



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

Departamento de Engenharia Mecânica

Licenciatura em Engenharia Mecânica

Trabalho de Licenciatura

**Tema: Dimensionamento de uma máquina de arrefecimento de cerveja
utilizando células Peltier**

Autor:

TEMBE, Ednaldo Hilário

20212917

Supervisor:

Prof. Dr. Eng^o Jorge Olívio Penicela Nhambiu

Maputo, Setembro de 2025



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

Departamento de Engenharia Mecânica

Licenciatura em Engenharia Mecânica

Dissertação submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane, como requisito para obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Mecânica.

Dimensionamento de uma máquina de arrefecimento de cerveja utilizando células Peltier

Discente:

TEMBE, Ednaldo Hilário
20212917

Supervisor:

Prof. Dr. Eng^o Jorge Olívio Penicela Nhambiu

Maputo, Setembro de 2025



Dimensionamento de uma Máquina de arrefecimento de cerveja utilizando células Peltier. Ednaldo Hilário Tembe

TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o estudante Ednaldo Hilário Tembe entregou no dia ____/____/2025 as três cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com a referência: _____, intitulado: DIMENSIONAMENTO DE UMA MÁQUINA DE ARREFECIMENTO DE CERVEJA UTILIZANDO CÉLULAS PELTIER.

Maputo, _____, de _____ de 2025

Chefe de Secretaria

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Ednaldo Hilário Tembe, declaro, sob palavra de honra, que o presente trabalho de licenciatura com o tema, **Dimensionamento de uma máquina de arrefecimento de cerveja utilizando células Peltier**, que apresento para o cumprimento dos requisitos para a obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Mecânica, foi por mim realizado, com base nos recursos que no mesmo se faz referência

(Ednaldo Hilário Tembe)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por ser o princípio e fim de todas as coisas, e por me conceder a força, a saúde e a perseverança ao longo desta caminhada.

Aos meus queridos pais, Hilário Lourenço Tembe e Argentina Tomás Bucuane, o meu mais profundo reconhecimento pelo amor incondicional, pelos valores transmitidos e pelo apoio constante. Aos meus irmãos, Edmilson Hilário Tembe, Higinio Loureiro Hilário Tembe e Ercínia da Luz Hilário Tembe, a presença, o carinho fraternal e o incentivo de sempre.

Ao meu supervisor, Prof. Doutor Eng. Jorge Olívio Penicela Nhambiu, a minha sincera gratidão pela paciência, orientação atenta, ensinamentos valiosos e disponibilidade ao longo de todo este trabalho.

Á minha querida namorada, Neyde Catarina Mosse Pereira, pelo apoio emocional, pelas palavras de encorajamento e por acreditar em mim mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos colegas e amigos da Faculdade, Miguel Manuel Júnior, Adelino António Cumbe, Ilídio Romão Ugembe, Shaad Enoque Muteto, Simião Júlio Chiconela, o meu apreço pelas partilhas de conhecimento, pelo companheirismo e pelas vivências que tornaram esta jornada mais rica e leve.

A todos os que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho, a minha sincera gratidão.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus amados Pais, Hilário Lourenço Tembe e Argentina Tomás Bucuane, pelo amor incansável, pelos sacrifícios silenciosos e pela dedicação constante ao longo da minha vida.

RESUMO

O presente trabalho teve como objectivo o dimensionamento de uma máquina de arrefecimento de cerveja baseada em células Peltier. A metodologia contemplou o estudo dos fundamentos da transferência de calor, o dimensionamento de componentes como serpentina, alhetas e reservatório, bem como a utilização de simulações numéricas para prever o comportamento térmico do sistema. Foram analisados os tempos de arrefecimento da água e da cerveja, a eficiência térmica do conjunto e a avaliação económica da solução proposta. Os resultados demonstram que a máquina atinge 2 °C em 31 minutos para a água e permite o arrefecimento da cerveja de 37 °C para 4 °C em apenas 2 minutos por dose, confirmando a viabilidade técnica e económica da proposta. Palavras-chave: Célula Peltier, Arrefecimento de cerveja, Transferência de calor, Serpentina, Eficiência energética.

ABSTRACT

The present work aimed at the design of a beer cooling machine using Peltier cells. The methodology included the study of heat transfer fundamentals, the sizing of components such as coil, fins and reservoir, as well as the use of numerical simulations to predict the system's thermal behaviour. The cooling times of water and beer were evaluated, together with the thermal efficiency of the system and the economic assessment of the proposed solution. Results show that the machine reaches 2 °C in 31 minutes for water and allows cooling beer from 37 °C to 4 °C in only 2 minutes per serving, confirming both the technical and economic feasibility of the design. Keywords: Peltier module; Beer refrigeration; Thermal energy transfer; Wound heat exchanger; Energy efficiency performance.

Índice

DECLARAÇÃO DE HONRA	i
AGRADECIMENTOS	ii
DEDICATÓRIA.....	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
1. Introdução.....	1
1.1. Considerações Preliminares	1
1.2. Estrutura do Trabalho.....	2
1.3. Objectivos.....	3
1.3.1. Geral.....	3
1.3.2. Específicos.....	3
2. ESTADO DA ARTE.....	4
2.1. Fundamentos da Transferência de Calor	4
2.1.1. Condução Térmica	4
2.1.2. Convecção Térmica.....	4
2.1.3. Interações e Resistências Térmicas	5
2.1.4. Relevância em Sistemas Térmicos	5
2.2. Fundamentos da Refrigeração Termoeléctrica.....	6
2.3. Aplicações em Sistemas de Arrefecimento	8
2.4. Considerações de Projecto.....	9
2.5. Simulações e Análise Térmica	10
2.6. Lacunas Identificadas	11
3. Materiais e Métodos	11
3.1. Descrição Geral do Sistema	11
3.2. Materiais Utilizados	12
3.2.1. Célula Peltier	12
3.2.2. Poliestireno Expandido (EPS).....	13
3.2.3. Serpentina.....	13
3.2.4. Chapas de alumínio	14
3.2.5. Alhetas.....	14
3.2.6. Pasta térmica.....	15
3.2.7. Cooler.....	15
3.2.8. Termostato ligado a um Contactador	16
3.2.9. Fonte de alimentação.....	16
3.2.10. Torneiras.....	16
3.2.11. Madeira.....	17
3.2.12. Alças.....	17
3.2.13. Fecho de engate para a caixa	18
3.3. Critérios de Dimensionamento do Sistema de Arrefecimento	18

3.3.1. Determinação da Carga Térmica a Extrair da Cerveja	18
3.3.2. Cálculos do escoamento e transferência de calor por convecção para cerveja.....	20
3.3.3. Coeficiente de transferência de calor por convecção (Externo)	22
3.3.4. Determinação do Coeficiente de transferência de calor entre a água e célula Peltier	24
3.3.5. Determinação da área de troca térmica	25
3.3.6. Determinação das Dimensões da Serpentina.....	27
3.3.7. Seleção e Configuração das Células Peltier.....	28
3.3.8. Dimensionamento da alheta (Lado frio).....	31
3.3.9. Dimensionamento da alheta (Lado Quente)	36
3.3.10. Tempo de arrefecimento da água	39
3.3.11. Procedimentos da Simulação da Serpentina.....	43
4. Resultados e Discussões.....	44
4.1. Análise do desempenho Térmico da Serpentina	44
4.1.1. Coeficientes de transferência de calor.....	45
4.1.2. Geometria da serpentina.....	45
4.1.3. Análise paramétrica da serpentina.....	45
4.1.4. Resultados da Simulação da Serpentina	47
4.2. Resultados da alheta (lado frio).....	51
4.2.1. Análise paramétrica da alheta (Lado frio).....	52
4.3. Resultados da configuração das células Peltier e da alheta (lado quente).....	53
4.3.1. Análise paramétrica da configuração das células Peltier e da alheta (Lado quente)	54
4.4. Resultados tempo de arrefecimento da água	55
5. Protótipo da máquina de arrefecimento de cerveja utilizando células Peltier	57
5.1. Representação da Máquina de arrefecimento.....	57
5.2. Componentes principais periféricos a máquina de arrefecimento.....	58
6. Avaliação Económica.....	59
6.1. Estimativa de custos para a máquina de arrefecimento de cerveja utilizando células Peltier	59
6.2. Análise comparativa do consumo de energia da máquina de arrefecimento de cerveja utilizando células Peltier e um congelador.....	61
7. Conclusões e Recomendações.....	62
7.1. Conclusões	62
7.2. Recomendações.....	63
8. Referências Bibliográficas	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:Transferência de calor por condução Fonte: (BioQuímica, 2011).....	4
Figura 2:Correntes de convecção de calor em recipiente submetido a chamas; Fonte: (MUNDOEDUCAÇÃO, 2025).....	4
Figura 3: Representação esquemática da convecção natural e forçada sobre superfícies verticais e horizontais; Fonte: (Çengel & Afshin J, 2012)	5
Figura 4: Esquema de funcionamento das células Peltier; Fonte: (Yhaeffner, 2016)	6
Figura 5: Célula Peltier; Fonte: (Stroski, 2021)	7
Figura 6: Célula Peltier com alhetas; Fonte: (Silva, De Souza, & Silva, 2018).....	7
Figura 7: Esquema de um Ciclo Ideal de Compressão a Vapor; Fonte: (Rosa, 2020)	9
Figura 8: Esquema de funcionamento de uma célula Peltier com arrefecimento e dissipação de calor; Fonte: (Peruzzotti, 2024). Adaptado pelo Autor	10
Figura 9: Máquina de arrefecimento de cerveja; Fonte: (Autor, 2025).....	12
Figura 10: Célula Peltier; Fonte: (adaptado pelo Autor, 2025)	12
Figura 11:Pacas de Poliestireno Expandido; Fonte: (MANZAN, 2021).....	13
Figura 12: Serpentina; Fonte: (aguilera, 2025).....	13
Figura 13:Chapas de alumínio; Fonte: (refritubos, 2025)	14
Figura 14:Alheta; Fonte (Autor, 2025).....	14
Figura 15:Pasta térmica; Fonte: (OKS, 2021)	15
Figura 16:Cooler; Fonte: (Nexus, 2024)	15
Figura 17:Termostato ligado a um contactor; Fonte: (RoboBuilders, 2025)	16
Figura 18:Fonte de alimentação chaveada; Fonte: (DHCP, 2025).....	16
Figura 19:Torneira belga; Fonte: (MEMO, 2025).....	17
Figura 20:Torneira Plástica; Fonte: (BAZARA, 2025).....	17
Figura 21:Madeira; Fonte: (Retondo, 2021).....	17
Figura 22:Alça; Fonte: (leroymerlin, 2025)	17
Figura 23:Fecho de engate; Fonte:((mercadolivres, 2025)	18
Figura 24:Interface do Ansys	43
Figura 25: Malha gerada para a serpentina.....	48
Figura 26: Vista 3D da serpentina com entrada e saída de fluido	48
Figura 27: Contorno de temperatura da serpentina	49
Figura 28: Contorno de velocidade do fluido dentro da serpentina	50
Figura 29: Contorno de pressão na serpentina	50
Figura 30: Vista explodida protótipo da máquina de arrefecimento; Fonte:(Autor, 2025).....	57
Figura 31: Vista explodida dos principais componentes periféricos da máquina de arrefecimento de cerveja	58

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Gráfico da Relação entre ΔT , Tensão, Corrente e Potência de Refrigeração.....	29
Gráfico 2 – Gráfico da Variação do Tempo de residência da cerveja na serpentina em função do número de Reynolds e a velocidade	45
Gráfico 3– Gráfico do número de Reynolds em função do coeficiente convectivo interno e externo	46
Gráfico 4– Gráfico do número de células Peltier em função do calor a ser retirado da cerveja e o calor retirado por cada célula Peltier	47
Gráfico 5 – Gráfico da Variação da Temperatura da Cerveja ao Longo do Tempo.....	49
Gráfico 6 – Gráfico do espaçamento entre as alhetas em função do h_L^f e da η_a^f	52
Gráfico 7 – Gráfico da Variação do calor absorvido em função da altura e comprimento da alheta.....	53
Gráfico 8: Gráfico da Variação da diferença de temperatura em função do COP e do Q_c por célula	54
Gráfico 9: Gráfico da Variação do número de alhetas em função do calor libertado pela alheta e da eficiência	55

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1– Resultados obtidos para a serpentina.....	44
Tabela 2: Resultados obtidos da alheta (Fria)	51
Tabela 3: Resultados obtidos da configuração das células Peltier e da alheta (Lado quente).....	54
Tabela 4: Resultados obtidos no tempo de arrefecimento da água.....	56
Tabela 5: Legenda da Vista explodida	58
Tabela 6: Investimento inicial total do Projecto.....	60

NOMENCLATURAS

Q_{vol} → É o caudal volumétrico da cerveja $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

V → É o volume da cerveja $[m^3]$

t → É o tempo $[s]$

\dot{m} → É o fluxo mássico da cerveja $\left[\frac{kg}{s}\right]$

ρ_{cerv} → É a densidade da cerveja $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

Q_{ret} → É a quantidade de calor a ser retirado da cerveja $[W]$;

$Cp_{cerveja}$ → Calor específico da cerveja $\left[\frac{J}{(kg \times K)}\right]$;

T_i → É a temperatura inicial da cerveja $[^\circ C]$;

T_f → É a temperatura final da cerveja $[^\circ C]$.

$A_{secção}$ → É a área da secção transversal da serpentina $[m^2]$;

d_{int} → É o diâmetro interno da serpentina $[m]$;

π → É a constante Pi ($\approx 3,1416$) [adimensional];

v → É a velocidade média da cerveja $\left[\frac{m}{s}\right]$;

$Re^{Cerveja}$ → É o número de Reynolds para cerveja [adimensional];

μ_{cerv} → É a viscosidade dinâmica da cerveja $[Pa \cdot s]$.

d_{int} → É o diâmetro interno da serpentina $[m]$;

f_c → É o factor de correcção para tubos curvados [adimensional];

R → É o raio médio de curvatura da serpentina $[m]$.

h_{int} → Coeficiente de transferência de calor por convecção no interior da serpentina $\left(\frac{W}{m^2 \times K}\right)$;

k_{cerv} → É a condutividade térmica da cerveja $[W/(m \times K)]$;

$N_u^{cerveja}$ → É o número de Nusselt para a cerveja [-];

T_{sup}^{extern} → É a temperatura média da superfície externa $[^\circ C]$;

$T_{água}$ → É a temperatura final da cerveja $[^\circ C]$.

$Gr_D^{serp e água}$ → É o número de Grashof entre a serpentina e água [adimensional];

β → É o coeficiente de expansão volumétrica $[1/K]$;

g → É a gravidade $[m/s^2]$;

T_{sup}^{extern} → É a temperatura média da superfície externa [°C];

d_{ext} → É o diâmetro externo da serpentina [m];

ν_c → É a viscosidade cinemática do fluido [m^2/s];

$Ra_D^{serp e \acute{a}gua}$ → É o número de Rayleigh entre a serpentina e a água [adimensional];

$Pr_{\acute{a}gua}$ → É o número de Prandtl da água [adimensional];

$N_u^{serp e \acute{a}gua}$ → É o número de Nusselt entre a serpentina e a água [adimensional];

h_{exter} → É o Coeficiente de transferência de calor por convecção no externo da serpentina [$\frac{W}{m^2 \times K}$];

$k_{\acute{a}gua}$ → É a Condutividade térmica da água [$W/(m \times K)$];

$Gr_l^{\acute{a}gua e cp}$ → É o número de Grashof [adimensional];

$T_{superf, cp}$ → É a temperatura da superfície das células peltier (lado frio) [°C];

L_c → É o comprimento característico da célula Peltier [m];

$Ra_l^{\acute{a}gua e cp}$ → É o número de Rayleigh [adimensional];

$N_u^{\acute{a}gua e cp}$ → É o número de Nusselt entre a água e a célula Peltier [adimensional];

$Ra_l^{\acute{a}gua e cp}$ → É o número de Rayleigh entre a água e a célula Peltier [adimensional];

$h_{\acute{a}gua}^{cp}$ → É o Coeficiente de transferência de calor por convecção entre a água e as células Peltier [$\frac{W}{m^2 \times K}$];

L → É o comprimento da serpentina [m];

$R_{conv, interna}$ → É a resistência térmica por convecção externa [$\frac{K}{W}$];

$R_{conv, externa}$ → É a resistência térmica por convecção externa [$\frac{K}{W}$];

U → É o coeficiente global de transferência de calor [$\frac{W}{m^2 \times K}$];

$R_{conv, interna}$ → É a resistência térmica por convecção externa [$\frac{K}{W}$];

A_s → É a área de troca térmica [m^2];

$d_{m\u00e9dio}$ → É o diâmetro médio da serpentina [m];

d_{int} → É o diâmetro interno da serpentina [m];

N_{esp} → É o número de espiras [adimensional];

D_{rolo} → É o diâmetro do rolo da serpentina [m];
 H_{serp} → É a altura total da serpentina enrolada em espiras [m];
 t_{res} → É o tempo de residência da cerveja dentro da serpentina [s];
 N_{cp} → É o número de células Peltier necessárias [adimensional];
 η → É o rendimento estimado da célula Peltier [adimensional];
 P_{refrig} → É a potência de refrigeração fornecida por cada módulo Peltier [W].
 Q_c → É a quantidade de calor absorvido pela face fria da célula Peltier [W];
 N_{cp} → É o número de células Peltier necessárias [adimensional];
 ΔT → É a diferença de temperatura entre o lado quente (T_h) e o frio (T_c) [°C];
 T_h → É a temperatura do lado quente da célula Peltier [°C];
 T_c → É a temperatura do lado frio da célula Peltier [°C];
 V → É a tensão aplicada à célula [V];
 P_{in} → É a Potência eléctrica de entrada [W];
 I → É a Intensidade de corrente [A].
 Q_h → É a Quantidade de calor rejeitada no lado quente da célula Peltier [W];
 COP → É o Coeficiente de desempenho da célula Peltier [adimensional];
 A → Área da superfície da célula Peltier [m²];
 Ra_{alh}^f → É o número de Rayleigh entre a alheta (lado frio) e a água [adimensional];
 q_s → É o fluxo de calor dissipado por uma célula Peltier [W/m²];
 S^f → É o espaçamento entre as alhetas (lado frio) [m];
 N_u^f → É o número de Nusselt entre a alheta (lado frio) e a água [adimensional];
 h_L^f → É o coeficiente de transferência de calor entre a alheta (lado frio) e a água [$\frac{W}{m^2 \times K}$];
 N^f → É o número de alhetas (lado frio) [adimensional];
 W^f → É a largura total do conjunto de alhetas [m];
 t^f → É a espessura da alheta [m];
 P^f → É o perímetro da secção transversal da alheta (lado frio) [m];
 A_c^f → É a área da secção transversal da alheta (lado frio) [m²];

$L_c^f \rightarrow$ É o comprimento característico da alheta (lado frio) [m];
 $H^f \rightarrow$ É o comprimento da alheta (lado frio) no sentido do escoamento [m];
 $m^f \rightarrow$ É o parâmetro característico da alheta (lado frio) [m^{-1}];
 $h_L^f \rightarrow$ É o coeficiente de transferência de calor entre a alheta (lado frio) e a água [$\frac{W}{m^2 \times K}$];
 $k_{al} \rightarrow$ É a condutividade térmica do alumínio [$W/(m \times K)$];
 $\eta_a^f \rightarrow$ É a eficiência da alheta (lado frio) [adimensional];
 $A_{conv_1alh} \rightarrow$ É a área de convecção de uma alheta (lado frio) [m^2];
 $A_{entre_alh} \rightarrow$ É a área entre as alhetas (lado frio) [m^2];
 $T_\infty \rightarrow$ É a temperatura da água ao redor da alheta [$^\circ C$];
 $T_b \rightarrow$ É a temperatura na base da alheta [$^\circ C$];
 $T_H \rightarrow$ É a temperatura da alheta na borda superior da placa [$^\circ C$];
 $A^{cooler} \rightarrow$ É a área do cooler [m^2];
 $C^{cooler} \rightarrow$ É o comprimento do cooler [m];
 $L^{cooler} \rightarrow$ É a largura do cooler [m];
 $v_{ar} \rightarrow$ É a velocidade do ar [m/s];
 $Q_v^{alh} \rightarrow$ É a vazão volumétrica entre a alheta e o ar [$\frac{m^3}{s}$];
 $R_e^q \rightarrow$ É o número de reynolds entre a alheta (lado quente) e o ar [adimensional];
 $v_{ar} \rightarrow$ É a velocidade do ar [m/s];
 $W^q \rightarrow$ É a largura total do conjunto de alhetas (lado quente) [m];
 $\nu_c^q \rightarrow$ É a viscosidade cinemática do ar [$\frac{m^2}{s}$];
 $N_u^q \rightarrow$ É o número de Nusselt entre a alheta (lado quente) e o ar [adimensional];
 $Pr_{ar} \rightarrow$ É a prandtl do ar [adimensional];
 $h_{ar} \rightarrow$ É o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a alheta e o ar [adimensional];
 $k_{ar} \rightarrow$ É a condutibilidade térmica do ar [$W/(m \times K)$];
 $P^q \rightarrow$ É o perímetro da secção transversal da alheta (lado quente) [m];
 $t^q \rightarrow$ É a espessura da alheta (lado quente) [m];
 $A_c^q \rightarrow$ É a área da seção transversal da alheta (lado quente) [m^2];

$m^q \rightarrow$ É o parâmetro característico da alheta (lado quente) [m^{-1}];

$\eta_a^q \rightarrow$ É a eficiência da alheta (lado quente) [adimensional];

$L_c^q \rightarrow$ É o comprimento característico da alheta (lado frio) [m];

$N^q \rightarrow$ É o número de alhetas (lado quente) [adimensional];

$S^q \rightarrow$ É o espaçamento entre as alhetas (lado quente) [m];

$Q_{total}^{quente} \rightarrow$ É o calor dissipado pela alheta (lado quente) [W];

$L_{alh}^q \rightarrow$ É a largura total do conjunto de alhetas (lado quente) [m];

$T_{\infty}^{ar} \rightarrow$ É a temperatura do ar ao redor da alheta [$^{\circ}C$];

$T_b^q \rightarrow$ É a temperatura na base da alheta (lado quente) [$^{\circ}C$];

$C^{recip} \rightarrow$ É o comprimento do recipiente que contém água [m];

$L^{recip} \rightarrow$ É a largura do recipiente que contém água [m];

$H^{recip} \rightarrow$ É a altura do recipiente que contém água [m];

$A_{ser}^{ocup} \rightarrow$ É a área ocupada pela serpentina [m^2];

$V_{total} \rightarrow$ É o volume total do recipiente [m^3];

$V_{serp} \rightarrow$ É o volume ocupado pela serpentina [m^3];

$V_f \rightarrow$ É o volume ocupado pelas alhetas [m^3];

$V_{\acute{a}gua} \rightarrow$ É o volume útil da água [m^3];

$\rho_{\acute{a}gua} \rightarrow$ É a densidade da água [$\frac{kg}{m^3}$];

$m_{\acute{a}gua} \rightarrow$ É a massa da água [kg];

$C_{p\acute{a}gua} \rightarrow$ É o calor específico da água [$\frac{J}{kg \times ^{\circ}C}$];

$T_{i,\acute{a}gua} \rightarrow$ É a temperatura inicial da água [$^{\circ}C$];

$T_{f,\acute{a}gua} \rightarrow$ É a temperatura final da água [$^{\circ}C$];

$A_{alheta_fria} \rightarrow$ É a área total de uma alheta (Lado frio) [m^2];

$A_{base} \rightarrow$ É a área total entre as lâminas de uma alheta (lado frio) [m^2];

$L_c^{alheta} \rightarrow$ É o comprimento característico da alheta (lado frio) [m]

$b \rightarrow$ É a constante de resfriamento [$\frac{1}{s}$];

$A_{alhetaT} \rightarrow$ É a área total das alhetas (lado frio) [m^2];

V_{albeta} → É o volume total das alhetas (lado frio) [m^3];

t_{arref} → É o tempo de arrefecimento da água [s];

E → É a energia elétrica consumida [kWh]

1. Introdução

1.1. Considerações Preliminares

A conservação térmica de produtos alimentares e bebidas representa uma das maiores preocupações da engenharia moderna, especialmente no que respeita à manutenção da qualidade, segurança e propriedades sensoriais destes produtos. No caso específico da cerveja, bebida de consumo generalizado em todo o mundo, a temperatura adequada de serviço influencia directamente a experiência sensorial da cerveja. A falta de controlo térmico pode comprometer a experiência do consumidor, bem como o valor comercial do produto, (KLIMCZACK, SKONECZNY, & POREDA, 2024).

A cerveja é uma das bebidas fermentadas mais antigas e consumidas globalmente, com uma produção que remonta a milénios e que hoje se beneficia de avanços tecnológicos significativos. No entanto, apesar dos progressos na produção, a etapa de arrefecimento e manutenção da temperatura ideal permanece um desafio, particularmente em contextos onde a refrigeração convencional não é viável ou sustentável. Neste sentido, o desenvolvimento de sistemas de arrefecimento eficientes, como os baseados em células Peltier, surge como uma solução promissora, combinando eficiência energética, portabilidade e precisão no controlo térmico

Segundo (ELETROGATE, 2023), a célula Peltier é um dispositivo que aproveita o chamado efeito termoeléctrico para realizar a transferência de calor entre duas faces, por meio da circulação de corrente eléctrica através de dois materiais semicondutores distintos. Ao ser alimentada electricamente, as cargas em movimento transportam consigo energia térmica, provocando o aquecimento de um dos lados da célula e o arrefecimento do lado oposto. Esta tecnologia é particularmente adequada para aplicações de pequena escala, como o arrefecimento de líquidos, mini frigoríficos, bebedouros ou mesmo componentes electrónicos, como processadores.

Dada a crescente procura por soluções sustentáveis e compactas de refrigeração, especialmente em ambientes onde os sistemas tradicionais são dispendiosos ou impraticáveis, torna-se pertinente explorar a aplicabilidade das células Peltier no arrefecimento de bebidas como a cerveja. A simplicidade construtiva, aliada à possibilidade de controlo preciso da temperatura, torna esta tecnologia particularmente atractiva para projectos de pequena e média escala.

