = a_I - S_p \Delta x \quad (2.6)$$

Figura 3 - Volume de controle para pontos internos

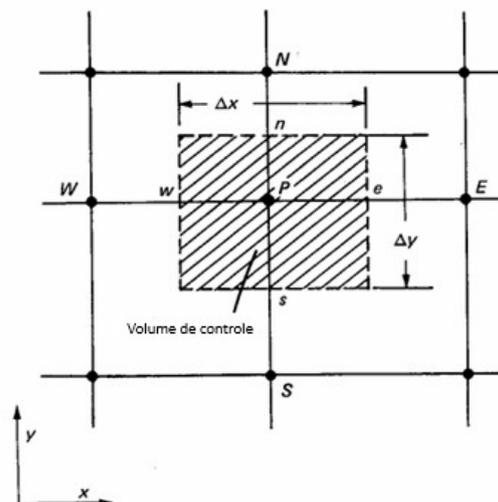


Fonte: Patankar (1980)

$$q_B - \frac{ki(T_B - T_I)}{(\delta x)i} + (S_c + S_p T_B) \cdot \Delta x = 0 \quad (2.7)$$

$$q_B = h(T_f - T_B) \quad (2.8)$$

Figura 4 - Volume de controle para condição 2D



Fonte: Patankar (1980)

Para uma malha 3D utilizará a equação 2.18 e seus os valores dos subíndices E, W, N, S, T, B, serão as equações 2.10 a 2.15.

$$a_p T_p = a_e T_e + a_w T_w + a_n T_n + a_s T_s + a_t T_t + a_b T_b + b \quad (2.9)$$

$$a_e = \frac{k_e \Delta y \Delta z}{(\delta x)_e} \quad (2.10)$$

$$a_w = \frac{k_w \Delta y \Delta z}{(\delta x)_w} \quad (2.11)$$

$$a_n = \frac{k_n \Delta z \Delta x}{(\delta y)_n} \quad (2.12)$$

$$a_s = \frac{k_s \Delta z \Delta x}{(\delta y)_s} \quad (2.13)$$

$$a_t = \frac{k_t \Delta x \Delta y}{(\delta z)_t} \quad (2.14)$$

$$a_b = \frac{k_b \Delta x \Delta y}{(\delta z)_b} \quad (2.15)$$

$$\dot{a}_b = \frac{\rho c \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \quad (2.16)$$

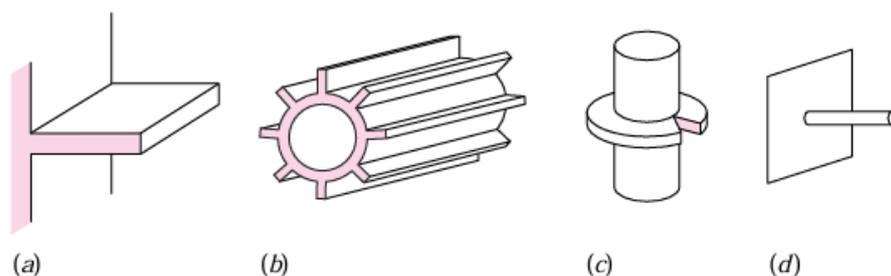
$$b = S_c \Delta x \Delta y \Delta z + a_p \dot{T}_p \quad (2.17)$$

$$a_p = a_e + a_w + a_n + a_s + a_t + a_b + \dot{a}_b + S_p \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.18)$$

## 2.3 Aletas

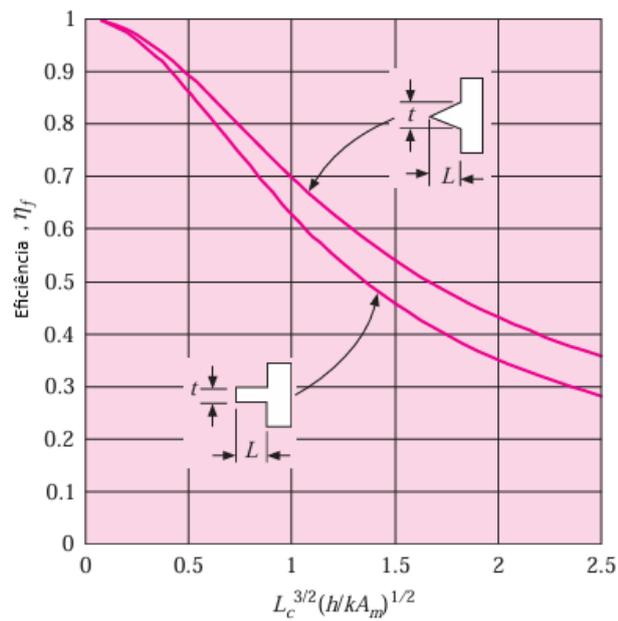
Holman (2010) destaca diferentes tipos de aletas, os quais são ilustrados na Figura 5 Sendo a figura 5-a uma aleta retangular a figura 5-b uma retangular em uma superfície cilíndrica sendo algo próximo a carcaça utilizada no gerador, a figura 4c uma aleta circular e a figura 5-d uma aleta cilíndrica. Ele apresenta uma comparação das eficiências de uma aleta triangular e uma aleta retangular reta figura 6. Mostrando assim e eficiência na transferencial de calor na aleta triangular ser maior a retangular.

**Figura 5 - Diferentes tipos de superfícies revestidas**



**Fonte: Holman (2010)**

**Figura 6 - Gráfico de eficiência das aletas retangulares e triangulares**



**Fonte: Holman (2010)**

$$L_c = L + \frac{t}{2} \rightarrow \text{Retangular} \quad (2.19)$$

$$L \rightarrow \text{Triangular}$$

$$tL_c \rightarrow \text{Retangular} \quad (2.20)$$

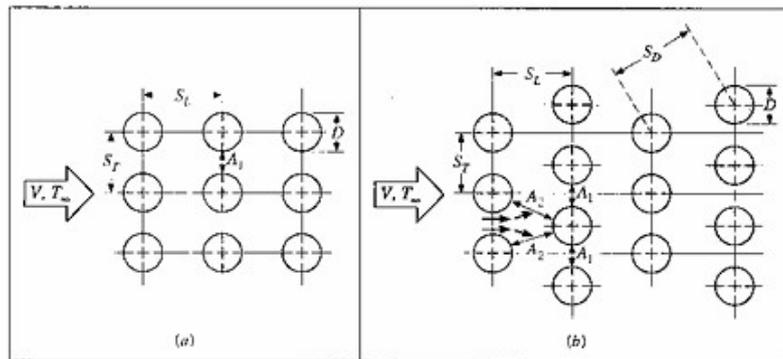
$$A_m = \frac{t}{2} L \rightarrow \text{Triangular}$$

## 2.4 Trocador de calor no formato de matrizes tubulares

As matrizes tubulares são muito utilizadas como meio para troca de calor [Bergman; Lavine \(2019\)](#) ressalta a utilização das matrizes tubulares na indústria de geração de vapor e resfriamento de ar em serpentinas. Tendo os arranjos alinhados e alternados.

Bergman; Lavine (2019) resalta que a configuração de arranjo será denominada pelo diâmetro do tubo  $D$ , passo transversal  $S_T$  e passo longitudinal  $S_L$ . Esses arranjos Figura 7.

Figura 7 - Arranjo matrizes tubulares alinhada e variada



Fonte: Bergman; Lavine (2019)

E para de determinar a distância ideal entre os tubos Bergman; Lavine (2019) utiliza da equação 2.21 e 2.22. E assim utilizando da tabela 2 para se obter as constantes da equação.

$$\frac{S_L}{D} \quad (2.21)$$

$$\frac{S_T}{D} \quad (2.22)$$

$$\overline{Nu}_D = C_1 Re_{max}^m \quad (2.23)$$

$$Re_{Dmax} = \frac{\rho V_{max} D}{\mu} \quad (2.24)$$

A equação 2.23 que se obtêm o número de Nusselt ( $Nu$ ) na qual utiliza o número Reynolds da equação 2.24 para se obter. A equação 2.23 utilizada sobre as condições de  $N_L \geq 10$ ,  $2000 \leq Re_{Dmax} \leq 40000$ ,  $Pr = 0,7$ .

**Tabela 2 - Constante das equações 2.23 2.24 para escoamento de ar sobre matriz tubular de 10 ou mais colunas**

$S_T / D$				
1,25			1,5	
$S_L / D$	$C_1$	$m$	$C_1$	$m$
<b>Alinhada</b>				
1,25	0,348	0,592	0,275	0,608
1,5	0,367	0,586	0,250	0,620
<b>Alternada</b>				
1,250	0,518	0,556	0,505	

Fonte: Adaptado de Bergman; Lavine (2019)

E para um número de colunas menor que 10, [Bergman; Lavine \(2019\)](#) utiliza um fator de correção da tabela 3.

**Tabela 3 - Fator de correção C2 para a equação 2.25**

$N_L$	4	5	6
Alinhada	0,90	0,92	0,94
Alternada	0,89	0,92	0,95

Fonte: Adaptado de Bergman; Lavine (2019)

$$\overline{Nu}_{DN_L \leq 10} = C_2 \overline{Nu}_{DN_L \geq 10} \quad (2.25)$$

## 2.5 Geração de malha

A geração da malha requer uma atenção especial pois normalmente erros em uma solução numérica ocorrem devido a uma malha não coerente, assim [Blazek \(2001\)](#) estabelece alguns requisitos na qual ele considera importantes na geração de uma malha ideal, sendo não deve haver buracos entre as células da grade mas também que as células da grade não se sobreponham. Além disso, a grade deve ser suave, ou seja, não deve haver alterações abruptas no volume das células da grade ou na relação de estiramento, e os elementos devem ser tão regulares quanto

possível. Além disso, se a grade consiste em quadriláteros ou hexaedros, não deve haver grandes dobras nas linhas da grade. Caso contrário, erros numéricos aumentariam significativamente.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Especificação do gerador eólico

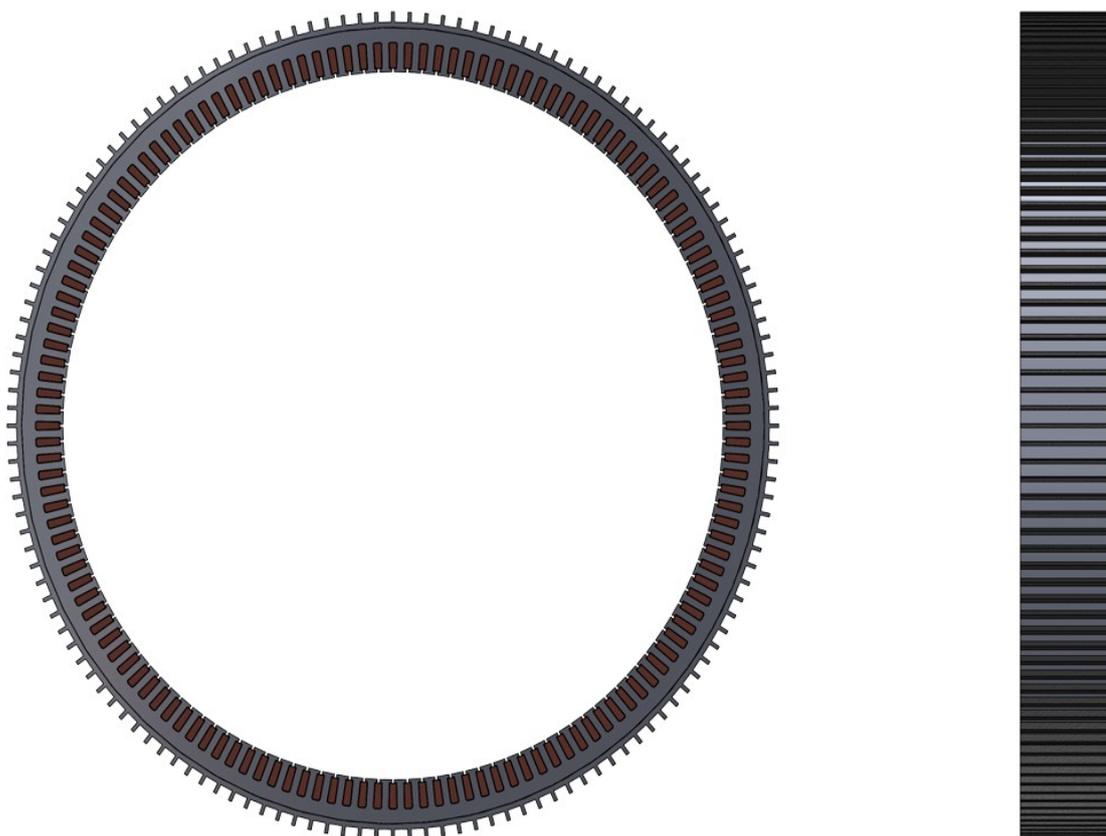
O modelo adotado neste trabalho foi baseado no trabalho de [Bazzo \(2017\)](#) modelo G1 que se refere a otimização para minimização do custo de materiais. E sua geometria esta listada na tabela 4 e o desenho do gerador é apresentado na figura 8 a 10.

**Tabela 4 - Dimensão do Gerador elétrico otimizado para minimização do custo de materiais**

Abertura da ranhura (mm)	3,00
Altura da coroa do estator (mm)	14,82
Altura da coroa do rotor (mm)	15,05
Altura do colarinho da ran. (mm)	1,47
Altura do pescoço da ranhura (mm)	3,00
Comprimento do entreferro (mm)	0,91
Comprimento do pacote (mm)	131,99
Diâmetro externo do rotor (mm)	909,94
Diâmetro externo do estator (mm)	1026,52
Diâmetro interno do estator (mm)	911,76
Diâmetro interno do rotor (mm)	861,64
Largura do dente (mm)	10,00
Largura do fundo da ranhura (mm)	11,75
Largura do topo da ranhura (mm)	10,09
Profundidade da ranhura (mm)	38,09
Largura da aleta – t (mm)	13
Comprimento – L (mm)	131,99
Número de aletas	144
Espessura (mm)	5

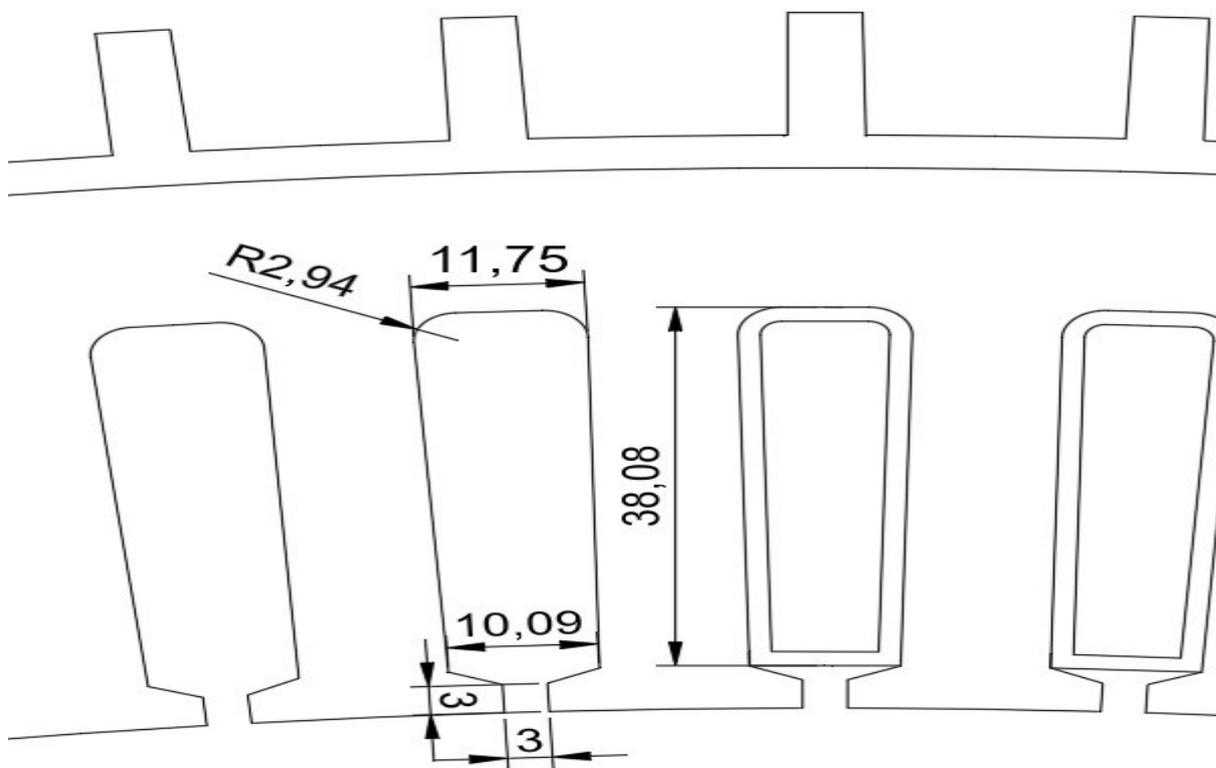
Fonte: Adaptado de Bazzo (2017)

Figura 8 - Gerador elétrico modelo G1

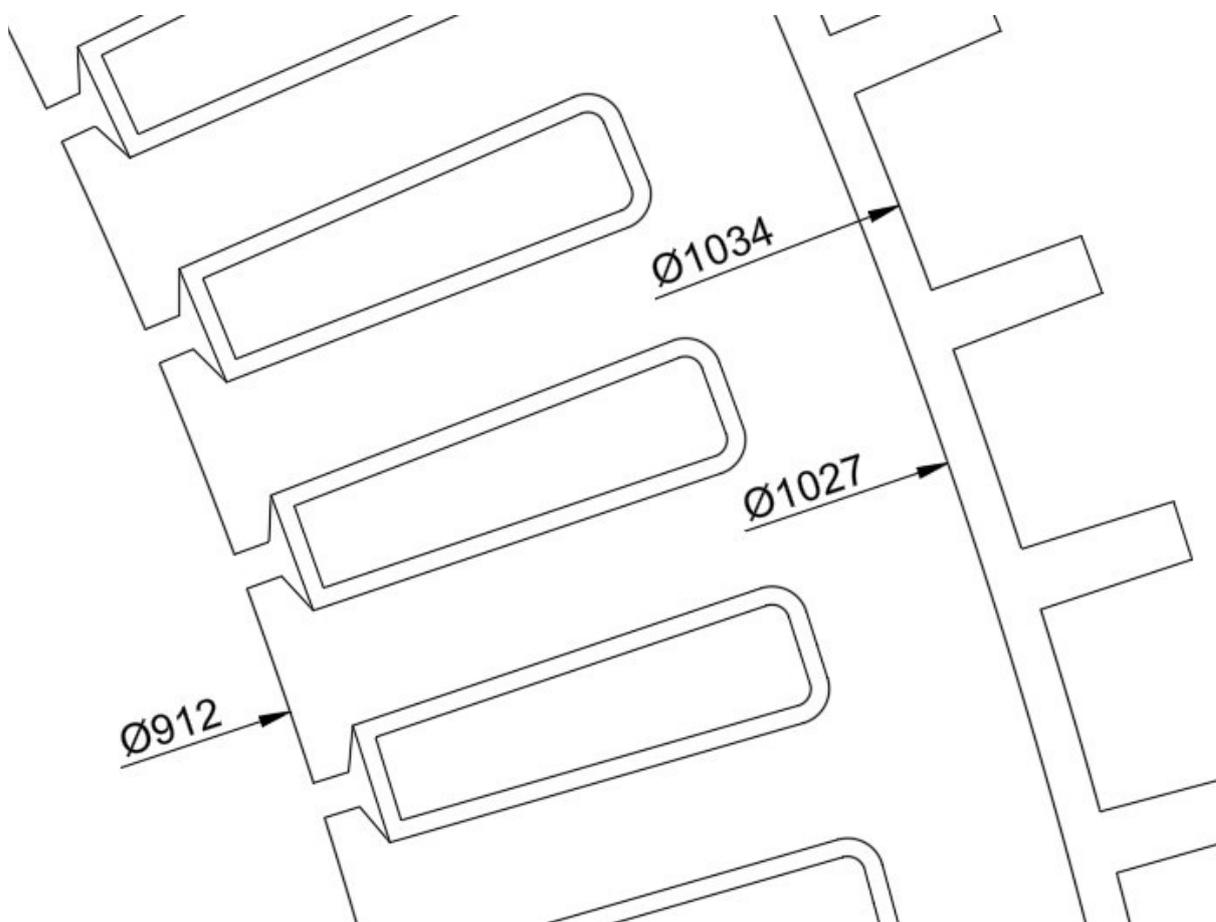


Fonte: Adaptado de Bazzo (2017)

Figura 9 - Gerador elétrico detalhes do dente do estator



Fonte: Adaptado de Bazzo (2017)

**Figura 10 - Gerador elétrico detalhes**

Fonte: Adaptado de Bazzo (2017)

### 3.2 Condições de contorno

A utilização de energia eólica vem sendo cada vez mais aproveitada para a geração de energia. Com o aproveitamento da força gerada pelo vento, transformando energia cinética em energia elétrica. Mas devido os geradores estarem a uma certa altura do chão, a sua manutenção se torna um obstáculo.

Assim reduzir a periodicidade da manutenção, aumentando a vida útil do gerador eólico de forma que não haja influência significativa em seu rendimento. Se não considerarmos as peças que se desgastam devido ao uso a vida útil da máquina

elétrica é determinada pelo material isolante. A classe do isolante é definida entre 105 °C (classe A) e 180 °C (classe H). E como foi dito o aumento para 10 °C da temperatura definida como máxima pelo isolante reduzirá a vida útil pela metade.

As principais características adotadas como isolante, temperatura ambiente, temperatura máxima, estão listadas na Tabela 5.

**Tabela 5 - Condições de contorno de temperatura**

Isolante	Classe H (180 °C)
Temperatura ambiente (°C)	40
Temperatura máxima do cobre (°C)	120
Temperatura máxima do gerador (°C)	120

**Fonte: Autoria própria (2014)**

### 3.3 Superfícies estendidas

#### 3.3.1 Aletas

As aletas desempenham um papel fundamental em motores e geradores, pois são responsáveis por otimizar a troca de calor com o ambiente, contribuindo significativamente para o processo de arrefecimento e prolongando a vida útil desses equipamentos. Além disso, ajudam a reduzir a fadiga térmica sobre o isolante, garantindo um funcionamento mais eficiente e confiável ao longo do tempo. E são divididas em dois grupos:

- Aleta plana de seção transversal uniforme;
- Aleta plana de seção transversal não-uniforme.

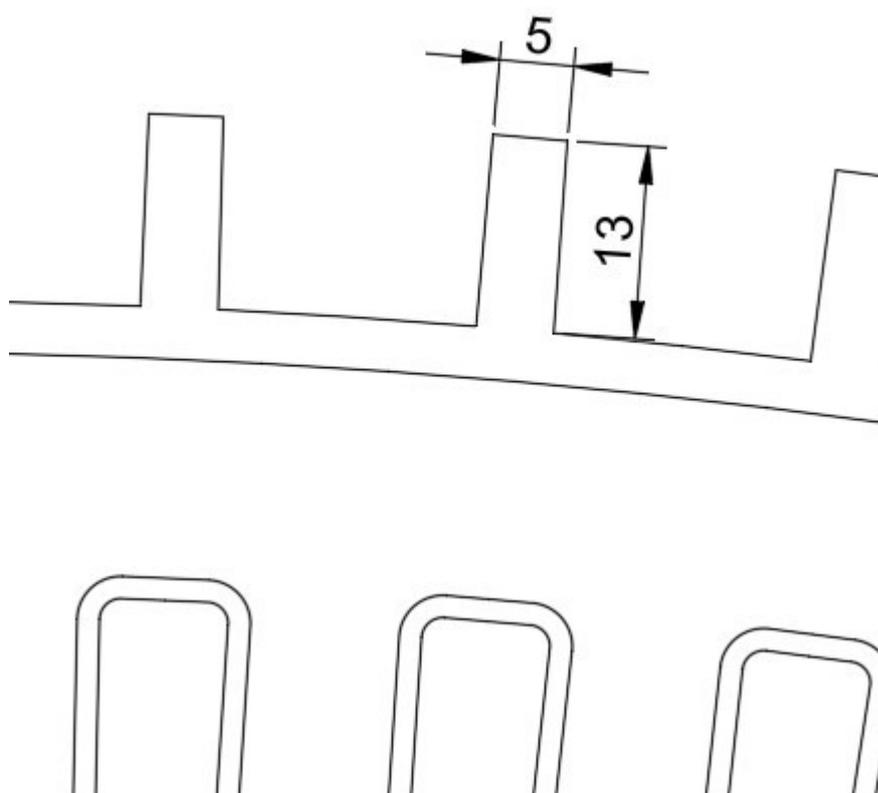
O modelo usado no trabalho de [Bazzo \(2017\)](#) é um aleta retangular uniforme. Com as dimensões utilizadas no modelo G1 na tabela 6, para utilizar a critério de comparação e sua representação está na figura 11.