1.2. Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está organizado em sete capítulos, estruturados de modo a apresentar de forma clara e progressiva o desenvolvimento do estudo:

- Capítulo 1 - Introdução: contém as considerações preliminares, a contextualização do problema e a definição dos objectivos gerais e específicos.
- Capítulo 2 - Estado da Arte: apresenta a fundamentação teórica sobre transferência de calor, princípios da refrigeração termoelétrica, funcionamento das células Peltier, aplicações práticas, considerações de projecto e simulações, identificando ainda lacunas na literatura.
- Capítulo 3 - Materiais e Métodos: descreve os materiais seleccionados (células Peltier, serpentina, alhetas, isolamentos, entre outros), a configuração do sistema e os critérios de dimensionamento, incluindo cálculos térmicos, hidráulicos e simulações computacionais.
- Capítulo 4 - Resultados e Discussões: expõe os resultados obtidos para a serpentina, alhetas, células Peltier e tempo de arrefecimento da água, complementados por gráficos, tabelas e análise crítica.
- Capítulo 5 - Protótipo da Máquina de Arrefecimento: apresenta a disposição construtiva da máquina, a representação esquemática e a vista explodida dos componentes principais e periféricos.
- Capítulo 6 - Avaliação Económica: reúne a estimativa de custos dos materiais, e componentes de potência e controlo, bem como a análise comparativa de consumo de energia entre a máquina proposta e sistemas convencionais (gileiras).
- Capítulo 7 - Conclusões e Recomendações: sintetiza os principais resultados obtidos, discute a viabilidade técnica, limitações e perspectivas de melhoria, e apresenta recomendações para futuros trabalhos na área.

1.3. Objectivos

1.3.1. Geral

- ✓ Dimensionar uma máquina de arrefecimento de cerveja utilizando células Peltier.

1.3.2. Específicos

- ✓ Analisar os princípios da transferência de calor envolvidos no processo de arrefecimento;
- ✓ Determinar a quantidade de células Peltier necessárias para o sistema de refrigeração da cerveja;
- ✓ Dimensionar a serpentina e as alhetas;
- ✓ Determinar o tempo de arrefecimento da cerveja;
- ✓ Determinar o tempo de arrefecimento da água;
- ✓ Realizar simulações para verificar se a cerveja atinge a temperatura desejada.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Fundamentos da Transferência de Calor

Segundo (NHAMBIU, 2023), “Transmissão de Calor é o processo pelo qual a energia é transportada, sempre que existir um gradiente de temperatura no interior de um sistema ou, quando dois sistemas com diferentes temperaturas são colocados em contacto”. Este processo ocorre de três formas, quais sejam: condução, convecção e radiação térmica, (MOREIRA, 2012).

2.1.1. Condução Térmica

Segundo (FILHO, 2016), a condução é o processo através do qual o calor se move de uma zona com temperatura mais elevada para outra com temperatura mais baixa, dentro de um mesmo material (sólido, líquido ou gás) ou entre materiais diferentes que estejam em contacto directo. Este fenómeno pode ser entendido como a passagem de energia das partículas que têm mais energia para aquelas que têm menos, devido à interação entre elas.

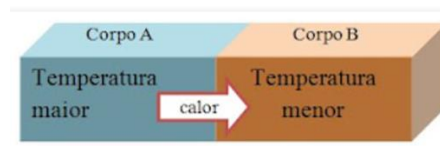


Figura 1: Transferência de calor por condução Fonte: (BioQuímica, 2011)

2.1.2. Convecção Térmica

Segundo (DA BARROSA, 2004), a convecção é o processo pelo qual a energia é transferida devido ao movimento do próprio material, provocado por uma diferença de temperatura. Este fenómeno acontece principalmente em fluidos, como líquidos e gases. Num fluido, em que as partículas se podem mover livremente, aquelas que entram em contacto com uma superfície quente aquecem-se e deslocam-se para zonas mais frias. Este movimento das partículas provoca a transferência de calor de um lugar para outro, sendo esta a essência da convecção.

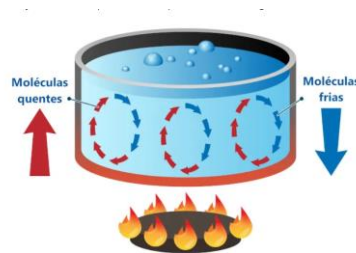


Figura 2: Correntes de convecção de calor em recipiente submetido a chamas; Fonte: (MUNDOEDUCAÇÃO, 2025)

Segundo (INSTRUMENTS, 2024) Existem dois tipos principais de convecção:

- **A convecção natural** ocorre quando o fluido se desloca por causa de forças naturais, como o empuxo, que provoca um movimento circular devido às diferenças de temperatura: o fluido quente sobe enquanto o fluido frio desce.

- A **convecção forçada** move o fluido por meio de uma força externa, por exemplo, um ventilador ou bomba, para aumentar a transferência de calor.

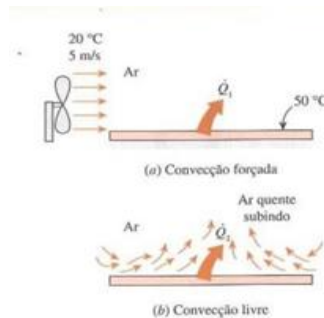


Figura 3: Representação esquemática da convecção natural e forçada sobre superfícies verticais e horizontais; Fonte: (Çengel & Afshin J, 2012)

Figura 3: Representação esquemática da convecção natural e forçada sobre superfícies verticais e horizontais; Fonte: (ÇENGEL & AFSHIN J, 2012)

2.1.3. Interações e Resistências Térmicas

Em sistemas compostos, é comum que os mecanismos de condução e convecção ocorram em sequência, formando uma cadeia de resistência térmica total. Segundo (SINDATHERMAL, 2021), resistência térmica, análoga à resistência elétrica, é definida como:

$$R = \frac{\Delta T}{q} \quad (2.1.)$$

Onde ΔT é a diferença de temperatura e, q é o fluxo de calor. A representação por resistências térmicas permite modelar sistemas compostos de maneira simplificada, incluindo múltiplas camadas de materiais e interfaces fluido-sólido.

2.1.4. Relevância em Sistemas Térmicos

A compreensão rigorosa da transferência de calor é essencial para o dimensionamento e otimização de sistemas térmicos em engenharia. A eficiência térmica de dispositivos e sistemas depende do controle adequado dos fluxos de calor internos, sendo muitas vezes necessário reduzir perdas térmicas, aumentar a área de troca ou melhorar o escoamento dos fluidos. Em particular, a convecção forçada é preferida em situações que exigem elevada remoção de calor em curto intervalo de tempo.

2.2. Fundamentos da Refrigeração Termoelétrica

Segundo, (JOÃO, 2023), módulos termoelétricos (ou conversores termoelétricos) são dispositivos de estado sólido que operam sem partes móveis, baseando-se em efeitos termoelétricos para a transferência de calor ou para a geração de energia elétrica. Quando aplicados ao arrefecimento, como no caso dos refrigeradores termoelétricos, tais módulos funcionam como bombas de calor, permitindo o controlo preciso da temperatura por meio da corrente elétrica aplicada.

A refrigeração termoelétrica, vulgarmente associada ao Efeito Peltier, é um método de arrefecimento que se baseia em fenómenos eletrónicos no estado sólido, dispensando o uso de fluidos refrigerantes e de componentes mecânicos, como os compressores típicos dos sistemas tradicionais de refrigeração, (MATAN, 2023).

Em 1821, Seebeck observou que, ao aplicar uma diferença de temperatura entre as junções de dois metais distintos num circuito fechado, surgia uma corrente elétrica. Anos mais tarde, em 1834, Peltier descobriu o efeito inverso: ao fazer passar uma corrente elétrica através de dois materiais diferentes, uma das junções arrefecia enquanto a outra aquecia, provocando uma diferença de temperatura. Estes fenómenos constituem a base de funcionamento dos módulos termoelétricos actuais (SILVA T. P., 2021).

O efeito Peltier ocorre quando uma corrente elétrica atravessa a união de dois materiais diferentes, causando a absorção de calor numa das junções e a sua libertação na outra. Tal fenómeno resulta de uma força electromotriz gerada pela diferença entre os materiais, a qual faz com que os portadores de carga conduzam energia de forma desigual. A direcção da corrente determina qual das junções aquece ou arrefece, tornando o fenómeno reversível: ao inverter a corrente, invertem-se também as funções térmicas das junções (FERNANDES, 2012).

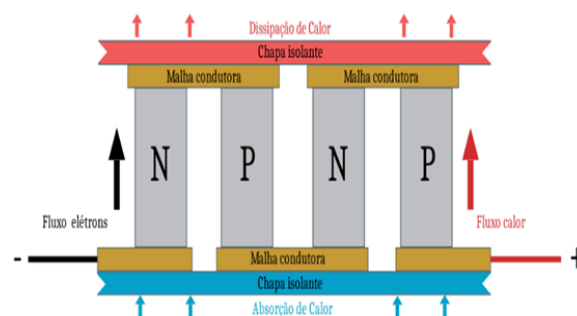


Figura 4: Esquema de funcionamento das células Peltier; Fonte: (Yhaeffner, 2016)

Segundo (SOUZA, 2011), o módulo ou célula de Peltier é constituído por um conjunto de junções termoelétricas ligadas electricamente em série e termicamente em paralelo, inseridas entre duas placas de cerâmica.

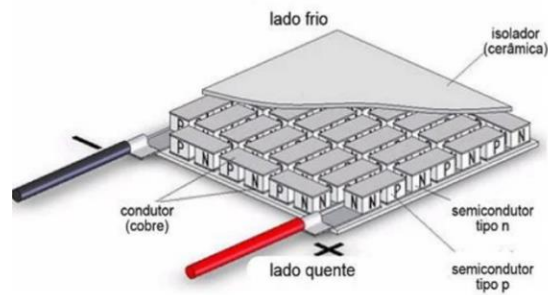


Figura 5: Célula Peltier; Fonte: (Stroski, 2021)

Segundo - (LINHARES, SUGUIMOTO, & De SOUZA, 2020), desempenho das células Peltier é influenciado pela qualidade dos materiais, pelo desenho térmico e pelas condições de funcionamento. Melhorias na resistência de contacto, nas interfaces térmicas e na eficiência dos trocadores de calor aumentam a sua eficácia. É fundamental controlar a temperatura da face quente, mantendo-a abaixo de aproximadamente 75 °C para evitar perda de rendimento e danos.

O coeficiente de desempenho (COP) varia consoante a potência aplicada: em potências baixas, o COP é superior, embora com uma diferença de temperatura (ΔT) maior; em potências moderadas, existe um ponto óptimo que maximiza a absorção de calor sem comprometer a eficiência. Assim, o projecto deve equilibrar estes factores para otimizar o desempenho e a durabilidade.

Para evitar o sobreaquecimento das placas, é essencial a utilização de dissipadores de calor e ventiladores, tanto do lado quente como do lado frio (quando aplicável). Na montagem, recomenda-se a aplicação de pasta térmica entre a placa e o dissipador, de modo a aumentar a eficiência da transferência térmica, (CAMPOS, 2016).

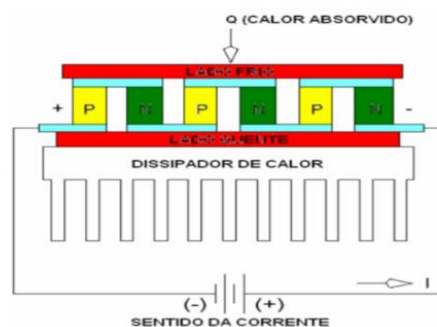


Figura 6: Célula Peltier com alhetas; Fonte: (Silva, De Souza, & Silva, 2018)

2.3. Aplicações em Sistemas de Arrefecimento

O efeito Peltier é utilizado em pastilhas (também conhecidas como células ou módulos) de Peltier para diversos fins, tais como a refrigeração de componentes electrónicos, pois permitem, ocupando pouco espaço, transferir calor continuamente para o ambiente sem a necessidade de gases ou equipamentos que poluam o meio ambiente, necessitando apenas de uma fonte eléctrica de corrente contínua e de dissipadores de calor, (VÉRAS, 2015) .

Segundo (MAESTRELLI, 2015), embora a tecnologia de refrigeração por compressão convencional continue a ser a mais difundida, a refrigeração electrónica baseada no efeito Peltier tem ganhado relevância em aplicações de pequena escala, onde a portabilidade, a eficiência energética e a ausência de partes móveis são essenciais. Esta transição tecnológica é notória em sectores como o industrial, automóvel, militar e de bens de consumo, onde módulos termoeléctricos são utilizados em desumidificadores, refrigeradores portáteis, sistemas de climatização de veículos, mini-geleiras e até no arrefecimento de microprocessadores. Casos extremos, como o uso em submarinos, demonstram a versatilidade desta tecnologia para arrefecimento em espaços confinados ou em condições adversas, onde sistemas tradicionais seriam inviáveis.

Estudos como os de (ZANIN, 2023) evidenciam que, apesar dos desafios associados ao elevado consumo energético das pastilhas termoeléctricas e à produção limitada de energia pelos painéis fotovoltaicos, factores que condicionam a capacidade de carga térmica, o sistema termoeléctrico demonstra eficácia prática quando operado dentro dos seus parâmetros projectados. O desempenho positivo torna-se evidente ao alcançar e manter estável a temperatura de 5 °C, garantindo a conservação adequada dos produtos, mesmo dentro das limitações energéticas existentes. Esta eficiência operacional em condições reais realça o potencial da tecnologia para aplicações portáteis, onde se equilibra o consumo energético e a performance térmica.

Outros autores como (MANHIÇA, 2018), têm procurado validar sistemas termoeléctricos em contexto real. Por exemplo, ele desenvolveu uma proposta para um sistema de ar condicionado automóvel baseado em módulos termoeléctricos Peltier, em substituição do sistema tradicional, com o objectivo de minimizar o consumo de combustível. Embora o modelo não tenha sido construído, este estudo reforça a viabilidade da aplicação da tecnologia termoeléctrica.

Algumas investigações como de (SILVA K. , 2012), destacam as diferenças fundamentais entre a refrigeração termoeléctrica e os sistemas convencionais. Enquanto estes últimos utilizam fluidos refrigerantes e compressores mecânicos, os módulos termoeléctricos operam com materiais semicondutores dopados, nos quais o fluxo de electrões, induzido por uma fonte de corrente contínua, substitui o ciclo de compressão e expansão do refrigerante. Neste sistema, o dissipador

de calor assume a função do condensador, removendo a energia térmica gerada. Quando é aplicada uma diferença de potencial, os portadores de carga (electrões e lacunas) transportam calor de uma junção para outra: absorvendo energia térmica no lado frio (em contacto com o ambiente a arrefecer) e libertando calor no lado quente (acoplado a um dissipador). Esta operação directa, sem partes móveis ou fluidos, simplifica o projecto e elimina a necessidade de componentes complexos, como compressores.

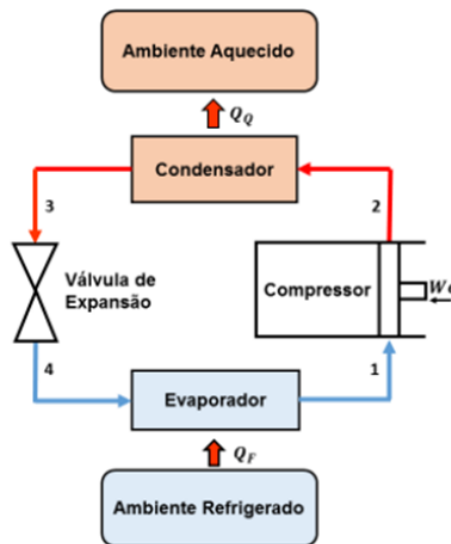


Figura 7: Esquema de um Ciclo Ideal de Compressão a Vapor; Fonte: (Rosa, 2020)

2.4. Considerações de Projecto

Um dos principais desafios no dimensionamento de sistemas termoeléctricos é o equilíbrio térmico entre o calor a ser removido e a capacidade real de arrefecimento dos módulos. Um dimensionamento incorrecto pode conduzir ao efeito contrário, em que o calor gerado no lado quente prejudica o desempenho global do sistema.

A Figura abaixo ilustra de forma esquemática o princípio de funcionamento de uma célula Peltier, evidenciando a necessidade de dissipar o calor no lado quente para garantir a eficiência global do sistema.

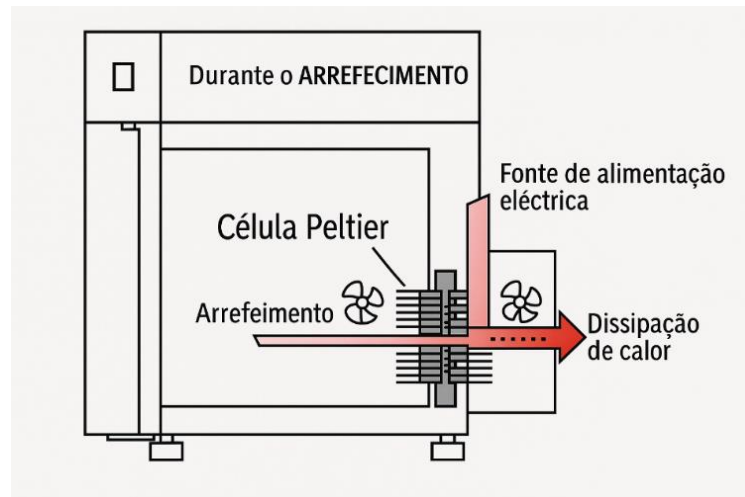


Figura 8: Esquema de funcionamento de uma célula Peltier com arrefecimento e dissipação de calor; Fonte: (Peruzzotti, 2024). Adaptado pelo Autor

A eficiência de um sistema termoelétrico Peltier depende, essencialmente, do Coeficiente de Desempenho (COP), que varia com a corrente aplicada, o diferencial de temperatura (ΔT) entre os lados quente e frio, o desenho térmico do sistema termoelétrico Peltier e o tipo de alimentação do controlador. O COP atinge o seu máximo quando a corrente está entre 30% e 60% do valor da corrente máxima do módulo, especialmente para ΔT inferiores a 25 K. Um bom projecto térmico implica o uso de dissipadores eficazes e a selecção adequada do módulo Peltier. Controladores TEC (refrigeradores termoelétricos) e a redução das perdas térmicas aumentam significativamente o desempenho. Minimizar a diferença de temperatura e arrefecer eficazmente o lado quente são factores fundamentais para maximizar a eficiência, (ENGINEERING, 2025).

Outro aspecto relevante é o isolamento térmico, que segundo (WILLICH, 2025) é uma técnica utilizada para reduzir a troca de calor entre dois ambientes com temperaturas diferentes, normalmente entre o interior de um edifício e o ambiente exterior. “O isolamento com isopor tem-se destacado como uma das melhores opções para garantir eficiência energética e conforto térmico em projectos industriais.” (INDUSTRIAL, 2002). Desta forma, assegura-se que a energia térmica extraída pelo módulo seja efectivamente removida do fluido alvo, evitando desperdícios na compensação de trocas térmicas com o exterior.

2.5. Simulações e Análise Térmica

Segundo, (Engineering, 2024) as simulações numéricas (ANSYS, Autodesk CFD, COMSOL) têm revolucionado o desenvolvimento de produtos, substituindo métodos tradicionais por modelos virtuais. Estas simulações permitem reduzir custos e prazos ao eliminar a necessidade de protótipos físicos, enquanto possibilitam a optimização de materiais e geometrias de forma virtual. A sua precisão analítica permite identificar falhas precocemente e testar condições extremas com segurança. Para além disso, promovem a sustentabilidade ao diminuir o desperdício de materiais

e energia. Por fim, asseguram a conformidade normativa em sectores críticos, combinando eficiência económica, técnica e ambiental.

Por estes motivos, serão empregues simulações neste projecto para prever o comportamento térmico, a distribuição de temperaturas da cerveja ao longo da serpentina e o tempo necessário para atingir a temperatura desejada.

2.6. Lacunas Identificadas

Apesar dos avanços nas tecnologias termoeléctricas, persistem lacunas significativas na literatura relativamente ao uso destas tecnologias em sistemas de arrefecimento de bebidas, particularmente em contextos com restrições energéticas, como os ambientes africanos. A maior parte dos estudos concentra-se em aplicações industriais ou em laboratórios de micro refrigeração, sem abordar directamente as condições reais de utilização em climas quentes, que exigem elevada robustez e autonomia.

Este trabalho pretende colmatar parte desta lacuna ao propor um modelo completo de dimensionamento, fundamentado em análises térmicas rigorosas, simulações numéricas e avaliação da eficiência do sistema. Ao focar-se especificamente no arrefecimento de cerveja, uma aplicação prática, popular e comercialmente relevante, o estudo contribui para a expansão do uso de tecnologias sustentáveis em produtos do dia-a-dia.

3. Materiais e Métodos

3.1. Descrição Geral do Sistema

O sistema consiste numa máquina de arrefecimento de cerveja, na qual a cerveja pressurizada, proveniente do barril, é conduzida através de uma serpentina instalada no interior de um recipiente em alumínio. Este recipiente encontra-se alojado numa caixa de isopor, que assegura o isolamento térmico e minimiza as perdas de calor para o ambiente.

A água contida no recipiente é arrefecida pelas células Peltier, que actuam por meio da transferência de calor por condução. Este fluido, ao ser arrefecido, transfere o seu frio para a serpentina, promovendo o arrefecimento da cerveja que nela circula. Para otimizar o processo de transferência térmica, as faces frias das células Peltier estão equipadas com alhetas, que aumentam o coeficiente de transferência de calor por convecção natural para a água.

Na face quente, as células estão acopladas a dissipadores equipados com *coolers*, os quais promovem a convecção forçada, assegurando a rápida dissipação do calor gerado e prevenindo o sobreaquecimento do sistema. O controlo da temperatura é assegurado por sensores e termostatos digitais, que garantem a estabilidade térmica e a segurança operacional.

O sistema dispõe ainda de torneiras para a saída da cerveja já arrefecida e para a drenagem da água do recipiente, bem como de uma tampa com fecho seguro, que permite a reposição do fluido e mantém o isolamento térmico.

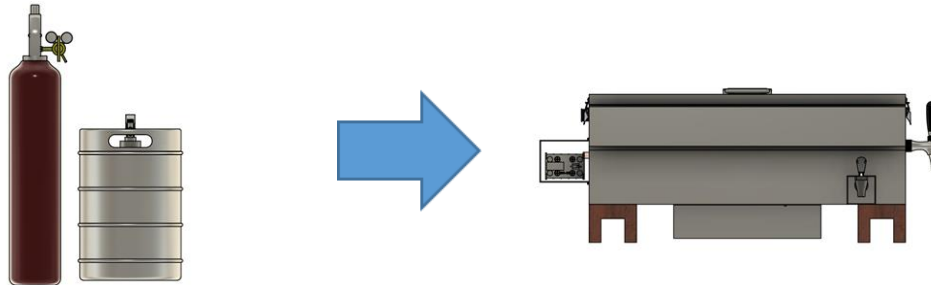


Figura 9: Máquina de arrefecimento de cerveja; Fonte: (Autor, 2025)

3.2. Materiais Utilizados

Neste subcapítulo, apresentam-se os materiais empregados na construção do protótipo da máquina de arrefecimento de cerveja utilizando células Peltier. A selecção dos materiais considerou propriedades térmicas, compatibilidade electromecânica, disponibilidade no mercado e custo-benefício.

3.2.1. Célula Peltier

As células termoeléctricas modelo TEC1-12740 foram seleccionadas para o sistema de arrefecimento devido à sua capacidade eficiente de transferência de calor e compatibilidade com a alimentação eléctrica disponível. Estas células operam segundo o princípio do efeito Peltier, pelo qual a passagem de corrente contínua provoca uma transferência de calor entre as suas faces, gerando uma diferença de temperatura útil para a refrigeração.



Figura 10: Célula Peltier; Fonte: (adaptado pelo Autor, 2025)

3.2.2. Poliestireno Expandido (EPS)

Segundo (KNAUF, 2025), este material é muito usado em sistemas de conservação térmica porque ajuda a manter alimentos e bebidas na temperatura ideal por mais tempo. O poliestireno expandido (EPS) tem como principal função reduzir as perdas de calor para o meio externo, mantendo a água refrigerada numa temperatura controlada por mais tempo.



Figura 11: Pacas de Poliestireno Expandido; Fonte: (MANZAN, 2021)

3.2.3. Serpentina

A serpentina é um dos elementos fundamentais do sistema, responsável pela troca térmica entre o fluido refrigerado (cerveja) e a água arrefecida contida no reservatório. Para esta aplicação, foi utilizada uma serpentina fabricada em tubo de cobre, que segundo (TUBALEQUIPAMENTOS, 2025), o material escolhido apresenta uma elevada condutividade térmica, resistência à corrosão e facilidade de conformação mecânica.

O tubo foi enrolado de forma helicoidal e submerso na água fria, permitindo que o calor da cerveja em circulação seja transferido para a água, reduzindo gradualmente a sua temperatura antes da extracção pela torneira.



Figura 12: Serpentina; Fonte: (aguilera, 2025)

3.2.4. Chapas de alumínio

Segundo (REFRITUBOS, 2025), o alumínio é um material amplamente utilizado na engenharia devido às suas propriedades físicas e químicas, como leveza, elevada resistência mecânica, boa resistência à corrosão e elevada condutividade térmica.

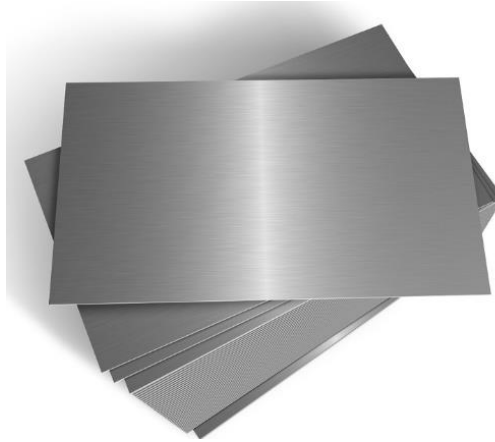


Figura 13: Chapas de alumínio; Fonte: (refritubos, 2025)

3.2.5. Alhetas

Segundo (OLIVEIRA, 2024), as alhetas são superfícies estendidas utilizadas para aumentar a taxa de transferência de calor entre um sólido e um fluido adjacente, sendo amplamente aplicadas em sistemas térmicos para melhorar o desempenho da convecção.