Tabela 6 - Condições de contorno de temperatura modelo G1

Largura - t (mm)	5
Comprimento - L (mm)	13
Número de aletas	144
Espessura - (mm)	131,99

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 11 - Dimensão aleta retangular modelo G1



Fonte: Adaptado de Bazzo (2017)

### 3.3.1.1 Aleta retangular

Para a aleta retangular a dimensão alterada será o comprimento, assim gerando uma área molhada maior para a transferência de calor, as dimensões estão na tabela 7

**Tabela 7 - Dimensões de comprimento retangular**

<b>Modelo – 1 (mm)</b>	20
<b>Modelo – 2 (mm)</b>	30
<b>Modelo – 3 (mm)</b>	50

Fonte: Autoria própria (2024)

### 3.3.1.2 Aleta triangular

Para a aleta triangular a dimensão alterada também será o comprimento assim como a aleta retangular. As dimensões estão na tabela 8

**Tabela 8 - Dimensões de comprimento aleta triangular**

<b>Modelo – 4 (mm)</b>	13
<b>Modelo – 5 (mm)</b>	20
<b>Modelo – 6 (mm)</b>	30

Fonte: Autoria própria (2024)

### 3.3.2 Matriz Tubular

Além das aletas para realizar o arrefecimento, também é possível utilizar matrizes tubulares também conhecido como feixe de tubos na parte externa do carter. Sendo caracterização em duas formas.

- Arranjo alinhado;
- Arranjo Alternado.

### 3.3.2.1 Matriz tubular alinhado

Na tabela 9 estão listadas as dimensões utilizadas na matriz tubular alinhada. Será estabelecida uma matriz com 5 a 6 colunas, com espaçamento  $S_L$  em 22 mm, e com um diâmetro  $D$  de 17 mm. A variável a ser modificada será o comprimento dos tubos na matriz.

**Tabela 9 - Dimensões da geometria do trocador de calor de matriz tubular alinhado**

	<b>Comprimento (mm)</b>	<b>Diâmetro – D (mm)</b>	<b><math>S_L/D</math></b>
<b>Modelo – 7</b>	13	17	1.3
<b>Modelo – 8</b>	15	17	1.3
<b>Modelo – 9</b>	20	17	1.3

**Fonte: Autoria própria (2024)**

### 3.3.2.2 Matriz tubular alternado

O modelo alternado no formato triangular seguirá com as mesmas dimensões que as modelo alinhado, assim demonstrado na tabela 10. E com o número de colunas também será entre 5 e 6.

**Tabela 10 - Dimensões da geometria do trocador de calor de matriz tubular alternada**

	<b>Comprimento (mm)</b>	<b>Diâmetro – D (mm)</b>	<b><math>S_L/D</math></b>
<b>Modelo – 10</b>	13	17	1.3
<b>Modelo – 11</b>	15	17	1.3
<b>Modelo – 12</b>	20	17	1.3

**Fonte: Autoria própria (2024)**

## **4 RESULTADOS OBTIDOS**

### **4.1 Estudo de convergência de malha**

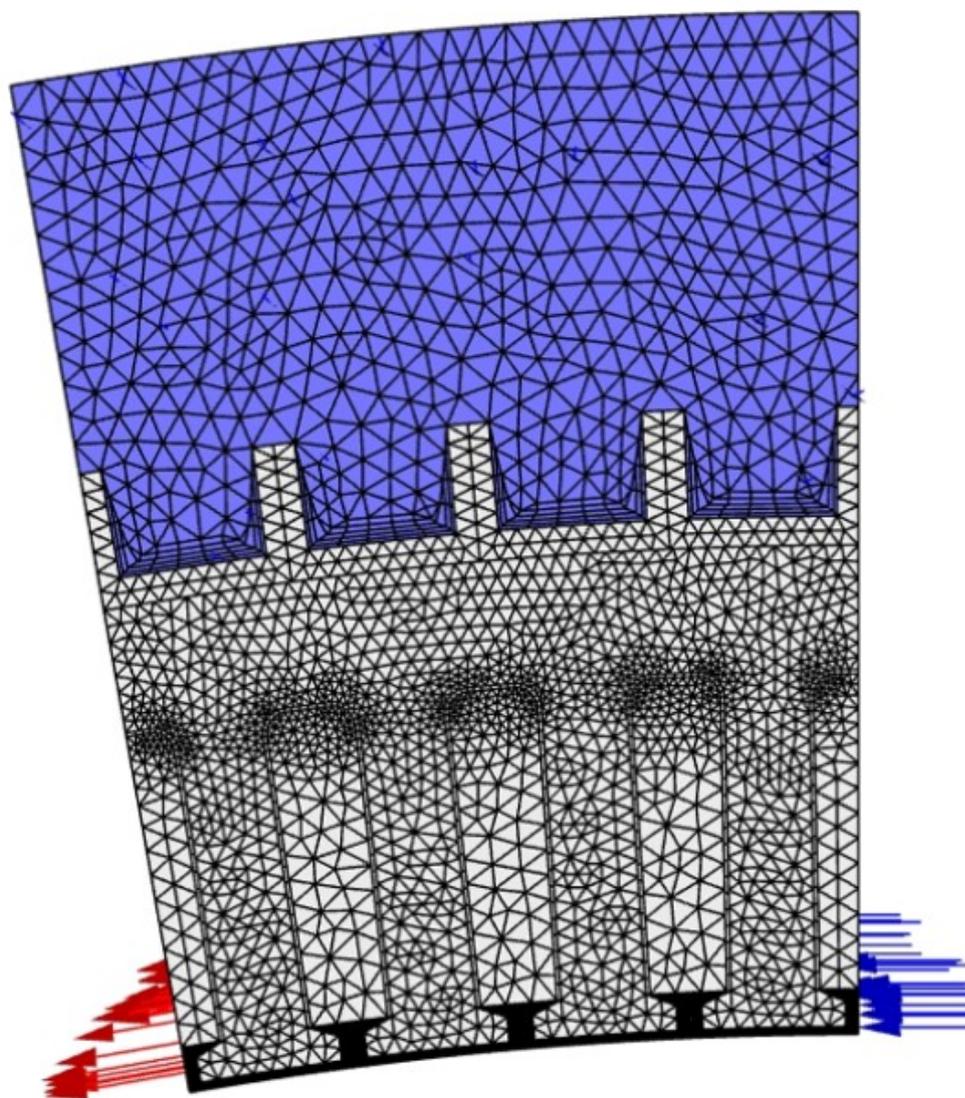
Foi feito um estudo de convergência para determinar se a malha utilizada na análise foi ideal ao caso estudado. Para cada geometria foram feitas 3 malhas para o estudo de convergência.

#### **4.1.1 Aleta retangular**

As simulações feitas na aleta retangular uniforme foram feitas utilizando a malha ilustrado na figura 12, variando a altura da aleta.

As malhas 1 a 3 representam a aleta retangular de 13 de milímetro de comprimento, e essas malhas estão presentes nas tabelas 11 a 13 que foram simuladas para comparar com o feito por Bazzo (2017) para ver o efeito do rotor no arrefecimento do gerador eólico de ímã permanentes.

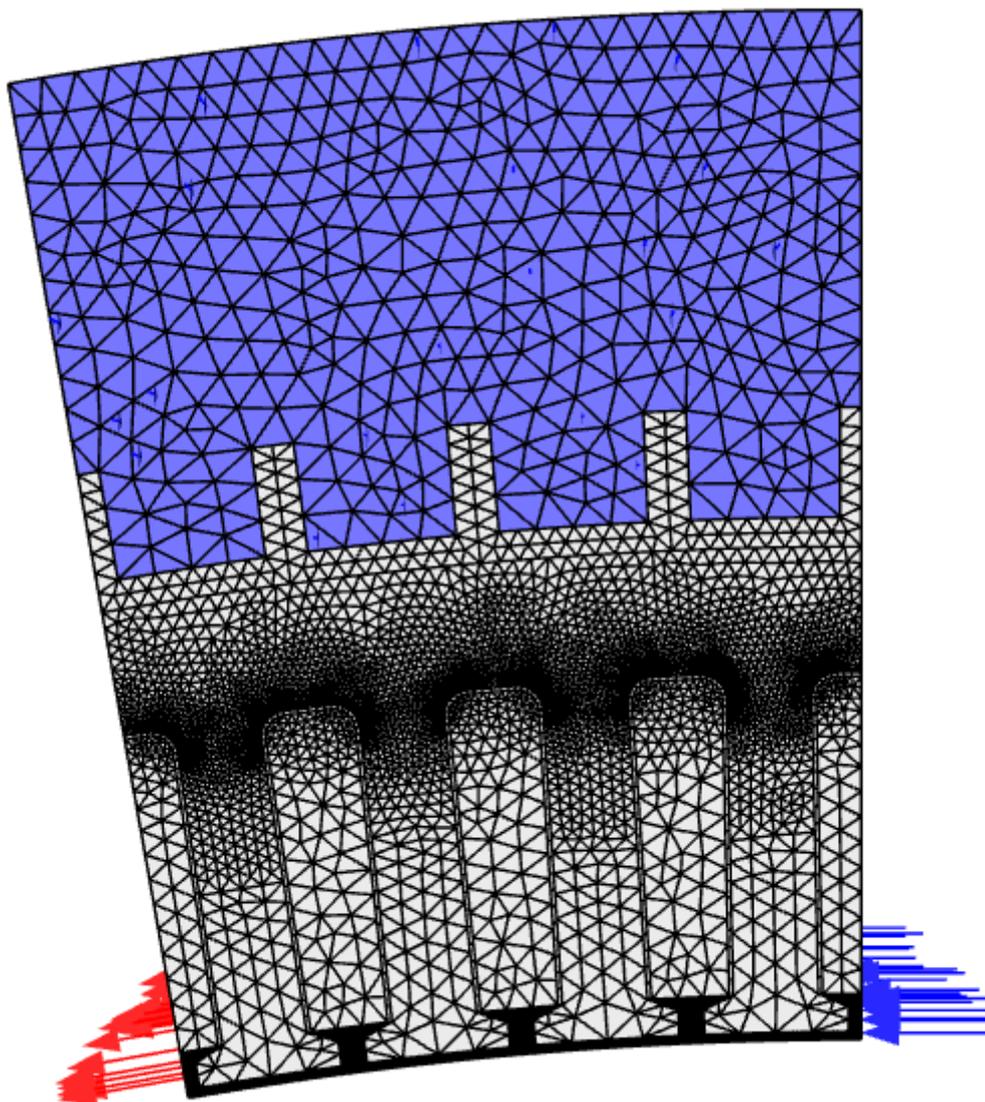
Figura 12 - Representação malha 1



Fonte: Autoria própria (2024)

A figura 13 é a representação esquemática das malhas 2 e 3 com variação no comprimento da aleta, refinamento da superfície do estator e também do tamanho do elemento presente no escoamento externo.

**Figura 13 - Representação malha 2 e 3**



**Fonte: Autoria própria (2024)**

**Tabela 11 - Malha (1) para a aleta retangular de diferentes comprimentos**

Comprimento (mm)	Nós	Elementos	Tempo	Nº de iterações
13	213366	794993	0:52:02	-
20	244972	910462	0:56:51,54	870
30	250157	91870	-	874
50	267123	973542	1:17:43,37	867

Fonte: Aatoria própria (2024)

**Tabela 12 - Malha (2) para a aleta retangular de diferentes comprimentos**

Comprimento (mm)	Nós	Elementos	Tempo	Nº de iterações
13	249374	94374	0:55:39,99	868
20	249855	934285	1:02:36,07	874
30	255040	942793	-	873
50	267972	9755972	0:59:56,79	868

Fonte: Aatoria própria (2024)

**Tabela 13 - Malha (3) para a aleta retangular de diferentes comprimentos**

Comprimento (mm)	Nós	Elementos	Tempo	Nº de iterações
13	260175	992378	1:03:33,43	868
20	268306	1026923	-	199
30	273491	1035431	1:02:22,86	875
50	278895	1028895	1:02:53,75	870

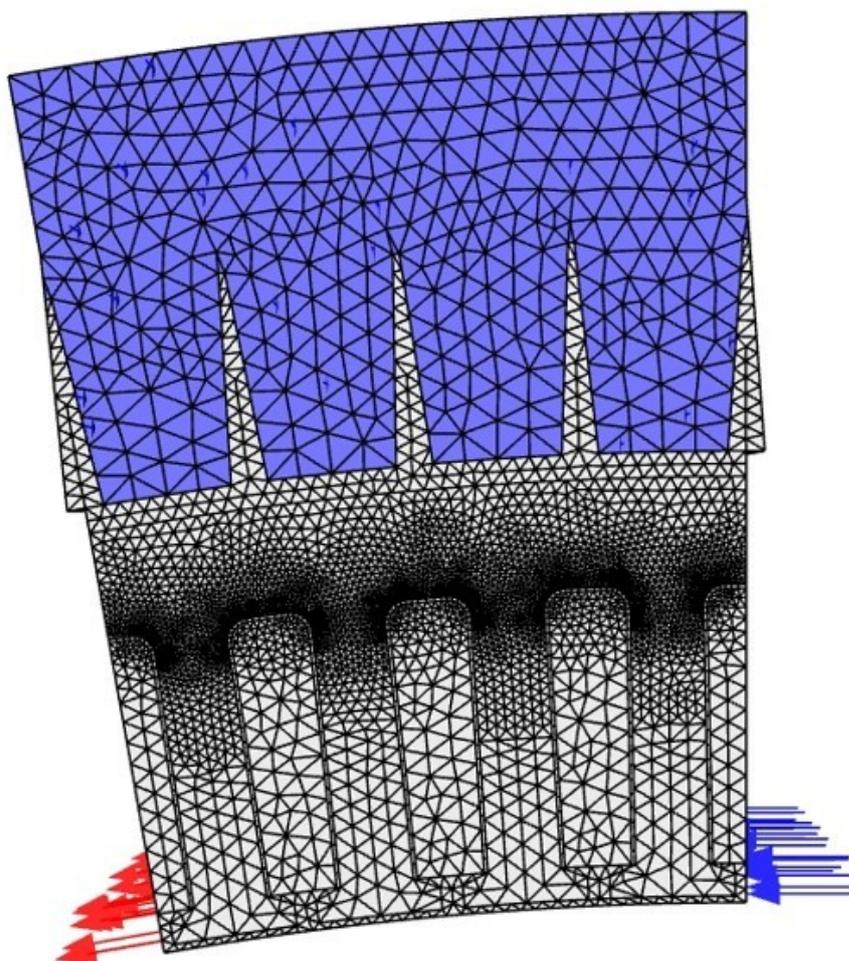
Fonte: Aatoria própria (2024)

#### 4.1.2 Aleta triangular

As figuras 14 e 16 são representações esquemáticas das malhas 4, 5 e 6 com variação no tamanho do elemento do escoamento externo. E comprimento da aleta.

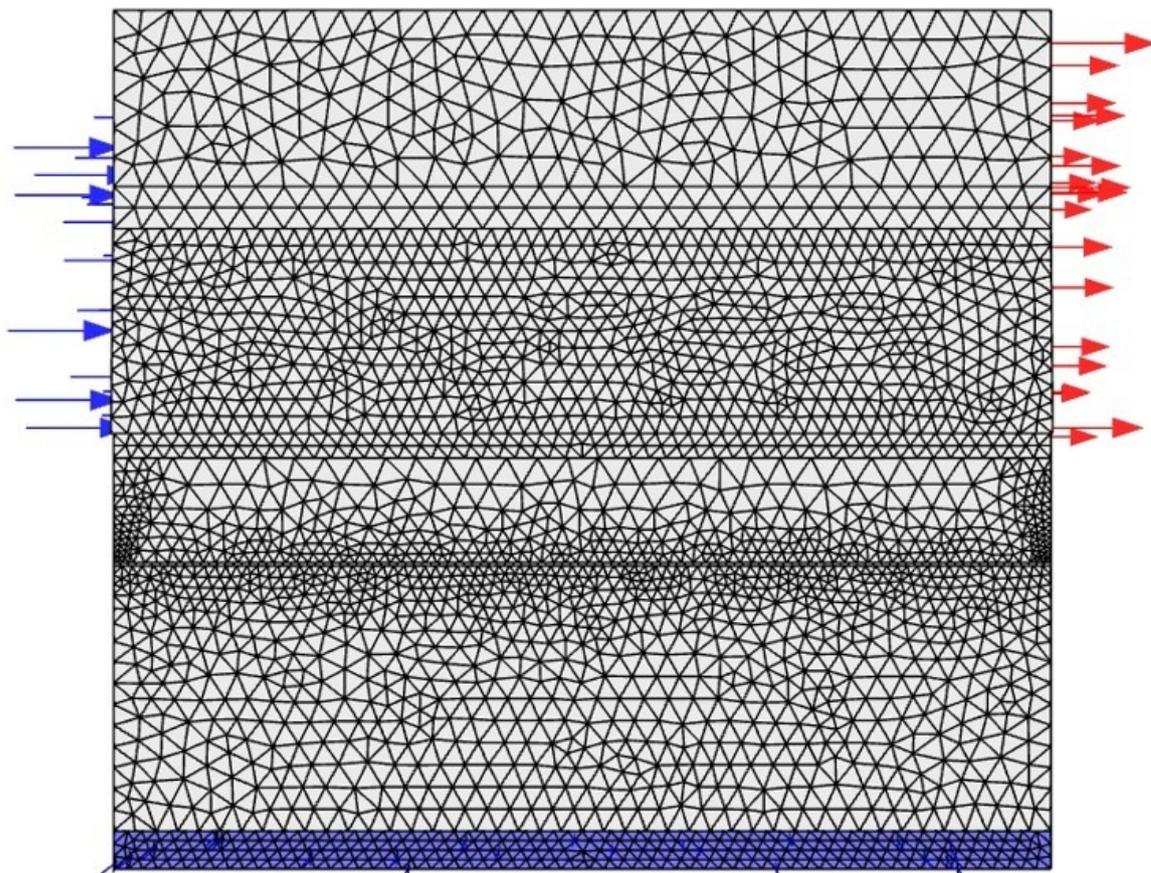
O grau de afinamento da aleta foi mantido como constante.

**Figura 14 - Representação da malha da aleta triangular vista frontal**



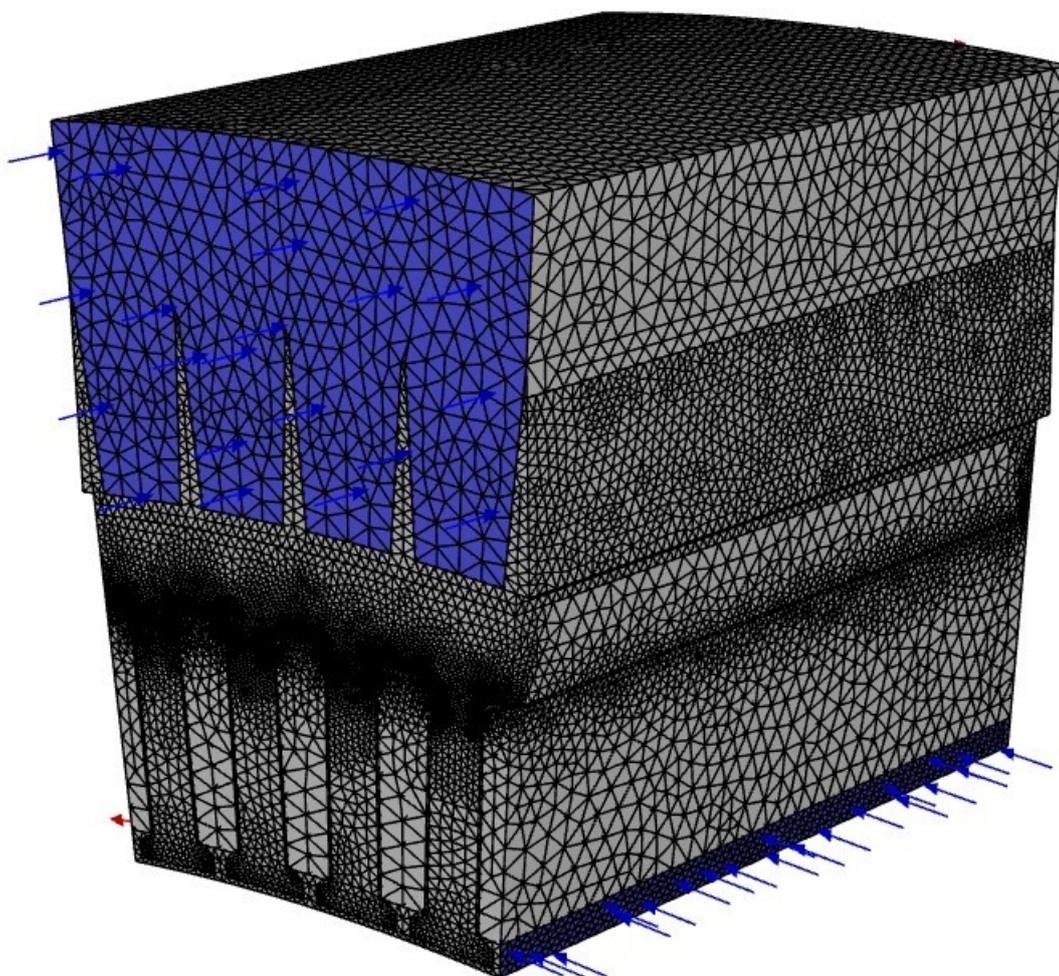
Fonte: Aatoria própria (2024)

**Figura 15 - Representação da malha da aleta triangular vista lateral**



Fonte: Autoria própria (2024)

**Figura 16 - Representação da malha da aleta triangular vista isométrica**



**Fonte: Aatoria própria (2024)**

Nas figuras 14 a 16 o fluxo de ar nas aletas tubulares no formato triangular é representado pelas flechas azuis na parte superior. E o fluxo de saída de ar é representado pelas flechas vermelhas. A parte azul inferior das figuras 14 e 16 é a entrada do fluxo de ar simulando o movimento do rotor.

**Tabela 14 - Malha (4) para a aleta triangular de diferentes comprimentos**

Comprimento (mm)	Nós	Elementos	Tempo	Nº de iterações
13	254434	988292	0:54:33,35	868
20	260726	1012790	0:59:02,79	868
30	260960	1033320	0:39:37,85	589

**Fonte: Aatoria própria (2024)**

**Tabela 15 - Malha (5) para a aleta triangular de diferentes comprimentos**

Comprimento (mm)	Nós	Elementos	Tempo	Nº de iterações
13	259448	1009000	0:56:27,57	865
20	265385	1032711	0:57:04,01	868
30	263688	1046767	0:39:17,24	589

**Fonte: Aatoria própria (2024)**

**Tabela 16 - Malha (6) para a aleta triangular de diferentes comprimentos**

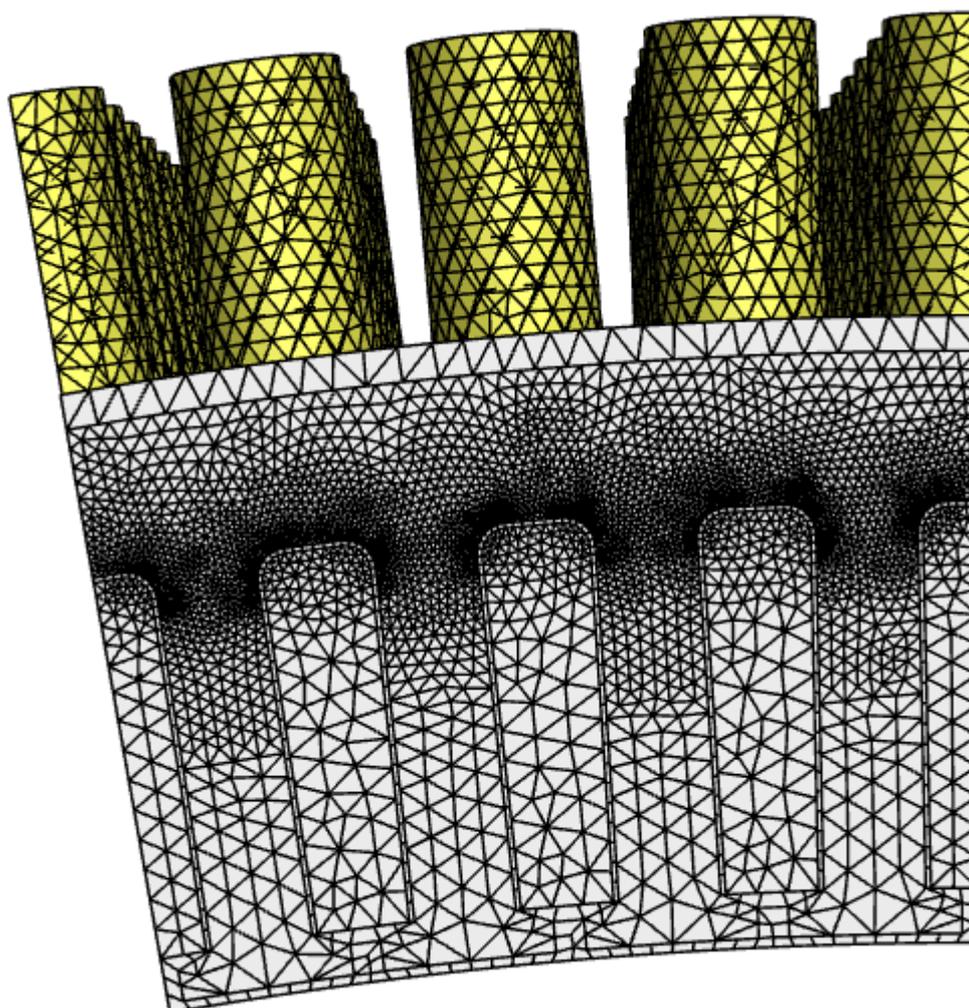
Comprimento (mm)	Nós	Elementos	Tempo	Nº de iterações
13	267481	1044048	-	868
20	-	-	-	-
30	-	-	-	-

**Fonte: Aatoria própria (2024)**

#### 4.1.3 Trocador de calor no formato matriz tubular modelo alinhado

As figuras 17 e 18 são representações esquemáticas das malhas e 7 a 9 presentes nas tabelas 17 a 19 com variação no comprimento da matriz tubular e o tamanho do elemento do escoamento externo.

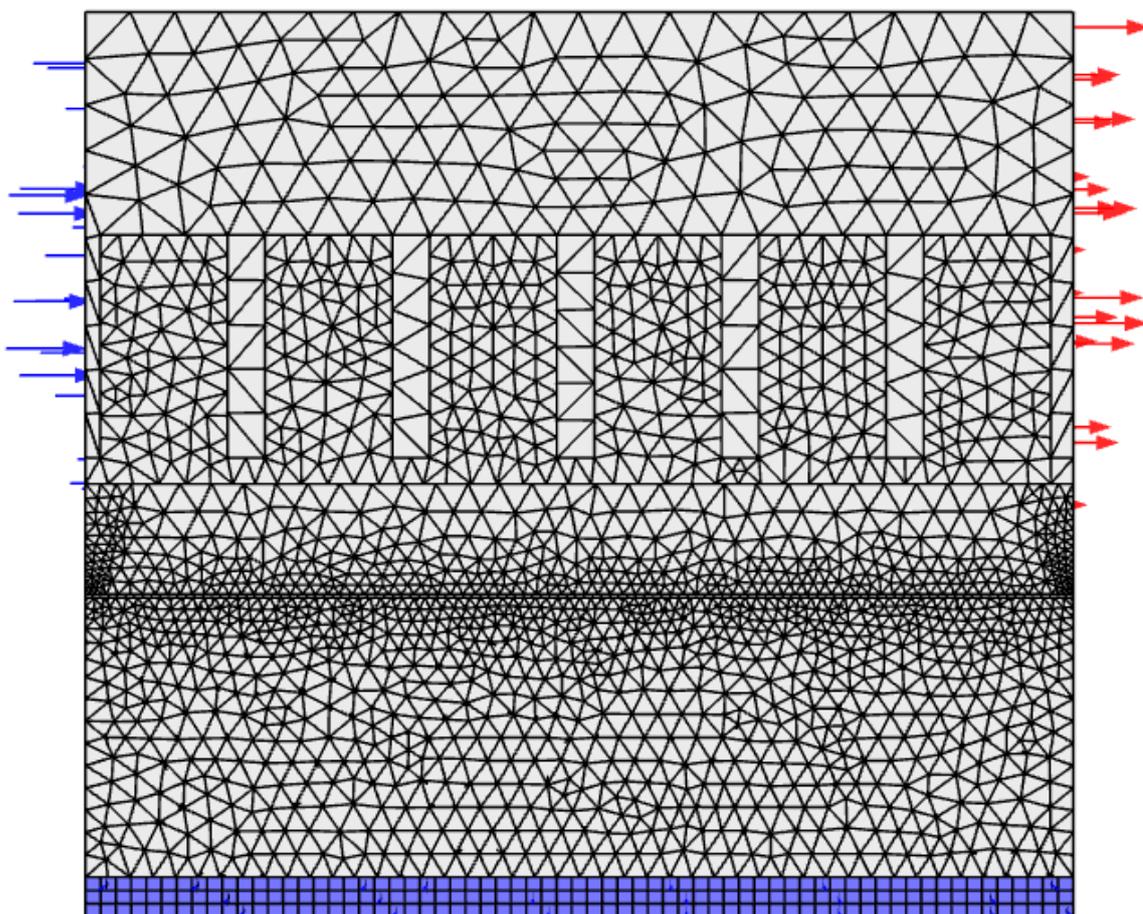
**Figura 17 - Representação da malha da matriz tubular modelo alinhado vista frontal**



Fonte: Autoria própria (2024)

Na figura 18 o fluxo de ar de entrada nos trocadores de calor no formato de matriz tubular é representado pelas flechas azuis. E o fluxo de saída de ar é representado pelas flechas vermelhas. A parte azul inferior da figura 18 é a entrada do fluxo de ar simulando o movimento do rotor.

**Figura 18 - Representação da malha da matriz tubular modelo alinhado vista lateral**



Fonte: Aatoria própria (2024)

**Tabela 17 - Malha (7) para a trocador de calor no formato de matriz tubular no modelo alinhado de diferentes comprimentos**

Comprimento (mm)	Nós	Elementos	Tempo	Nº de iterações
13	279228	1032514	0:38:19,0	869
15	233420	858397	0:32:19,26	568
20	274865	994293	0:38:11,91	868

**Fonte: Aatoria própria (2024)**

**Tabela 18 - Malha (8) para a trocador de calor no formato de matriz tubular no modelo alinhado de diferentes comprimentos**

Comprimento (mm)	Nós	Elementos	Tempo	Nº de iterações
13	265887	969607	0:34:18,60	868
15	254742	899781	0:32:19,86	868
20	254737	967882	0:33:12,71	868

**Fonte: Aatoria própria (2024)**

**Tabela 19 - Malha (9) para a trocador de calor no formato de matriz tubular no modelo alinhado de diferentes comprimentos**

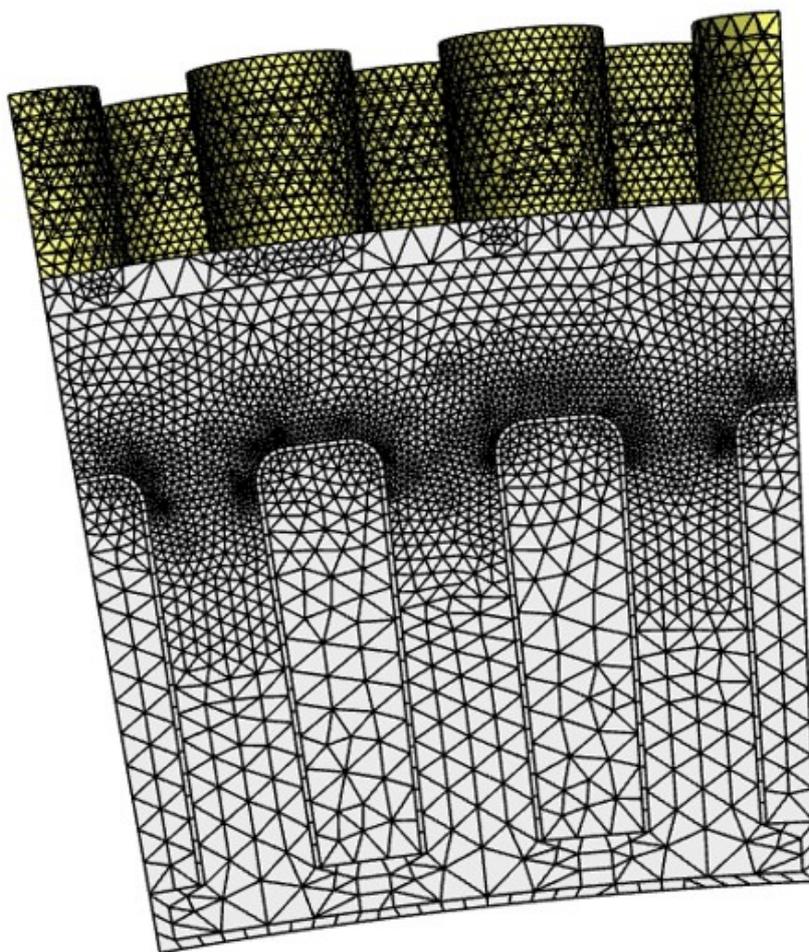
Comprimento (mm)	Nós	Elementos	Tempo	Nº de iterações
13	267445	974202	0:33:07,94	868
15	281795	1039796	0:38:52:56	868
20	255650	973049	0:32:04,69	868

**Fonte: Aatoria própria (2024)**

#### 4.1.4 Trocado de calor no formato de matriz tubular modelo alternado

A figura 19 é a representação esquemática da malha 10 com variação no comprimento da matriz tubular.

**Figura 19** - Representação da malha da matriz tubular modelo alternado vista frontal



Fonte: Autoria própria (2024)

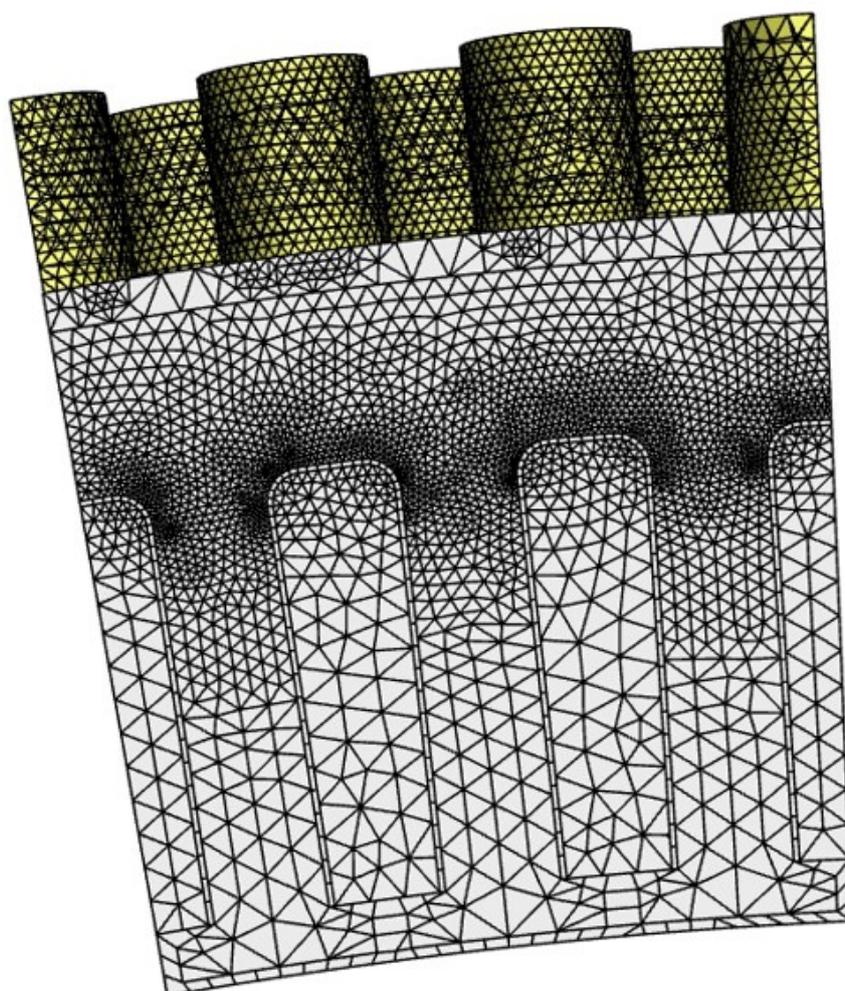
**Tabela 20 - Malha (10) para a trocador de calor no formato de matriz tubular no modelo alternado de diferentes comprimentos**

Comprimento (mm)	Nós	Elementos	Tempo	Nº de iterações
13	185920	704141	0:04:47,27	126
15	238082	950699	1:15:38,45	1040
20	244776	979577	1:23:52,75	1040

Fonte: Autoria própria (2024)

A figura 20 é a representação esquemática da malha 11 também apenas variando o comprimento da matriz tubular.

**Figura 20 - Representação da malha da matriz tubular modelo alternado vista frontal**



Fonte: Autoria própria (2024)

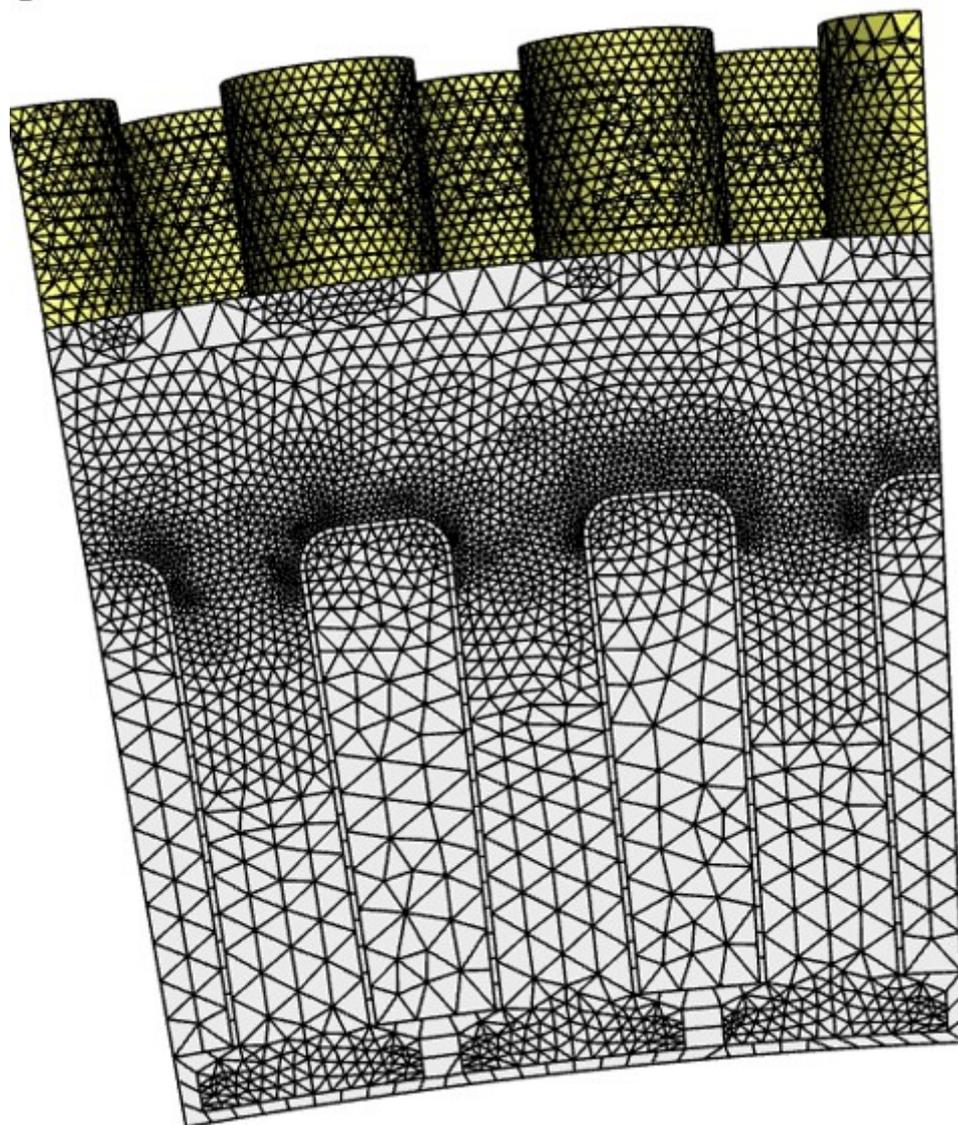
**Tabela 21 - Malha (11) para a trocador de calor no formato de matriz tubular no modelo alternado de diferentes comprimentos**

Comprimento (mm)	Nós	Elementos	Tempo	Nº de iterações
13	205141	778653	0:32:38,36	1047
15	247137	1007430	1:06:19,26	1040
20	250591	1012946	1:31:23,09	1040

**Fonte: Autoria própria (2024)**

As figuras 21 e a representação esquemática das malhas 12 variando seu comprimento

**Figura 21** - Representação da malha da matriz tubular modelo alternado vista frontal



Fonte: Autoria própria (2024)

**Tabela 22** - Malha 12

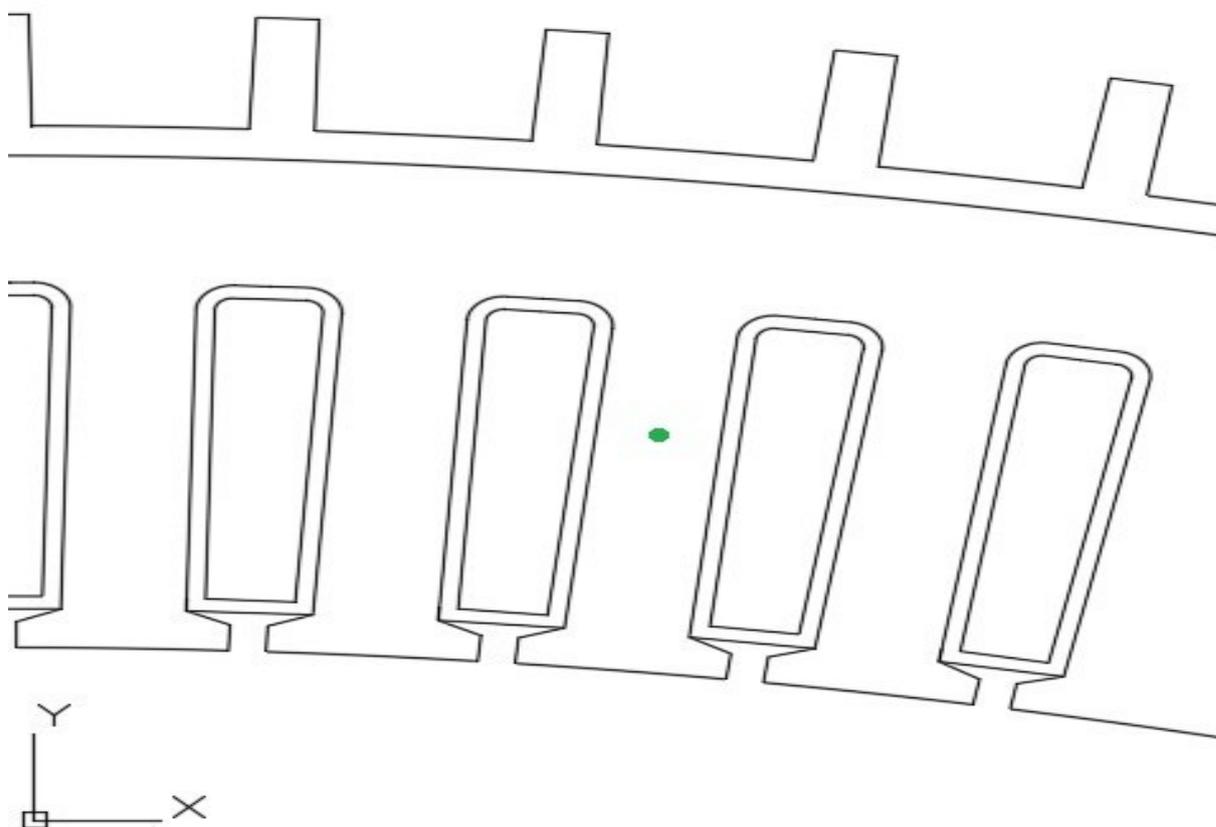
Comprimento (mm)	Nós	Elementos	Tempo	Nº de iterações
13	236125	946101	1:10:11,29	998
15	243309	996221	1:24:38,73	1040
20	253319	1021555	1:25:42,42	1040

Fonte: Autoria própria (2024)

## 4.2 Efeito do rotor sobre o estator

Os gráficos a seguir têm como referência a figura 22. O ponto verde indica o início da extração dos valores de temperatura que se encontra na posição 0 na coordenada Z do plano cartesiano, e uma linha será traçada a partir desse ponto até a posição 131,99 milímetros na coordenada Z do sistema cartesiano.

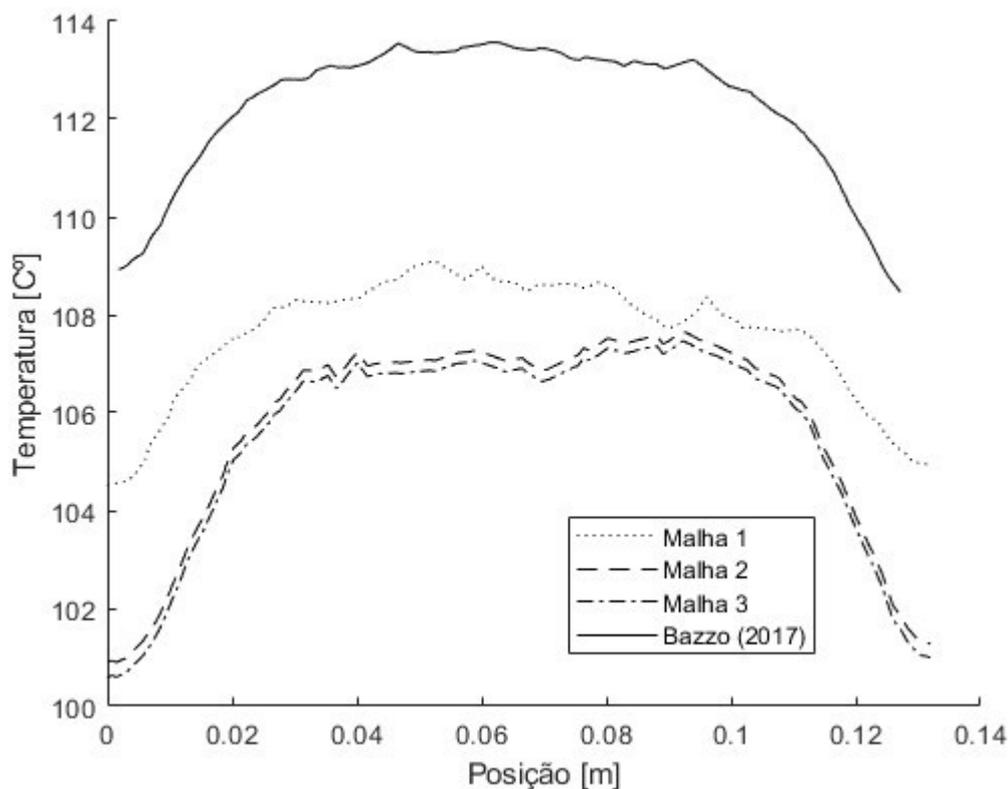
**Figura 22 - Ponto de referência dos valores dos gráficos**



**Fonte: Autoria própria (2024)**

A figura 23 apresenta o efeito do rotor sobre o arrefecimento sobre uma aleta de 13 milímetros.

A aleta retangular uniforme de 13 mm sem o efeito do rotor apresentada na figura 22 demonstra uma temperatura superior as que possuem o efeito do rotor sobre o estator.