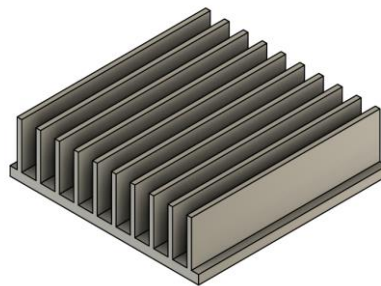


Figura 14: Alheta; Fonte (Autor, 2025)

Serão utilizadas alhetas tanto na face quente quanto na face fria das células Peltier:

- Na face quente, as alhetas estarão expostas ao ar e serão submetidas à ventilação forçada através de ventoinhas, promovendo uma dissipação rápida do calor rejeitado pelas células.
- Na face fria, as alhetas estarão submersas na água do reservatório, contribuindo para o arrefecimento eficiente do fluido refrigerante através de convecção natural forçada (devido à movimentação térmica da água).

3.2.6. Pasta térmica

A resistência térmica no contacto pode ser reduzida aplicando condutores térmicos na superfície das peças, chamados pasta térmica ou massa térmica. (PCCOMPONENTES, 2025)



Figura 15: Pasta térmica; Fonte: (OKS, 2021)

- Local de aplicação: Entre a célula Peltier e a alheta (face fria); e a alheta (Face quente)
- Função principal: Melhorar a condução térmica na interface
- Justificativa: Redução da resistência térmica e aumento da eficiência de arrefecimento.

3.2.7. Cooler

Segundo (GARRETT, 2022), “Coolers controlam temperatura e previnem que componentes sejam danificados pelo calor.”



Figura 16: Cooler; Fonte: (Nexus, 2024)

Os coolers são componentes essenciais do sistema de arrefecimento, utilizados para promover convecção forçada sobre as alhetas instaladas na face quente das células Peltier, facilitando a dissipação eficiente do calor para o ambiente externo. Sem este mecanismo, a temperatura da face quente aumentaria rapidamente, comprometendo o desempenho das células e podendo causar falhas térmicas.

3.2.8. Termostato ligado a um Contactor

Um sistema de controle de temperatura com termostato digital e contactor externo é usado em aplicações industriais para gerenciar cargas de alta corrente (ex.: 300A). O termostato monitora a temperatura e, ao atingir um limite pré-definido, envia um sinal para a bobina do contactor, que abre ou fecha seus contactos, ligando ou desligando a alimentação da carga (células Peltier, *cooler's*).



Figura 17: Termostato ligado a um contactor; Fonte: (RoboBuilders, 2025)

3.2.9. Fonte de alimentação

Segundo (ELETRODEX, 2025), “A fonte de alimentação chaveada ou comutada como também é conhecida. É uma fonte essencial para projectos que necessitem de funcionamento ligado à rede eléctrica, efectuando o chaveamento de corrente. As fontes chaveadas são leves quando comparadas às demais e dissipam menos calor.”



Figura 18: Fonte de alimentação chaveada; Fonte: (DHCP, 2025)

3.2.10. Torneiras

No projecto, são previstas duas torneiras distintas: uma para a saída da cerveja já resfriada, assegurando que o produto seja retirado com a temperatura ideal para consumo, e outra para a retirada da água da cuba, o que facilita o deslocamento e a manutenção do sistema.



Figura 19: Torneira belga; Fonte: (MEMO, 2025)



Figura 20: Torneira Plástica; Fonte: (BAZARA, 2025)

3.2.11. Madeira

A base de sustentação da máquina de arrefecimento foi construída em madeira. A escolha deste material deve-se principalmente à sua disponibilidade local, baixo custo e facilidade de manufactura. A madeira apresenta ainda resistência mecânica adequada para suportar o peso total do sistema.



Figura 21: Madeira; Fonte: (Retondo, 2021)

3.2.12. Alças

Para facilitar o transporte do equipamento, optou-se pela instalação de puxadores dobráveis (também chamados alça). O mecanismo retráctil permite que os puxadores permaneçam recolhidos quando não estão em uso, evitando saliências e melhorando a ergonomia da máquina portátil.



Figura 22: Alça; Fonte: (leroymerlin, 2025)

3.2.13. Fecho de engate para a caixa

Foram utilizados fechos rápidos em aço inoxidável 304 para fixar a tampa à estrutura da máquina. Esses dispositivos, também conhecidos como *toggle latch*, permitem travamento seguro e de fácil manuseio, dispensando o uso de ferramentas. Além de facilitar a abertura para manutenção e colocação da água dentro do recipiente, exercem pressão sobre a tampa, garantindo vedação adequada e resistência durante o transporte.



Figura 23: Fecho de engate; Fonte: (mercadolivre, 2025)

3.3. Critérios de Dimensionamento do Sistema de Arrefecimento

A definição dos critérios de dimensionamento é fundamental para a concepção do sistema de arrefecimento proposto. Neste trabalho, recorre-se a módulos termoelétricos, nomeadamente as células Peltier para extrair calor da cerveja até atingir a temperatura desejada.

A metodologia adoptada compreende:

- A determinação da carga térmica a remover da cerveja;
- O dimensionamento da serpentina como permutador térmico;
- A quantificação do desempenho dos módulos Peltier;
- A análise da eficiência das alhetas de dissipação, nos lados frio e quente.
- O tempo do arrefecimento da água.

3.3.1. Determinação da Carga Térmica a Extrair da Cerveja

A determinação da carga térmica constitui o primeiro passo no processo de dimensionamento do sistema de arrefecimento. Este valor representa a quantidade de energia térmica que deve ser removida da cerveja para que a mesma atinja a temperatura final desejada, dentro do intervalo de tempo estabelecido.

Para tal, consideram-se os seguintes dados de partida:

- Calor específico da cerveja = $3900 \left[\frac{J}{(Kg \times K)} \right]$
- Temperatura Inicial da Cerveja = $37 [^{\circ}C]$

- Temperatura Final da Cerveja = 4 [°C]
- Volume da Cerveja = 0,5 [L]
- Tempo de enchimento da cerveja entre copos: 35 [s]
- Diâmetro externo da serpentina: $12,7 \times 10^{-3}$ [m]
- Diâmetro interno da serpentina: $10,92 \times 10^{-3}$ [m]
- Densidade da Cerveja: $1011 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$.

- **Caudal volumétrico**

O caudal volumétrico (Q_{vol}) é a medida do volume de um fluido que passa através de uma certa superfície num determinado intervalo de tempo, (FERREIRA, 2014).

$$Q_{vol} = \frac{V}{t} \quad (3.1)$$

Onde:

$Q_{vol} \rightarrow$ É o caudal volumétrico da cerveja $\left[\frac{m^3}{s} \right]$

$V \rightarrow$ É o volume da cerveja $[m^3]$

$t \rightarrow$ É o tempo de enchimento entre copos [s]

- **Fluxo mássico**

Fluxo mássico é a quantidade de massa de um fluido que atravessa uma dada secção transversal por unidade de tempo (MATSUMOTO, 2025). Trata-se de uma grandeza fundamental na análise de escoamentos e processos de transferência de calor.

$$\dot{m} = \rho_{cerv} \times Q_{vol} \quad (3.2)$$

Onde:

$\dot{m} \rightarrow$ É o fluxo mássico da cerveja $\left[\frac{kg}{s} \right]$

$\rho_{cerv} \rightarrow$ É a densidade da cerveja $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

$Q_{vol} \rightarrow$ É o caudal volumétrico da cerveja $\left[\frac{m^3}{s} \right]$

- **Cálculo do calor a ser retirado da cerveja**

A equação apresentada é designada por equação fundamental da calorimetria e permite calcular a quantidade de energia térmica trocada (cedida ou recebida) por um corpo quando essa troca provoca unicamente uma variação da sua temperatura, sem mudança de fase, (SIAS, 2025).

$$Q_{ret} = \dot{m} \times Cp_{cerveja} \times (T_i - T_f) \quad (3.3)$$

Onde:

$Q_{ret} \rightarrow$ É a quantidade de calor a ser retirado da cerveja [W];

\dot{m} → É o fluxo mássico da cerveja $\left[\frac{kg}{s}\right]$

$Cp_{cerveja}$ → Calor específico da cerveja $\left[\frac{J}{(Kg \times K)}\right]$;

T_i → É a temperatura inicial da cerveja $[^{\circ}C]$;

T_f → É a temperatura final da cerveja $[^{\circ}C]$.

3.3.2. Cálculos do escoamento e transferência de calor por convecção para cerveja

• Área da secção da serpentina

A área da secção da serpentina corresponde à superfície circular interior por onde escoa a cerveja. O seu valor é essencial para o cálculo da velocidade do fluido e, conseqüentemente, para a análise do regime de escoamento e da transferência de calor.

$$A_{secção} = \pi \times \left(\frac{d_{int}}{2}\right)^2 \quad (3.4)$$

Onde:

$A_{secção}$ → É a área da secção transversal da serpentina $[m^2]$;

d_{int} → É o diâmetro interno da serpentina $[m]$;

π → É a constante Pi ($\approx 3,1416$) [adimensional];

• Determinação da velocidade média da cerveja

$$v = \frac{Q_{vol}}{A_{secção}} \quad (3.5)$$

Onde:

v → É a velocidade média da cerveja $\left[\frac{m}{s}\right]$;

Q_{vol} → É o caudal volumétrico da cerveja $\left[\frac{m^3}{s}\right]$;

$A_{secção}$ → É a área da secção transversal da serpentina $[m^2]$;

• Número de Reynolds

A determinação do número de Reynolds é essencial para caracterizar o regime do escoamento do fluido no interior da serpentina. Este número adimensional permite distinguir entre escoamento laminar, de transição ou turbulento, e influencia directamente o cálculo do coeficiente de convecção interna.

$$R_e^{Cerveja} = \frac{(\rho_{cerv} \times v \times d_{int})}{\mu_{cerv}} \quad (3.6)$$

Onde:

$R_e^{Cerveja}$ → É o número de Reynolds para cerveja $[-]$;

ρ_{cerv} → É a densidade da cerveja [kg/m³];

v → É a velocidade média da cerveja [m/s];

μ_{cerv} → É a viscosidade dinâmica da cerveja [Pa·s].

d_{int} → É o diâmetro interno da serpentina [m];

- **Factor de Correção para Convecção em Tubos Curvados**

Devido à curvatura da serpentina, o escoamento desenvolve forças centrífugas que influenciam o perfil de velocidade e, por conseguinte, a transferência de calor. Para contemplar este efeito, introduz-se um factor de correção empírico aplicado ao número de Nusselt.

$$f_c = 1 + 3,5 \times \left(\frac{d_{int}}{2 \times R} \right) \quad (3.7)$$

Onde:

f_c → É o factor de correção para tubos curvados [-];

d_{int} → É a o diâmetro interno da serpentina [m];

R → É o raio médio de curvatura da serpentina [m].

- **Número de Nusselt**

Em casos clássicos e bem definidos de escoamento totalmente desenvolvido em tubos circulares, com condições de contorno ideais, têm-se os seguintes valores para Nu:

- Para fluxo constante na superfície do tubo:

$$N_u^{cerveja} = 4,36 \quad (3.8)$$

- Para temperatura constante na superfície do tubo:

$$N_u^{cerveja} = 3,66 \quad (3.9)$$

- **Coefficiente de transferência de calor por convecção (Interno)**

O coeficiente de transferência de calor por convecção é uma medida que indica a facilidade com que o calor passa de uma superfície sólida para um fluido em movimento, ou do fluido para a superfície. Ele serve para calcular a taxa real de troca de calor em sistemas térmicos e permite avaliar se a convecção é fraca ou intensa. É fundamental no dimensionamento de trocadores de calor, radiadores, evaporadores e outros equipamentos de aquecimento ou arrefecimento.

$$h_{int} = \frac{N_u^{cerveja} \times k_{cerv}}{d_{int}} \quad (3.10)$$

Onde:

h_{int} → Coeficiente de transferência de calor por convecção no interior da serpentina $\left(\frac{W}{m^2 \times K} \right)$;

k_{cerv} → É a condutividade térmica da cerveja [W/(m×K)];

d_{int} → É a o diâmetro interno da serpentina [m];

$N_u^{cerveja}$ → É o número de Nusselt para a cerveja [-];

3.3.3. Coeficiente de transferência de calor por convecção (Externo)

- **Determinação da temperatura da superfície externa**

Para fins de simplificação na análise térmica, a temperatura da superfície externa da serpentina foi estimada como a média entre a temperatura de entrada da cerveja (37 °C) e a temperatura da água envolvente (2 °C). Essa aproximação é justificada pelo facto do maior gradiente térmico ocorre próximo à entrada da serpentina, onde o fluido quente inicia a troca de calor com o meio externo, e pela consideração de que a parede da serpentina possui espessura reduzida, o que minimiza a resistência térmica condutiva."

$$T_{sup}^{extern} = \frac{T_i + T_{\acute{a}gua}}{2} \quad (3.11)$$

Onde:

T_{sup}^{extern} → É a temperatura média da superfície externa [°C];

T_i → É a temperatura inicial da cerveja [°C];

$T_{\acute{a}gua}$ → É a temperatura final da cerveja [°C].

- **Número de Grashof**

Segundo (THERMOPEDIA, 2011) , o número de Grashof é um parâmetro adimensional que relaciona os efeitos da transferência de calor e de massa na convecção natural. Ele representa a influência da diferença de temperatura em uma superfície sólida imersa em um fluido, mostrando como essa diferença gera movimento do fluido e, conseqüentemente, transporte de calor e massa. É um parâmetro adimensional usado para avaliar a intensidade da convecção natural e para correlacionar a transferência de calor e de massa em superfícies sólidas imersas em um fluido.

$$Gr_D^{serp e \acute{a}gua} = \frac{g \times \beta \times (T_{\acute{a}gua} - T_{sup}^{extern}) \times d_{ext}^3}{\nu_c^2} \quad (3.12)$$

Onde:

$Gr_D^{serp e \acute{a}gua}$ → É o número de Grashof entre a serpentina e água [adimensional];

β → É o coeficiente de expansão volumétrica [1/K];

g → É a gravidade [m/s²];

$T_{\acute{a}gua}$ → É a temperatura da água [°C];

T_{sup}^{extern} → É a temperatura média da superfície externa [°C];

d_{ext} → É o diâmetro externo da serpentina [m];

ν_c → É a viscosidade cinemática do fluido [m²/s];

- **Número de Rayleigh**

O número de Rayleigh é um parâmetro adimensional utilizado para caracterizar a intensidade da convecção natural em fluidos. Valores baixos (inferiores a dez mil) indicam que a transferência de calor ocorre predominantemente por condução, sem movimentação significativa do fluido. Para valores intermediários (entre dez mil e mil milhões), observa-se o início da convecção natural em regime laminar. Quando o número de Rayleigh atinge valores elevados (acima de mil milhões), há predominância de movimentos turbulentos no fluido, resultando em considerável aumento da transferência de calor. Dessa forma, este parâmetro actua como indicador dos mecanismos predominantes de transmissão de calor: condução, convecção laminar ou convecção turbulenta.

$$Ra_D^{serp e \acute{a}gua} = Gr_D^{serp e \acute{a}gua} \times Pr_{\acute{a}gua} \quad (3.13)$$

Onde:

$Ra_D^{serp e \acute{a}gua}$ → É o número de Rayleigh entre a serpentina e a água [adimensional];

$Gr_D^{serp e \acute{a}gua}$ → É o número de Grashof entre a serpentina e a água [adimensional];

$Pr_{\acute{a}gua}$ → É o número de prandtl da água [adimensional];

- **Nusselt**

O número de Nusselt é um parâmetro adimensional utilizado para comparar a transferência de calor por convecção com aquela resultante da condução térmica. Valores próximos a 1 indicam predominância do mecanismo de condução, enquanto valores elevados evidenciam o aumento significativo da troca de calor devido à convecção. Esse número é fundamental para avaliar a eficiência dos processos convectivos e constitui um critério essencial no dimensionamento de trocadores de calor e demais sistemas térmicos.

$$N_u^{serp e \acute{a}gua} = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 \times Ra_D^{serp e \acute{a}gua} \frac{1}{6}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr_{\acute{a}gua}} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (3.14)$$

Onde:

$N_u^{serp e \acute{a}gua}$ → É o número de Nusselt entre a serpentina e a água [adimensional];

$Ra_D^{serp e \acute{a}gua}$ → É o número de Rayleigh entre a serpentina e a água [adimensional];

$Pr_{\acute{a}gua}$ → É o número de prandtl da água [adimensional];

- **Coefficiente de transferência de calor entre a serpentina e água**

O coeficiente de transferência de calor entre a serpentina e a água representa a eficiência do processo de troca térmica nessa interface. Esse parâmetro indica o grau de facilidade com que o calor é transferido da serpentina para a água durante o processo de arrefecimento.

$$h_{exter} = \frac{N_u^{serp e \acute{a}gua} \times k_{\acute{a}gua}}{d_{ext}} \quad (3.15)$$

Onde:

h_{exter} → É o Coeficiente de transferência de calor por convecção no externo da serpentina $\left(\frac{W}{m^2 \times K}\right)$;

$N_u^{serp e \acute{a}gua}$ → É o número de Nusselt [adimensional];

$k_{\acute{a}gua}$ → É a Condutividade térmica da água [W/(m×K)];

d_{ext} → É o diâmetro externo da serpentina [m];

3.3.4. Determinação do Coeficiente de transferência de calor entre a água e célula Peltier

Este capítulo apresenta a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção entre a água e a superfície fria da célula Peltier. O objetivo consiste em quantificar a eficiência da troca térmica nessa interface, considerando a água como meio de transporte do calor transferido da serpentina para a célula. A metodologia empregada envolve o cálculo dos números de Grashof, Rayleigh e Nusselt, resultando na obtenção do coeficiente de transferência de calor, o que permite avaliar o desempenho das células Peltier em contato com a água e sua contribuição para o arrefecimento do sistema.

- **Número de Grashof**

$$Gr_l^{\acute{a}gua e cp} = \frac{g \times \beta \times (T_{\acute{a}gua} - T_{superf, cp}) \times L_c^3}{\nu_c^2} \quad (3.16)$$

Onde:

$Gr_l^{\acute{a}gua e cp}$ → É o número de Grashof [adimensional];

β → É o coeficiente de expansão volumétrica [1/K];

$T_{\acute{a}gua}$ → É a temperatura da água [°C];

$T_{superf, cp}$ → É a temperatura da superfície das células peltier (lado frio) [°C];

L_c → É o comprimento característico da célula Peltier [m];

- **Número de Rayleigh**

$$Ra_l^{\acute{a}gua e cp} = Gr_l^{\acute{a}gua e cp} \times Pr_{\acute{a}gua} \quad (3.17)$$

Onde:

$Ra_l^{água e cp} \rightarrow$ É o número de Rayleigh [adimensional];

$Gr_l^{água e cp} \rightarrow$ É o número de Grashof [adimensional];

$Pr_{água} \rightarrow$ É o número de prandtl da água [adimensional];

- **Número de Nusselt**

$$Nu_u^{água e cp} = \left(0,825 + \frac{0,387 \times Ra_l^{água e cp} \frac{1}{6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr_{água}} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right)^2 \quad (3.18)$$

Onde:

$Nu_u^{água e cp} \rightarrow$ É o número de Nusselt entre a água e a célula Peltier [adimensional];

$Ra_l^{água e cp} \rightarrow$ É o número de Rayleigh entre a água e a célula Peltier [adimensional];

$Pr_{água} \rightarrow$ É o número de prandtl da água [adimensional];

- **Coefficiente de transferência de calor**

$$h_{água}^{cp} = \frac{Nu_u^{água e cp} \times k_{água}}{L_c} \quad (3.19)$$

Onde:

$h_{água}^{cp} \rightarrow$ É o Coeficiente de transferência de calor por convecção entre a água e as células Peltier

$\left(\frac{W}{m^2 \times K} \right)$;

$Nu_u^{água e cp} \rightarrow$ É o número de Nusselt entre a água e a células Peltier [adimensional];

$k_{água} \rightarrow$ É a Condutividade térmica da água [W/(m×K)];

$L_c \rightarrow$ É o comprimento característico da célula Peltier [m];

3.3.5. Determinação da área de troca térmica

Para o dimensionamento da serpentina, considerou-se a área de permuta térmica entre os dois fluidos envolvidos: a cerveja no interior do tubo e a água no exterior.

A expressão utilizada para este cálculo resulta da combinação de duas formulações clássicas da engenharia térmica.

- Em primeiro lugar, considerou-se a Equação (3.3) e igualou a Equação (3.20), que se encontra abaixo.

Por outro lado, a transferência de calor entre dois meios separados por uma parede é descrita pela equação geral da convecção aplicada a permutadores de calor:

$$Q_{ret} = U \times A_s \times \Delta T_{ln} \quad (3.20)$$

Onde:

Q_{ret} → É a quantidade de calor a ser retirado da cerveja [W];

U → É o coeficiente global de transferência de calor [W/(m²·K)];

A_s → É a área de troca térmica [m²];

ΔT_{ln} → É a diferença de temperatura média logarítmica [°C].

Sabe-se que:

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_i - T_{\acute{a}gua}) - (T_f - T_{\acute{a}gua})}{\ln\left(\frac{T_i - T_{\acute{a}gua}}{T_f - T_{\acute{a}gua}}\right)} \quad (3.21)$$

Onde:

ΔT_{ln} → É a diferença de temperatura média logarítmica [°C];

T_i → É a temperatura inicial da cerveja [°C];

T_f → É a temperatura final da cerveja [°C];

$T_{\acute{a}gua}$ → É a temperatura inicial da cerveja [°C].

Para determinação do coeficiente global de transferência de calor seguiram-se as seguintes etapas:

- **Cálculo da resistência térmica por convecção interna**

A resistência térmica do lado interno da serpentina, onde circula a cerveja, é dada por:

$$R_{conv,interna} = \frac{1}{h_{interno} \times \pi \times d_{int} \times L} \quad (3.22)$$

Onde:

$h_{interno}$ → É o Coeficiente de transferência de calor por convecção de cerveja $\left(\frac{W}{m^2 \times K}\right)$;

d_{int} → É o diâmetro interno da serpentina [m];

L → É o comprimento da serpentina [m];

- **Cálculo da resistência térmica por convecção externa**

A resistência térmica do lado externo, onde a serpentina está imersa na água, é expressa por:

$$R_{conv,externa} = \frac{1}{h_{exter} \times \pi \times d_{ext} \times L} \quad (3.23)$$

Onde:

h_{exter} → É o Coeficiente de transferência de calor por convecção no lado externo da serpentina $\left(\frac{W}{m^2 \times K}\right)$;

d_{ext} → É o diâmetro externo da serpentina [m];

L → É o comprimento da serpentina [m];

- **Determinação da resistência térmica total**

$$R_{total} = R_{conv,interna} + R_{conv,externa} \quad (3.24)$$

Onde:

$R_{conv,interna}$ → É a resistência térmica por convecção interna $\left(\frac{K}{W}\right)$;

$R_{conv,externa}$ → É a resistência térmica por convecção externa $\left(\frac{K}{W}\right)$;

- Neste contexto, o coeficiente global de transferência de calor, U, foi expresso em função resistência térmica total:

$$U = \frac{1}{R_{total} \times A_s} \quad (3.25)$$

Onde:

U → É o coeficiente global de transferência de calor $\left(\frac{W}{m^2 \times K}\right)$;

$R_{conv,interna}$ → É a resistência térmica por convecção interna $\left(\frac{K}{W}\right)$;

A_s → É a área de troca térmica [m²];

Esta formulação decorre da analogia com resistências térmicas em série, onde se assumiu que a resistência condutiva da parede da serpentina é desprezável. Tal simplificação é justificada pelo facto de se tratar de uma parede delgada e construída em cobre, material de elevada condutividade térmica. Assim, o seu contributo para a resistência térmica total é insignificante face às resistências por convecção nos dois lados da superfície, permitindo adoptar uma modelação mais directa e realista do fenómeno de permuta de calor.

Substituindo pelas expressões deduzidas acima e igualando as equações (3.3) e (3.22) e isolando a área A_s , obtém-se:

$$A_s = \frac{\dot{m} \times C_{p_{cerveja}} \times (T_i - T_f) \times (h_{int} + h_{ext})}{h_{int} \times h_{ext} \times \Delta T_{ln}} \quad (3.26)$$

3.3.6. Determinação das Dimensões da Serpentina

A determinação das dimensões da serpentina é fundamental para garantir uma transferência de calor eficiente, permitindo o arrefecimento rápido e eficaz da cerveja.

- **Diâmetro médio da Serpentina**

$$d_{médio} = \frac{d_{ext} + d_{int}}{2} \quad (3.27)$$

Onde:

$d_{m\u00e9dio}$ → É o di\u00e2metro m\u00e9dio da serpentina [m];

d_{int} → É o di\u00e2metro interno da serpentina [m];

d_{ext} → É o di\u00e2metro externo da serpentina [m];

- **Comprimento da Serpentina**

$$L = \frac{A_s}{\pi \times d_{m\u00e9dio}} \quad (3.28)$$

Onde:

L → É o comprimento da serpentina [m];

A_s → \u00c1rea da superf\u00edcie da Serpentina [m^2];

$d_{m\u00e9dio}$ → É o di\u00e2metro m\u00e9dio da serpentina [m].

- **N\u00famero de Espiras da Serpentina**

$$N_{esp} = \frac{L}{\pi \times D_{rolo}} \quad (3.29)$$

Onde:

N_{esp} → \u00c9 o n\u00famero de espiras [*adimensional*];

L → \u00c9 o comprimento da serpentina [m];

D_{rolo} → \u00c9 o di\u00e2metro do rolo da serpentina [m].

- **Altura do Rolo da Serpentina**

$$H_{serp} = N_{esp} \times d_{ext} \quad (3.30)$$

Onde:

H_{serp} → \u00c9 a altura total da serpentina enrolada em espiras [m];

N_{esp} → \u00c9 o n\u00famero de espiras [*adimensional*];

d_{ext} → \u00c9 o di\u00e2metro externo da serpentina [m];

- **Determina\u00e7\u00e3o do tempo de resid\u00eancia da cerveja na serpentina**

$$t_{res} = \frac{L}{v} \quad (3.31)$$

Onde:

L → \u00c9 o comprimento da serpentina [m];

v → \u00c9 a velocidade m\u00e9dia da cerveja [$\frac{m}{s}$];

3.3.7. Selec\u00e7\u00e3o e Configura\u00e7\u00e3o das C\u00e9lulas Peltier

- **Determina\u00e7\u00e3o da quantidade das c\u00e9lulas Peltier**

Para assegurar o arrefecimento da cerveja, determina-se o n\u00famero de m\u00f3dulos Peltier relacionando a carga t\u00e9rmica total a extrair com a capacidade de refrigera\u00e7\u00e3o de cada c\u00e9lula.