**Figura 23 - Gráfico de temperatura com aleta retangular de 13 mm**

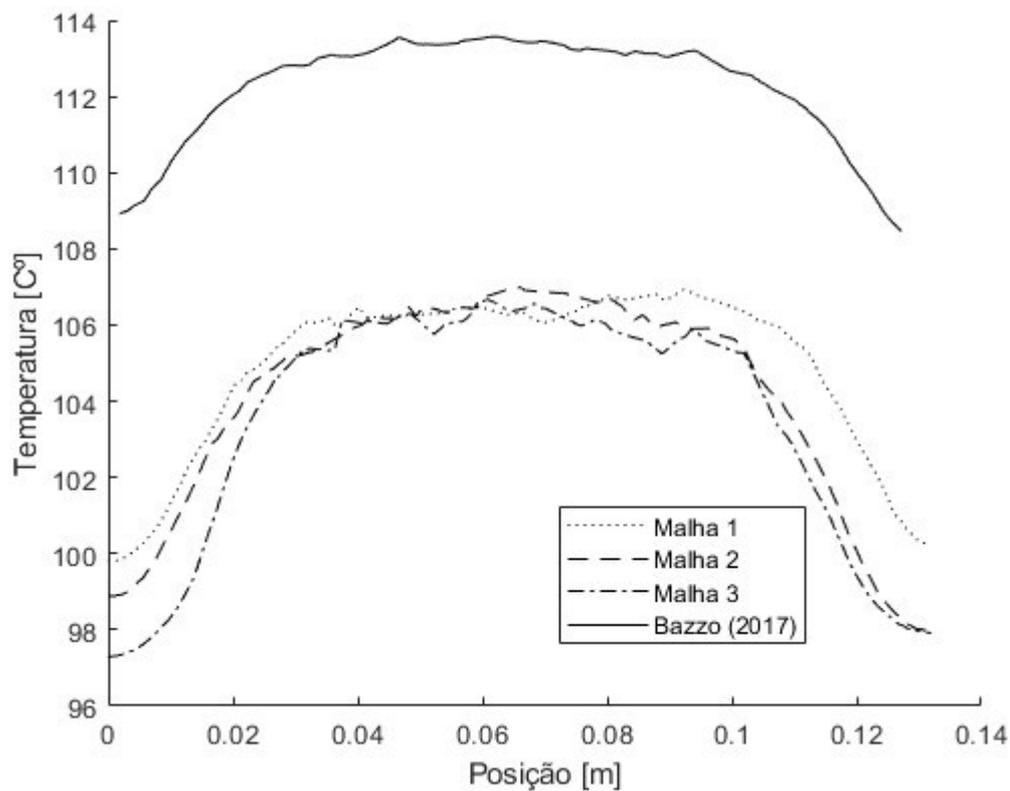
Fonte: Autoria própria (2024)

### 4.3 Comparação de temperatura com diferentes malhas

A temperatura ao longo do estator presente nos gráficos das figuras 24 a 34 demonstra uma comparação entre as malhas apresentadas nas tabelas 11 a 22. E para todos os gráficos a aleta com 13 mm de comprimento e sem o efeito do rotor será apresentada como o modelo de Bazzo (2017) nos gráficos apresentados nas figuras 24 e 25.

A figura 24 apresenta uma grande redução, utilizando da aleta retangular uniforme de 20 mm de comprimento, chegando a ficar abaixo de 100 °C.

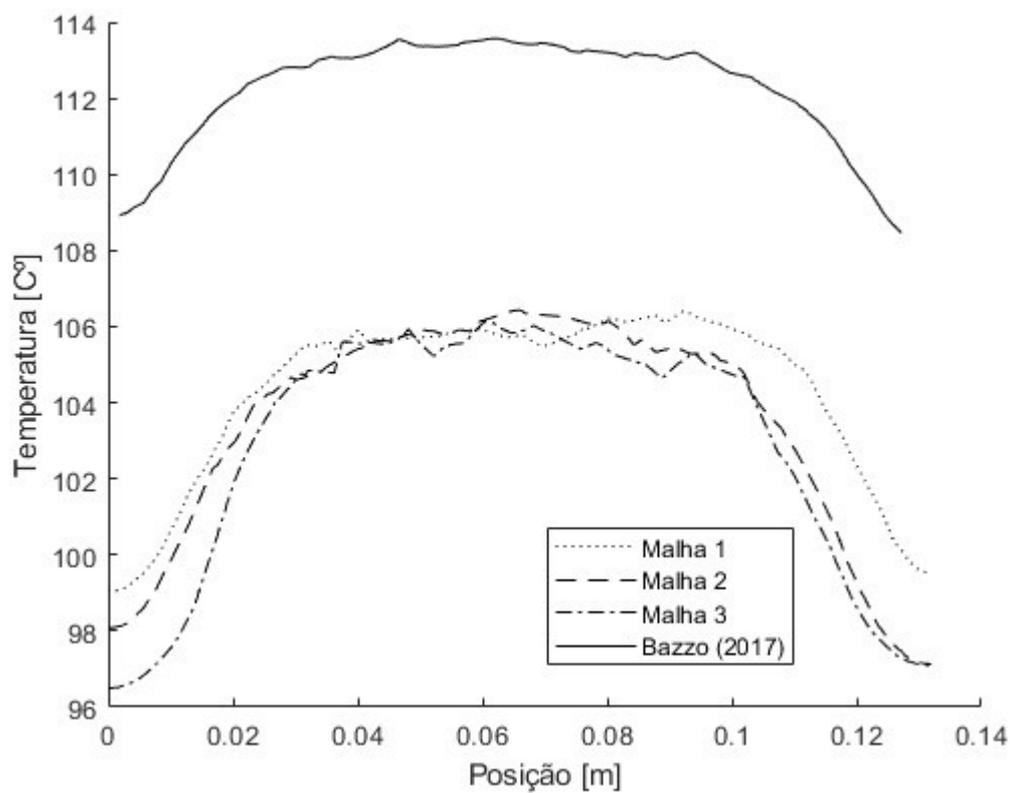
Figura 24 - Gráfico de temperatura com aleta retangular de 20 mm



Fonte: Autoria própria (2024)

A figura 25 apresenta a comparação com aleta retangular uniforme de 30 mm, também apresenta uma grande redução na temperatura. A malha 3 apresenta uma temperatura inicial abaixo de 100 °C.

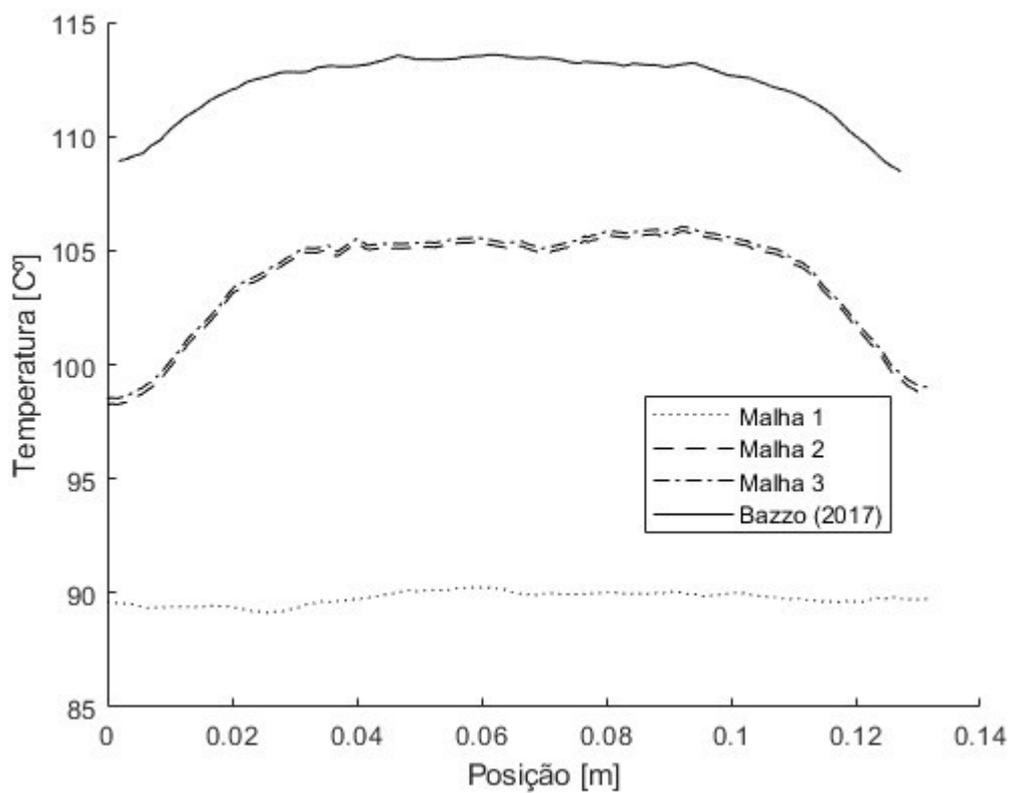
Figura 25 - Gráfico de temperatura com aleta retangular de 30 mm



Fonte: Autoria própria (2024)

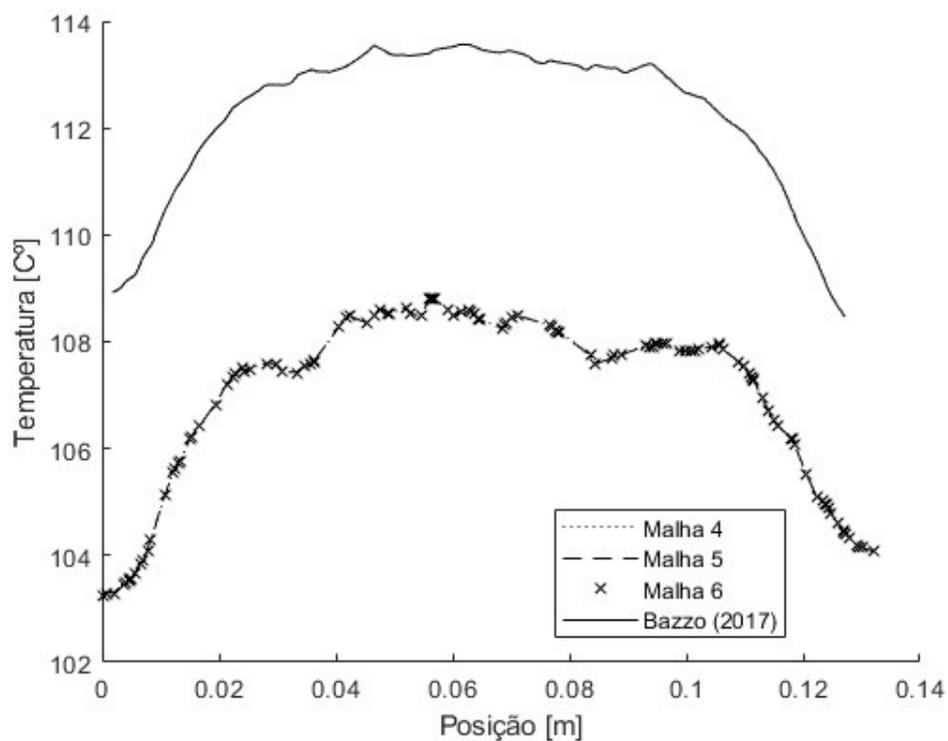
A figura 26 apresenta o estudo de convergência da aleta retangular uniforme de 50 mm de comprimento. E a malha 1 da figura 26 apresentou divergência em relação as outras e será desconsiderada.

As malhas 2 e 3 apresentaram melhora no arrefecimento estando perto de 100 °C.

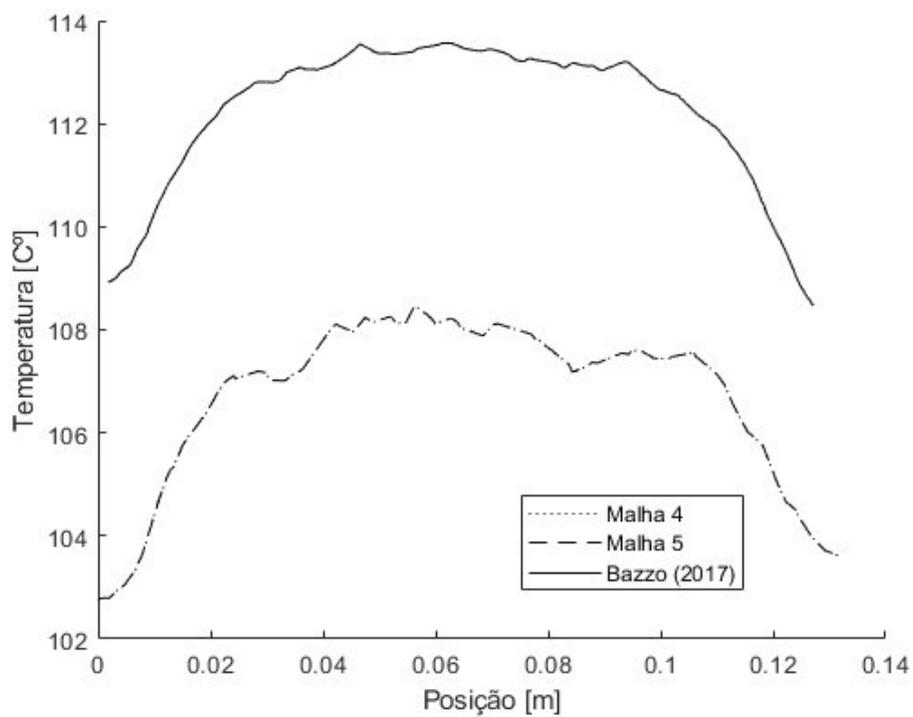
**Figura 26 - Gráfico de temperatura com aleta retangular de 50 mm**

**Fonte: Autoria própria (2024)**

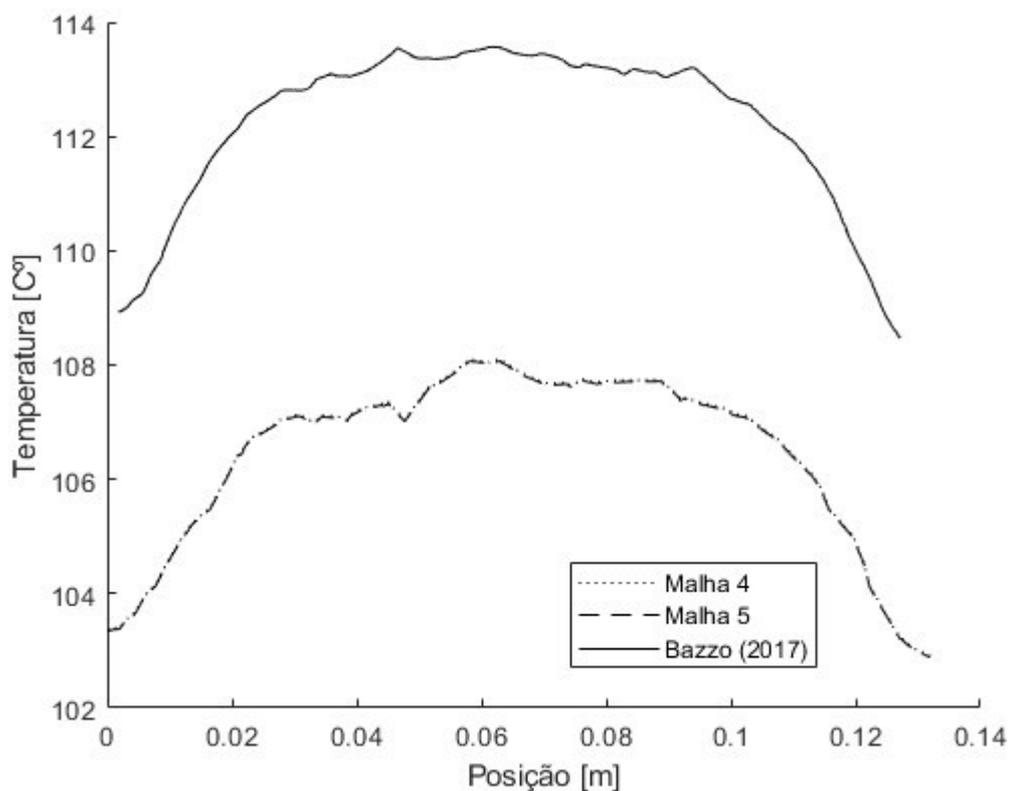
As figuras 27, 28 e 29 apresentam o arrefecimento por uma aleta triangular uniforme de 13 mm, 20 mm e 30 mm de comprimento. E demonstram um resultado diferente do esperado sendo que iria ter uma eficiência maior que a aleta retangular uniforme em relação ao arrefecimento. Assim mesmo aumentado sua área molhada não houve um aumento significativo no arrefecimento de estator.

**Figura 27 - Gráfico de temperatura com aleta triangular de 13 mm**

Fonte: Autoria própria (2024)

**Figura 28 - Gráfico de temperatura com aleta triangular de 20 mm**

Fonte: Autoria própria (2024)

**Figura 29 - Gráfico de temperatura com aleta triangular de 30 mm**

Fonte: Autoria própria (2024)

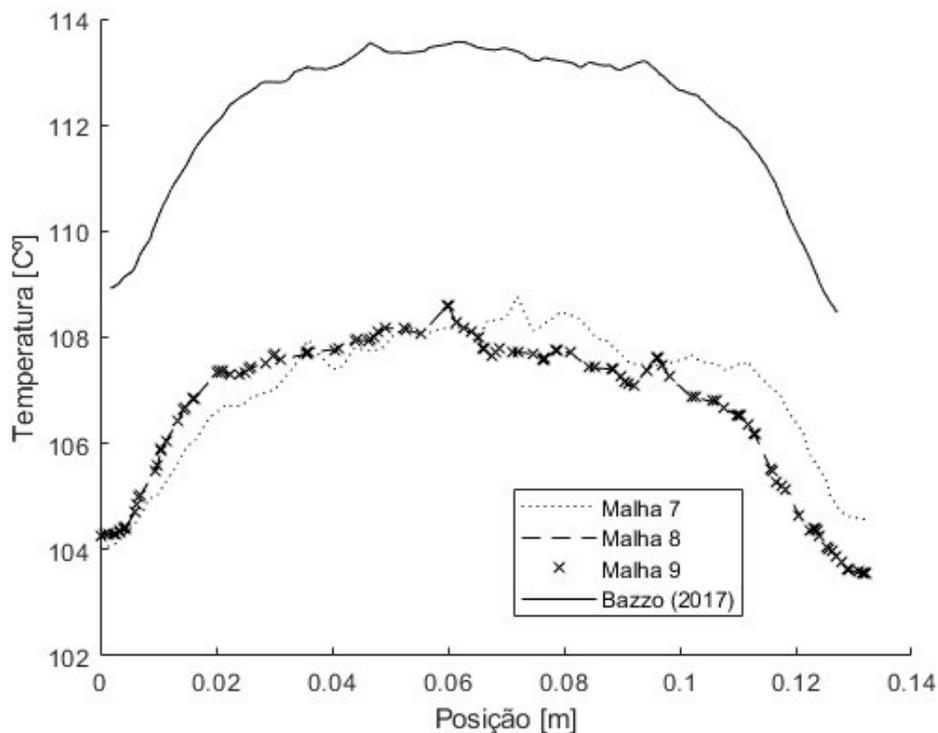
Os gráficos nas figuras 30 e 31 são da temperatura ao longo do estator utilizando uma matriz tubular alinhada ao invés das aletas para o arrefecimento externo.

Também teve um resultado diferente do esperado no qual esse modelo de geometria causa uma turbulência significativa na superfície da carcaça. Mas foi notado uma melhor uniformidade na temperatura ao longo do estator.

A malha 9 da figura 31 será desconsiderada por apresentar divergência em relação as outras malhas.

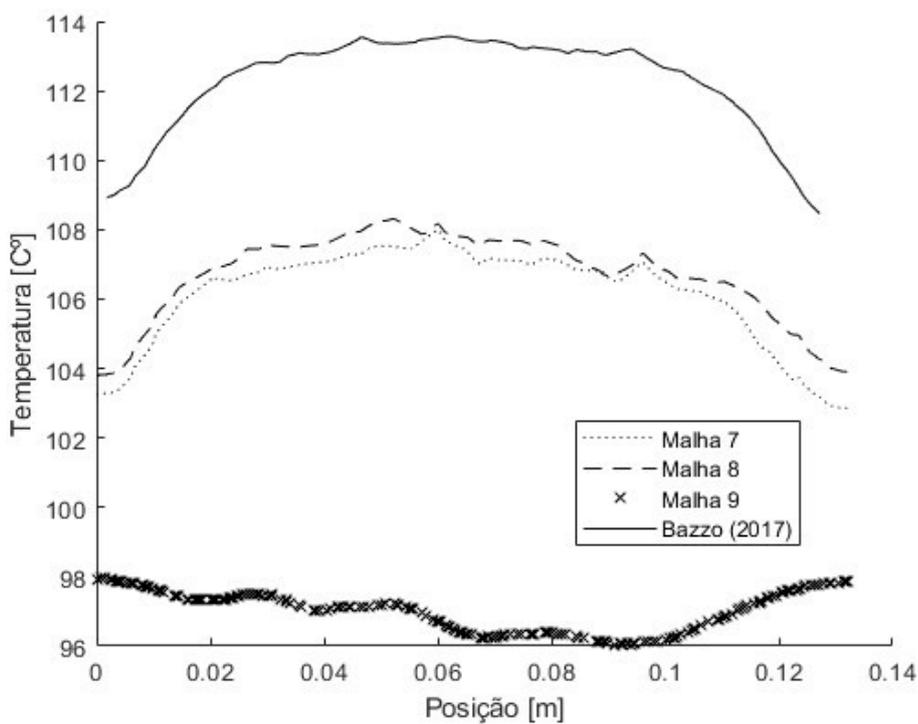
Figura 30 - Gráfico de temperatura com matriz tubular alinhado de 13 mm

Fonte:



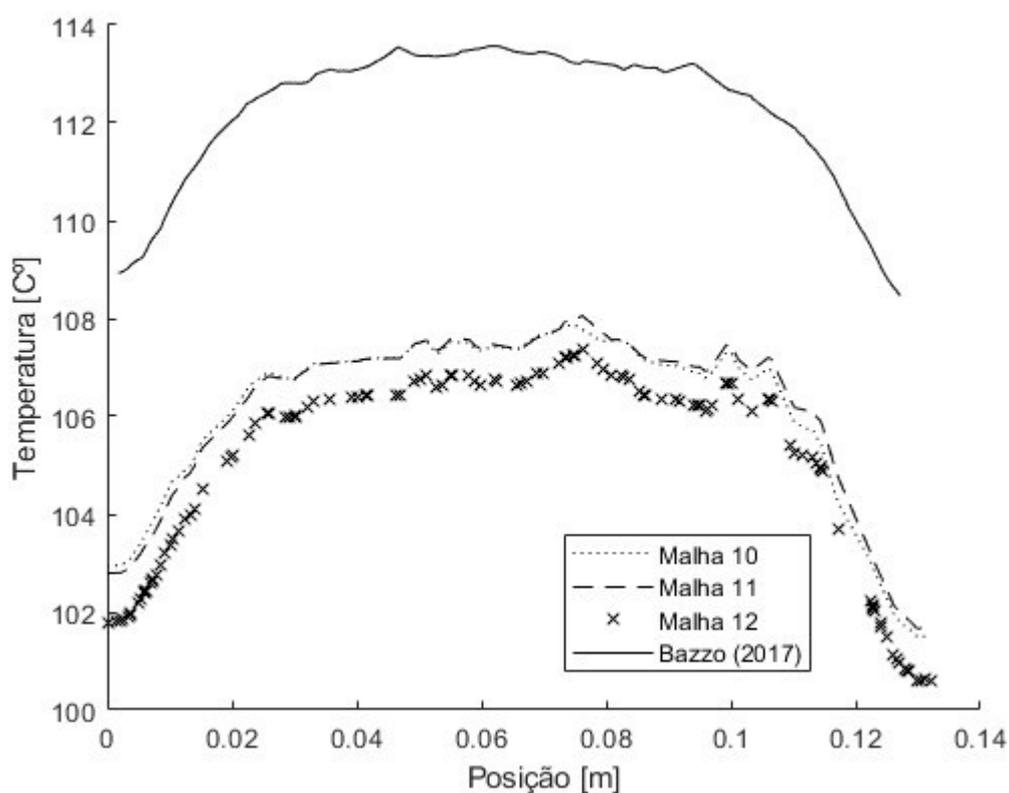
Autoria própria (2024)

Figura 31 - Gráfico de temperatura com matriz tubular alinhado de 20 mm

Fonte:  
Autoria  
própria  
(2024)

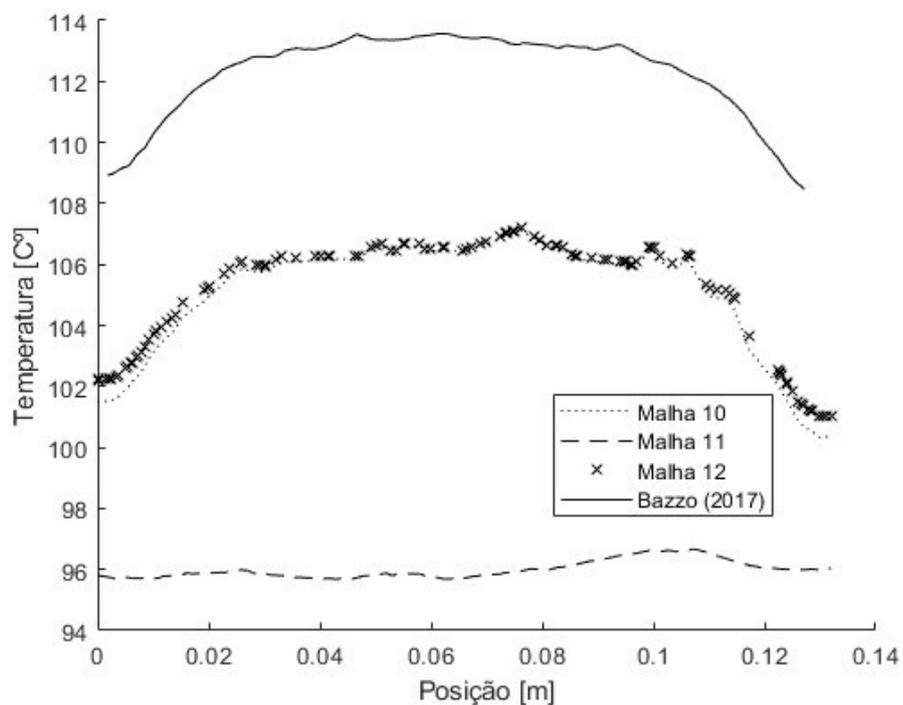
Os gráficos apresentados nas figuras 32 a 34 são da temperatura ao longo do estator utilizando da matriz tubular modelo alternado de 45 com 13 mm, 15 mm e 20 mm comprimento. E apresentaram um resultado melhor que o modelo alternado mas ainda é esperado um resultado melhor que o da aleta retangular uniforme. Mas assim com na matriz tubular alinhada esse modelo apresentou uma melhor uniformidade na temperatura ao longo do estator.

**Figura 32 - Gráfico de temperatura com matriz tubular alternado de 13 mm**

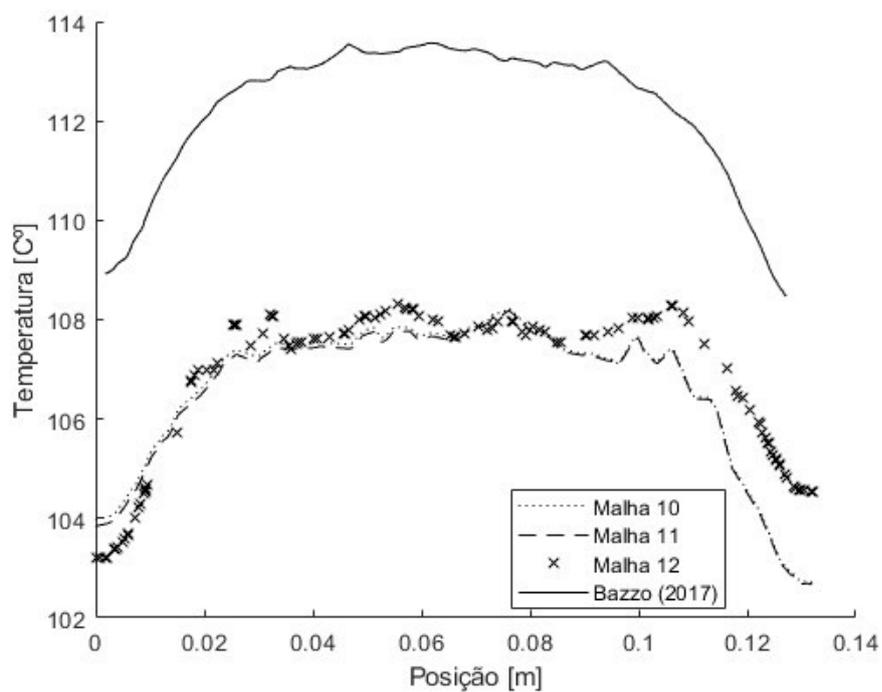


Fonte: Autoria própria (2024)

A malha 11 da figura 33 será desconsiderada por apresentar divergência em relação aos outros resultados.

**Figura 33 - Gráfico de temperatura com matriz tubular alternado de 15 mm**

Fonte: Autoria própria (2024)

**Figura 34 - Gráfico de temperatura com matriz tubular alternado de 20 mm**

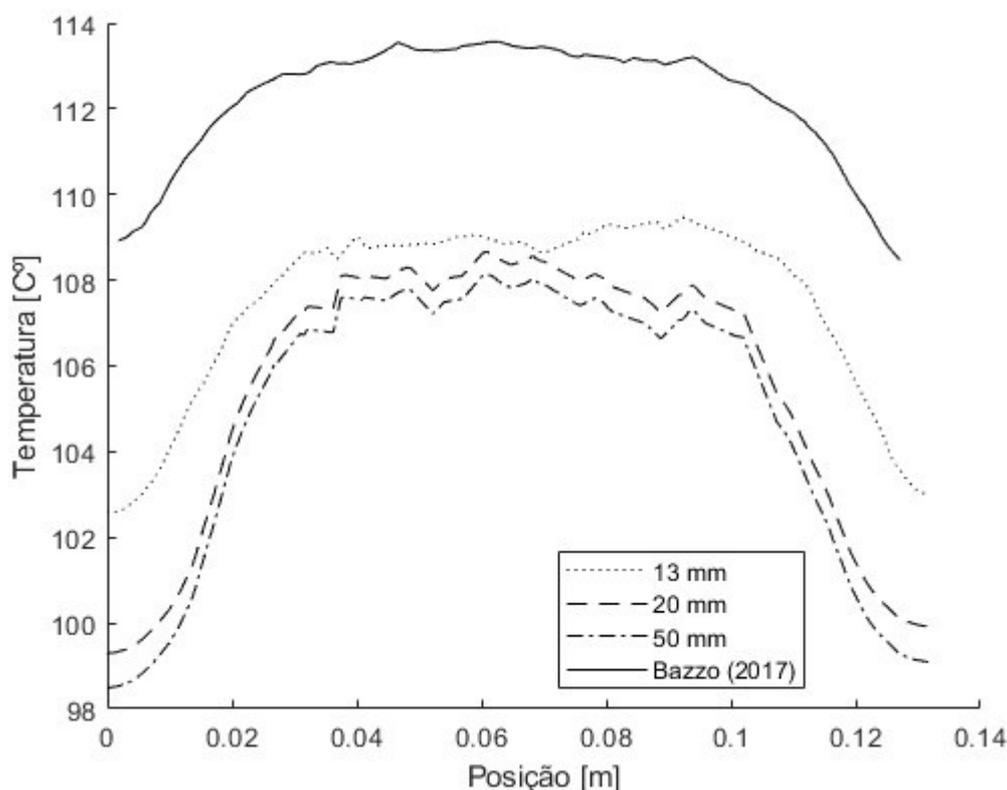
Fonte: Autoria própria (2024)

#### 4.4 Comparação de temperatura entre altura das geometrias

A figura 35 apresenta uma comparação entre os diferentes tamanhos da aleta retangular uniforme. Como era esperado a aleta com 50 mm de comprimento apresentou uma eficiência melhor em relação aos outros tamanhos.

E comparando com o modelo de Bazzo (2017), apresentou uma significativa redução de temperatura.

Figura 35 - Gráfico de temperatura ao longo do estator com aleta retangular uniforme.

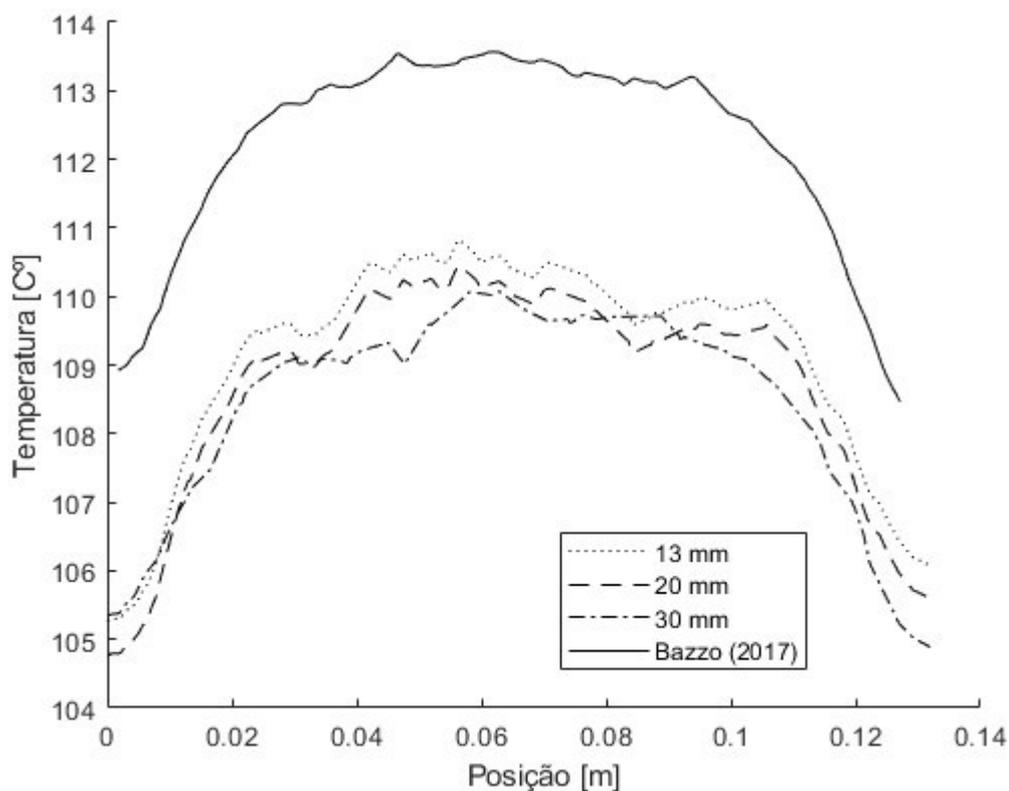


Fonte: Autoria própria (2024)

A figura 36 apresenta a comparação dos diferentes tamanhos da aleta triangular uniforme, E mesmo com diferentes tamanhos e diferentes áreas molhadas os resultados ficaram muito próximos um dos outros.

E comparando com o modelo de Bazzo (2017), apresentou uma boa redução na temperatura.

Figura 36 - Gráfico de temperatura ao longo do estator com aleta triangular uniforme.

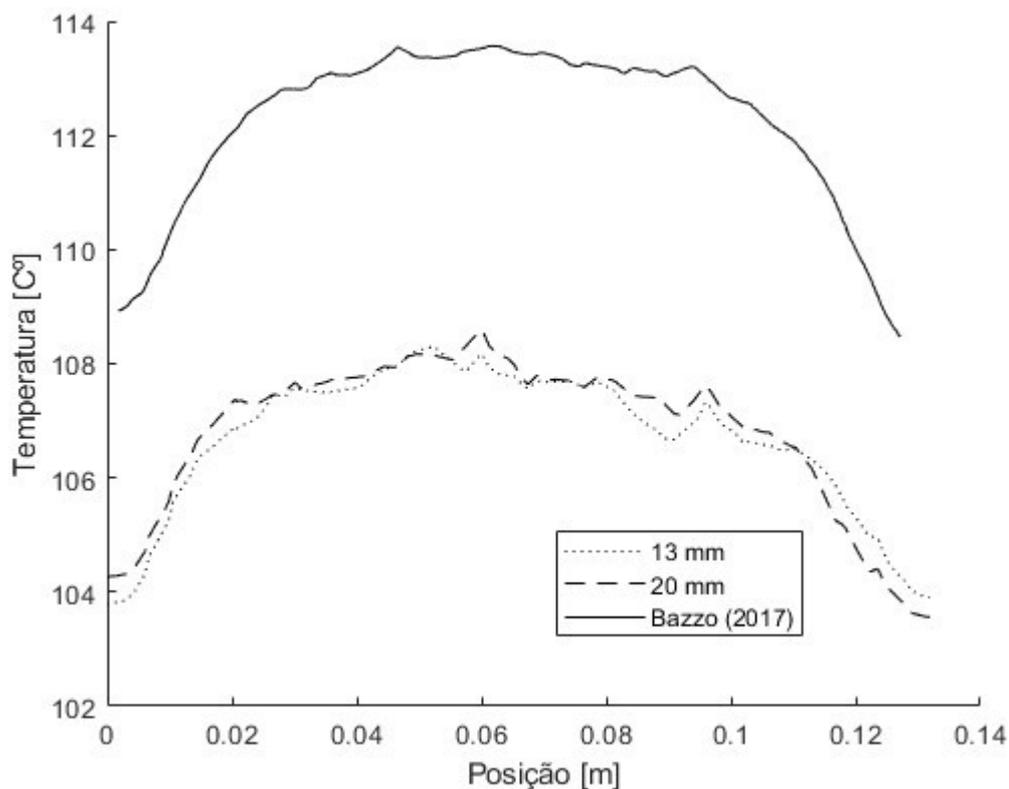


Fonte: Autoria própria (2024)

O gráfico apresentado na figura 37 apresenta a temperatura ao longo do estator utilizando a matriz tubular modelo alinhado na carcaça com comprimentos de 13 mm e 20 mm.

Comparando com o modelo original, assim como na aleta triangular apresentou uma boa redução na temperatura mas a matriz tubular alinhada demonstra uma melhor uniformidade de temperatura ao longo do estator.

Figura 37 - Gráfico de temperatura ao longo do estator com matriz tubular modelo alinhado

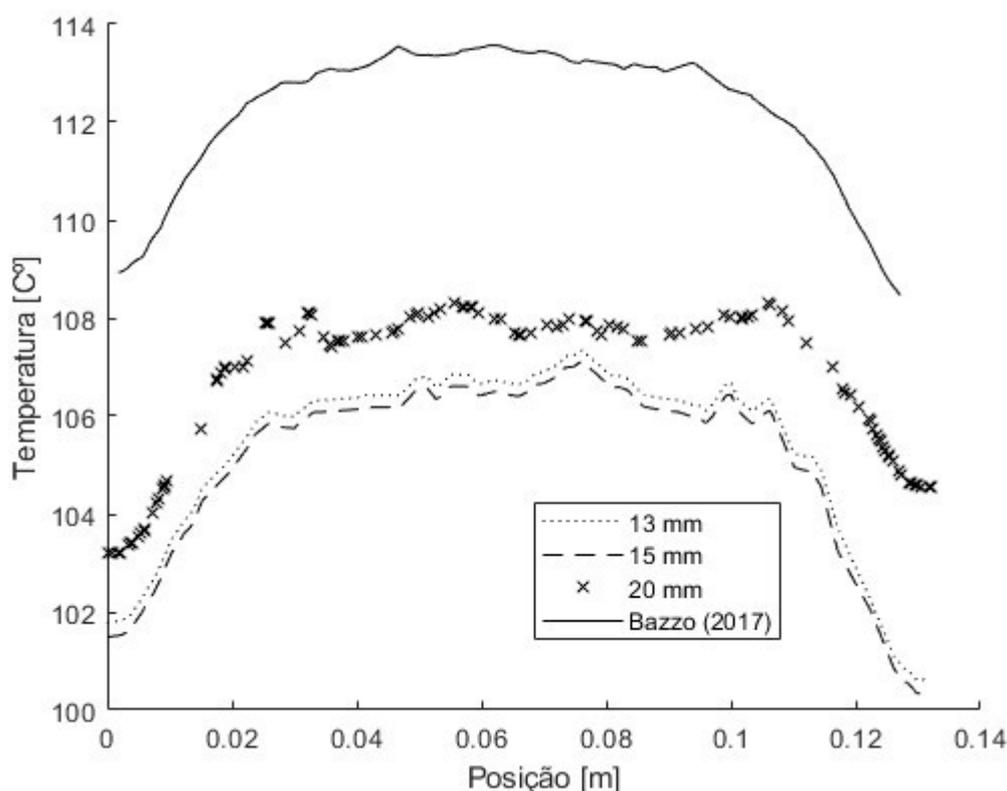


Fonte: Autoria própria (2024)

A figura 38 apresenta o gráfico de temperatura ao longo do estator utilizando a matriz tubular modelo alternado no lugar na aleta com diferentes tamanhos de comprimentos e fazendo uma comparação com o modelo original.

A matriz tubular modelo alternado apresenta uma boa redução e uniformidade da temperatura no estator. E demonstra também um melhor resultado que o modelo alinhado.

**Figura 38 - Gráfico de temperatura ao longo do estator com matriz tubular modelo alternado**



Fonte: Autoria própria (2024)

A tabela 23 apresenta a porcentagem de redução de temperatura de cada geometria com diferentes tamanhos. Sendo a maior porcentagem de redução a geometria retangular de 50 mm, apresentando assim a maior eficiência em arrefecimento do gerador eólico de ímã permanente.

Na tabela 23 demonstra a porcentagem de redução na temperatura, comparando com o modelo de Bazzo (2017) no ponto inicial e também na temperatura máxima encontrada em cada geometria.

Sendo a geométrica com maior porcentagem de redução a aleta retangular uniforme de 50 mm. A matriz tubular modelo alternado também apresentou uma boa redução se compara com os outros dois modelos sendo triangular e matriz tubular modelo alinhado.

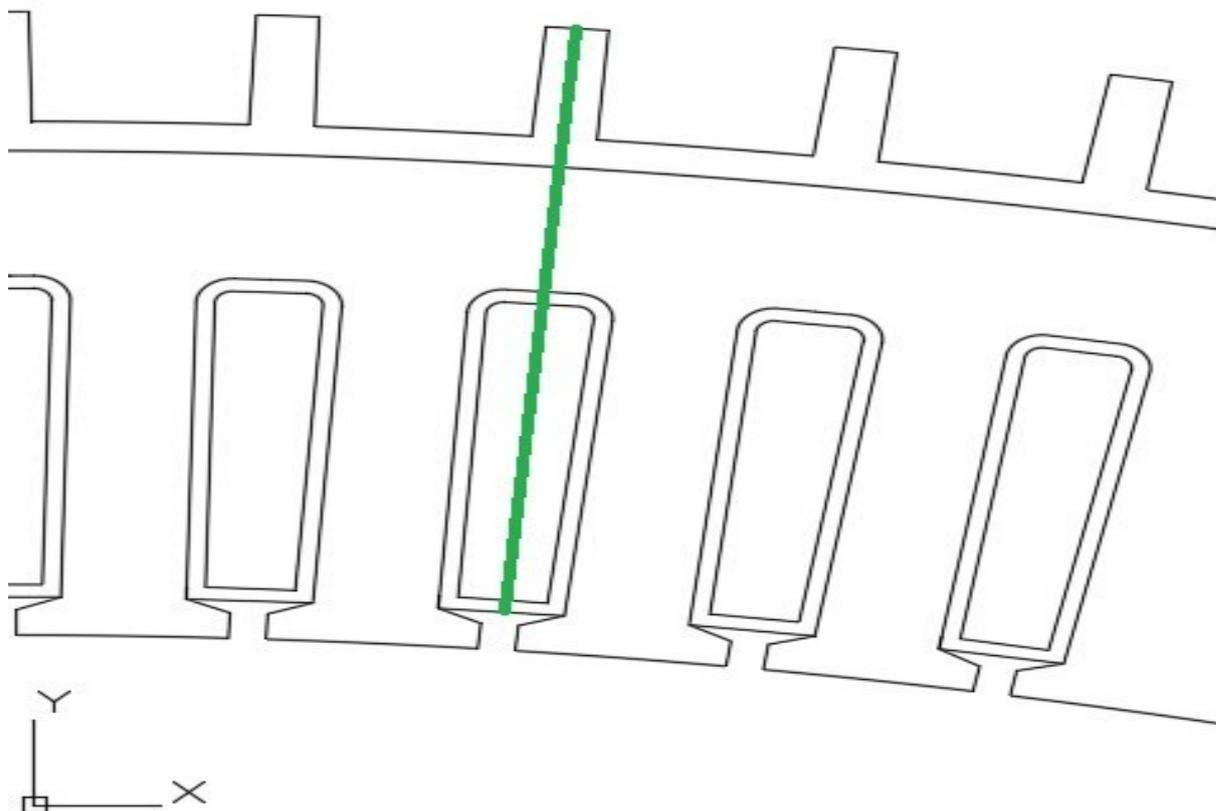
**Tabela 23 - Porcentagem de redução de temperatura comparado com Bazzo (2017)**

Geometria	Temperatura inicial (°C)	Redução em (%)	Temperatura máxima (°C)	Redução em (%)
Retangular 13 mm	104,05	4,473	108,593	4,3140
Retangular 20 mm	103,28	5,1807	107,922	4,9053
Retangular 30 mm	101,807	6,533	107,35	5,40
Retangular 50 mm	98,271	9,779	105,762	6,80
Triangular 13 mm	103,293	5,168	108,796	4,144
Triangular 20 mm	102,797	5,624	108,429	4,458
Triangular 30 mm	103,357	5,11	108,066	4,7784
Matriz tubular alinhado 13 mm	104,95	3,6475	108,768	4,1589
Matriz tubular alinhado 20 mm	103,243	5,21	107,691	5,10
Matriz tubular alternado 13 mm	101,792	6,8057	107,35	5,4093
Matriz tubular alternado 15 mm	101,51	6,8057	107,182	5,557
Matriz tubular alternado 20 mm	103,194	5,2596	108,325	4,5502

Fonte: Autoria própria (2024)

#### 4.4.1 Gráficos de temperatura na carcaça

**Figura 39 - Linha de referência para dados dos gráficos**

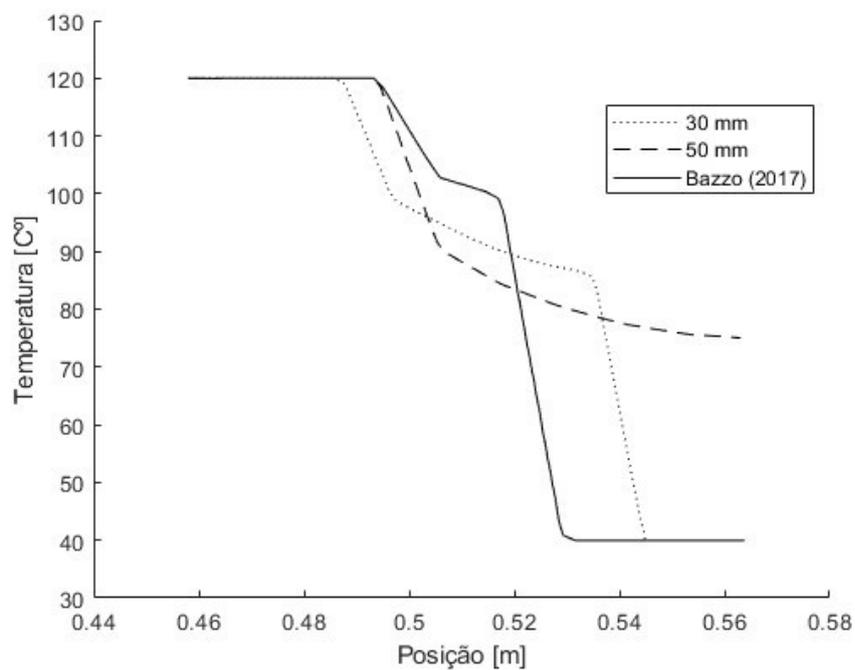


**Fonte: Autoria própria (2024)**

Os gráficos de temperatura apresentados nas figuras 40 a 43 foram feitos com referência ao longo da linha verde na figura 39 e no ponto 0,65995 metro sendo no meio do gerador eólico. Os gráficos de temperatura foram feitos de forma a comparar o arrefecimento e a eficiência da geometria em comparação com o modelo utilizado por Bazzo (2017)

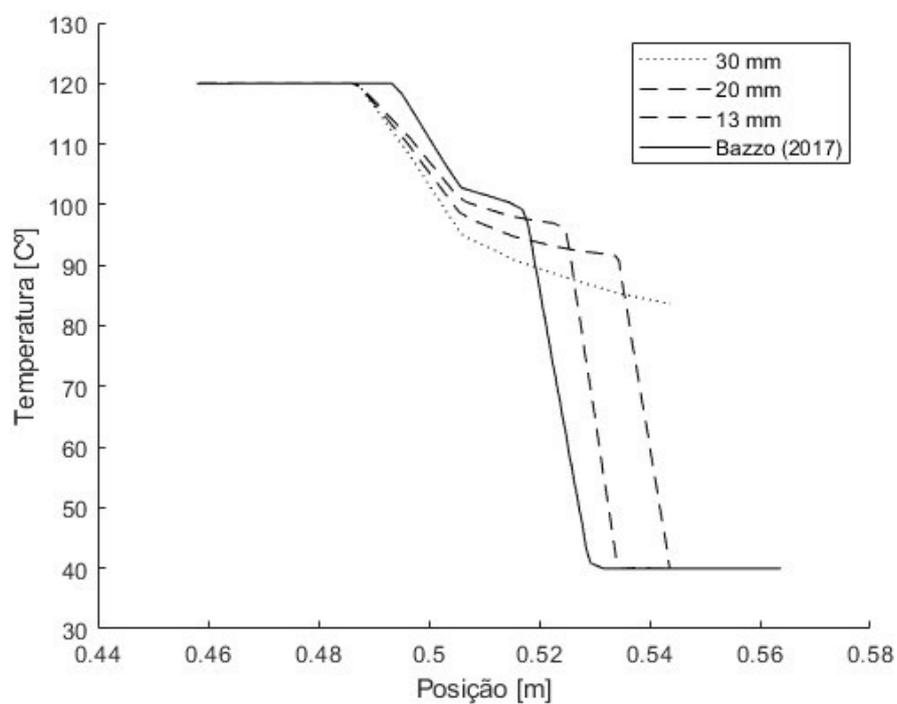
Os gráficos presentes nas figuras 40 a 43 demonstraram uma melhora na eficiência no arrefecimento com exceção do gráfico da figura 42 na matriz tubular de 15 mm. Sendo o único caso que a temperatura na carcaça esta acima do modelo de Bazzo (2017).