- Para tal considerou-se:

Rendimento térmica de cada célula Peltier: 70%

$$N_{cp} = \frac{Q_{ret}}{\eta \times P_{refrig}} \quad (3.32)$$

Onde:

N_{cp} → É o número de células Peltier necessárias [adimensional];

Q_{ret} → É a quantidade de calor a ser retirado da cerveja [W];

η → É o rendimento estimado da célula Peltier [adimensional];

P_{refrig} → É a potência de refrigeração fornecida por cada módulo Peltier [W].

- **Caracterização Electrotérmica da Célula Peltier**

O gráfico seguinte, fornecido pelo fabricante da célula Peltier, apresenta as curvas características de desempenho electrotérmico do módulo em diferentes condições de corrente e tensão de alimentação. Na parte superior encontram-se as curvas de tensão em função da corrente aplicada, enquanto a parte inferior mostra a capacidade de refrigeração em função do diferencial de temperatura. Esta representação permite compreender como a potência de refrigeração e a eficiência do módulo variam com as condições de operação, servindo de base para a selecção do ponto de funcionamento mais adequado ao sistema projectado.

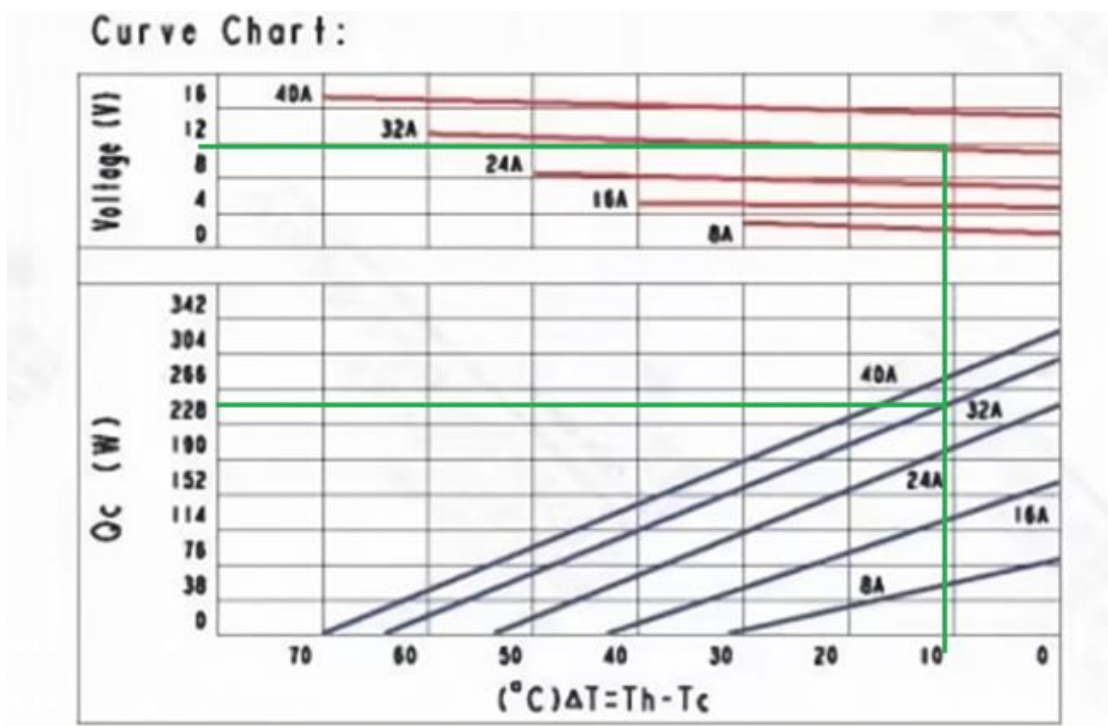


Gráfico 1 – Gráfico da Relação entre ΔT , Tensão, Corrente e Potência de Refrigeração

- **Determinação da carga térmica por célula**

A quantidade total de calor a ser retirada do sistema foi designada por Q_{ret} . Considerando a utilização do número de células Peltier determinado anteriormente, a carga térmica a ser extraída por cada célula foi calculada por:

$$Q_c = \frac{Q_{ret}}{N_{cp}} \quad (3.33)$$

Onde:

$Q_c \rightarrow$ É a quantidade de calor absorvido pela face fria da célula Peltier [W];

$Q_{ret} \rightarrow$ É a quantidade de calor a ser retirado da cerveja [W];

$N_{cp} \rightarrow$ É o número de células Peltier necessárias [adimensional];

Através da leitura directa do gráfico do fabricante:

- Traçou-se uma linha horizontal (a verde) no gráfico 1, correspondente a $Q_c = 233 \text{ W}$
- Esta linha intercepta a curva referente à corrente de 32 A.
- A partir da intersecção, desceu-se uma linha vertical até ao eixo das abcissas, obtendo-se:

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (3.34)$$

Onde:

$\Delta T \rightarrow$ É a diferença de temperatura;

$T_h \rightarrow$ É a temperatura do lado quente da célula Peltier [°C];

$T_c \rightarrow$ É a temperatura do lado frio da célula Peltier [°C];

Para efeitos do presente projecto, foi considerada como condição de funcionamento da máquina que a temperatura da face fria da célula Peltier se mantenha constante a 0 °C durante toda a operação.

- **Determinação da tensão de alimentação**

Com base no valor de ΔT ; traçou-se uma linha vertical no gráfico 1, até interceptar novamente a curva de 32 A.

A partir desse ponto, traçou-se uma linha horizontal (também verde) até ao eixo das ordenadas, lendo-se:

$$V = 12 \quad (3.35)$$

Onde:

$V \rightarrow$ É a tensão aplicada à célula [V];

Segundo (FERROTEC, 2025), o comportamento termoelétrico de um módulo Peltier pode ser descrito por meio de relações fundamentais entre os parâmetros eléctricos e térmicos. As expressões principais incluem:

a) Potência eléctrica de entrada

$$P_{in} = V \times I \quad (3.36)$$

Onde:

P_{in} → É a Potência eléctrica de entrada [W];

V → É a Tensão aplicada ao módulo [V];

I → É a Intensidade de corrente [A].

b) Fluxo de calor rejeitado no lado quente

$$Q_h = Q_c + P_{in} \quad (3.37)$$

Onde:

Q_h → É a Quantidade de calor rejeitada no lado quente da célula Peltier [W];

Q_c → É a quantidade de calor absorvido pela face fria da célula Peltier [W];

P_{in} → É a Potência eléctrica de entrada [W];

c) Coeficiente de desempenho (COP)

O coeficiente de performance (COP) é um indicador adimensional de eficiência que avalia a relação entre a capacidade útil de resfriamento – ou seja, o calor extraído do lado frio – e a potência eléctrica consumida pelo sistema. Em dispositivos Peltier, o valor do COP é altamente influenciado pela diferença de temperatura entre as superfícies, pela intensidade da corrente aplicada e pela eficiência na dissipação térmica do lado quente.

$$COP = \frac{Q_c}{P_{in}} \quad (3.38)$$

Onde:

COP → É o Coeficiente de desempenho da célula Peltier [adimensional];

Q_c → É a quantidade de calor absorvido pela face fria da célula Peltier [W];

P_{in} → É a Potência eléctrica de entrada [W];

3.3.8. Dimensionamento da alheta (Lado frio)

O presente subcapítulo tem por objectivo o dimensionamento térmico das alhetas associadas ao lado frio das células Peltier, submersas em água, visando maximizar a dissipação do fluxo de calor absorvido pela célula.

As propriedades termofísicas da água utilizadas neste dimensionamento foram obtidas à temperatura média do processo, considerando-se a média entre a temperatura final da água (2 °C) e a temperatura do lado frio da célula Peltier (0 °C), resultando numa temperatura média de 1 °C.

- Assumindo as seguintes condições geométricas e operacionais:

Espessura da alheta: $t^f = 0,0015 [m]$;

Espaçamento entre alhetas: $S^f = 0,0047 [m]$;

Largura da base: $W^f = 0,062 [m]$;

Altura da alheta: $H^f = 0,015 [m]$;

Condutividade térmica do alumínio: $k_{al} = 235 \left[\frac{W}{m \times K} \right]$;

Área da secção da célula Peltier: $A_c = 0,062 \times 0,062 [m^2]$;

Temperatura da água: $T_\infty = 2 [^\circ C]$;

Temperatura da base: $T_s = 0 [^\circ C]$;

Calor a ser dissipado: $Q_c = 233 [W]$.

- **Determinação do fluxo de calor dissipado por cada célula Peltier**

$$q_s = \frac{Q_c}{A_c} \quad (3.39)$$

Onde:

$Q_c \rightarrow$ É o Calor a ser dissipado [W];

$A_c \rightarrow$ Área da superfície da célula Peltier [m^2];

- **Número de Rayleigh Modificado**

Nesta etapa utiliza-se a forma modificada do número de Rayleigh, adequada para superfícies com alhetas. Este parâmetro caracteriza a convecção natural que ocorre no espaço entre as alhetas em contacto com a água.

$$Ra_{alh}^f = \frac{g \times \beta \times q_s \times S^{f4}}{k_{\acute{a}gua} \times \nu_c^2} \times Pr_{\acute{a}gua} \quad (3.40)$$

Onde:

$Ra_{alh}^f \rightarrow$ É o número de Rayleigh entre a alheta (lado frio) e a água [adimensional];

$\beta \rightarrow$ É o coeficiente de expansão volumétrica [1/K];

$g \rightarrow$ É a gravidade [m/s^2];

$\nu_c \rightarrow$ É a viscosidade cinemática do fluido [m^2/s];

$q_s \rightarrow$ É o fluxo de calor dissipado por uma célula Peltier [W/m^2];

$S^f \rightarrow$ É o espaçamento entre as alhetas [m];

$k_{\acute{a}gua} \rightarrow$ É a condutibilidade térmica da água [$W/(m \times K)$];

$Pr_{\acute{a}gua} \rightarrow$ É o número de Prandtl da água [adimensional];

- **Número de Nusselt**

$$N_u^f = \left[\frac{48}{(Ra_{alh}^f \times S^f / L_c)^2} + \frac{2,51}{(Ra_{alh}^f \times S^f / L_c)^{0,4}} \right]^{-0,5} \quad (3.41)$$

Onde:

N_u^f → É o número de Nusselt [adimensional];

Ra_{alh}^f → É o número de Rayleigh entre a alheta (lado frio) e a água [adimensional];

L_c → É o comprimento característico [m];

S^f → É o comprimento característico [m];

- **Coefficiente de Transferência de Calor por Convecção Natural**

$$h_L^f = \frac{N_u^f \times k_{\acute{a}gua}}{S^f} \quad (3.42)$$

Onde:

h_L^f → É o coeficiente de transferência de calor entre a alheta (lado frio) e a água [$\frac{W}{m^2 \times K}$];

N_u^f → É o número de Nusselt entre a alheta (lado frio) e a água [adimensional];

$k_{\acute{a}gua}$ → É a Condutividade térmica da água [W/(m×K)];

S^f → É o espaçamento entre as alhetas (lado frio) [m];

- **Número de alhetas**

$$N^f = \frac{W^f}{S^f + t^f} \quad (3.43)$$

Onde:

N^f → É o número de alhetas (lado frio) [adimensional];

W^f → É a largura total do conjunto de alhetas [m];

S^f → É o espaçamento entre as alhetas [m];

t^f → É a espessura da alheta [m];

- **Perímetro da secção transversal**

$$P^f = 2W^f + 2t^f \quad (3.44)$$

Onde:

P^f → É o perímetro da secção transversal da alheta (lado frio) [m];

W^f → É a largura total do conjunto da alheta (lado frio) [m];

t^f → É a espessura da alheta (lado frio) [m];

- **Área da seção transversal da alheta**

$$A_c^f = W^f \times t^f \quad (3.45)$$

Onde:

A_c^f → É a área da seção transversal da alheta (lado frio) [m^2];

W^f → É a largura total do conjunto da alheta (lado frio) [m];

t^f → É a espessura da alheta (lado frio) [m];

- **Comprimento característico da alheta**

$$L_c^f = H^f + \frac{t^f}{2} \quad (3.46)$$

Onde:

L_c^f → É o comprimento característico da alheta (lado frio) [m];

H^f → É o comprimento da alheta (lado frio) no sentido do escoamento [m];

t^f → É a espessura da alheta (lado frio) [m].

- **Parâmetro característico da alheta**

$$m^f = \sqrt{\frac{h_L^f \times P^f}{k_{al} \times A_c^f}} \quad (3.47)$$

Onde:

m^f → É o parâmetro característico da alheta (lado frio) [m^{-1}];

h_L^f → É o coeficiente de transferência de calor entre a alheta (lado frio) e a água [$\frac{W}{m^2 \times K}$];

P^f → É o perímetro da seção transversal da alheta [m];

A_c^f → É a área da seção transversal da alheta (lado frio) [m^2];

k_{al} → É a condutividade térmica do alumínio [$W/(m \times K)$];

- **Eficiência da alheta**

A eficiência representa a capacidade efectiva da alheta para conduzir e dissipar calor em comparação ao seu desempenho ideal. Este parâmetro é essencial para analisar se a geometria selecionada utiliza, de maneira eficiente, a área disponível.

$$\eta_a^f = \frac{\tanh m^f L_c^f}{m^f L_c^f} \quad (3.48)$$

Onde:

η_a^f → É a eficiência da alheta (lado frio) [adimensional];

m^f → É o parâmetro característico da alheta (lado frio) [m^{-1}];

L_c^f → É o comprimento característico da alheta (lado frio) [m];

- **Área de convecção de uma alheta**

$$A_{conv_1alh} = 2W^f + 2t^f \quad (3.49)$$

Onde:

A_{conv_1alh} → É a área de convecção de uma alheta (lado frio) [m^2];

W^f → É a largura total do conjunto da alheta (lado frio) [m];

t^f → É a espessura da alheta (lado frio) [m];

- **Área entre alhetas**

$$A_{entre_alh} = H^f + (N^f - 1) \times W^f \times S^f \quad (3.50)$$

Onde:

A_{entre_alh} → É a área entre as alhetas (lado frio) [m^2];

N^f → É o número de alhetas (lado frio) [adimensional];

H^f → É o comprimento da alheta (lado frio) no sentido do escoamento [m];

W^f → É a largura total do conjunto de alhetas [m];

S^f → É o espaçamento entre as alhetas [m];

- **Temperatura na base da alheta**

$$Q_c = (N^f \times \eta_a^f \times h_L^f \times A_{conv_1alh} + h_L^f \times A_{entre_alh}) \times (T_\infty - T_b) \quad (3.51)$$

Onde:

Q_c → É a quantidade de calor absorvido pela face fria da célula Peltier [W];

N^f → É o número de alhetas [adimensional];

η_a^f → É a eficiência da alheta [adimensional];

A_{conv_1alh} → É a área de convecção de uma alheta [m^2];

h_L^f → É o coeficiente de transferência de calor entre a alheta (lado frio) e a água [$\frac{W}{m^2 \times K}$];

A_{entre_alh} → É a área entre as alhetas [m^2];

T_∞ → É a temperatura da água ao redor da alheta [$^\circ C$];

T_b → É a temperatura na base da alheta [m]

- **Temperatura no Topo da Alheta**

A determinação da temperatura na extremidade superior da alheta possibilita a avaliação do gradiente térmico ao longo de seu comprimento. Essa análise verifica se o desempenho da alheta permanece adequado até sua extremidade.

$$T_H = T_\infty - (T_\infty - T_b) \times \frac{\cosh[m^f \times (H^f - H^f)]}{\cosh(m^f \times H^f)} \quad (3.52)$$

Onde:

T_H → É a temperatura da alheta na borda superior da placa [$^\circ C$];

T_{∞} → É a temperatura da água ao redor da alheta [°C];

T_b → É a temperatura na base da alheta [°C];

m^f → É o parâmetro característico da alheta [m^{-1}];

H^f → É o comprimento da alheta no sentido do escoamento [m];

3.3.9. Dimensionamento da alheta (Lado Quente)

O presente subcapítulo tem por objectivo o dimensionamento térmico das alhetas associadas ao lado quente das células Peltier. Estas alhetas são responsáveis por dissipar para o ar o calor rejeitado pelas células, garantindo o equilíbrio térmico do sistema. Através da sequência de cálculos, que envolve a determinação do escoamento do ar, números adimensionais e coeficientes de transferência, avalia-se a eficiência das alhetas no processo de rejeição de calor.

- **Geometria da alheta**

Espessura da alheta: $t^q = 0,002$ [m];

Espaçamento entre alhetas: $S^q = 0,0015$ [m];

Largura da placa em metros (cobre 4 células Peltier): $W^q = 0,062$ [m];

Altura da alheta: $H^q = 0,055$ [m];

Sabendo que o *cooler* escolhido tem um fluxo de ar de 44,3 CFM. Então pode-se determinar a determina-se a vazão volumétrica em m^3/s .

Sabendo ainda que; **1CFM → 0,0004719 m^3/s**

Então, determina-se da vazão volumétrica $Q_v^{alh} = 44,3 \times 0,0004719 = 0,0209 \frac{m^3}{s}$

- **Determinação da área do cooler**

$$A^{cooler} = C^{cooler} \times L^{cooler} \quad (3.53)$$

Onde:

A^{cooler} → É a área do cooler [m^2];

C^{cooler} → É o comprimento do cooler [m];

L^{cooler} → É a largura do cooler [m];

- **Determinação da velocidade do ar**

$$v_{ar} = \frac{Q_v^{alh}}{A^{cooler}} \quad (3.54)$$

Onde:

v_{ar} → É a velocidade do ar [m/s];

Q_v^{alh} → É a vazão volumétrica entre a alheta e o ar [$\frac{m^3}{s}$];

A^{cooler} → É a área do cooler [m^2];

- **Cálculo do número de Reynolds**

A determinação do Reynolds permite identificar o regime de escoamento do ar entre as alhetas. Esse valor é fundamental para seleccionar a correlação adequada do número de Nusselt.

$$R_e^q = \frac{v_{ar} \times W^q}{\nu_c^q} \quad (3.55)$$

Onde:

$R_e^q \rightarrow$ É o número de Reynolds entre a alheta (lado quente) e o ar [adimensional];

$v_{ar} \rightarrow$ É a velocidade do ar [m/s];

$W^q \rightarrow$ É a largura total do conjunto de alhetas (lado quente) [m];

$\nu_c^q \rightarrow$ É a viscosidade cinemática do ar [$\frac{m^2}{s}$];

- **Cálculo do número de Nusselt (escoamento externo)**

O Nusselt traduz a relação entre convecção e condução no escoamento do ar, indicando a intensidade da troca térmica no lado quente.

$$N_u^q = 0,680 \times R_e^{q,0,8} \times Pr_{ar}^{0,3} \quad (3.56)$$

Onde:

$N_u^q \rightarrow$ É o número de Nusselt entre a alheta (lado quente) e o ar [adimensional];

$R_e^q \rightarrow$ É o número de Reynolds entre a alheta (lado quente) e o ar [adimensional];

$Pr_{ar} \rightarrow$ É a Prandtl do ar [adimensional];

- **Coefficiente de convecção**

$$h_{ar} = \frac{N_u^q \times k_{ar}}{W^q} \quad (3.57)$$

Onde:

$h_{ar} \rightarrow$ É o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a alheta e o ar [adimensional];

$N_u^q \rightarrow$ É o número de Nusselt entre a alheta (lado quente) e o ar [adimensional];

$k_{ar} \rightarrow$ É a condutibilidade térmica do ar [W/(m×K)];

$W^q \rightarrow$ É a largura total do conjunto de alhetas (lado quente) [m];

- **Perímetro da secção transversal**

$$P^q = 2W^q + 2t^q \quad (3.58)$$

Onde:

$P^q \rightarrow$ É o perímetro da secção transversal da alheta (lado quente) [m];

$W^q \rightarrow$ É a largura total do conjunto de alhetas (lado quente) [m];

$t^q \rightarrow$ É a espessura da alheta (lado quente) [m];

- **Área da secção rectangular da alheta**

$$A_c^q = W^f \times t^f \quad (3.59)$$

Onde:

A_c^q → É a área da secção transversal da alheta (lado quente) [m^2];

W^q → É a largura total do conjunto da alheta (lado quente) [m];

t^q → É a espessura da alheta (lado quente) [m];

- **Parâmetro característico da alheta**

$$m^q = \sqrt{\frac{h_{ar} \times P^q}{k_{al} \times A_c^q}} \quad (3.60)$$

Onde:

m^q → É o parâmetro característico da alheta (lado quente) [m^{-1}];

h_{ar} → É o coeficiente de transferência de calor entre a alheta (lado quente) e o ar [$\frac{W}{m^2 \times K}$];

P^q → É o perímetro da secção transversal da alheta (lado quente) [m];

A_c^q → É a área da secção transversal rectangular da alheta (lado quente) [m^2];

k_{al} → É a condutividade térmica do alumínio [$W/(m \times K)$];

- **Eficiência da alheta (lado quente)**

A eficiência representa o grau de eficácia com que cada alheta dissipa calor ao longo do seu comprimento, aproximando-se do desempenho ideal, no qual todo o calor proveniente da base seria transferido de maneira otimizada para o ar. Este parâmetro é fundamental para a validação da geometria selecionada.

$$\eta_a^q = \frac{\tanh m^q L_c^q}{m^q L_c^q} \quad (3.61)$$

Onde:

η_a^q → É a eficiência da alheta (lado quente) [adimensional];

m^q → É o parâmetro característico da alheta (lado quente) [m^{-1}];

L_c^q → É o comprimento característico da alheta (lado quente) [m];

- **Número de alhetas (lado quente)**

$$N^q = \frac{W^q}{S^q + t^q} \quad (3.62)$$

Onde:

N^q → É o número de alhetas (lado quente) [adimensional];

W^q → É a largura total do conjunto de alhetas (lado quente) [m];

$S^q \rightarrow$ É o espaçamento entre as alhetas (lado quente) [m];

$t^q \rightarrow$ É a espessura da alheta (lado quente) [m];

- **Calor dissipado pela alheta (lado quente)**

Neste estágio, integram-se os parâmetros geométricos, os coeficientes convectivos e a eficiência do sistema para calcular o calor total dissipado. Esse resultado possibilita avaliar de maneira criteriosa a adequação do sistema de rejeição térmica no suporte à carga térmica da célula Peltier.

$$Q_{total}^{quente} = [N^q \times \eta_a^q \times (2 \times W^q + 2 \times t^q) \times L + ((N^q - 1) \times W \times s) \times h_{ar} \times (T_b^q - T_{\infty}^{ar})] \quad (3.63)$$

Onde:

$Q_{total}^{quente} \rightarrow$ É o calor dissipado pela alheta (lado quente) [W];

$N^q \rightarrow$ É o número de alhetas (lado quente) [adimensional];

$\eta_a^q \rightarrow$ É a eficiência da alheta (lado quente) [adimensional];

$W^q \rightarrow$ É a largura total do conjunto de alhetas (lado quente) [m];

$t^q \rightarrow$ É a espessura da alheta (lado quente) [m];

$L_{alh}^q \rightarrow$ É a largura total do conjunto de alhetas (lado quente) [m];

$h_{ar} \rightarrow$ É o coeficiente de transferência de calor entre a alheta (lado quente) e o ar [$\frac{W}{m^2 \times K}$];

$T_{\infty}^{ar} \rightarrow$ É a temperatura do ar ao redor da alheta [°C];

$T_b^q \rightarrow$ É a temperatura na base da alheta (lado quente) [°C];

3.3.10. Tempo de arrefecimento da água

A determinação do tempo de arrefecimento constitui um parâmetro essencial na avaliação do desempenho térmico do sistema. Com base na massa da água e na energia necessária para reduzir a sua temperatura, é possível estimar a duração do processo de arrefecimento.

- **Volume total do recipiente**

$$V_{total} = C^{recip} \times L^{recip} \times H^{recip} \quad (3.64)$$

Onde:

$C^{recip} \rightarrow$ É o comprimento do recipiente que contém água [m];

$L^{recip} \rightarrow$ É a largura do recipiente que contém água [m];

$H^{recip} \rightarrow$ É a altura do recipiente que contém água [m];

- **Área ocupada pela serpentina**

$$A_{ser}^{ocup} = \frac{\pi}{4} \times d_{ext}^2 \quad (3.65)$$

Onde:

$d_{ext} \rightarrow$ É o diâmetro externo da serpentina [m];

$\pi \rightarrow$ É a constante Pi ($\approx 3,1416$) [adimensional];

- **Volume ocupado pela serpentina**

$$V_{serp} = A_{ser}^{ocup} \times L \quad (3.66)$$

Onde:

A_{ser}^{ocup} → É a área ocupada pela serpentina [m^2];

L → É o comprimento da serpentina [m];

- **Volume ocupado pelas alhetas**

$$V_{1f} = t^f \times W^f \times H^f \quad (3.67)$$

Onde:

W^f → É a largura total do conjunto da alheta (lado frio) [m];

t^f → É a espessura da alheta (lado frio) [m];

H^f → É o comprimento da alheta (lado frio) no sentido do escoamento [m];

Sabendo que são 8 alhetas submersas na água:

$$V_f = 8 \times V_{1f} \quad (3.68)$$

- **Volume útil da água**

Esta etapa desconta o volume físico ocupado pela serpentina e pelas alhetas, determinando o volume efectivamente disponível para a água. Tal procedimento constitui a base para o cálculo da massa de água a ser resfriada.

$$V_{\acute{a}gua} = V_{total} - V_{serp} - V_f \quad (3.69)$$

Onde:

V_{total} → É o volume total do recipiente [m^3];

V_{serp} → É o volume ocupado pela serpentina [m^3];

V_f → É o volume ocupado pelas alhetas [m^3];

- **Determinação da área de convecção da alheta do lado frio**

$$A_{alheta_fria} = N^f \times (2W^f + 2t^f) \times H^f + W^f \times t^f \quad (3.70)$$

Onde:

N^f → É o número de alhetas (lado frio) [adimensional];

H^f → É o comprimento da alheta (lado frio) no sentido do escoamento [m];

W^f → É a largura total do conjunto de alhetas [m];

t^f → É a espessura da alheta (lado frio) [m];

- **Área da base entre as lâminas**

$$A_{base} = W^f \times (N^f \times S^f) \quad (3.71)$$

Onde:

$W^f \rightarrow$ É a largura total do conjunto de alhetas [m];

$S^f \rightarrow$ É o espaçamento entre as alhetas [m];

$N^f \rightarrow$ É o número de alhetas (lado frio) [adimensional];

- **Área total da alheta das 8 alhetas (Lado frio)**

$$A_{alhetaT} = 8 \times (A_{alheta_fria} + A_{base}) \quad (3.72)$$

Onde:

$A_{alheta_fria} \rightarrow$ É a área total de uma alheta (Lado frio) [m^2];

$A_{base} \rightarrow$ É a área total entre as lâminas de uma alheta (lado frio) [m^2];

- **Volume da alheta**

Têm-se o tempo de arrefecimento da água:

$$V_{alheta} = 8 \times N^f \times (W^f \times t^f \times H^f) \quad (3.73)$$

Onde:

$N^f \rightarrow$ É o número de alhetas (lado frio) [adimensional];

$H^f \rightarrow$ É o comprimento da alheta (lado frio) no sentido do escoamento [m];

$t^f \rightarrow$ É a espessura da alheta (lado frio) [m];

$W^f \rightarrow$ É a largura total do conjunto de alhetas [m];

Nota: O valor 8 representa as 8 alhetas que estarão distribuídas nas 8 células Peltier.