**Figura 40 - Gráfico de temperatura ao longo da aleta retangular**

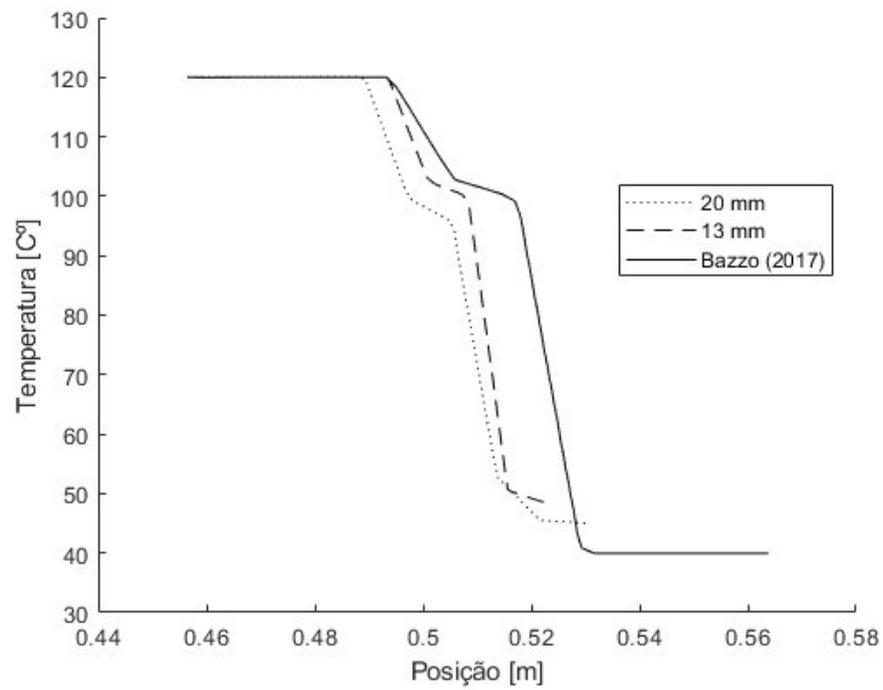


Fonte: Autoria própria (2024)

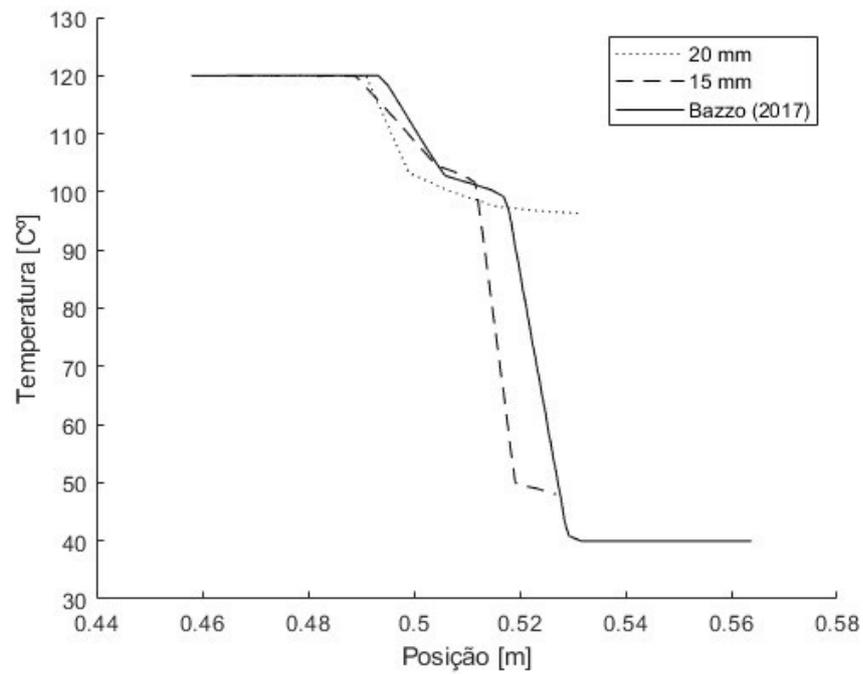
**Figura 41 - Gráfico de temperatura ao longo da aleta triangular**



Fonte: Autoria própria (2024)

**Figura 42 - Gráfico de temperatura ao longo da matriz tubular alternado**

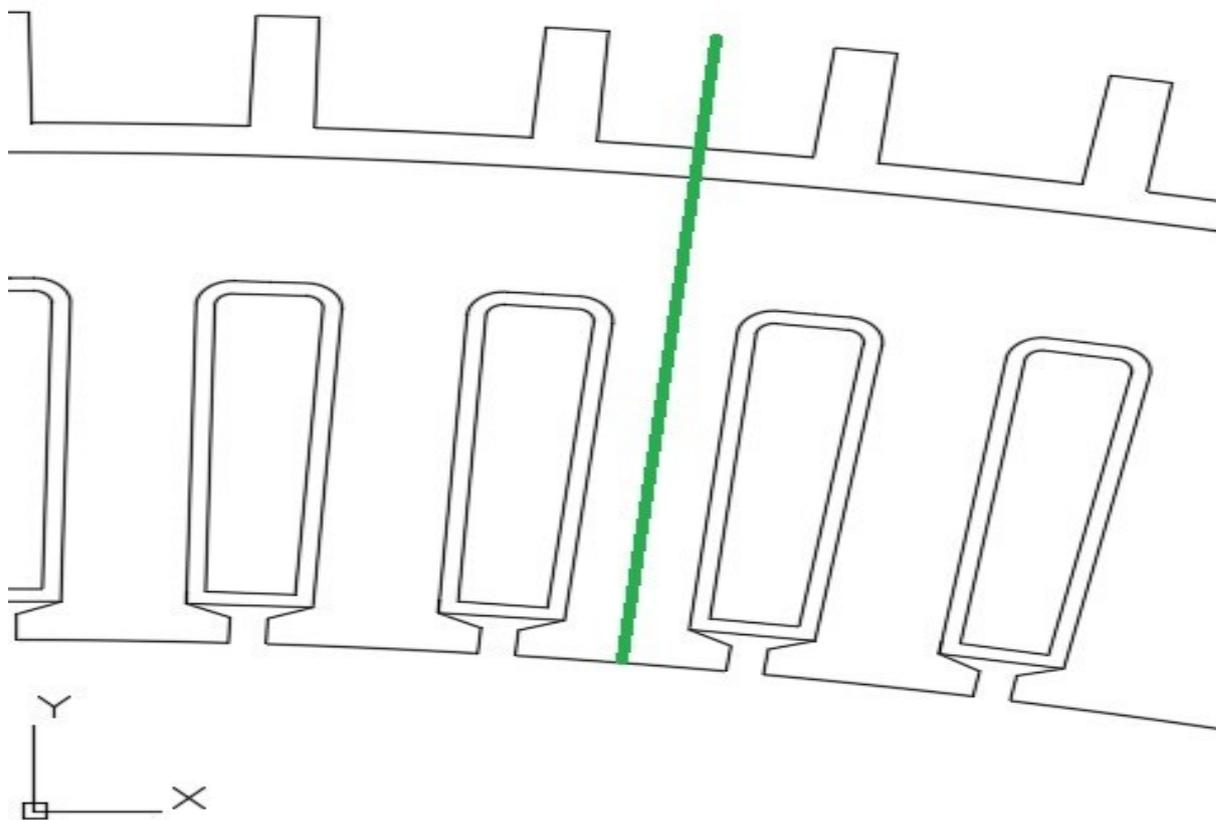
Fonte: Autoria própria (2024)

**Figura 43 - Gráfico de temperatura ao longo da matriz tubular alinhado**

Fonte: Autoria própria (2024)

#### 4.4.2 Gráficos de temperatura no estator

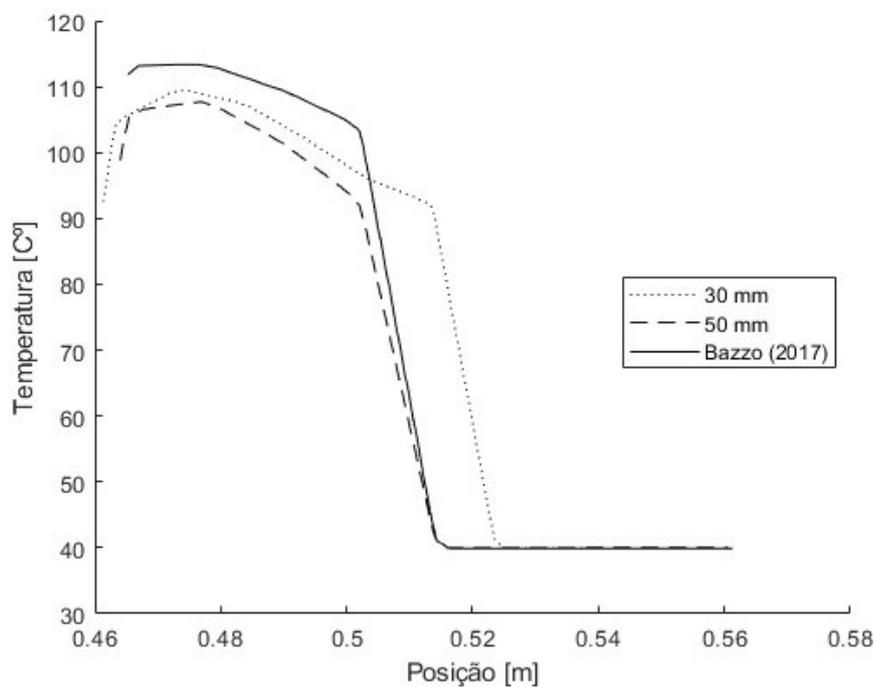
**Figura 44 - Linha de referência para dados dos gráficos**



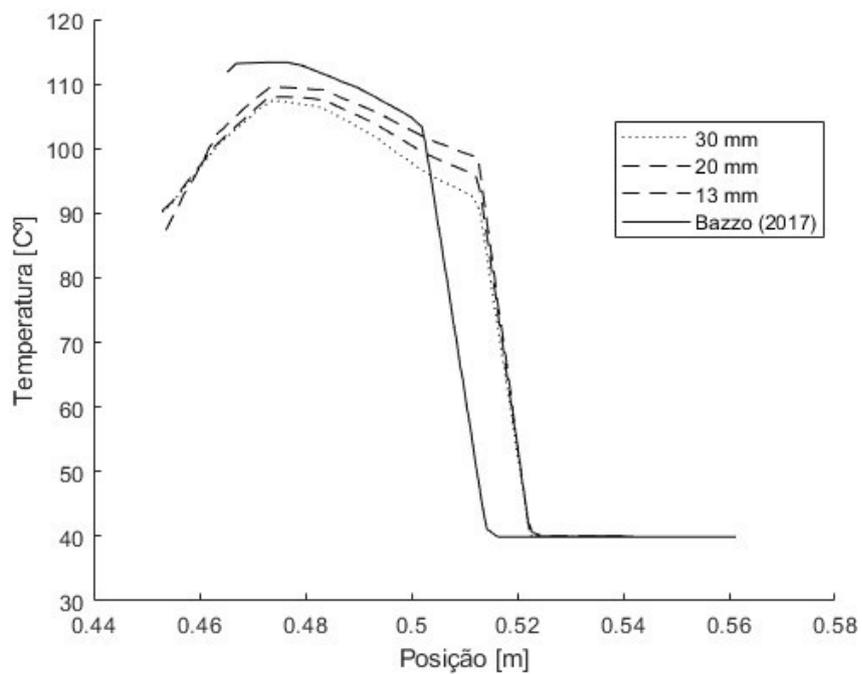
**Fonte: Autoria própria (2024)**

Os gráficos de temperatura apresentados nas figuras 45 a 47 foram feitos com referência na figura 44 no ponto 0,65995 metro sendo no meio do gerador eólico. Os gráficos de temperatura foram feitos de forma a comparar o arrefecimento e a eficiência da geometria em comparação com o modelo utilizado por Bazzo (2017)

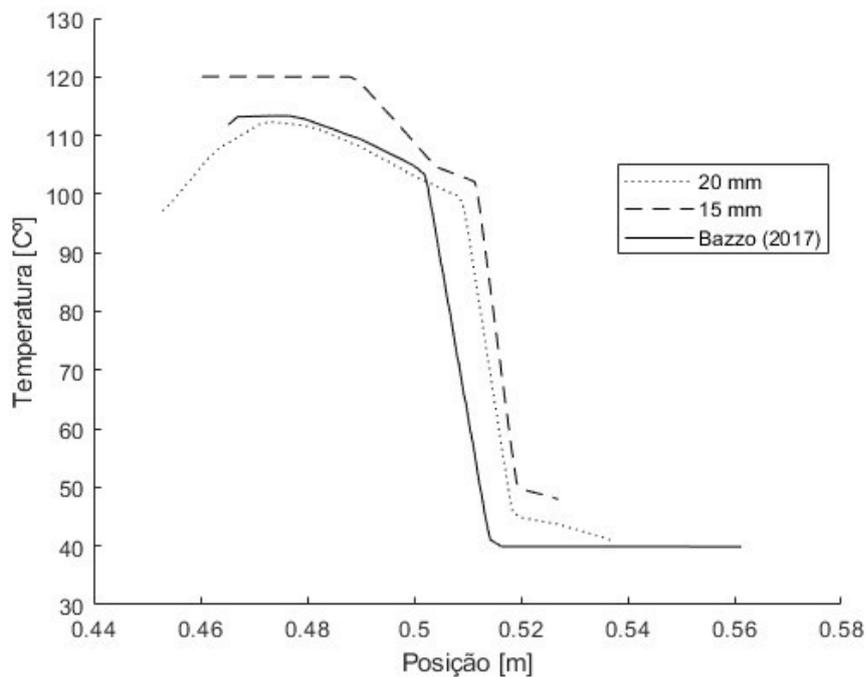
Em todos as geometrias com exceção da geometria matriz tubular modelo alinhado de 15 mm apresentaram a redução na temperatura no dente do estator em comparação com o modelo de Bazzo (2017).

**Figura 45 - Gráfico de temperatura no dente do estator com aleta retangular**

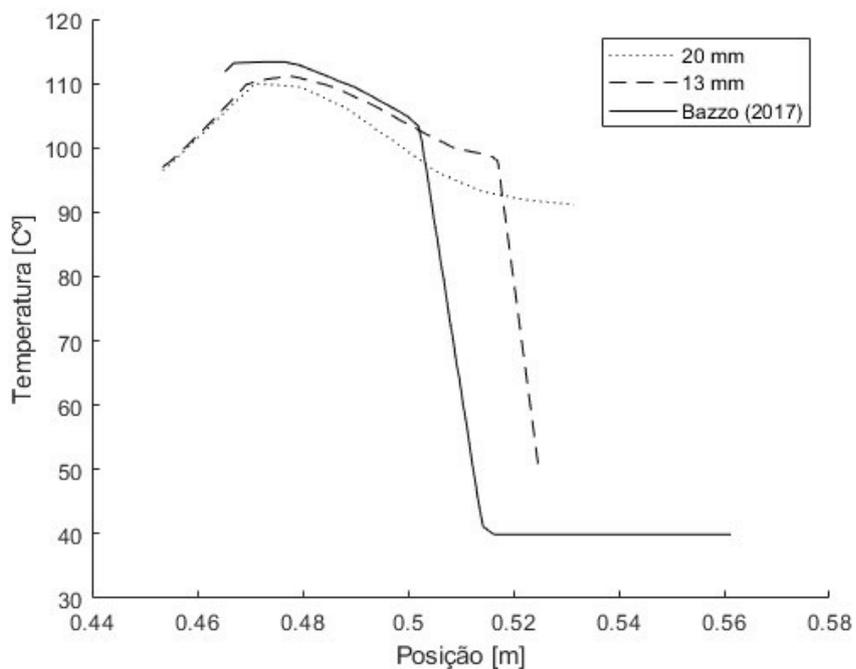
Fonte: Autoria própria (2024)

**Figura 46 - Gráfico de temperatura no dente do estator com aleta triangular**

Fonte: Autoria própria (2024)

**Figura 47 - Gráfico de temperatura no dente do estator com matriz tubular alinhado**

Fonte: Autoria própria (2024)

**Figura 48 - Gráfico de temperatura no dente do estator com matriz tubular alternado**

Fonte: Autoria própria (2024)

No apêndice estão apresentados os resultados dos isovalores da distribuição de temperatura das geometrias simuladas.

## 5 CONCLUSÃO

Foi concluído que todas as geometrias com exceção da matriz tubular alinhada de 15 mm apresentaram uma melhora no arrefecimento do gerador eólico de ímãs permanentes. Mas a geometria retangular de 50 mm apresentou o melhor resultado com uma redução de 9,8%.

Em relação as geometrias triangulares não houve uma diferença significativa de temperatura com o aumento da aleta triangular. Assim o aumento da aleta e da área molhada melhorando o arrefecimento não teve uma mudança significativa.

A geometria matriz tubular modelo alinhado apresentou a menor porcentagem de arrefecimento em comparação as outras geometrias e mesmo a matriz tubular alinhado sendo um modelo que gera turbulência significativa, não houve uma redução na temperatura que torne este modelo ideal para utilização para arrefecimento.

A modelo de matriz tubular alternado apresentou um bom resultado de arrefecimento, tendo uma redução de 6,8% que em comparação aos modelos triangular e matriz tubular modelo alinhado, teve uma maior porcentagem de redução de temperatura. Possivelmente o aumento do ângulo e a distância entre os tubos da matriz tubular alternada para um número maior, melhora mais o arrefecimento.

Os gráficos apresentados nas figuras 40 a 43 demonstram a eficiência da aleta no arrefecimento do estator, evidenciando que, em todos os casos, a temperatura se manteve abaixo do modelo proposto por Bazzo (2017). Além disso, os gráficos das figuras 45 a 48 reforçam a eficácia das aletas no arrefecimento do dente do estator. Conforme esperado, todas as geometrias analisadas apresentaram um bom desempenho nesse aspecto, sendo a aleta retangular a que se destacou como a mais eficiente.

## REFERÊNCIAS

BAZZO, T. **Projeto ótimo multidisciplinar de geradores síncronos de ímãs permanentes para aerogeradores considerando a curva de ocorrência do vento**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

BERGMAN, T.; LAVINE, A. **INCROPERA Fundamentos da transferência de calor e de massa**. 8ª edição ed. Grupo GEN, 2019.

BLAZEK, J. **Computational fluid dynamics: Principles and applications**. 2ª edição ed. 2001.

BLOMQUIST, M. **Performance Optimization of Numerical Simulations of Heat Transfer and Fluid Flow**. Northridge: CALIFORNIA STATE UNIVERSITY, NORTHRIDGE 2018.

HOLMAN, J. P. **Heat Transfer**. 10ª edição ed. 2010.

MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M. **The finite volume method in computational fluid dynamics**. 2015

PATANKAR, S. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. 1980.

TARAS, P.; NILIFARD, R.; ZHU, Z.-Q.; AZAR, Z. Cooling Techniques in Direct-Drive Generators for Wind Power Application. **Energies**, v. 15, n. 16, p. 5986, 2022.

ÖZISIK, M. Necati. **Heat transfer: a basic approach**. New York: McGraw-Hill, 1985

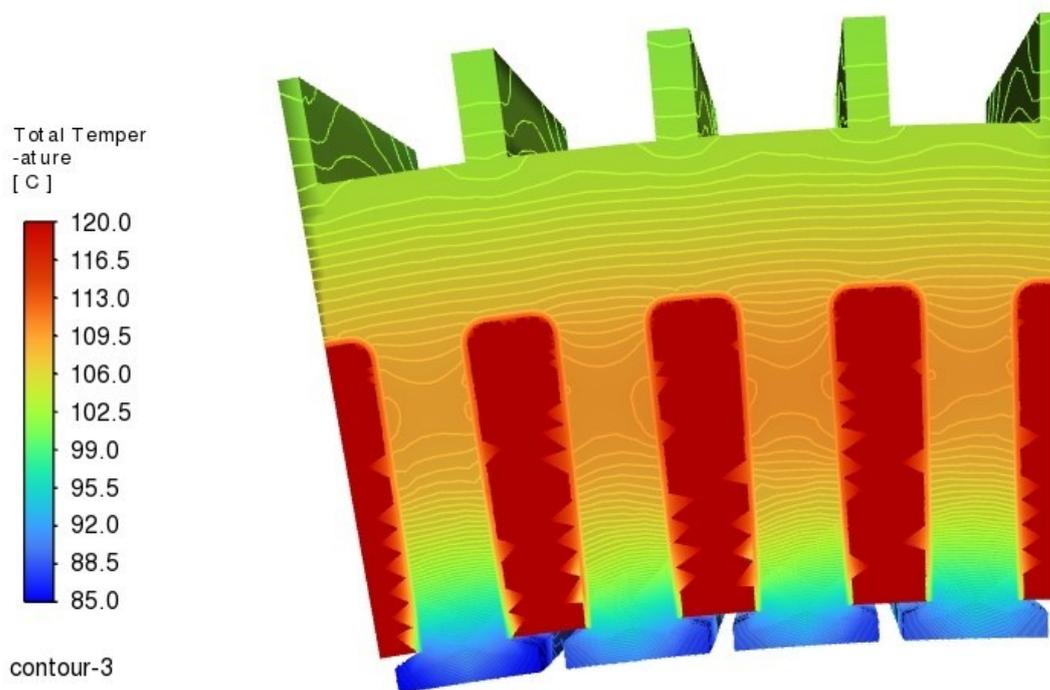
WINDBOX. **Componentes dos aerogeradores**. Blog Windbox. Disponível em: <https://windbox.com.br/blog/componentes-dos-aerogeradores/>. Acesso em: 12 fev. 2025.

WHITE, F. **Fluid Mechanics**. 5ª edição ed. 2002.

**APÊNDICE - Resultados de distribuição de temperatura no gerador**

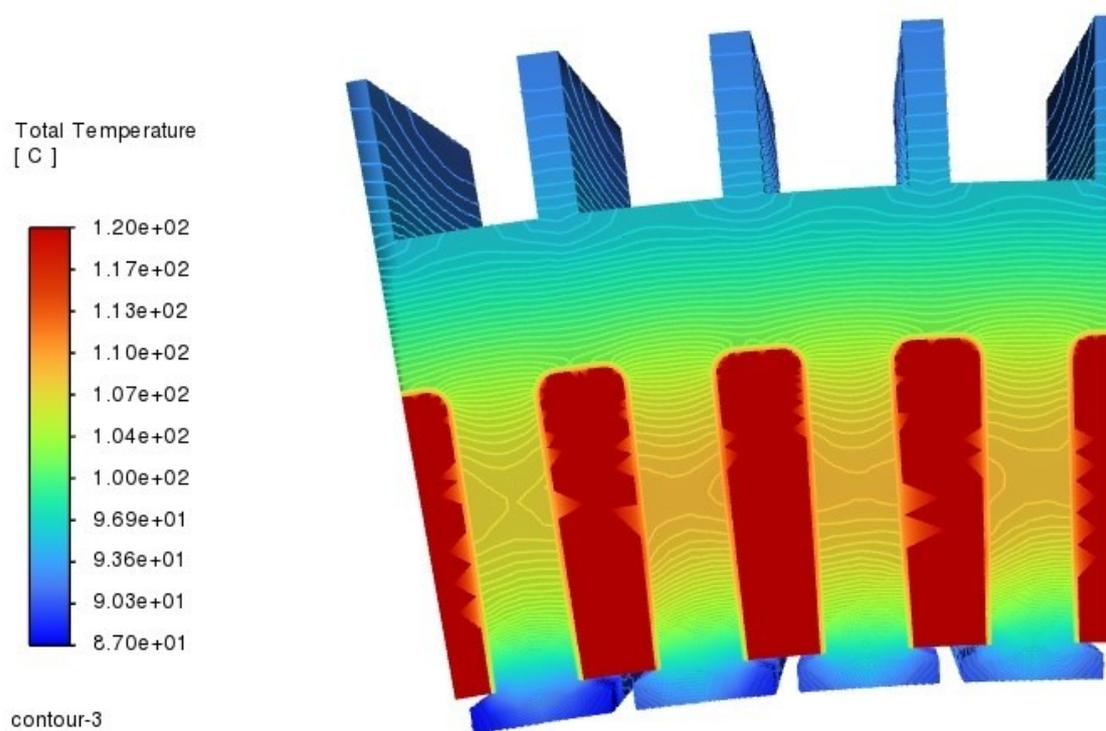
As figuras 49 a 65 apresentam a distribuição de temperatura ao longo do gerador elétrico de ímãs permanentes

**Figura 49 - Aleta retangular 13 mm modelo**



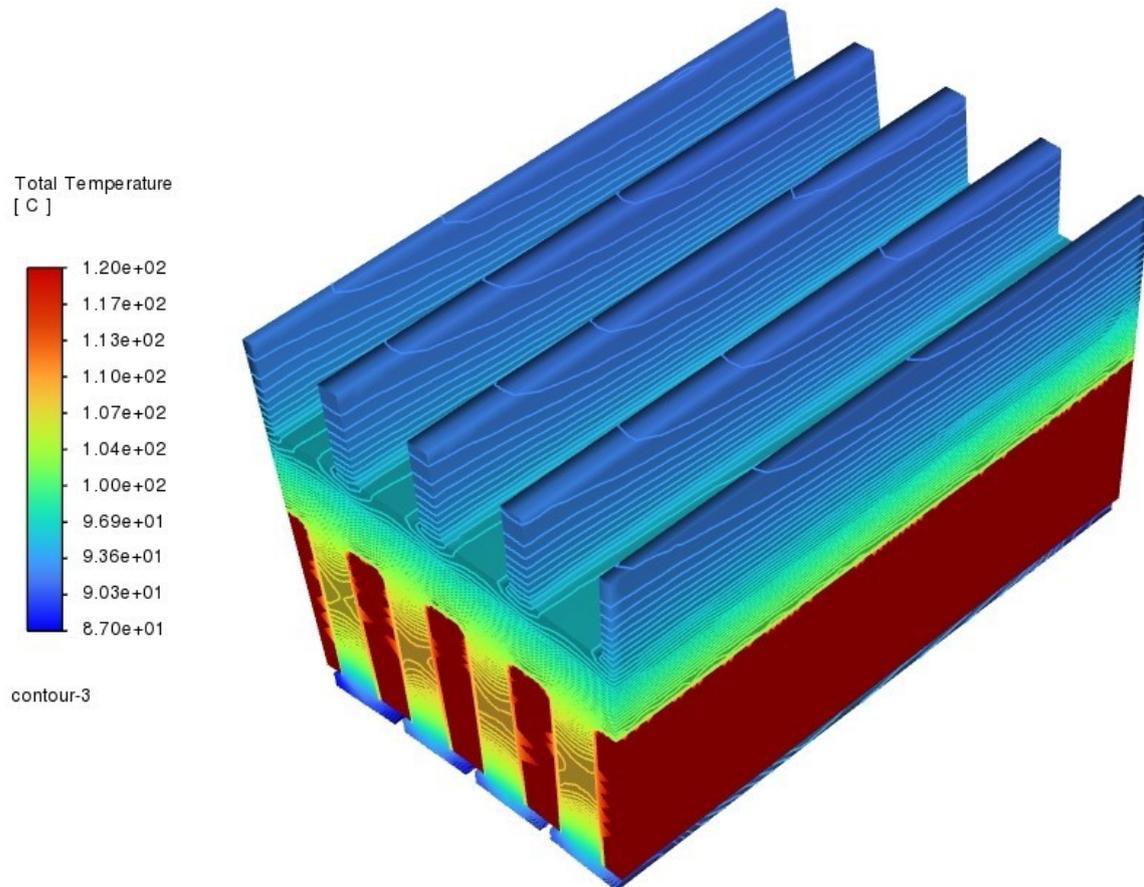
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 50 - Aleta retangular 20 mm modelo vista frontal



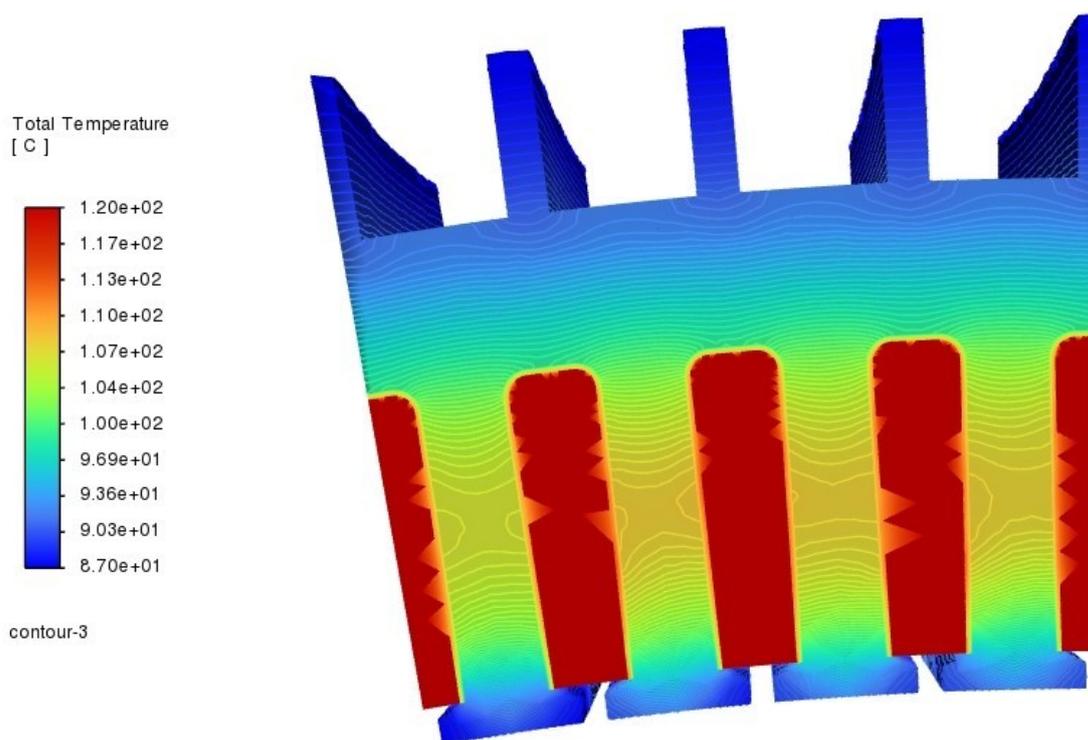
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 51 - Aleta retangular 20 mm modelo vista isométrica



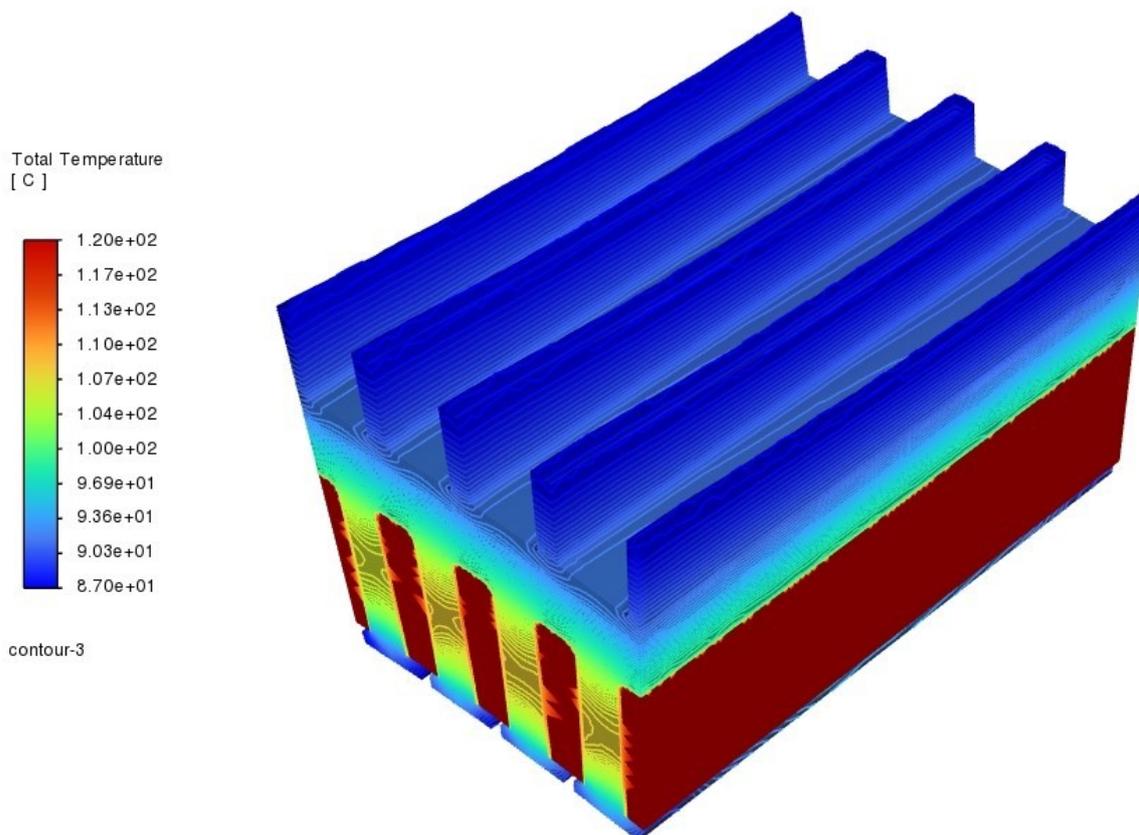
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 52 - Aleta retangular 30 mm modelo vista frontal



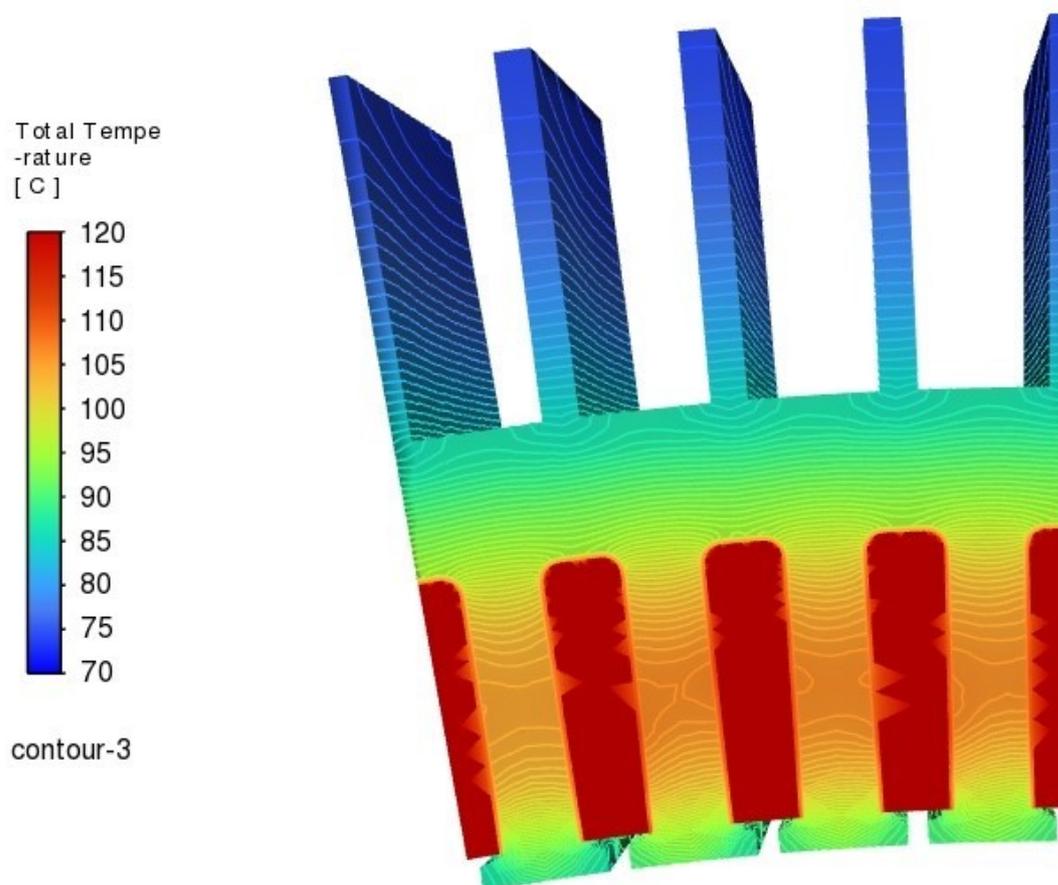
Fonte: Aatoria própria (2024)

Figura 53 - Aleta retangular 30 mm modelo vista isométrica



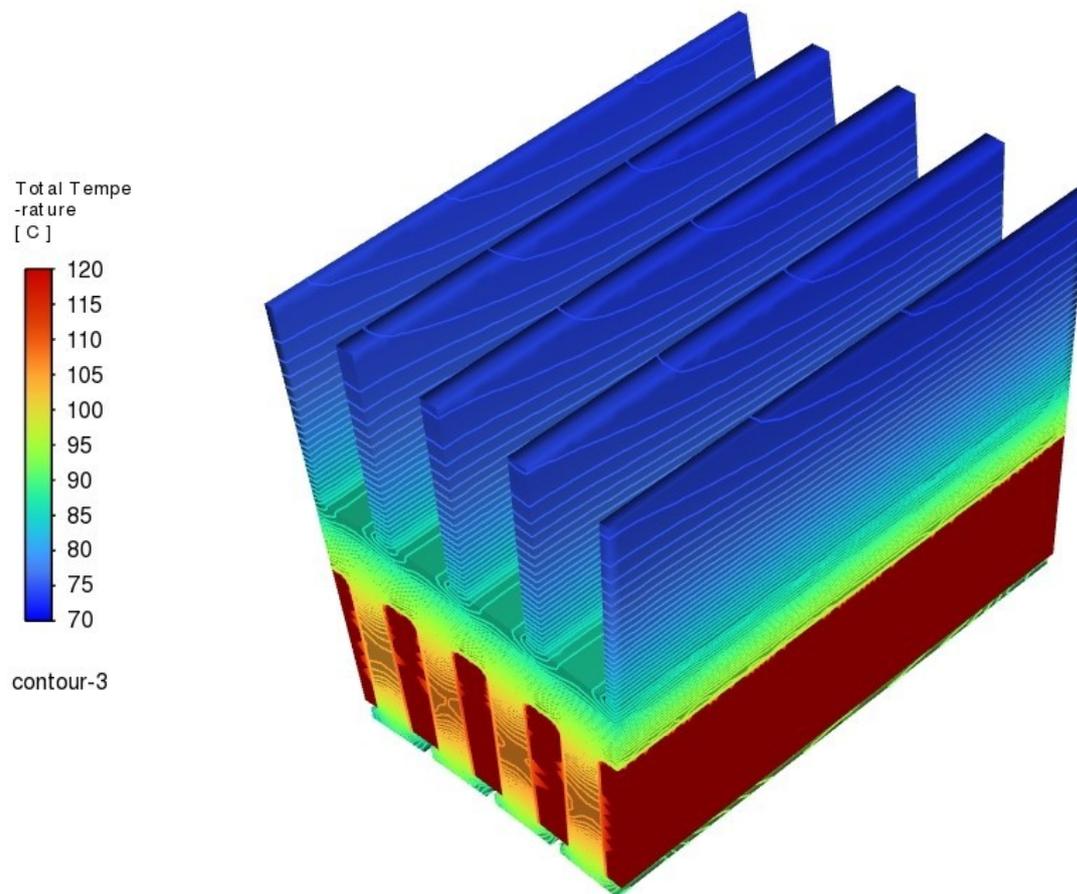
Fonte: Aatoria própria (2024)

Figura 54 - Aleta retangular 50 mm modelo vista frontal



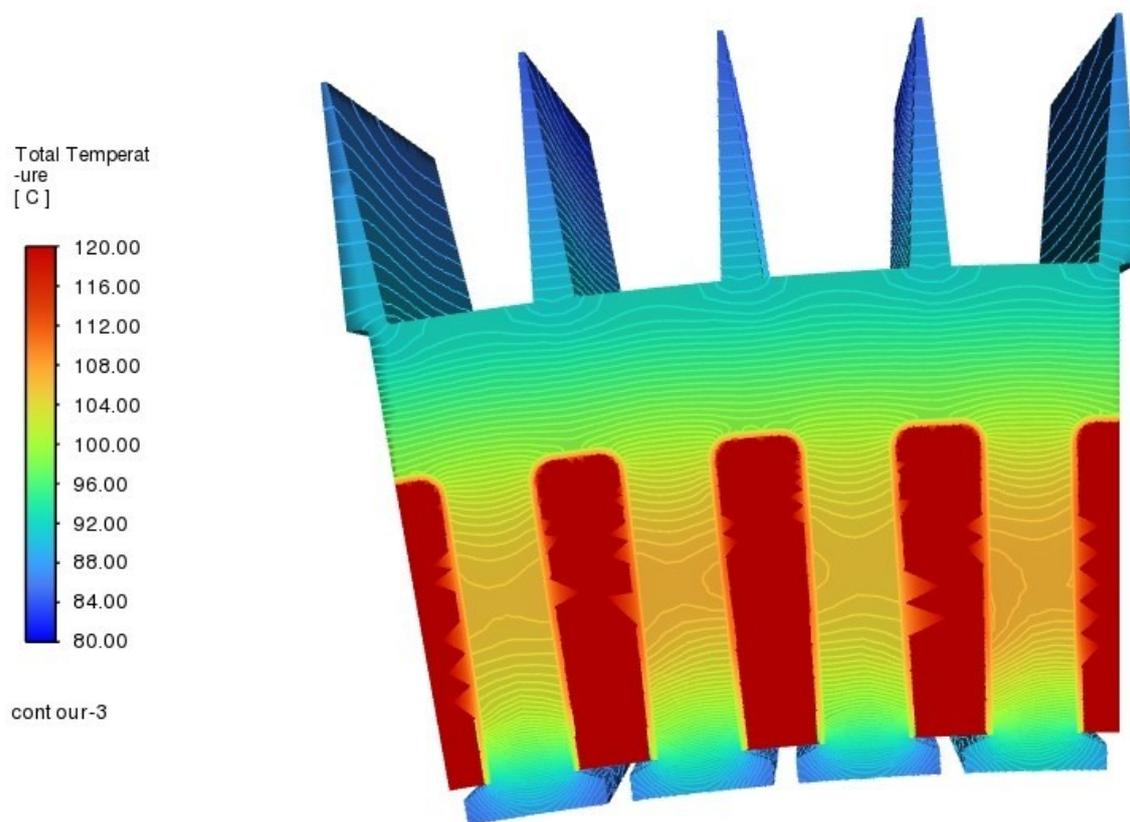
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 55 - Aleta retangular 50 mm modelo vista isométrica



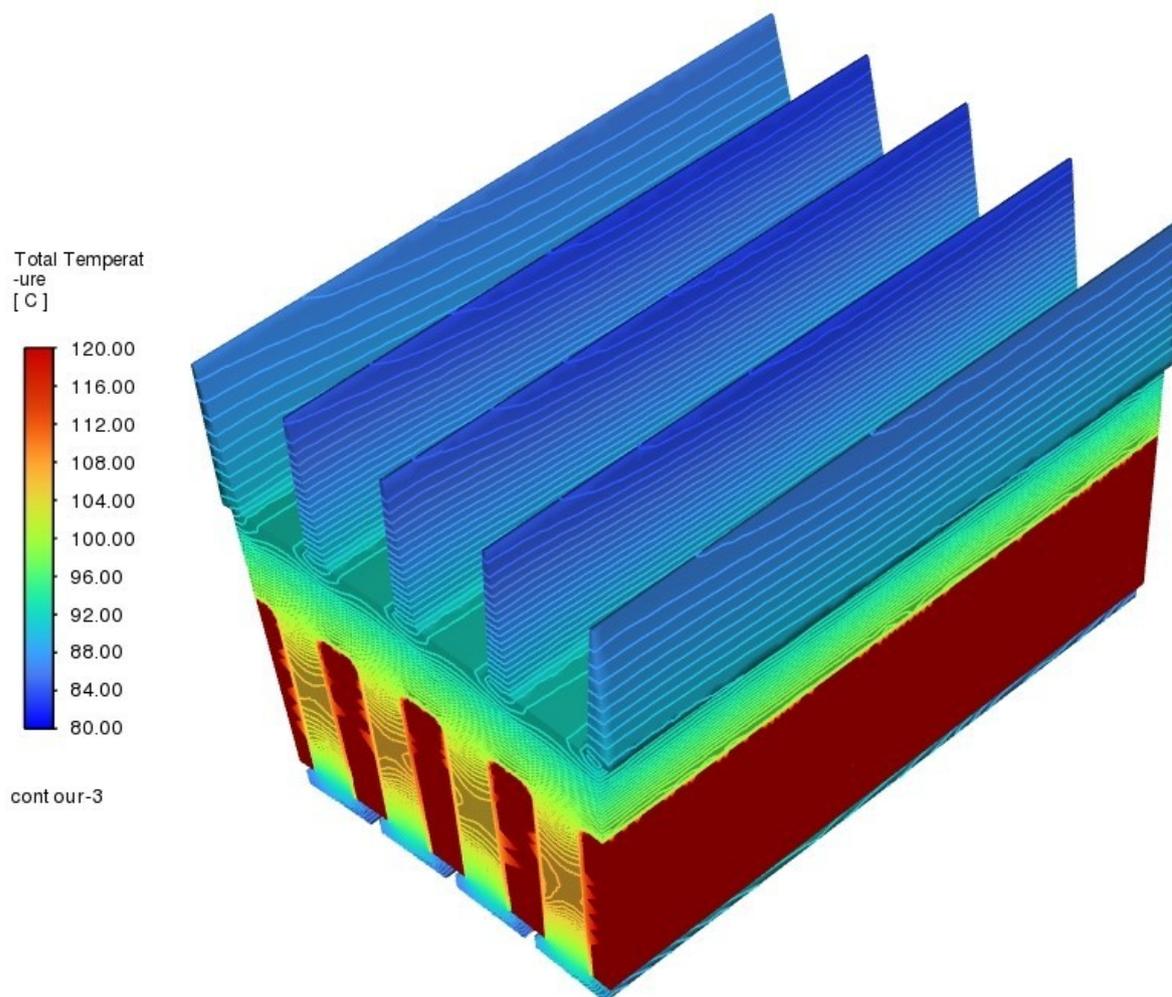
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 56 - Aleta triangular 30 mm modelo vista frontal



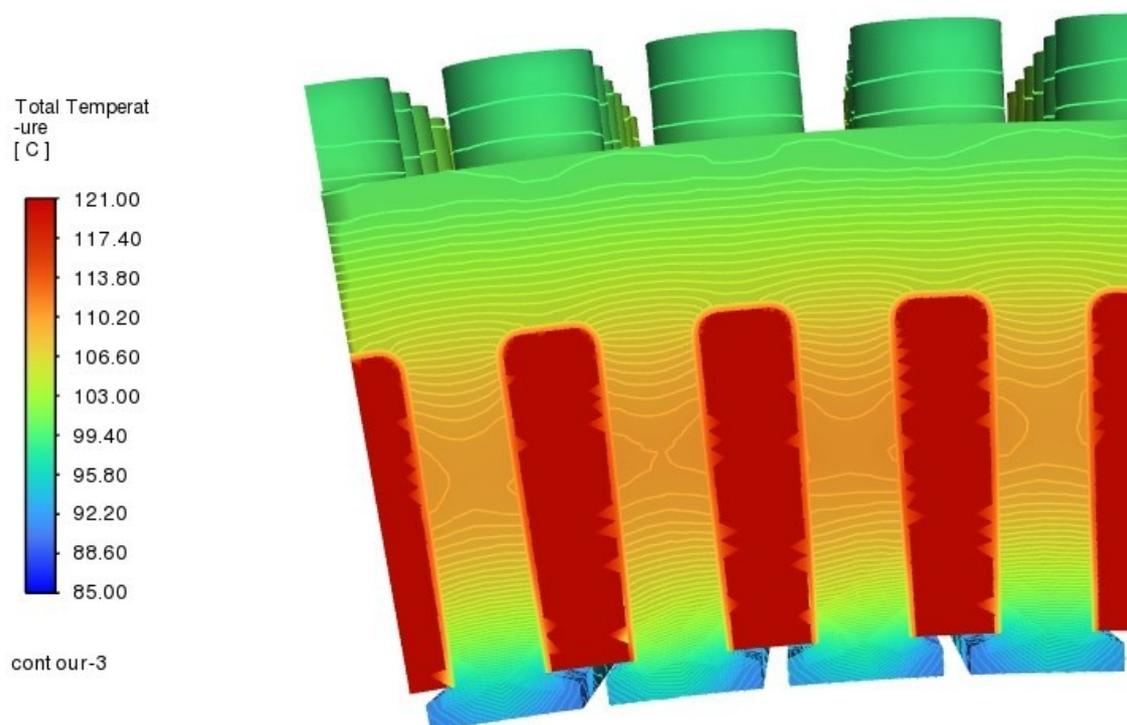
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 57 - Aleta triangular 30 mm modelo vista isométrica