O primeiro passo para a determinação do tempo de arrefecimento da água em regime transiente é a definição do comprimento característico, que permite avaliar o número de Biot. Quando o número de Biot é inferior a 0,1, admite-se que a temperatura no interior do sistema é uniforme, podendo assim aplicar-se o método da capacidade concentrada para a estimativa do tempo de arrefecimento.

- **Comprimento característico para a determinação do tempo de arrefecimento da água**

$$L_c^{alheta} = \frac{V_{alheta}}{A_{alhetaT}} \quad (3.74)$$

Onde:

$V_{alheta} \rightarrow$ É o volume total das alhetas (lado frio) [m^3];

$A_{alhetaT} \rightarrow$ É a área total das alhetas (lado frio) [m^2];

- **Determinação do número de Biot**

O número de Biot é um parâmetro adimensional utilizado para comparar a resistência à condução térmica em um sólido com a resistência à convecção presente na sua superfície em contato com um fluido. Esse índice identifica o principal fator limitante na transferência de calor, sendo fundamental para determinar a aplicabilidade da hipótese de temperatura interna uniforme, como no método da capacidade concentrada.

$$Bi = \frac{h_L^f \times L_c^{albeta}}{k_{al}} \quad (3.75)$$

Onde:

h_L^f → É o coeficiente de transferência de calor entre a albeta (lado frio) e a água [$\frac{W}{m^2 \times K}$];

L_c^{albeta} → É o comprimento característico da albeta (lado frio) [m]

k_{al} → É a condutividade térmica do alumínio [$W/(m \times K)$];

- **Constante de arrefecimento**

A constante de arrefecimento é um parâmetro que quantifica a taxa de transferência de calor entre a água e as albetas. Esse valor é fundamental para caracterizar a curva de resfriamento no contexto do modelo de capacidade concentrada e permite estimar o intervalo de tempo necessário para que a água atinja a temperatura final a partir de uma condição inicial.

$$b = \frac{h_L^f \times A_{albetaT}}{\rho_{\acute{a}gua} \times V_{\acute{a}gua} \times Cp_{\acute{a}gua}} \quad (3.76)$$

Onde:

h_L^f → É o coeficiente de transferência de calor entre a albeta (lado frio) e a água [$\frac{W}{m^2 \times K}$];

$A_{albetaT}$ → É a área total das albetas (lado frio) [m^2];

$V_{\acute{a}gua}$ → É o volume útil da água [m^3];

$Cp_{\acute{a}gua}$ → É o calor específico da água [J/kgK];

$\rho_{\acute{a}gua}$ → É a densidade da água [kg/m^3].

- **Determinação do tempo do arrefecimento da água**

$$t_{arref} = -\frac{1}{b} \times \ln \left(\frac{T_{f,\acute{a}gua} - T_{\infty}}{T_{i,\acute{a}gua} - T_{\infty}} \right) \quad (3.77)$$

Onde:

b → É a constante de resfriamento [$\frac{1}{s}$];

$T_{f,\acute{a}gua}$ → É a temperatura final da água [$^{\circ}C$];

$T_{i,\acute{a}gua}$ → É a temperatura inicial da água [$^{\circ}C$];

T_{∞} → É a temperatura ao redor da água (considerou-se a temperatura do lado frio da célula Peltier) [$^{\circ}C$].

Nota: No caso sem albetas, o tempo de arrefecimento é determinado de forma análoga, considerando as dimensões da célula Peltier em vez das albetas.

3.3.11. Procedimentos da Simulação da Serpentina

Para a simulação da serpentina foi utilizado o ANSYS Workbench 2025 R1, recorrendo ao módulo *Fluent*. O procedimento desenvolveu-se em etapas sequenciais, conforme ilustrado na interface do software, conforme pode-se ver abaixo

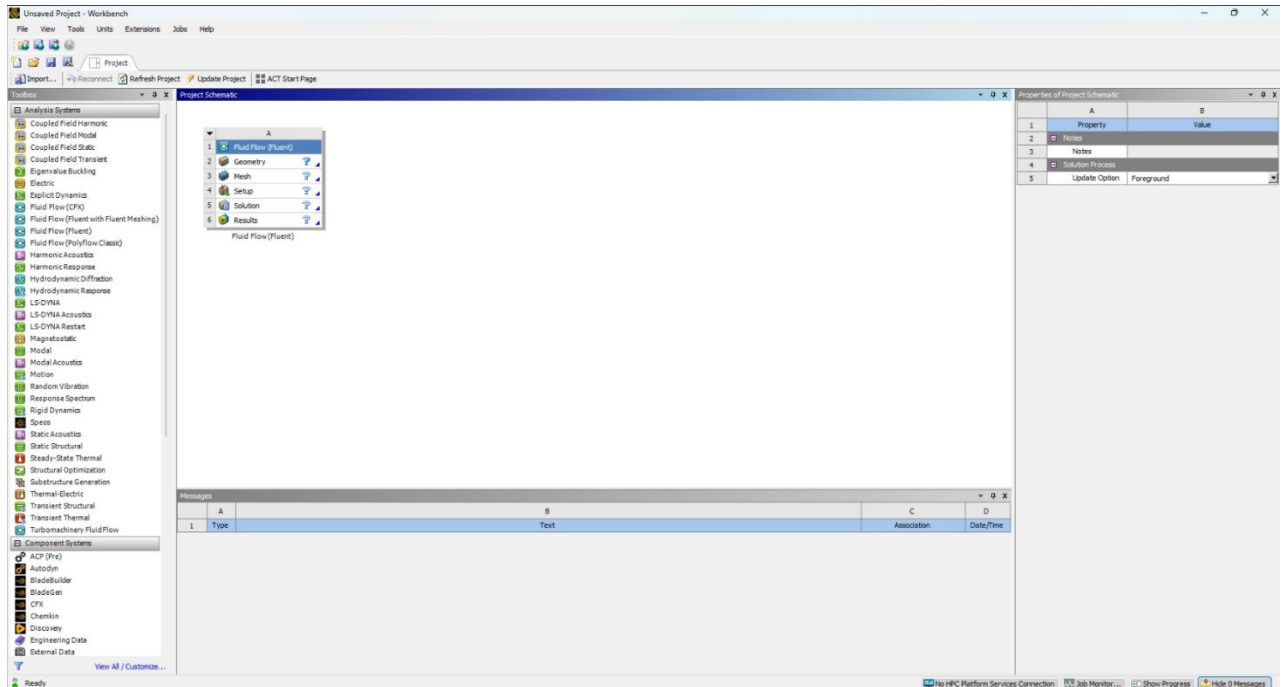


Figura 24: Interface do Ansys

- **Escolha do módulo (*Fluid Flow – Fluent*):** seleccionou-se o ambiente de escoamento de fluídos como base de simulação, adequado à análise térmica e hidráulica da serpentina.
- **Geometria:** nesta fase importou-se a geometria da serpentina, garantindo a definição do volume de controlo necessário à simulação numérica.
- **Geração da malha (*Mesh*):** elaborou-se a malha computacional, definindo a discretização do domínio fluído e sólido. Foram adoptados critérios de refinamento local em zonas de maior interesse, como a superfície da serpentina.
- **Definição do *setup* (*Setup*):** configuraram-se as condições de contorno, propriedades físicas dos materiais, parâmetros de escoamento e transferência de calor, bem como as condições iniciais de temperatura da água e da cerveja.
- **Processo de cálculo (*Solution*):** procedeu-se à resolução iterativa do modelo no Fluent, empregando o regime transiente, de modo a acompanhar a evolução temporal da temperatura da cerveja.
- **Resultados (*Results*):** por fim, realizaram-se pós-processamentos para obter distribuições de temperatura, campos de velocidade e valores médios relevantes, que serviram de base à análise e discussão dos resultados.

4. Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através da simulação do sistema de resfriamento, bem como a discussão crítica dos mesmos. São analisados o desempenho da serpentina, a transferência de calor nas alhetas, a evolução térmica da água no reservatório e a eficiência global do sistema. Os resultados são comparados com dados da literatura e discutidos de acordo com os princípios da transferência de calor.

4.1. Análise do desempenho Térmico da Serpentina

Esta secção avalia o desempenho térmico da serpentina, responsável pela transferência de calor entre a cerveja e a água do reservatório. São quantificados os perfis de temperatura, a taxa de remoção de calor e o rendimento do processo de arrefecimento. Apresentam-se os coeficientes convectivos interno, externo e global, identificando-se a principal resistência térmica associada ao escoamento laminar interno. Adicionalmente, são analisados os efeitos dos parâmetros geométricos-comprimento, número de espiras e altura do rolo-na área efetiva de troca térmica e na uniformidade da convecção externa. Uma análise paramétrica complementa o estudo, variando sistematicamente os principais parâmetros de projeto. Por fim, recorre-se aos resultados das simulações CFD (malha, condições de contorno e campos de temperatura, velocidade e pressão) para validar o dimensionamento e fundamentar as conclusões obtidas.

- A tabela a baixo apresenta os principais parâmetros e resultados obtidos.

Parâmetros	Valor	Observações
Q_{ret}	1859 [W]	Quantidade de calor a ser retirado da cerveja
$T_{água}$	2 [°C]	Temperatura ao redor da serpentina
v	0,15 [m/s]	Velocidade de entrada de cerveja na serpentina
$Re^{Cerveja}$	1684 [-]	Número de Reynolds
h_{int}	252,3 $\left[\frac{W}{(m^2 \times ^\circ C)}\right]$	Coefficiente de convecção interno
h_{exter}	1374 $\left[\frac{W}{(m^2 \times ^\circ C)}\right]$	Coefficiente de convecção entre água e serpentina
U	201,5 $\left[\frac{W}{(m^2 \times ^\circ C)}\right]$	Coefficiente global de transferência de calor
A_s	0,76 [m ²]	Área de troca térmica da serpentina
L	20,4 [m]	Comprimento total da serpentina
N_{esp}	43,3 [m]	Número de espiras (usado 44 no projecto)
H_{esp}	0,55 [m]	Altura da serpentina (usado 0,6 m no projecto)
t_{res}	133,6 [s]	Tempo de residência da cerveja na serpentina

Tabela 1– Resultados obtidos para a serpentina

A tabela apresenta uma síntese dos principais parâmetros envolvidos no processo de arrefecimento da cerveja na serpentina, abrangendo condições de escoamento, coeficientes de transferência de calor, características geométricas do equipamento e tempo de residência. Essas informações possibilitam a avaliação da eficiência do projeto e subsidiam recomendações para a otimização do desempenho térmico.

4.1.1. Coeficientes de transferência de calor

O coeficiente convectivo interno h_{int} depende do regime de escoamento; para Reynolds de 1684, o escoamento é laminar e apresenta valores reduzidos, tornando-se a principal limitação da troca térmica. O coeficiente externo h_{exter} é mais elevado, enquanto o coeficiente global ($U=201,5 \left[\frac{W}{m^2 \times ^\circ C} \right]$), traduz o efeito combinado, dominado pela convecção interna em regime laminar.

4.1.2. Geometria da serpentina

O comprimento da serpentina ($\approx 20,4$ m) foi dimensionado para garantir a saída da cerveja a 4 °C. Utilizaram-se **44 espiras**, o que compacta a geometria e aumenta a área de troca, e a altura final do rolo foi de **0,6 m**, assegurando a total imersão no reservatório e convecção externa uniforme.

4.1.3. Análise paramétrica da serpentina

A análise paramétrica da serpentina consiste em variar parâmetros geométricos e operacionais para avaliar o seu efeito na troca térmica. Neste estudo alterou-se o tempo de enchimento entre copos, equivalente a diferentes caudais de cerveja, afectando o número de Reynolds, o coeficiente convectivo interno e, entre outros parâmetros, a eficiência global do sistema.

- Abaixo apresenta-se o gráfico do número de Reynolds e da velocidade em função do tempo de residência.

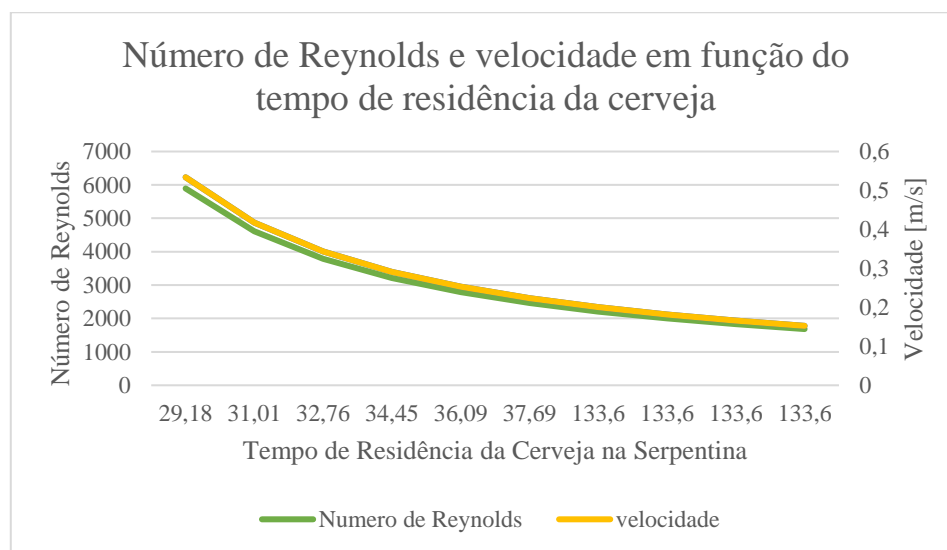


Gráfico 2 – Gráfico da Variação do Tempo de residência da cerveja na serpentina em função do número de Reynolds e a velocidade

Discussão: O gráfico mostra que, para tempos de residência mais curtos, a velocidade do escoamento é elevada, resultando em números de Reynolds próximos de 6000, típicos de regime turbulento. Este regime favorece a convecção interna e, conseqüentemente, a transferência de calor. À medida que o tempo de residência aumenta, a velocidade diminui e o Reynolds desce gradualmente até valores da ordem de 1700, característicos de regime laminar. Nesta condição, a mistura do fluido é menos eficaz e o coeficiente convectivo interno reduz-se significativamente, o que limita a taxa de remoção de calor pela serpentina.

- A seguir apresenta-se o gráfico dos coeficientes convectivos interno e externo em função do número de Reynolds.

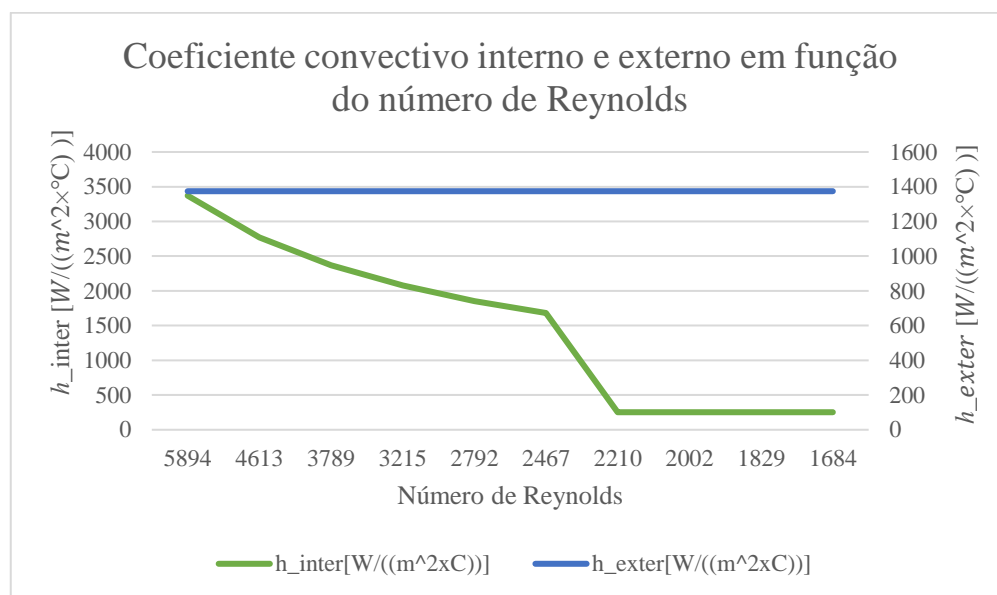


Gráfico 3– Gráfico do número de Reynolds em função do coeficiente convectivo interno e externo

Discussão: A análise mostra que, para valores elevados de Reynolds, o coeficiente convectivo interno h_{int} é superior a 3000 W/(m²·K), excedendo largamente o coeficiente externo. À medida que o Reynolds diminui, devido à menor velocidade de escoamento, o h_{int} reduz-se até cerca de 250 W/(m²·K), tornando-se inferior ao h_{exter} . O coeficiente externo h_{exter} permanece praticamente constante, uma vez que foi calculado com base em convecção natural da água ao redor da serpentina, mantendo-se inalterado porque as propriedades do fluido, a geometria do tubo e a diferença de temperatura consideradas no modelo não variaram. Assim, nas condições de baixo Reynolds, a resistência interna passa a dominar o processo de transferência de calor, constituindo o principal factor limitativo do desempenho térmico da serpentina.

Em seguida, faz-se a análise paramétrica da quantidade de células Peltier. Varia-se o número de células instaladas e observa-se o efeito sobre a quantidade total de calor a retirar da cerveja e a potência retirada por cada célula.

- Em sequência apresenta-se o gráfico do número de células Peltier em função do calor a ser retirado da cerveja e o calor retirado por cada célula Peltier

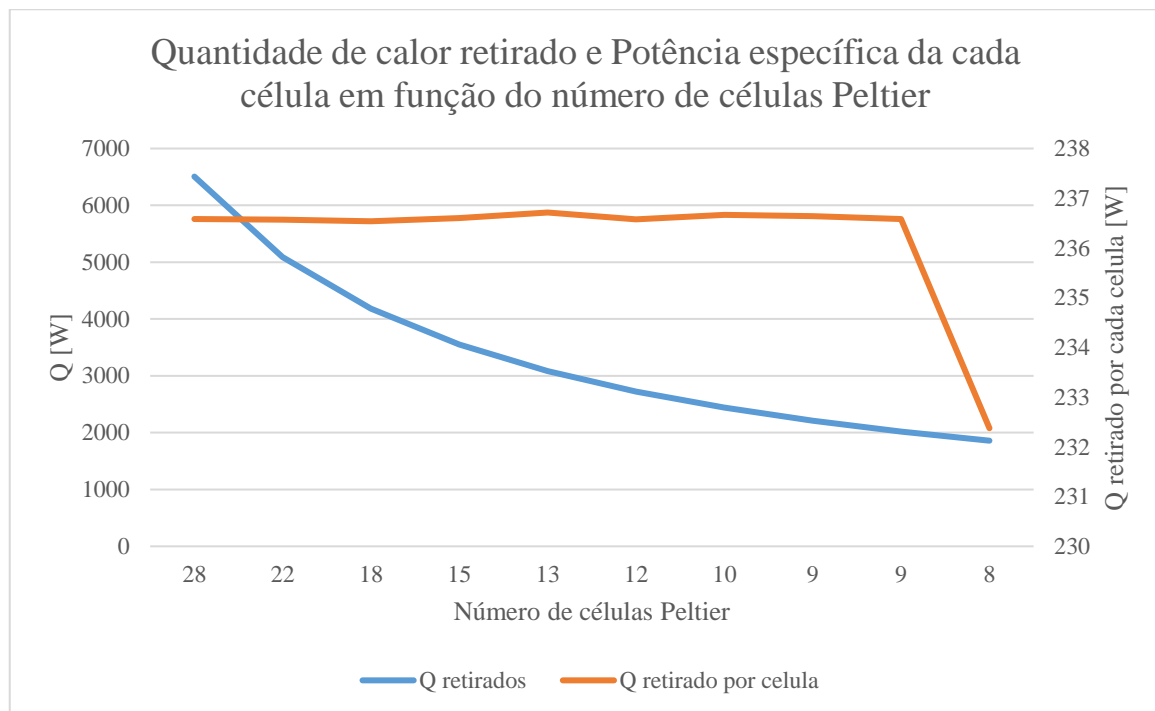


Gráfico 4– Gráfico do número de células Peltier em função do calor a ser retirado da cerveja e o calor retirado por cada célula Peltier

Discussão: Quanto maior a quantidade de calor a remover, maior deverá ser o número de células Peltier. Nesta perspectiva, o dimensionamento faz-se a partir da exigência térmica do processo, escolhendo o total de módulos que assegure a soma de capacidades individuais necessária, com margem operacional adequada. Sabendo que a carga a retirar da cerveja é de 1 859 W e que cada célula Peltier absorve cerca de 233 W, conclui-se que oito células perfazem aproximadamente 1,86 kW, cumprindo integralmente a especificação.

4.1.4. Resultados da Simulação da Serpentina

4.1.4.1 Visualização e Malha

A Figura 25 apresenta a malha da serpentina, cuja qualidade variou entre 0,161 e 0,998, com média próxima de 0,75. A maior parte dos elementos apresenta qualidade superior a 0,7, o que garante estabilidade numérica e precisão nos cálculos de escoamento e transferência de calor. Apesar da presença de alguns elementos de menor qualidade, estes são pontuais e não comprometem a solução global. Assim, a malha pode ser considerada adequada para a simulação CFD.

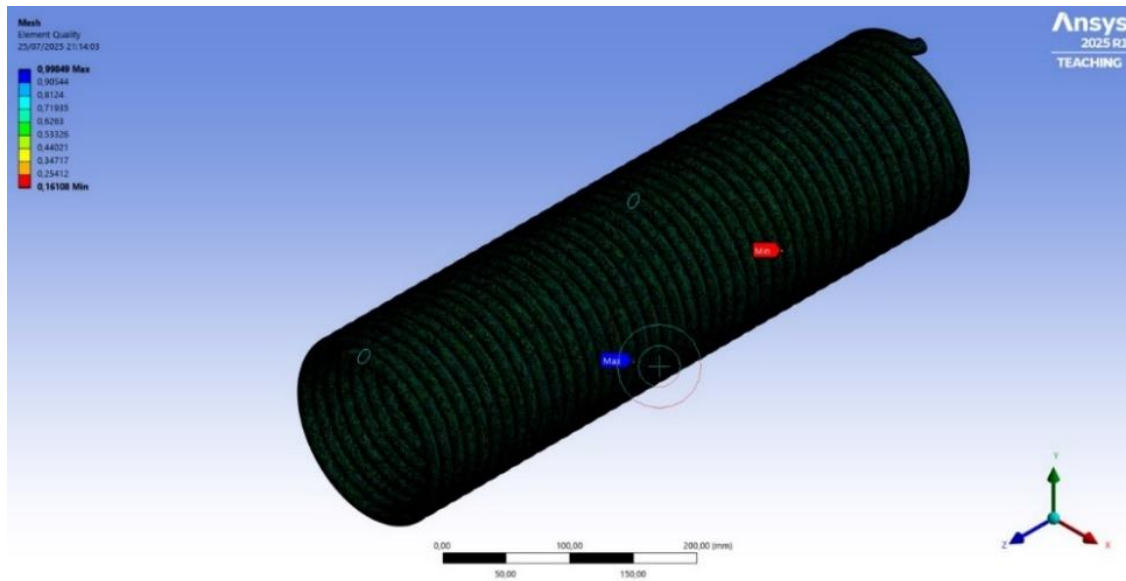


Figura 25: Malha gerada para a serpentina

4.1.4.2 Definição das Condições de Contorno

Na Figura 26 estão representadas as condições de contorno adotadas para a simulação. Pela entrada da serpentina (seta azul), a cerveja foi definida a 37 °C com velocidade de 0,1525 m/s, enquanto na saída (seta vermelha) aplicou-se uma condição de pressão de 0 Pa manométrica, correspondente à pressão ambiente de referência, permitindo que o fluido escoe livremente para a atmosfera. A serpentina foi modelada em cobre, e esteve completamente imersa em um banho de água fria a 2 °C, aplicado como condição de contorno externa para promover o resfriamento por convecção.