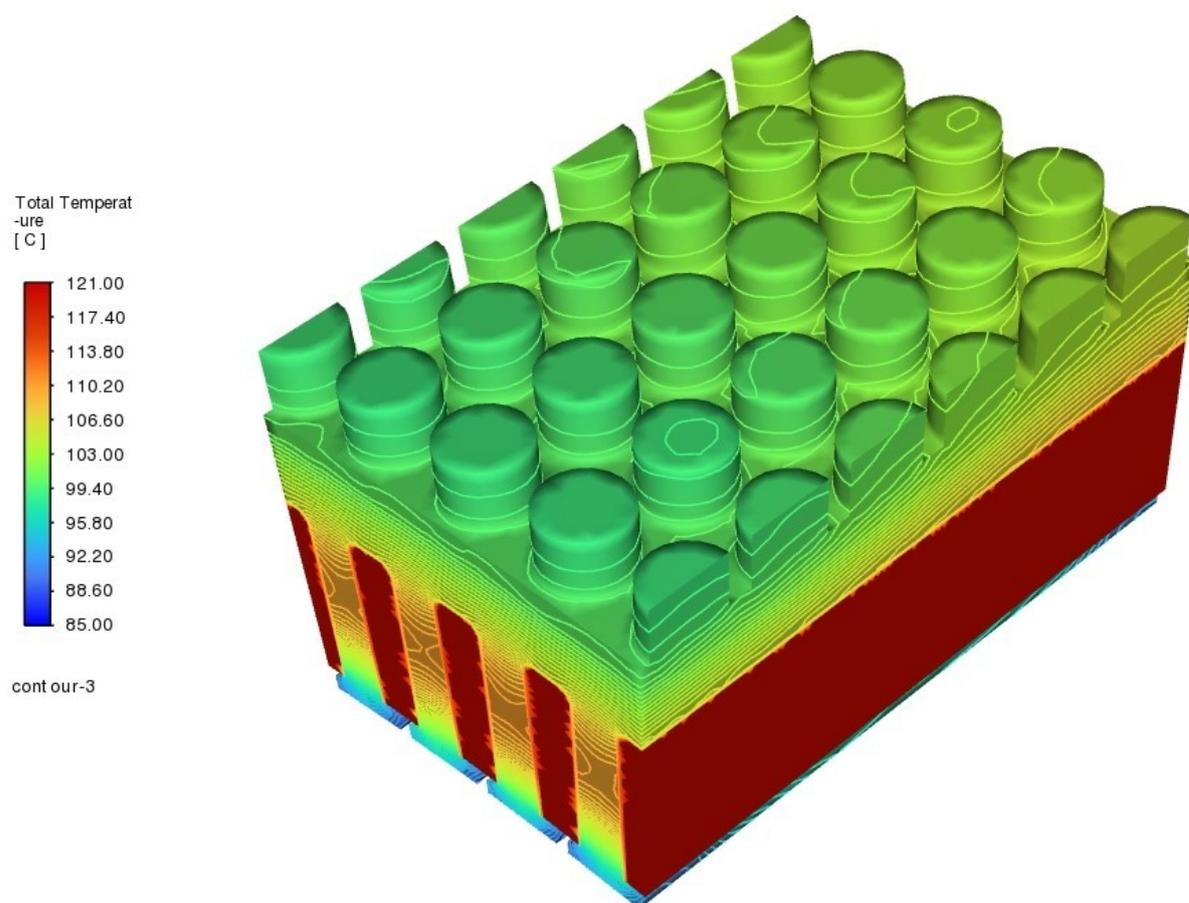
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 58 - Matriz tubular modelo alinhado 15 mm de comprimento vista frontal



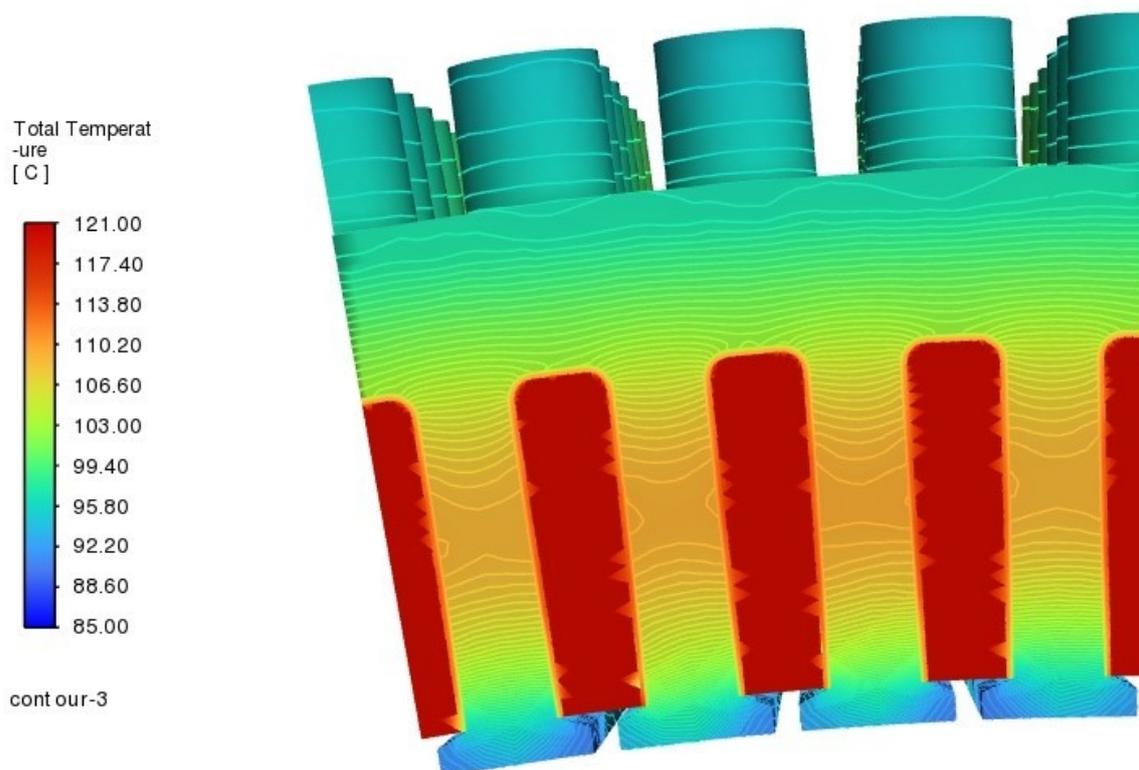
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 59 - Matriz tubular modelo alinhado 15 mm de comprimento vista isométrica



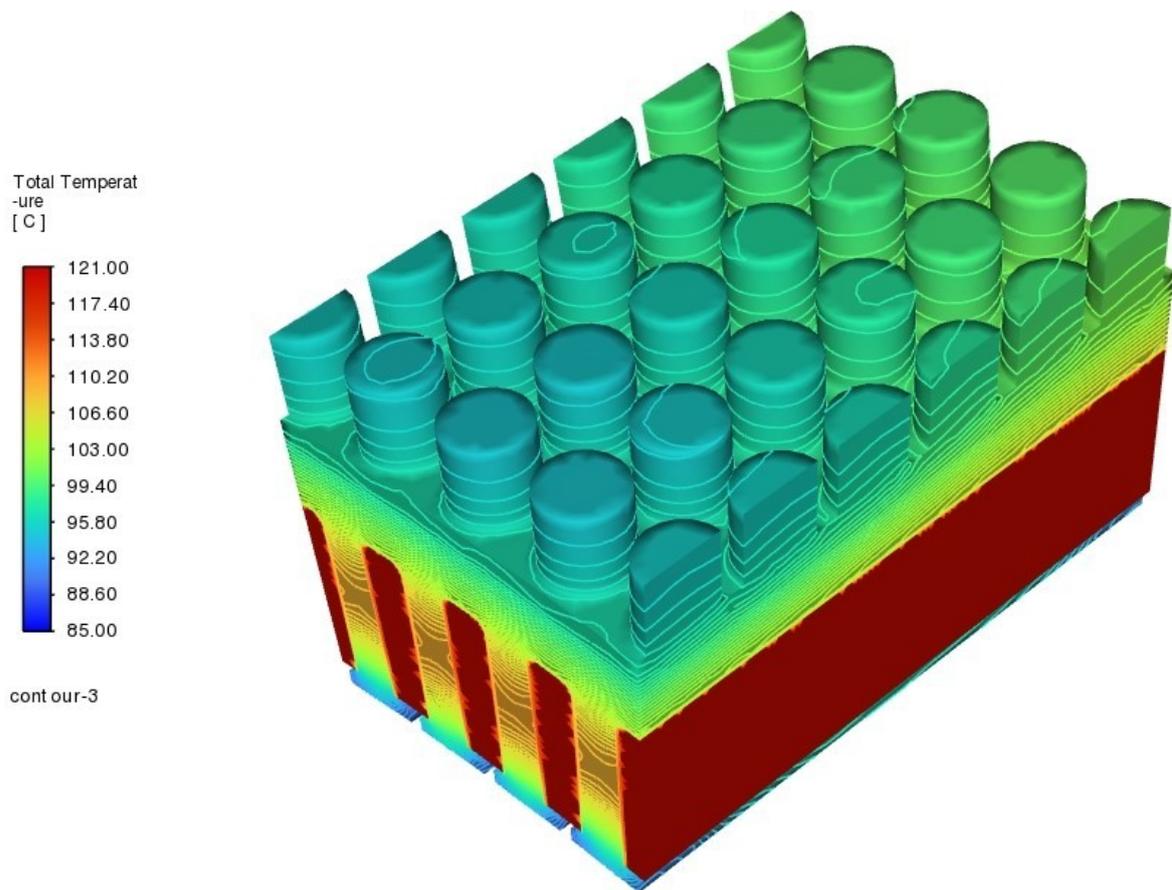
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 60 - Matriz tubular modelo alinhado 20 mm de comprimento vista frontal



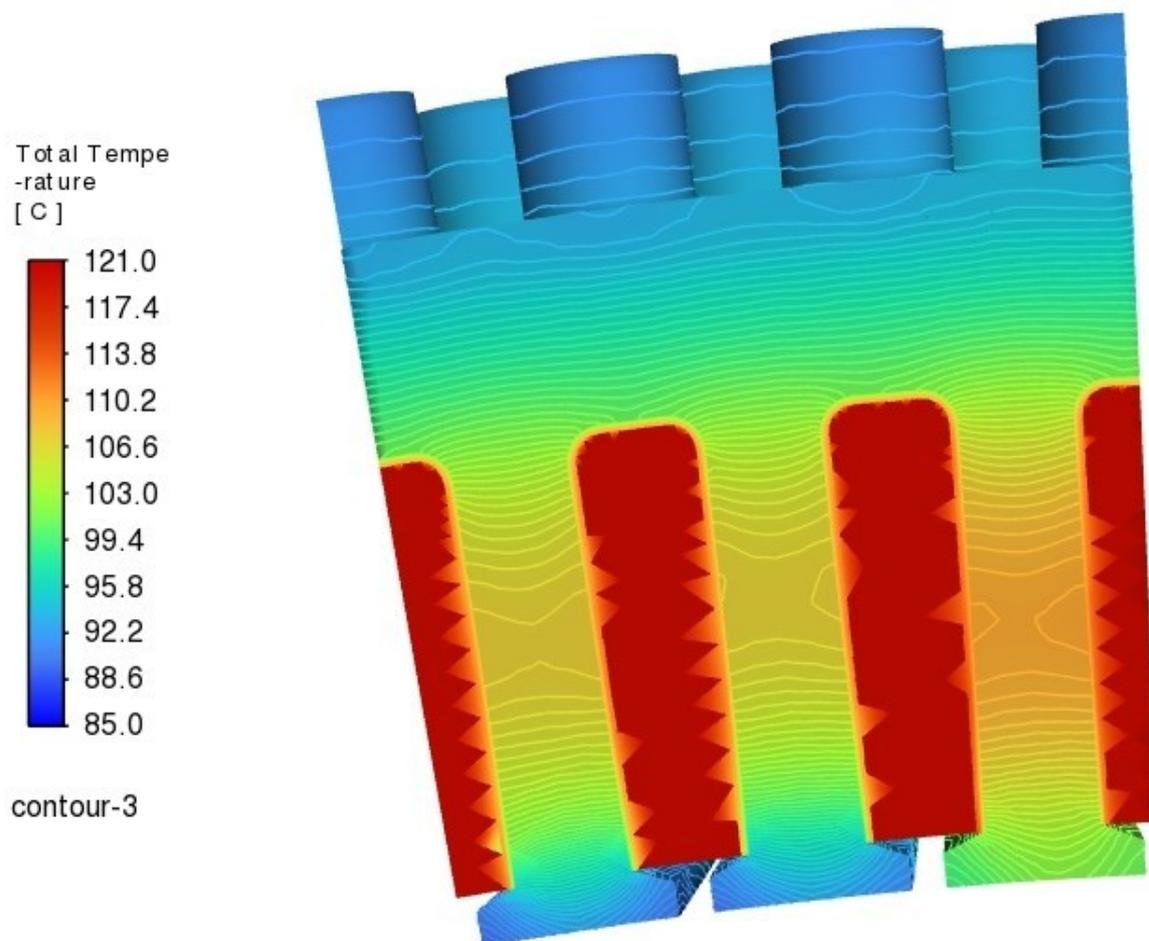
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 61 - Matriz tubular modelo alinhado 20 mm de comprimento vista isométrica



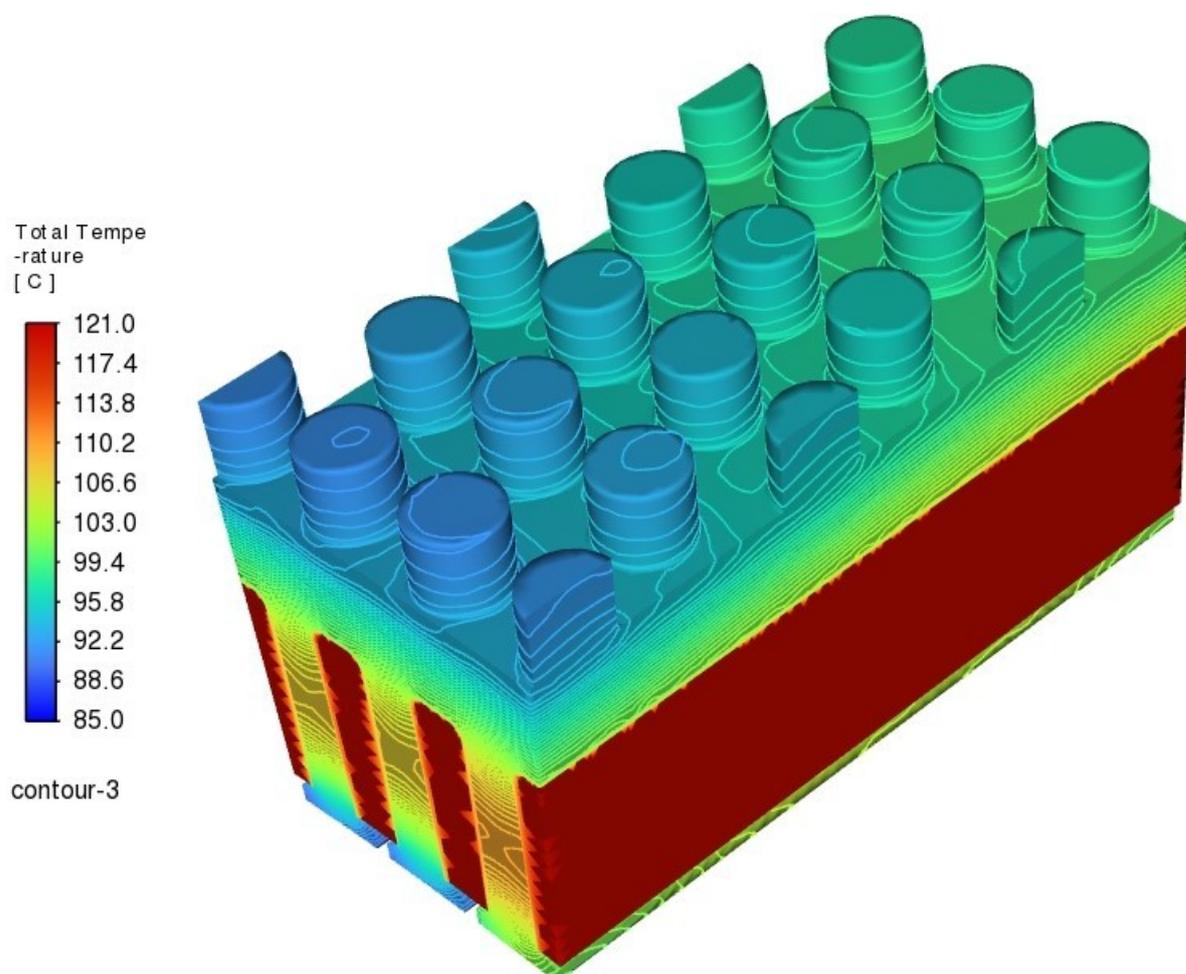
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 62 - Matriz tubular modelo alternado 15 mm de comprimento vista frontal



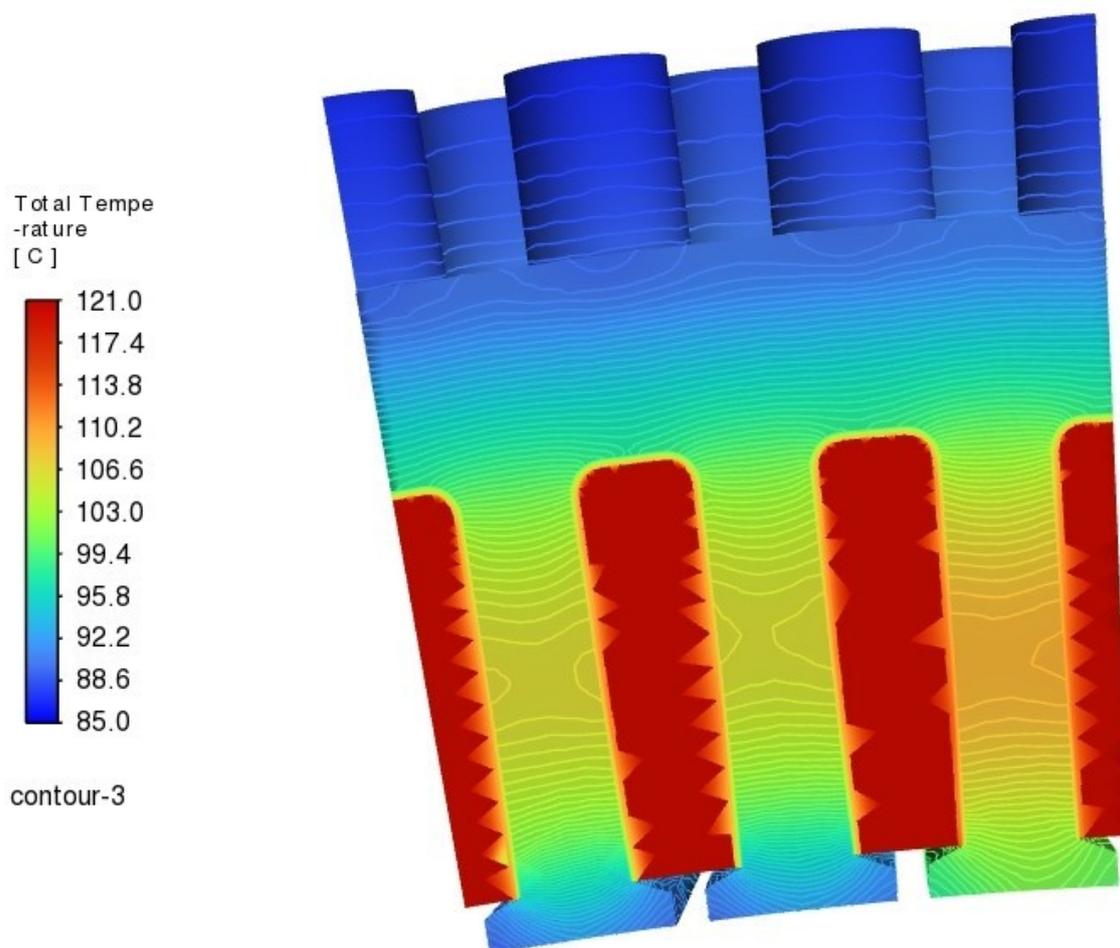
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 63 - Matriz tubular modelo alternado 15 mm de comprimento vista isométrica



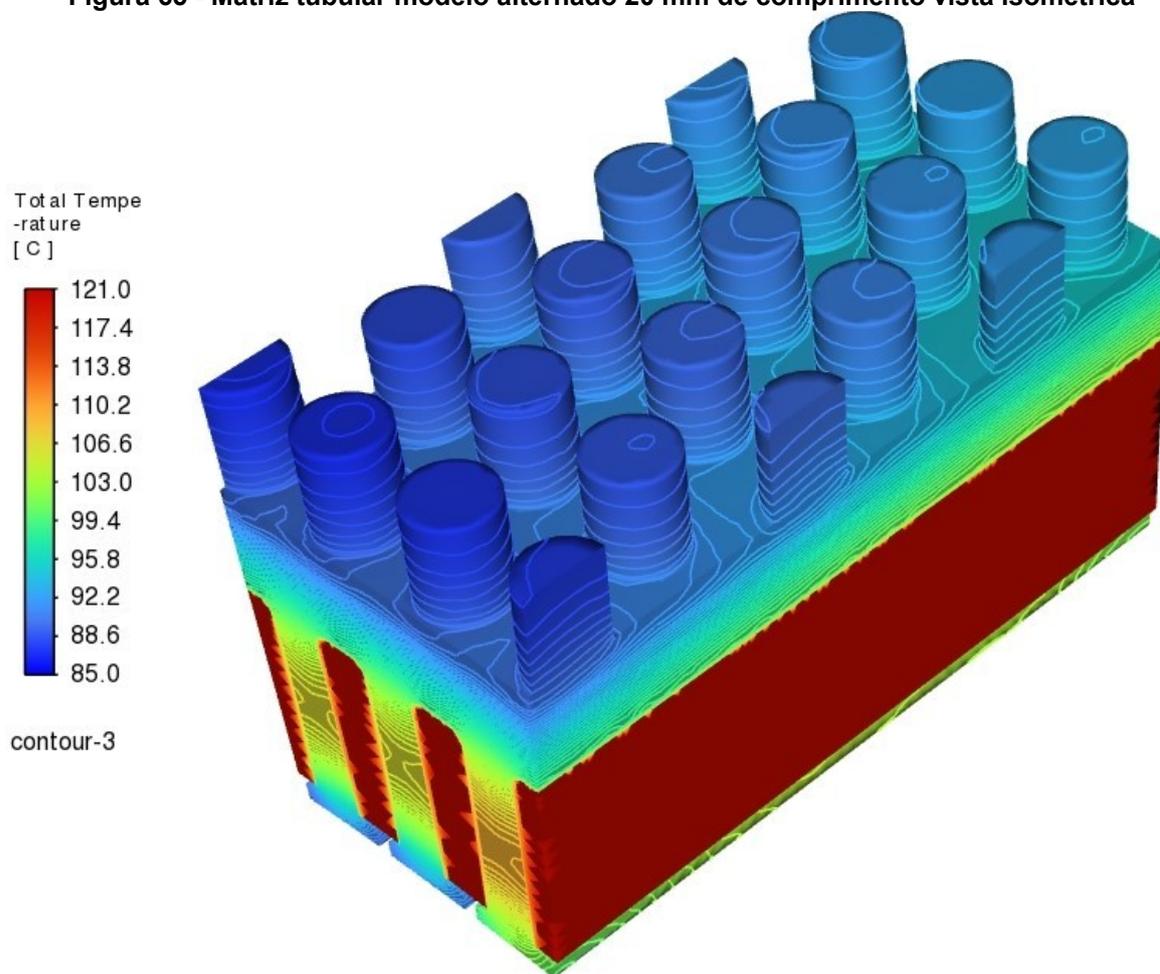
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 64 - Matriz tubular modelo alternado 20 mm de comprimento vista frontal



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 65 - Matriz tubular modelo alternado 20 mm de comprimento vista isométrica



Fonte: Autoria própria (2024)