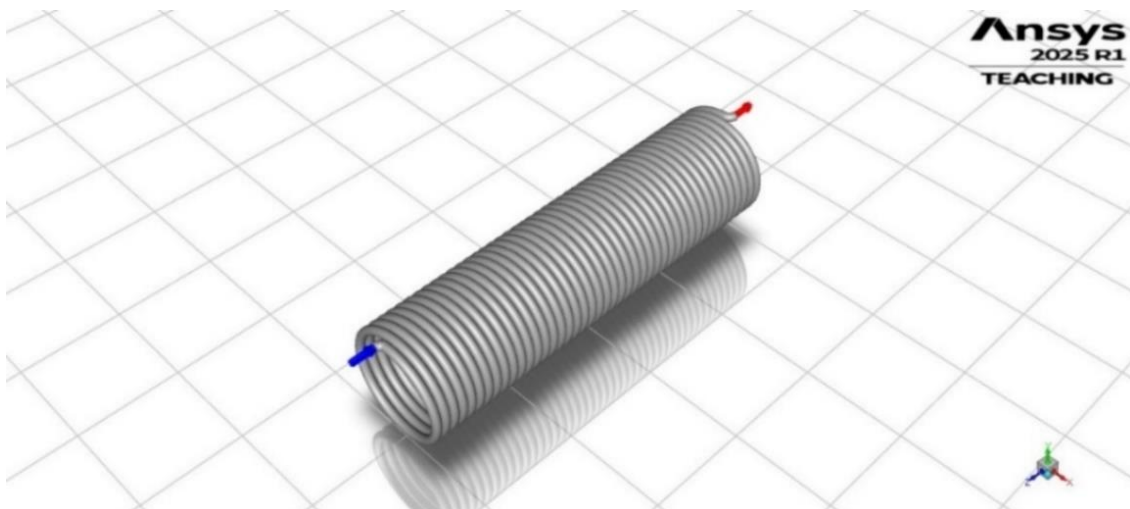


Figura 26: Vista 3D da serpentina com entrada e saída de fluido

4.1.4.3. Distribuição de Temperatura

A Figura 27 mostra a evolução térmica da cerveja ao longo da serpentina. O fluido entra a 37 °C e atinge cerca de 3,5 °C após 135 s, tempo total de arrefecimento. O dimensionamento com 44 espiras (ligeiramente acima das 43,3 calculadas) assegurou que a temperatura final ficasse 0,55 °C abaixo do valor projectado, confirmando a eficiência do sistema. A maior queda térmica ocorre nas primeiras voltas, devido ao elevado gradiente entre a cerveja e a água a 2 °C, enquanto nas últimas espiras a redução é mais suave, reflectindo a aproximação do equilíbrio térmico.

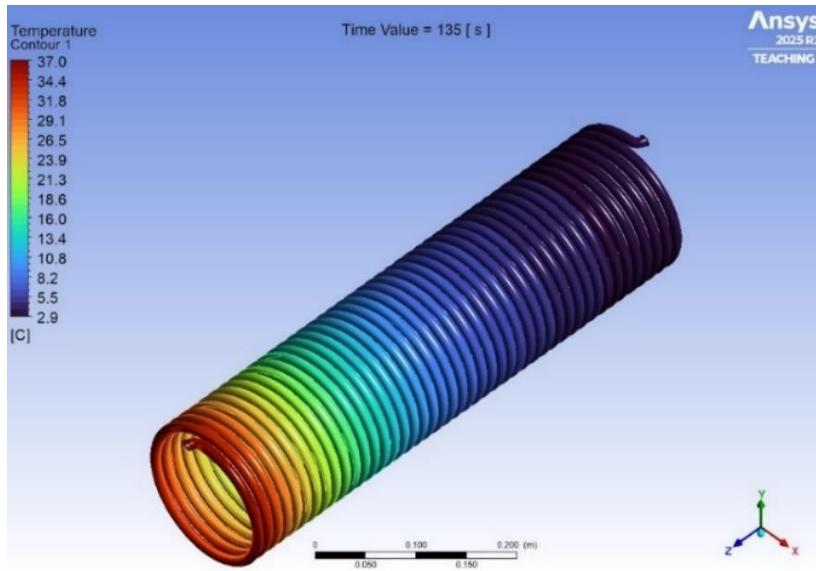


Figura 27: Contorno de temperatura da serpentina

Para complementar a análise qualitativa do contorno térmico, o gráfico abaixo apresenta a variação quantitativa da temperatura média da cerveja ao longo da serpentina. Os dados que permitiram a construção do gráfico abaixo foram obtidos directamente a partir da simulação numérica realizada no software ANSYS Fluent.

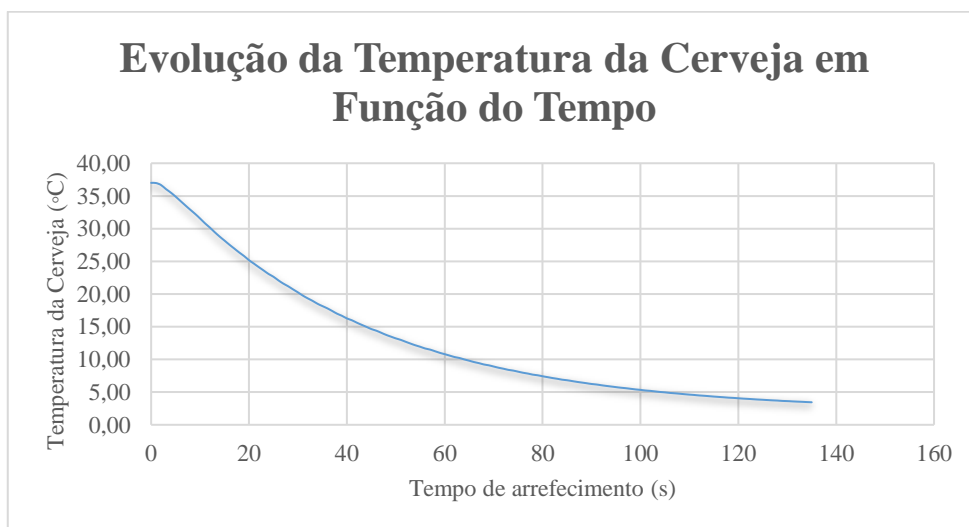


Gráfico 5 – Gráfico da Variação da Temperatura da Cerveja ao Longo do Tempo

4.1.4.4. Distribuição de Velocidade

A Figura 28 mostra que a velocidade do escoamento permanece praticamente constante em torno de 0,15 m/s, com pequenas variações apenas nas curvas mais acentuadas da serpentina. Esse comportamento confirma o regime laminar ($Re = 1684$), caracterizado por baixa mistura entre as camadas de fluido. As variações observadas decorrem das perdas por atrito e da geometria helicoidal, mas não comprometem a uniformidade do escoamento.

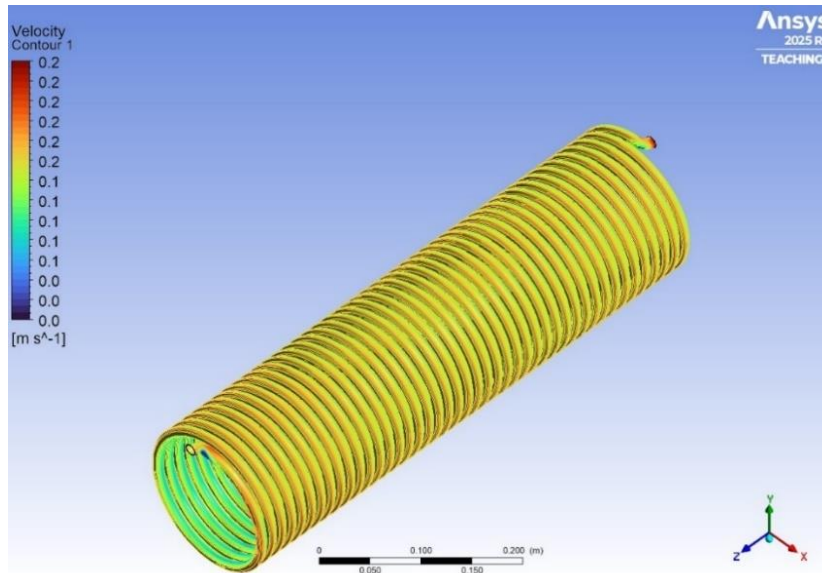


Figura 28: Contorno de velocidade do fluido dentro da serpentina

4.1.4.5. Distribuição de Pressão

A Figura 29 mostra que a pressão na entrada da serpentina atinge aproximadamente 1573 Pa, decrescendo gradualmente ao longo do escoamento. Esse comportamento deve-se às perdas de carga por atrito viscoso e, principalmente, ao efeito da curvatura helicoidal do tubo, que induz escoamento secundário e intensifica as forças de cisalhamento na parede.

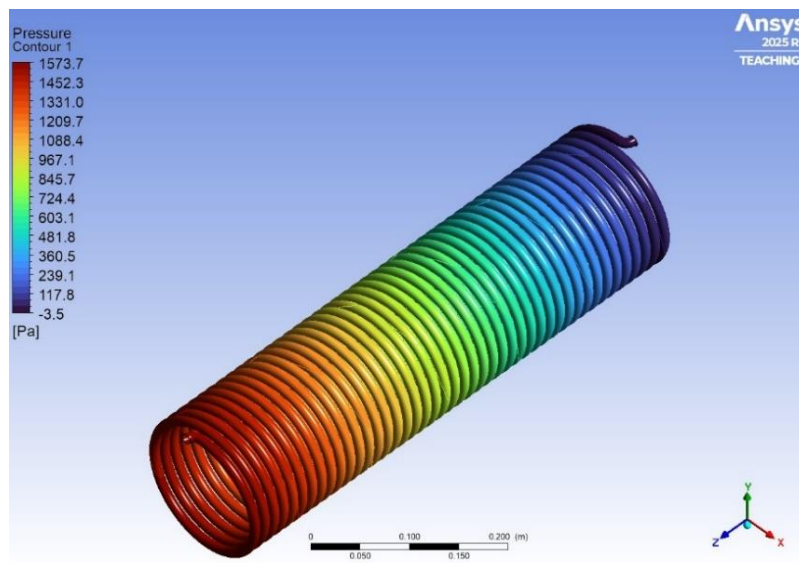


Figura 29: Contorno de pressão na serpentina

4.2. Resultados da alheta (lado frio)

As alhetas instaladas no lado frio das células Peltier têm a função de aumentar a área de contacto com a água, potenciando a transferência de calor por convecção.

Parâmetros Principais da alheta (Lado frio)

- A tabela a baixo apresenta os principais parâmetros e resultados obtidos

Parâmetros	Valor	Observações
h_L^f	633 $\left[\frac{W}{(m^2 \times ^\circ C)}\right]$	É o coeficiente de transferência de calor entre a alheta (lado frio) e a água;
η_a^f	0,27 [-]	É a eficiência da alheta (lado frio);
$h_{\acute{a}gua}^{cp}$	291,2 $\left[\frac{W}{(m^2 \times ^\circ C)}\right]$	É o Coeficiente de transferência de calor por convecção entre a água e as células Peltier;
T_H	1,3 [$^\circ C$]	É a temperatura da alheta na borda superior da placa;
T_b	0,96 [$^\circ C$]	É a temperatura na base da alheta;
A_{alheta_fria}	0,18 [m^2]	É a área total de uma alheta (Lado frio);
Q_c	233 [W]	É a quantidade de calor absorvido pela face fria da célula Peltier;

Tabela 2: Resultados obtidos da alheta (Fria)

Comentários:

- O coeficiente convectivo da alheta fria é elevado 633 $\left[\frac{W}{(m^2 \times ^\circ C)}\right]$, mais do dobro do valor entre a água e a face fria da célula 291,2 $\left[\frac{W}{(m^2 \times ^\circ C)}\right]$, mostrando que a limitação principal está no contacto água-célula.
- A eficiência reduzida (0,27) deve-se ao gradiente térmico entre a base (0,96 $^\circ C$) e a extremidade (1,3 $^\circ C$, evidenciando que parte da área não dissipa calor de forma efectiva.
- Apesar disso, a área de 0,18 [m^2], por alheta permite atingir a potência de 233 [W], e o conjunto das oito alhetas fornece cerca de **1864 W** de dissipação.

4.2.1. Análise paramétrica da alheta (Lado frio)

A análise paramétrica da alheta (Lado frio) consiste em variar parâmetros geométricos de modo a avaliar a sua influência na transferência de calor entre a superfície da alheta e a água do reservatório. Neste estudo variaram-se a altura (H), a largura (W), a espessura (t) e o espaçamento entre alhetas (S), analisando-se os efeitos sobre o coeficiente convectivo h_L^f , a eficiência da alheta η_a^f e a potência térmica absorvida Q_c .

- A seguir apresenta-se o gráfico que relaciona o espaçamento entre alhetas com o coeficiente convectivo h_L^f e a eficiência η_a^f , de modo a avaliar a influência da geometria no desempenho térmico do lado frio.

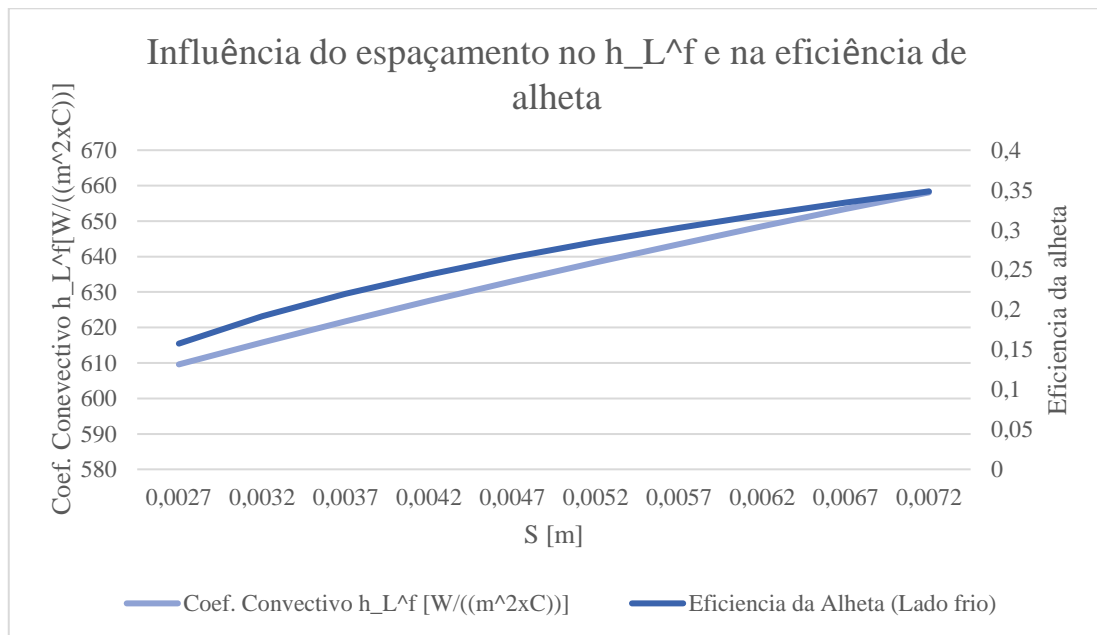


Gráfico 6 – Gráfico do espaçamento entre as alhetas em função do h_L^f e da η_a^f

Discussão: Com $S=0,0047$ m obteve-se um ponto intermédio. Espaçamentos menores causam interferência entre alhetas, com sobreposição das camadas-limite e menor eficiência. Espaçamentos maiores aumentam ligeiramente h_L^f e mais significativamente η_a^f , mas reduzem a compacidade. O valor adoptado permite que a água circule melhor entre as alhetas, favorecendo a renovação do fluido e uma distribuição mais uniforme das correntes convectivas. Acima de $S \approx 0,006$ m, os ganhos tornam-se pouco significativos pois há menos superfície de contacto total disponível no reservatório.

- A seguir apresenta-se o gráfico que relaciona o calor dissipado Q_c com as dimensões da alheta, permitindo avaliar a influência geométrica no desempenho térmico do lado frio.

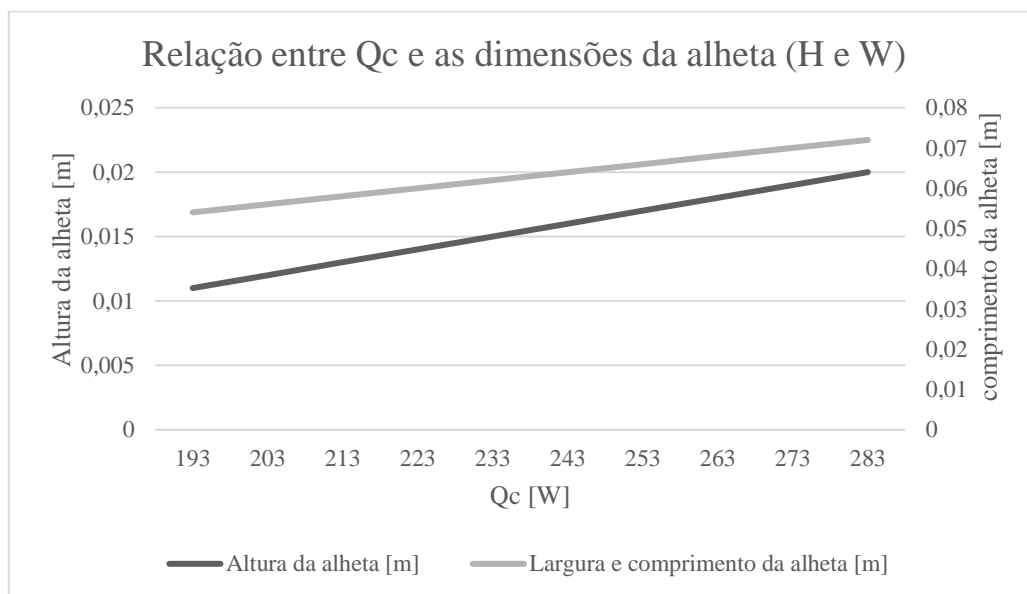


Gráfico 7 – Gráfico da Variação do calor absorvido em função da altura e comprimento da alheta

Discussão: O aumento da altura e da largura da alheta amplia a área de contacto e, conseqüentemente, o calor dissipado. No ponto adoptado $Q_c = 233$ [W], as dimensões foram $H = 0,015$ m e $W = 0,062$ m, suficientes para atingir a potência necessária. Para dimensões maiores, os ganhos em Q_c tornam-se cada vez menores, porque nas extremidades da alheta a diferença de temperatura em relação à água é baixa, o que reduz a eficácia da convecção nessa região.

4.3. Resultados da configuração das células Peltier e da alheta (lado quente)

A configuração das células Peltier e da alheta no lado quente define o balanço energético do sistema, pois o calor absorvido no lado frio é somado à potência eléctrica e rejeitado no lado quente. A alheta (lado quente) assegura a dissipação desta carga para o meio, sendo determinante para a estabilidade térmica.

Parâmetros Principais da configuração das células Peltier e da alheta (Lado quente)

- A tabela a baixo apresenta os principais parâmetros e resultados obtidos

Parâmetros	Valor	Observações
ΔT	11 [°C]	É a diferença de temperatura;
Q_h	620,6 [W]	É a Quantidade de calor rejeitada no lado quente da célula Peltier;
COP	0,62 [-]	É o Coeficiente de desempenho da célula Peltier

Q_c	233 [W]	É a quantidade de calor absorvido pela face fria da célula Peltier;
Q_{total}^{quente}	2912 [W]	É o calor dissipado pela alheta (lado quente);
N^q	18 [-]	É o número de alhetas (lado quente) [adimensional];
η_a^q	0,43 [-]	É a eficiência da alheta (lado quente) [adimensional];

Tabela 3: Resultados obtidos da configuração das células Peltier e da alheta (Lado quente)

- A Tabela 3 apresenta os principais parâmetros associados à configuração das células Peltier e das alhetas no lado quente. Essas informações possibilitam a análise do balanço energético do sistema, com ênfase na quantidade de calor rejeitada, no desempenho das alhetas e na eficiência global das células Peltier. A avaliação desses parâmetros é essencial para garantir a dissipação adequada da carga térmica, promovendo a estabilidade operacional e o desempenho térmico do sistema.

4.3.1. Análise paramétrica da configuração das células Peltier e da alheta (Lado quente)

A análise paramétrica permite avaliar como a eficiência e a capacidade de dissipação variam com as condições operacionais e geométricas do sistema. No caso das células Peltier, destaca-se a relação entre o COP e o calor absorvido em função do gradiente térmico imposto.

- A seguir apresenta-se o gráfico que relaciona o coeficiente de desempenho (COP) e a capacidade de refrigeração por célula.

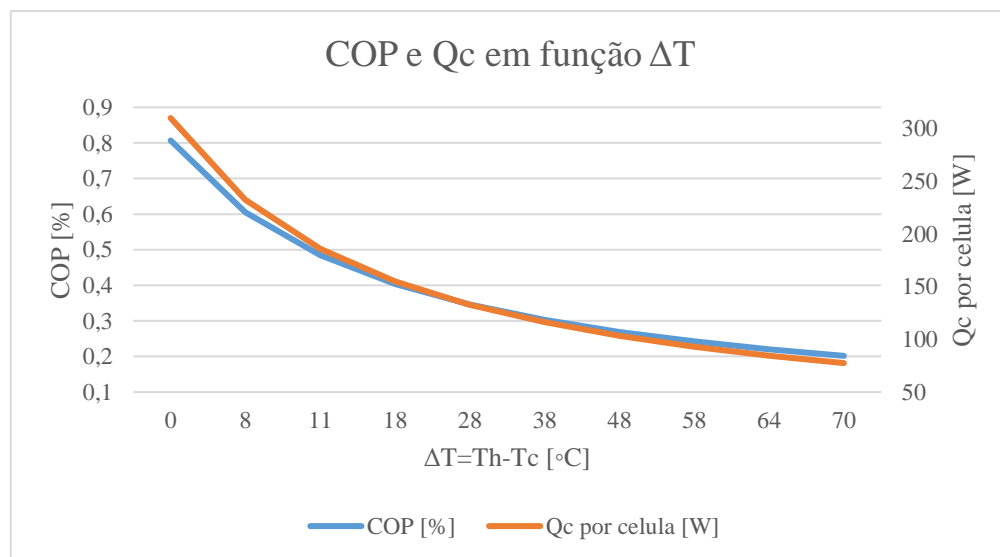


Gráfico 8: Gráfico da Variação da diferença de temperatura em função do COP e do Q_c por célula

Discussão: O gráfico evidencia que tanto o COP como a capacidade de refrigeração por célula diminuem com o aumento de ΔT . Para baixos valores de ΔT , o sistema apresenta maior eficiência e capacidade de remoção de calor, sendo está a zona de operação mais favorável. À medida que o desnível térmico cresce, a condução interna intensifica-se, reduzindo simultaneamente a eficiência

e o calor dissipado. O ponto adoptado no projecto situa-se numa região intermédia, garantindo equilíbrio entre desempenho e estabilidade operacional.

- Segue-se o gráfico que relaciona o calor total dissipado (Q_{total}^{quente}) e a eficiência da alheta (η_a^q) em função do número de alhetas (N^q).

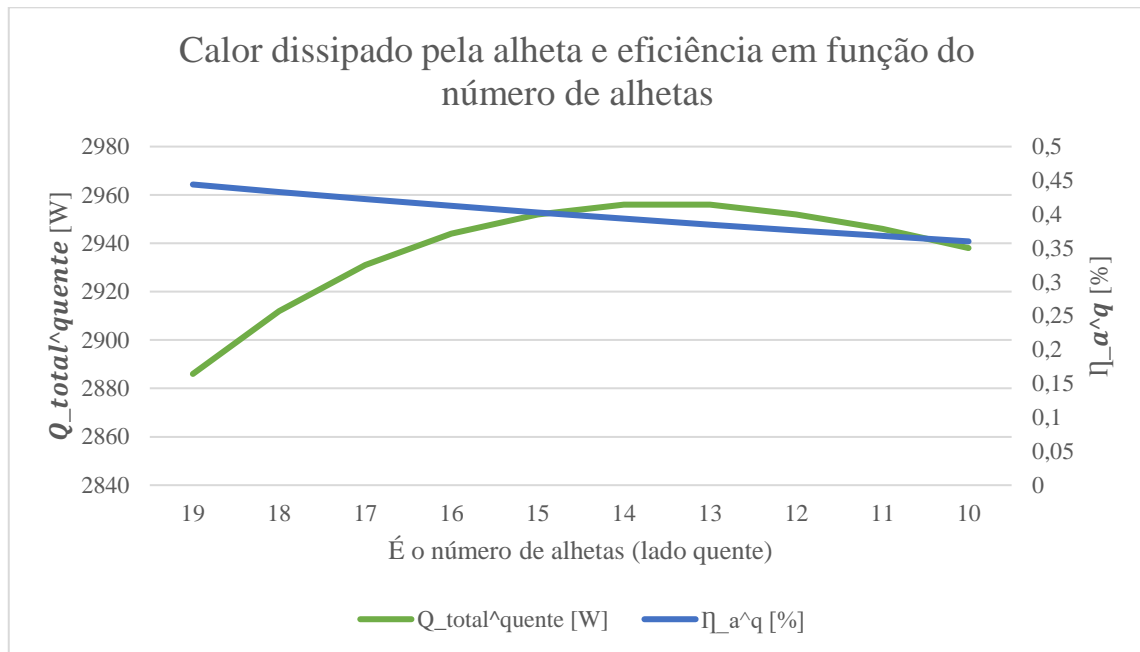


Gráfico 9: Gráfico da Variação do número de alhetas em função do calor libertado pela alheta e da eficiência

Discussão: Neste gráfico observa-se que o aumento do número de alhetas conduz a um acréscimo do calor dissipado, devido à maior área exposta ao ar. Contudo, a eficiência individual diminui gradualmente, já que as extremidades das alhetas se encontram a temperaturas mais próximas do ambiente e pouco contribuem para a transferência térmica. No projecto, cada conjunto de alhetas está colocado sobre a superfície quente de quatro células Peltier, que no total rejeitam cerca de 2468 W. O valor obtido de Q_{total}^{quente} (2912 W) confirma que a geometria definida garante a dissipação necessária, assegurando uma margem de segurança para a operação contínua.

4.4. Resultados tempo de arrefecimento da água

Este subcapítulo apresenta os resultados do tempo de arrefecimento da água, comparando a condição com e sem alhetas no lado frio das células Peltier.

- A tabela abaixo apresenta os principais parâmetros e resultados obtidos

Parâmetros	Valor	Observações
$A_{alhetaT}$	0,18 [m ²]	É a área total da alheta das 8 alhetas (Lado frio)
$A_{celulaT}$	0,031 [m ²]	É a área total da face fria das 8 células Peltier

t_{arref}	1856 [s]	É o tempo do arrefecimento da água com alhetas (lado frio) submersas
t_{arref}^{sem}	24019 [s]	É o tempo do arrefecimento da água sem alhetas (lado frio) submersas

Tabela 4: Resultados obtidos no tempo de arrefecimento da água

Comentário: Verifica-se que, na ausência de alhetas, o tempo de arrefecimento da água é de 24 019 s ($\approx 6,7$ h), enquanto a presença de alhetas reduz esse tempo para 1 856 s (≈ 31 min), devido ao aumento da área de contacto e à intensificação da convecção. Os 31 minutos correspondem ao tempo necessário para que a água esteja pronta para o funcionamento da máquina e para iniciar o serviço da cerveja. Essa diferença demonstra de forma clara a vantagem significativa da utilização de alhetas em comparação com sua ausência.

A seguir apresenta-se o gráfico que relaciona a área total das alhetas com o tempo de arrefecimento da água, permitindo evidenciar a influência da superfície de troca térmica na redução do tempo necessário para o processo.

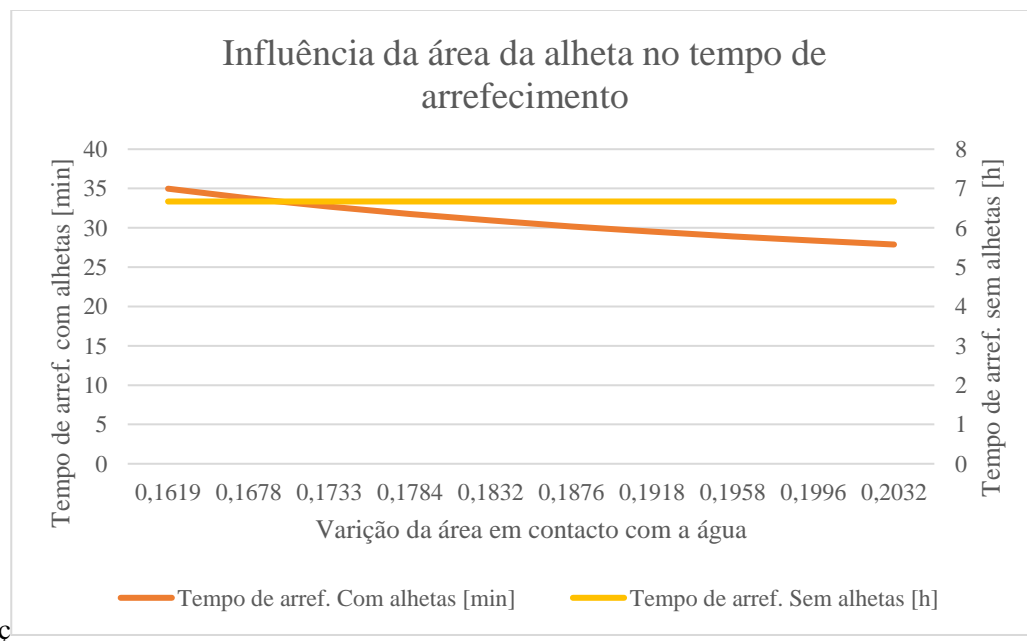


Gráfico 10: Gráfico da Variação da área em contacto com a água de modo a verificar o tempo de arref. Da água

Discussão: O gráfico indica que a ampliação da superfície de contacto entre as alhetas e a água resulta numa redução significativa do tempo necessário para o arrefecimento.

5. Protótipo da máquina de arrefecimento de cerveja utilizando células Peltier

Este subcapítulo apresenta o protótipo desenvolvido da máquina de arrefecimento em vista explodida, destacando a disposição e a integração dos principais componentes. Além da representação estrutural, são abordados e ilustrados alguns elementos auxiliares, como o controlador de pressão e outros dispositivos de suporte ao funcionamento do sistema.

5.1. Representação da Máquina de arrefecimento

Apresenta-se o protótipo da máquina em vista explodida, evidenciando a disposição relativa e a sequência de montagem dos principais sub-conjuntos.

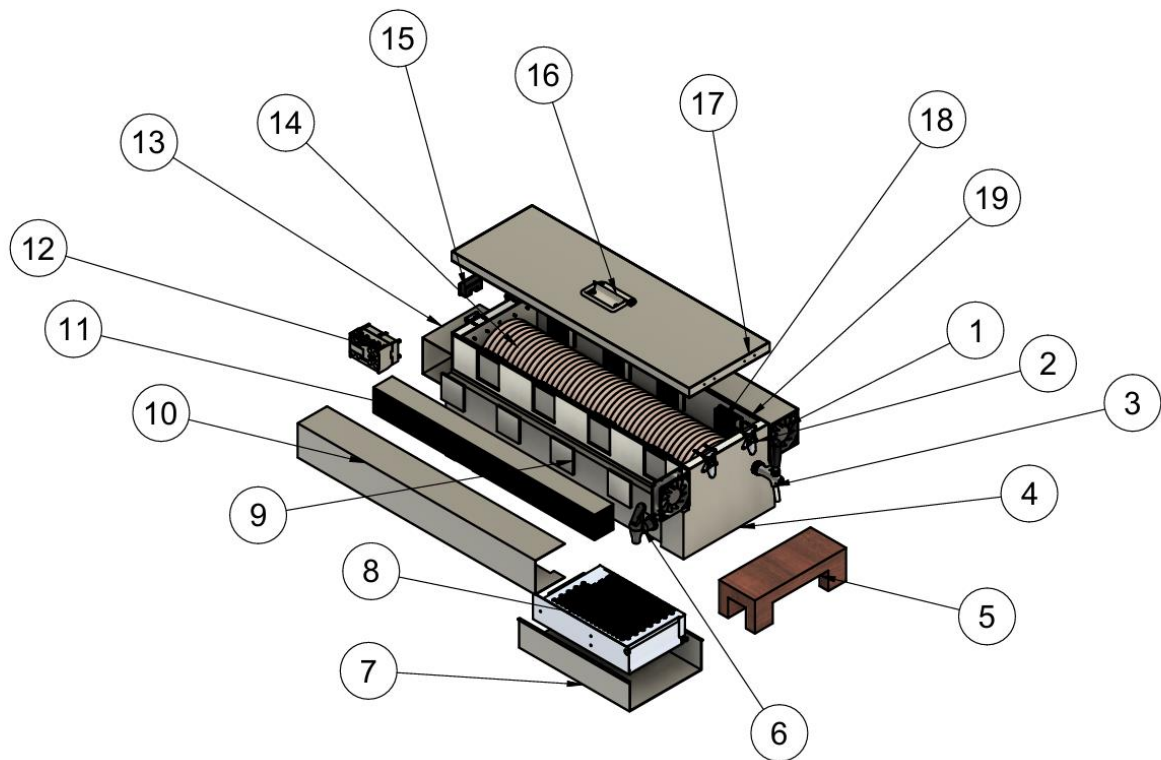


Figura 30: Vista explodida protótipo da máquina de arrefecimento; Fonte:(Autor, 2025)

- Na tabela abaixo segue-se a legenda da vista explodida:

Legenda	
1. Cooler	11. Alheta (lado quente)
2. Fecho	12. Contactor
3. Torneira Belga	13. Suporte do Contactor
4. Caixa de alumínio	14. Serpentina
5. Base de apoio (madeira)	15. Termostato
6. Torneira plástica	16. Alça
7. Suporte da Fonte de alimentação	17. Tampa de alumínio

8. Fonte de alimentação	18. Alheta (lado frio)
9. Células Peltier	19. Caixa de isopor
10. Ducto	-

Tabela 5: Legenda da Vista explodida

Destaca-se que, na tampa do recipiente, está instalada internamente uma placa de poliestireno expandido (EPS). Esse revestimento tem a função de aprimorar o isolamento térmico.

5.2. Componentes principais periféricos a máquina de arrefecimento

- A figura abaixo representa alguns dos componentes periféricos da máquina de arrefecimento.

Legenda:

1. Cilindro de Gás Carbónico CO₂ acoplado ao regulador de pressão;
2. Barril;
3. Válvula Extractora Tipo S com alívio de Pressão.

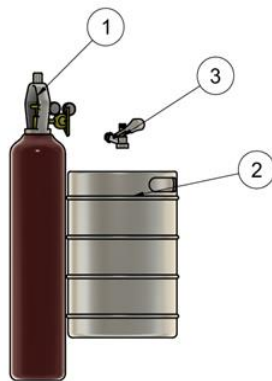


Figura 31: Vista explodida dos principais componentes periféricos da máquina de arrefecimento de cerveja

Outros componentes periféricos são: tubo de Polietileno atóxico CHOPP; tubo de polietileno atóxico CO₂; conexão rápida para saída do regulador de pressão e conexão rápida para válvulas extractoras.

Abaixo apresenta-se as funções de cada componente periférico:

- Tubo de Polietileno Atóxico *CHOPE* → Condução do gás do regulador à extractora;
- Tubo de polietileno atóxico CO₂ → Condução do produto da extractora para a máquina;
- Regulador de pressão CO₂ (saída simples) → Reduz e regula a pressão do gás para a linha;
- Válvula extractora para chope – tipo S, com alívio → Acopla ao barril e separa entrada de gás/saída de produto;
- Conexão rápida para saída do regulador de pressão → União do regulador ao tubo de CO₂.
- Conexão rápida para válvulas extractoras → Ligações gás/produto na válvula extractora.

6. Avaliação Económica

6.1. Estimativa de custos para a máquina de arrefecimento de cerveja utilizando células Peltier

A tabela a seguir apresenta as estimativas referentes aos materiais, componentes e serviços necessários para a fabricação da máquina de arrefecimento, incluindo a unidade de potência, o controle térmico e os materiais periféricos ao sistema. Os valores estão expressos em dólares americanos (USD), já incorporando uma margem de 10% para fins de avaliação económica.

Material para fabricação da máquina de arrefecimento			
Item	Descrição	Preço (\$)	Valor de margem (10%)
1	Serpentina de cobre de 210 mm	\$ 102	\$ 112,2
2	2×Base de apoio (madeira) (300 × 342 mm)	\$ 12	\$ 13,2
3	8×Alhetas (Lado frio) e 2×Alhetas (Lado quente)	\$ 42	\$ 46,2
4	8×Células Peltier	\$ 96	\$ 105,6
5	4× Fecho rápido tipo sobrecentro	\$ 32	\$ 35,2
6	Placas de poliestireno expandido (EPS) 40mm (2000× 700)	\$ 15	\$ 16,5
7	Chapa de alumínio 1,5mm (1000 × 3000)	\$ 80	\$ 88
8	Torneira Belga	\$ 47	\$ 51,7
9	Torneira Plástica	\$ 2	\$ 2,2
10	Alça	\$ 21,71	\$ 23,88
11	24 parafusos M2×50mm+Porcas+Anilhas	\$ 15,77	\$ 17,35
12	4 Parafusos M5×50mm+Porcas+Anilhas	\$ 3,64	\$ 4
13	Pasta Térmica Silicone Branca (Kit 1kg)	\$ 24	\$ 26,4
14	2×Cooler's	\$ 15	\$ 16,5
15	Consumíveis de soldadura	\$ 75	\$ 82,5
	Total:	\$ 583,12	\$ 641,43
Unidade de Potência e Controle Térmico			
Item	Descrição	Preço (\$)	Valor de margem (10%)
1	1×Fonte de alimentação	\$ 96,72	\$ 106,4
2	1×Contactor	\$ 61	\$ 67,1
3	1×Termostato	\$ 30,2	\$ 33,22

4	1×Cabo de 35mm ² com 120mm e 1×Cabo de 4mm ² com 1000mm	\$ 7	\$ 7,7
Total:		\$ 194,92	\$ 214,42
Material Periférico a máquina de arrefecimento			
Item	Descrição	Preço (\$)	Valor de margem (10%)
1	1×Cilindro de Gás Carbónico CO2	Preço total do Conjunto	Valor de margem total para o Conjunto
2	1×Regulador de Pressão CO2 (1 Saída)		
3	1×Válvula Extractora Tipo S c/ Alívio de Pressão - Rosca G5/8"		
4	2×Conexão Rápida (Tubo 3/8" X BSP Fêmea 5/8") p/ Válvulas Extractoras		
5	1×Tubo de Polietileno Atóxico CHOPE - Cor Natural - 3/8"		
6	1×Tubo de Polietileno Atóxico CO2 - Cor Natural - 3/8"		
----		\$ 247,70	\$ 272,47
7	1×Barril De Chope Inox 10 Litros	\$ 80	\$ 88
Total:		\$ 327,7	\$ 360,47
Total Geral:		\$ 1105,74	\$ 1216,32
Total Geral (Sem material Periférico):		\$ 778	\$ 855,85
Total Geral (Sem material Periférico) em MZN:		MZN 49792	MZN 54774,4
Total Geral em MZN:		MZN70767,4	MZN 77844,5

Tabela 6: Investimento inicial total do Projecto

Com base na avaliação económica apresentada, o custo total estimado da máquina de arrefecimento (incluindo unidade de potência, controle térmico e materiais periféricos) é de MZN 77844,5.

6.2. Análise comparativa do consumo de energia da máquina de arrefecimento de cerveja utilizando células Peltier e um congelador

Realiza-se uma análise comparativa do consumo energético entre o protótipo de máquina de resfriamento de cerveja com células Peltier e um congelador doméstico convencional, fundamentado no ciclo de compressão de vapor. Esta avaliação considera exclusivamente o período de pré-resfriamento, ou seja, o intervalo necessário para que cada sistema atinja as condições mínimas de operação.

- Energia eléctrica consumida:

$$E = (P_{in}/1000) \times (t_{arref}/60) \quad (6.1)$$

Onde:

E → É a energia eléctrica consumida [kWh];

P_{in} → É a Potência eléctrica de entrada [W];

t_{arref} → É o tempo do arrefecimento da água com alhetas [min]

Segundo (PALERMO, 2025), os freezers horizontais (congeladores) levam em média 4 horas e 55 minutos para atingir a temperatura de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo necessário este período para que possam ser utilizados de forma eficiente. A potência eléctrica de entrada destes equipamentos situa-se geralmente entre 150 W e 400 W, dependendo do modelo e da sua eficiência energética.

Tomando por referência a potência no topo da faixa (400 W) e admitindo 4 h até que o congelador possa ser utilizado de forma eficiente, a energia eléctrica consumida é de **1,6kWh**.

No protótipo desenvolvido, o pré-arrefecimento da água até $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ requer apenas 31 minutos. Para uma potência de entrada de 384 W, o consumo medido foi de aproximadamente **0,2 kWh**. Após este período, o sistema encontra-se apto para fornecer cerveja $3,45\text{ }^{\circ}\text{C}$ em apenas 2,25 minutos por dose.

Os resultados evidenciam que, em condições de pré-arrefecimento, a máquina com células Peltier apresenta **redução de cerca de 87 % no consumo energético relativamente ao congelador**, além de um tempo de resposta significativamente mais curto.

7. Conclusões e Recomendações

7.1. Conclusões

O estudo realizado atingiu plenamente o objectivo geral de dimensionar uma máquina de arrefecimento de cerveja utilizando células Peltier, tendo-se demonstrado que esta tecnologia pode ser aplicada de forma eficiente para refrigeração de bebidas em pequena escala. Constatou-se que os mecanismos de condução, convecção e radiação atuam de forma complementar no sistema. A condução predomina entre a superfície da célula Peltier e o dissipador; a convecção responde pela transferência térmica entre a serpentina/alhetas e o fluido (cerveja ou água); já a radiação apresenta impacto insignificante nas condições avaliadas. O entendimento aprofundado desses fenômenos foi fundamental para otimizar o desempenho global do sistema.

A análise energética e os cálculos de carga térmica possibilitaram a definição do número ideal de módulos Peltier, assegurando que a potência de refrigeração fosse suficiente para atingir a temperatura desejada da cerveja. Constatou-se que um dimensionamento inferior prejudicaria tanto o tempo de resfriamento quanto a eficiência, enquanto um dimensionamento superior resultaria em maior consumo energético. O equilíbrio obtido corroborou a adequação da solução escolhida.

O dimensionamento correcto da serpentina e das alhetas mostrou-se determinante para o desempenho do sistema. As superfícies de troca térmica foram projectadas de forma a maximizar a dissipação de calor no lado quente e a absorção no lado frio, garantindo maior eficiência térmica. Observou-se que o aumento da área de contacto e o uso de materiais de alta condutividade (como cobre ou alumínio) contribuem significativamente para a estabilidade da temperatura. Os resultados obtidos mostraram que a cerveja atingiu a temperatura de consumo de 3,45°C próximo da temperatura projectada (4°C). Este resultado comprova a viabilidade prática do sistema, garantindo que a utilização do equipamento atende a expectativas de rapidez sem comprometer a qualidade da bebida.

A água atingiu a condição de operação em aproximadamente 31 minutos, o que permite o início eficiente do funcionamento da máquina. Este tempo de pré-arrefecimento revela uma vantagem significativa em comparação com sistemas convencionais, reduzindo o intervalo necessário para disponibilizar a refrigeração e aumentando a rapidez na preparação da cerveja para o serviço.

As simulações computacionais confirmaram os resultados experimentais, validando o modelo teórico adotado. Observou-se que as curvas de arrefecimento obtidas em simulação coincidiram com os valores práticos dentro de uma margem aceitável de erro. Isso reforça a confiabilidade do sistema dimensionado e demonstra a utilidade das ferramentas de simulação para prever o desempenho de projectos semelhantes.

Em síntese, cada um dos objectivos específicos contribuiu para a consolidação do projecto, desde a base teórica da transferência de calor, passando pelo correto dimensionamento dos componentes críticos, até à validação prática e computacional do desempenho do sistema.

7.2. Recomendações

Recomenda-se realizar estudos de eficiência energética, explorando diferentes modos de operação, utilização de controladores electrónicos inteligentes (como PWM) e sistemas de recuperação de calor, de forma a reduzir o consumo eléctrico sem comprometer a capacidade de arrefecimento. Pesquisas futuras podem avaliar o desempenho de dissipadores fabricados com ligas metálicas de alta condutividade térmica, nanotecnologias ou até materiais compósitos, que possam melhorar a transferência de calor e reduzir as perdas térmicas do sistema.

Sugere-se desenvolver sistemas de controlo baseados em microcontroladores (ex.: Arduino, ESP32, Raspberry Pi) para monitorar e ajustar em tempo real a temperatura, a potência aplicada às células Peltier e o tempo de arrefecimento, tornando o equipamento mais inteligente e eficiente. Embora o projecto tenha sido focado no arrefecimento da cerveja, recomenda-se expandir os testes para outros líquidos (refrigerantes, sumos, água mineral) e diferentes volumes, a fim de avaliar a versatilidade do sistema e a necessidade de ajustes no dimensionamento.

É importante realizar um estudo económico aprofundado, comparando o custo de produção, manutenção e operação do sistema Peltier com sistemas de refrigeração convencionais, verificando a sua viabilidade para uso doméstico ou em pequena escala comercial.

Investigar alternativas de *design*, como combinações de módulos Peltier em paralelo/série, optimização da geometria da serpentina e melhoria da circulação do fluido, com o objetivo de diminuir o tempo necessário para atingir a temperatura desejada. Futuramente, o sistema pode ser alimentado por fontes de energia renovável, como painéis solares, tornando-o mais sustentável e independente da rede eléctrica.

8. Referências Bibliográficas

1. AGUILERA. (6 de Junho de 2025). Fonte: aguilera: <https://aguilera.es/?productos=tubo-espiral-de-cobre-5-5-m-de-longitud>
2. BAZARA. (2025). *bazara*. Fonte: bazara: <https://bazara.co.mz/van-000837-torneira-branca-pl%C3%A1stica-rosca-3/4>
3. CAMPOS, A. L. (20 de Julho de 2016). *Researchgate*. Fonte: Researchgate: https://www.researchgate.net/publication/277573278_REFRIGERACAO_UTILIZANDO_PASTILHAS_DE_EFEITO_PELTIER/link/578ed00408ae81b4466ecec6/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Ii9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoicHVibGJlYXRpb24ifX0
4. ÇENGEL, Y. A., & AFSHIN J, G. (2012). *Transfêrencia de Calor e Massa*. São Paulo: AMGH.
5. DA BARROSA, M. R. (2004). *Princípios Fundamentais da Transferencia de Calor*.
6. DHCP, I. (2025). *DHCP Informática*. Fonte: DHCP; Informática: <https://www.dhcp.com.br/fonte-chaveada-estabilizada-12v-20a-250w.html>
7. ELETRODEX. (2025). *eletrodex*. Fonte: eletrodex: https://www.eletrodex.net/energia/fontes-de-alimentacao/chaveadas?srsItd=AfmBOooD0opAr3BU2xRuNH-7IJXDlj5fJijwzXxIMJf0LnZcVxud_vRh
8. ELETROGATE. (21 de Março de 2023). *Eletrogate*. Fonte: Eletrogate: <https://blog.eletrogate.com/usando-pastilhas-peltier/>
9. Engineering, C. (11 de Julho de 2024). *creaform engineering*. Fonte: creaform engineering: <https://www.creaform-engineering.com/en/resources/what-is-numerical-simulation>
10. ENGINEERING, m. (2025). *meerstetter engineering*. Fonte: meerstetter engineering.
11. FERNANDES, A. E. (2012). *Conversão de Energia com Células de Peltier*. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa.
12. FERREIRA, M. (2014). Caudal. *REVISTA DE CIÊNCIA ELEMENTAR*, 1-2.
13. FERROTEC. (2025). *ferrotec*. Fonte: ferrotec: <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref11/>
14. FILHO, S. C. (2016). *ANÁLISE DE DUAS PROPOSTAS DE MÉTODOS – PROPAGAÇÃO CILÍNDRICA E PLANA – PARA A DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE ISOLAMENTO TÉRMICO DE MANTAS DE EVA*. . CRUZ DAS ALMAS: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA .
15. GARRETT, F. (16 de Dezembro de 2022). *techtudo*. Fonte: techtudo: <https://www.techtudo.com.br/noticias/2022/12/o-que-e-cooler-veja-tipos-e-saiba-importancia-no-computador.ghml>
16. INDUSTRIAL, I. e. (2002). *Isolamento e Montagem Industrial*. Fonte: <https://www.jdisolamentoemontagem.com/isolamento-isopor>: <https://www.jdisolamentoemontagem.com/isolamento-isopor>
17. INSTRUMENTS, T. (9 de Setembro de 2024). *thermtest*. Fonte: thermtest: <https://thermtest.com/examples-of-convection-heat-transfer>
18. JOÃO, L. (2023). *Energy Harvest: Recolha de Energia*. Covilhã: Universidade de Beira Interior.
19. KLIMCZACK, K., SKONECZNY, M. C., & POREDA, A. (2024). *FACTORS AFFECTING BEER QUALITY DURING STORAGE*. Kraków: University of Agriculture in Kraków.

20. KNAUF. (2025). Fonte: KNAUF: <https://www.knauf-isopor.com.br/produtos/caixas/caixas-termicas-alimentos/>
21. LEROYMERLIN. (2025). *leroymerlin*. Fonte: leroymerlin: <https://www.leroymerlin.pt/produtos/conjunto-de-4-puxadores-dobreveis-de-aco-inoxidavel-puxadores-de-porta-de-metal-para-caixas-de-ferramentas-portas-de-armarios-escotilhas-95619629.htm>
22. LINHARES, V. D., SUGUIMOTO, F. K., & De SOUZA, M. A. (2020). Análise de eficiência de pastilhas peltier em diferentes potências elétricas. *X Seminário de Extensão e Inovação* (p. 2). Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
23. MAESTRELLI, E. (2015). *Desenvolvimento de um sistema de condicionamento de ar em escala reduzida utilizando Módulos Termoelétricos*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
24. MANHIÇA, H. L. (2018). *Análise e Desenvolvimento de Sistema de Condicionamento de Ar automotivo Baseado em Módulos Termoelétricos*. Maputo: UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE.
25. MANZAN, L. (2021). *RECICLAGEM DO POLIESTIRENO EXPANDIDO COM USO DE SOLVENTES SUSTENTÁVEIS*. SÃO PAULO: ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO.
26. MATAN. (26 de Outubro de 2023). *electricity-magnetism*. Fonte: electricity-magnetism: <https://www.electricity-magnetism.org/pt-br/dispositivos-de-refrigeracao-termoeletrica-peltier/>
27. MATSUMOTO, T. (2025). FLUXOS ADVECTIVOS DE GRANDEZAS EXTENSIVAS QUANTIFICANDO ESCOAMENTOS. *FLUXOS ADVECTIVOS DE GRANDEZAS EXTENSIVAS QUANTIFICANDO ESCOAMENTOS*. São Paulo, São Paulo, Brasil: universidade estadual paulista júlio de mesquita filho.
28. MEMO. (2025). *MEMO*. Fonte: lojasmemo: <https://www.lojasmemo.com.br/produto/torneira-belga-5-8-para-chopeira-alpha-70281>
29. MERCADOLIVRE. (2025). *mercadolivre*. Fonte: mercadolivre: https://www.mercadolivre.com.br/kit-2-fecho-engate-rapido-presso-case-caixa-6cm-fae1-inox/p/MLB24649086#polycard_client=search-nordic&searchVariation=MLB24649086&wid=MLB4230051498&position=11&search_layout=stack&type=product&tracking_id=2887dbbd-4276-42f6
30. MOREIRA, J. R. (2012). *Processos de Transferência de Calor*. São Paulo: ESCOLA POLITÉCNICA DA USP.
31. NEXUS, G. (08 de Abril de 2024). *Gamers Nexus*. Fonte: Gamers Nexus: <https://gamersnexus.net/coolers/arctics-new-28-freezer-36-air-cooler-contact-frame-cpu-cooler-review-benchmarks>
32. NHAMBIU, J. (21 de Fevereiro de 2023). Transmissão de calor. *Transmissão de calor*. Maputo, Maputo, Moçambique: Universidade Eduardo Mondlane.
33. OKS. (Janeiro de 2021). *Contimetra*. Fonte: OKS: https://www.contimetra.com/Conteudos_F/AC/fichas/oks_arcondicionado/ficha_oks_arcond_01_sp.pdf
34. OLIVEIRA, S. D. (2024). *CONDUÇÃO TÉRMICA*. São Paulo: Universidade Estadual Paulista.
35. PALERMO, A. (23 de Março de 2025). *Prudent Reviews*. Fonte: <https://prudentreviews.com/freezer-cooling-time/#Freezer-Cooling-Times-by-Brand-and-Type>

- 36.PCCOMPONENTES. (2025). *pccomponentes*. Fonte: pccomponentes: <https://www.pccomponentes.pt/melhor-pasta-termica-e-como-elegir>
- 37.PERUZZOTTI, F. E. (14 de Maio de 2024). *Jointlab*. Fonte: Jointlab: https://jointlab.com/es/blog/pol-eko/incubadora-refrigerada-con-tecnologia-peltier?srsId=AfmBOopA_b0VU3CAvmHx1C9nPankScsDainuidAThCz8K0fwLtDBxNOS
- 38.REFRITUBOS. (2025). *refritubos*. Fonte: refritubos: <https://www.refritubos.com.br/chapa-de-aluminio-lisa>
- 39.RETONDO, L. (2021). *Construindo Casas*. Fonte: Construindo Casas: <https://construindocasas.com.br/blog/materiais/madeira/>
- 40.RoboBUILDERS. (2025). *RoboBuilders*. Fonte: RoboBuilders: <https://blog.robobuilders.com.br/como-instalar-e-configurar-o-termostato-xh-w3001/>
- 41.ROSA, J. S. (2020). *ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM TÚNEL DE CONGELAMENTO EM UMA EMPRESA DO SETOR*. ResearchGate.
- 42.SIAS, D. B. (2025). *CALOR SENSÍVEL: CALORIMETRIA*. Pelotas: Centro Federal de Educação Tecnológica de Pelotas – CEFET-RS.
- 43.SILVA, K. (2012). *SISTEMA TERMOELÉTRICO APLICADO AO ESTUDO DOS EFEITOS DE CONGELAMENTO E DE PROPRIEDADES TÉRMICAS*. Campinas: UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS.
- 44.SILVA, M. H., De SOUZA, R. T., & SILVA, R. d. (2018). *ESTUDO COMPARATIVO DO COMPRESSOR À VAPOR E DAS PASTILHAS PELTIER*. Umuarama: UNIVERSIDADE PARANAENSE – UNIPAR.
- 45.SILVA, T. P. (2021). *UTILIZAÇÃO DO EFEITO PELTIER PARA RESFRIAMENTO DE AMBIENTES*. Uberlândia: UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA.
- 46.SINDATHERMAL. (30 de Setembro de 2021). *sindathermal*. Fonte: sindathermal: <https://pt.sindathermal.com/info/what-is-thermal-resistance-64786291.html>
- 47.SOUZA, D. D. (2011). *CONDICIONADOR DE AR PARA CABINE DE CAMINHÃO, UTILIZANDO*. Brasília-DF : CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA -UniCEUB .
- 48.STROSKI, P. N. (23 de Junho de 2021). *electricalelibrary*. Fonte: electricalelibrary: <https://www.electricalelibrary.com/2021/06/23/os-efeitos-seebeck-e-peltier/>
- 49.THERMOPEDIA. (02 de Fevereiro de 2011). *THERMOPEDIA*. Fonte: THERMOPEDIA: <https://www.thermopedia.com/content/824/>
- 50.TUBALEQUIPAMENTOS. (2025). *tubalequipamentos*. Fonte: tubalequipamentos: <https://www.tubalequipamentos.com.br/serpentina-de-cobre>
- 51.VÉRAS, J. C. (25 de Junho de 2015). *Análise experimental dos efeitos termoelétricos em geradores termoelétricos*. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba-UFPB. Fonte: WIKIPÉDIA: https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Peltier
- 52.WILLICH, J. (01 de Janeiro de 2025). *Produttivo*. Fonte: Produttivo: <https://www.produttivo.com.br/blog/isolamento-termico/>
- 53.YHAEFFNER. (16 de Setembro de 2016). *Wikipédia*. Fonte: Wikipédia.: https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Esquema_Pastilha_de_Peltier.svg
- 54.ZANIN, C. H. (2023). REFRIGERADOR PORTÁTIL ALIMENTADO POR ENERGIA RENOVÁVEL. *SEMANA ACADÊMICA*, 17.

ANEXOS

Anexo I. Parâmetros principais da célula Peltier TEC1-12740

Parâmetros	Valor	Observações
Modelo	TEC1-12740	Célula termoelétrica utilizada no protótipo.
Dimensões	62× 62× 1,5 mm	----
Tensão nominal	12 V	Alimentação em corrente contínua.
Corrente máxima	40A	Corrente nominal de operação.
Potência térmica máxima	338 W	Potência de refrigeração sob condições ideais de ΔT e corrente máxima.
Material semiconductor:		Telureto de bismuto (Bi_2Te_3)

Anexo II. Especificações dos Materiais usados

Propriedades	Cobre	Alumínio	Poliestireno Expandido – EPS (Isopor)
Tipo de Material	Cobre	Alumínio	Poliestireno expandido
Composição química	Cobre (Cu) $\geq 99,9$ %; Fósforo (P) $\leq 0,03$ %; Impurezas (Ag, S, Fe, Ni, Pb) $\leq 0,05$ %	Alumínio (Al) ≥ 98 %; Silício (Si) 0,2–0,6 %; Ferro (Fe) $\leq 0,7$ %; Cobre (Cu) $\leq 0,1$ %; Manganês (Mn) $\leq 0,1$ %; outros $\leq 0,15$ %	Polímero de estireno (C ₈ H ₈) n ~95–98 %; agente expensor (pentano) 2–5 %; aditivos de estabilização ≤ 1 %
Espessura	0,89 mm	1,5 mm (para as chapas)	40 mm
Densidade	8,96 g/cm ³	2,71 g/cm ³	0,015–0,030 g/cm ³
Condutividade térmica	390 W/m×K	237 W/m×K	0,033–0,040 W/m·K
Ponto de fusão	1 085 °C	660 °C	Amolece ~95 °C; degrada >200 °C
Aplicação no protótipo	Elevada condutividade térmica, essencial para a troca rápida de calor cerveja–água	Boa condutividade e baixo peso, otimizando dissipação e absorção de calor	Baixa condutividade, reduz perdas de frio no reservatório

Anexo III. Parâmetros térmicos e geométricos obtidos para a serpentina

Parâmetros	Valor	Observações
Q_{vol}	$0,000014 \left[\frac{m^3}{s} \right]$	É o caudal volumétrico da cerveja;
\dot{m}	$0,014 \left[\frac{kg}{s} \right]$	É o fluxo mássico da cerveja;
Q_{ret}	$1859 [W]$	É a quantidade de calor a ser retirado da cerveja;
$A_{secção}$	$0,000094 [m^2]$	É a área da secção transversal da serpentina;
v	$0,15 [m/s]$	É a velocidade de entrada de cerveja na serpentina;
$Re^{Cerveja}$	$1684 [-]$	É o número de Reynolds;
f_c	$1,26$	É o factor de correcção para tubos curvados [-];
h_{int}	$252,3 \left[\frac{W}{(m^2 \times ^\circ C)} \right]$	É o coeficiente de convecção interno;
T_{sup}^{extern}	$19,5 [^\circ C]$	É a temperatura média da superfície externa;
$Gr_D^{serp e \acute{a}gua}$	482715	É o número de Grashof entre a serpentina e a água [adimensional];
$Ra_D^{serp e \acute{a}gua}$	6023000	É o número de Rayleigh entre a serpentina e a água [adimensional];
$Nu_u^{serp e \acute{a}gua}$	$31,11$	É o número de Nusselt entre a serpentina e a água [adimensional];
h_{exter}	$1374 \left[\frac{W}{(m^2 \times ^\circ C)} \right]$	Coeficiente de convecção entre água e serpentina
$Gr_l^{\acute{a}gua e cp}$	$372671 [-]$	É o número de Grashof;
$Ra_l^{\acute{a}gua e cp}$	$5029000 [-]$	É o número de Rayleigh;
$Nu_u^{\acute{a}gua e cp}$	$32,25 [-]$	É o número de Nusselt entre a água e a célula Peltier;
$h_{\acute{a}gua}^{cp}$	$291,2 \left[\frac{W}{(m^2 \times ^\circ C)} \right]$	É o Coeficiente de transferência de calor por convecção entre a água e as células Peltier;
ΔT_{ln}	$11,53 [^\circ C];$	É a diferença de temperatura média logarítmica;
$R_{conv,interna}$	$0,0057 \left(\frac{K}{W} \right)$	É a resistência térmica por convecção externa;
$R_{conv,externa}$	$0,00089 \left(\frac{K}{W} \right);$	É a resistência térmica por convecção externa;
R_{total}	$0,0065 \left(\frac{K}{W} \right)$	É a resistência térmica total;

<i>U</i>	201,5 $\left[\frac{W}{(m^2 \times ^\circ C)}\right]$	É o coeficiente global de transferência de calor
<i>A_s</i>	0,76 [m ²]	É a área de troca térmica da serpentina;
<i>d_{médio}</i>	0,012 [m]	É o diâmetro médio da serpentina;
<i>L</i>	20,4 [m]	É o comprimento total da serpentina;
<i>N_{esp}</i>	43,3 [m]	É o número de espiras (usado 44 no projeto);
<i>H_{esp}</i>	0,55 [m]	É a altura da serpentina (usado 0,6 m no projeto);
<i>t_{res}</i>	133,6 [s]	É o tempo de residência da cerveja na serpentina;

Anexo IV. Resultados obtidos para a configuração das Células Peltier

Parâmetros	Valor	Observações
N_{cp}	8	É o número de células Peltier necessárias;
Q_c	233 [W]	É a Quantidade de calor rejeitada no lado quente da célula Peltier;
ΔT	11 [°C]	É a diferença de temperatura entre o lado quente (T_h) e o frio (T_c);
T_h	11 [°C]	É a temperatura do lado quente da célula Peltier;
T_c	0 [°C]	É a temperatura do lado frio da célula Peltier;
V	12 V	É a tensão aplicada à célula;
I	32 A	É a Intensidade de corrente;
P_{in}	384 [W]	É a Potência eléctrica de entrada;
Q_h	620,6 [W]	É a Quantidade de calor rejeitada no lado quente de cada célula Peltier;
COP	0,62 [-]	É o Coeficiente de desempenho da célula Peltier

Anexo V. Parâmetros térmicos e geométricos obtidos para as alhetas (lado frio)

Parâmetros	Valor	Observações
q_s	60614 [W/m ²]	É o fluxo de calor dissipado por uma célula Peltier;
Ra_{alh}^f	557249 [-];	É o número de Rayleigh entre a alheta (lado frio) e a água;
Nu_u^f	5,3 [-];	É o número de Nusselt entre a alheta (lado frio) e a água [adimensional];
h_L^f	633 $\left[\frac{W}{(m^2 \times ^\circ C)}\right]$	É o coeficiente de transferência de calor entre a alheta (lado frio) e a água;
N^f	10 [-];	É o número de alhetas (lado frio);
P^f	0,127 [m];	É o perímetro da secção transversal da alheta (lado frio);
A_c^f	0,00093 [m ²];	É a área da secção transversal da alheta (lado frio);
L_c^f	0,06275 [m];	É o comprimento característico da alheta (lado frio);
m^f	60,65 [m ⁻¹];	É o parâmetro característico da alheta (lado frio);
η_a^f	0,27 [-]	É a eficiência da alheta (lado frio);
A_{conv_1alh}	0,127	É a área de convecção de uma alheta (lado frio) [m ²];
A_{entre_alh}	0,018	É a área entre as alhetas (lado frio) [m ²];
T_H	1,3 [°C]	É a temperatura da alheta na borda superior da placa;
T_b	0,96 [°C]	É a temperatura na base da alheta;

Anexo VI. Parâmetros térmicos e geométricos obtidos para as alhetas (lado quente)

Parâmetros	Valor	Observações
A^{cooler}	0,0064 [m^2];	É a área do <i>cooler</i> ;
v_{ar}	3,27 [m/s];	É a velocidade do ar;
Q_v^{alh}	0,021 [$\frac{m^3}{s}$];	É a vazão volumétrica entre a alheta e o ar;
R_e^q	127590 [-];	É o número de Reynolds entre a alheta (lado quente) e o ar;
N_u^q	7362 [-];	É o número de Nusselt entre a alheta (lado quente) e o ar;
h_{ar}	311,1 [$\frac{W}{(m^2 \times ^\circ C)}$];	É o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a alheta e o ar;
P^q	1,24 [m];	É o perímetro da secção transversal da alheta (lado quente);
A_c^q	0,00124 [m^2];	É a área da seção transversal da alheta (lado quente);
m^q	36,44 [m^{-1}];	É o parâmetro característico da alheta (lado quente);
η_a^q	0,43 [-]	É a eficiência da alheta (lado quente);
N^q	18 [-]	É o número de alhetas (lado quente);
Q_{total}^{quente}	2912 [W]	É o calor dissipado pela alheta (lado quente);

Anexo VII. Resultados dos valores calculados para o tempo de arrefecimento da água

Parâmetros	Valor	Observações
V_{total}	0,022 [m^3]	É o volume total do recipiente;
A_{ser}^{ocup}	0,0001267 [m^2];	É a área ocupada pela serpentina;
V_{serp}	0,0026 [m^3];	É o volume ocupado pela serpentina;
V_f	0,000011 [m^3];	É o volume ocupado pelas alhetas;
$V_{água}$	0,020 [m^3];	É o volume útil da água;
$A_{algheta_fria}$	0,18 [m^2]	É a área total de uma algheta (Lado frio);
A_{base}	0,02914 [m^2];	É a área total entre as lâminas de uma algheta (lado frio);
$V_{algheta}$	0,00011 [m^3];	É o volume total das alghetas (lado frio);
$A_{alghetaT}$	0,18 [m^2];	É a área total das alghetas (lado frio);
$L_c^{algheta}$	0,00061 [m]	É o comprimento característico da algheta (lado frio);
Bi	0,0016 [-]	É o número de Biot para as alghetas'
b	0,0014 [$\frac{1}{s}$]	É a constante de resfriamento;
t_{arref}	1856 [s]	É o número de arrefecimento da água para as alghetas;

Anexo VIII – Especificações do Contactor



DC CONTACTORS

DC Magnetic Contactor

Model	ATO-ASW50	ATO-ASW100	ATO-ASW200	ATO-ASW400
Product Picture				
Dimension	69x34x88 mm	59x40x93 mm	86x46x122 mm	102x85x160 mm
Weight	240 g	420 g	700 g	1350 g
Technical Parameters				
Contact Form	1NO or 1NC	1NO or 1NC	1NO or 1NC	1NO or 1NC or 1C/O
Load Terminal and Center Distance	M6 Male Terminal/21mm	M8 Male Terminal/29mm	M8 Male Terminal/35mm	M10 Male Terminal/39.5mm
Coil Rated Voltage	12V/24V/48V	12V/24V/48V	12V/24V/48V	12V/24V/48V
Contact Circuit Rated Load Current	50 A	100 A	200 A	400 A
Rated Load Voltage	12V~72V DC	12V~72V DC	12V~72V DC	12V~72V DC
Overload Current	≤7 Ie, ≤1s	≤7 Ie, ≤1s	≤7 Ie, ≤1s	≤7 Ie, ≤1s
Coil Power	≤7.0W	≤8.5W	≤12 W	≤15 W
Main Contact Voltage Drop at 100A Load	≤100 mV	≤100 mV	≤100 mV	≤100 mV
The Allowed Range of Coil Voltage Pull-	±20%	±20%	±20%	±20%
In Time (N/O Contacts to Open) Drop-	≤30 ms	≤30 ms	≤30 ms	≤30 ms
Out Time (N/O Contact to Close) Contact	≤20 ms	≤20 ms	≤20 ms	≤20 ms
Opening Max Bounce Period Insulation Resistance	≤5 ms	≤5 ms	≤5 ms	≤5 ms
Resistance	≥50 MΩ	≥50 MΩ	≥50 MΩ	≥50 MΩ
Dielectric Withstanding Voltage	50Hz/60Hz 1500VAC/Min	50Hz/60Hz 1500VAC/Min	50Hz/60Hz 1500VAC/Min	50Hz/60Hz 1500VAC/Min
Operation Duty	Continuous or Intermittent	Continuous or Intermittent	Continuous or Intermittent	Continuous or Intermittent
Electric Life	20000 times	20000 times	20000 times	20000 times
Mechanical Life	300 thousand times	300 thousand times	300 thousand times	300 thousand times
Use of The Environment				
Vibration	2.5G, 5~50 Hz	2.5G, 5~50 Hz	2.5G, 5~50 Hz	2.5G, 5~50 Hz
Environmental Protection	IP 50	IP 50	IP 50	IP 50
Operating Temperature	-25℃~55℃	-25℃~55℃	-25℃~55℃	-25℃~55℃
Operating Humidity	5~95% RH	5~95% RH	5~95% RH	5~95% RH
Mounting Hole Dimension				

Anexo IX – Especificações da Fonte de alimentação

Parâmetro	
Número modelo	SCP-4000W
Potência nominal de saída	4000W
Tensão DC de saída	13.3V 16V 20V 24V 25V 36V 40V 50V 80V 100V 160V 200V
Faixa de corrente de saída	270A 250A 200A 166A 160A 111A 100A 83A 80A 50A 20A 35 ~ 250A

Anexo X – Especificações do Termostato Digital XH-W3001

Parâmetro	
Faixa de operação	-50 °C a 110 °C, com precisão de $\pm 0,1$ °C
Função	Controle de temperatura para refrigeração ou aquecimento
Alimentação	Compatível com 12 V, 24 V ou 220 V
Capacidade de saída	Até 10 A
Dimensões	61 × 45 × 31 mm; design compacto e fácil de instalar

Anexo XI – Especificações do Cooler

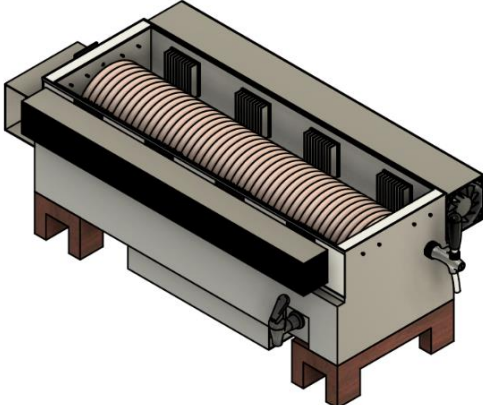
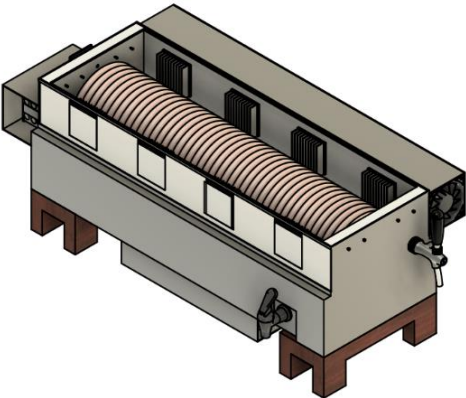
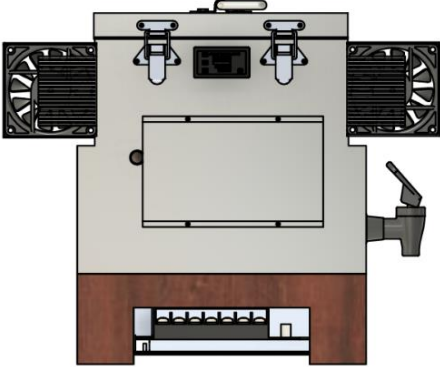
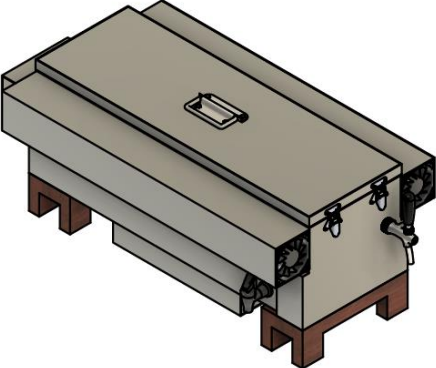


Product Specification Sheet

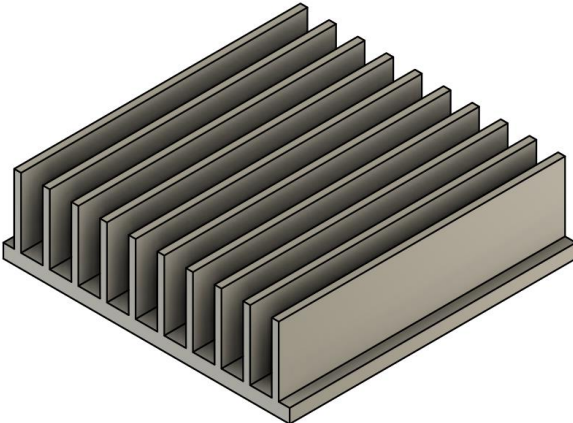
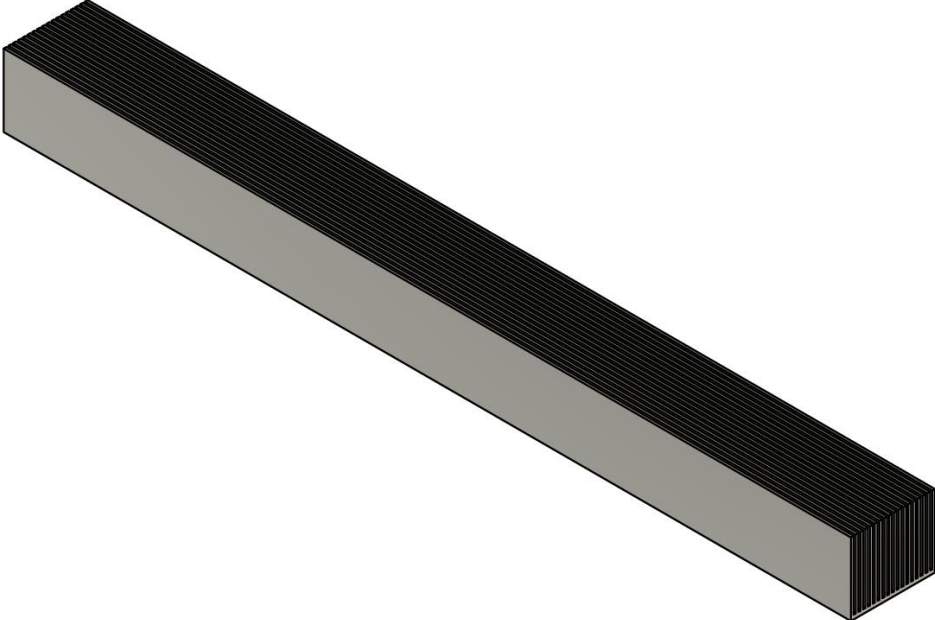
Model No: **CG8025H12-IP67**

Dimensions	80x80x25mm
Bearing System	Dual Ball Bearing
Wire Option	3 Wire with Tachometer, Length - 762mm (30in)
Connector Option	3-Pin 2510 MOLEX (Female Housing/Male Pin)
Rated Voltage	12 VDC
Operating Voltage	4.9 VDC - 13.8 VDC
Rated Operating Current	0.13 Amp running
Rated Speed	3500 ±10% RPM
Air Flow	44.3 CFM
Static Air Pressure	5.54 mmH2O
Noise Level	38 dBA
Motor Protection Type	By Impedance With Polarity Protection
Environmental Protection	IP67
Life Expectance	67,000 Hours at 25°C
Operation Temperature	-10°C to +70°C
Net Weight	66g
Options	Closed Corners

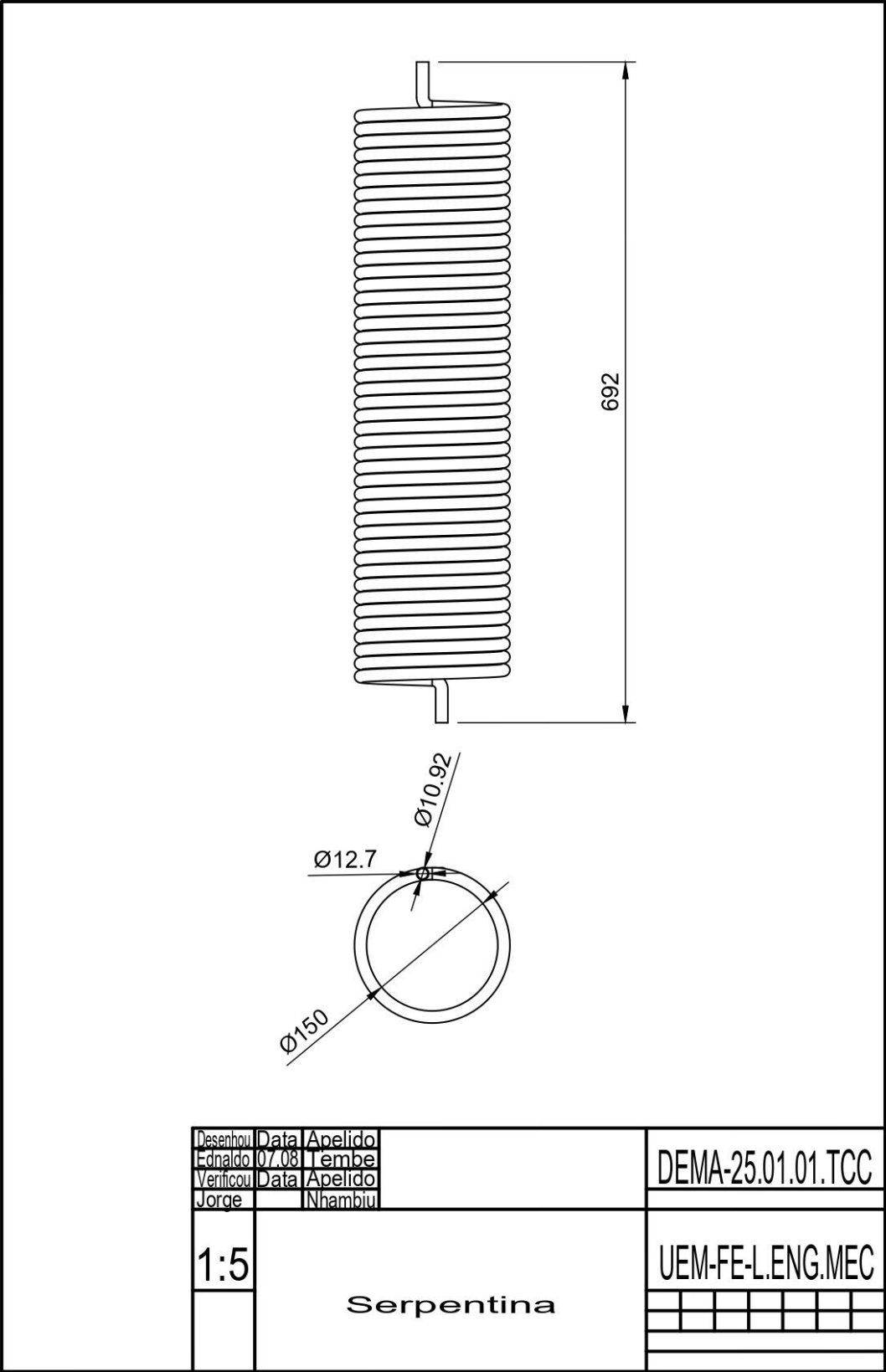
Anexo XII. Ilustração da máquina de arrefecimento utilizando células Peltier



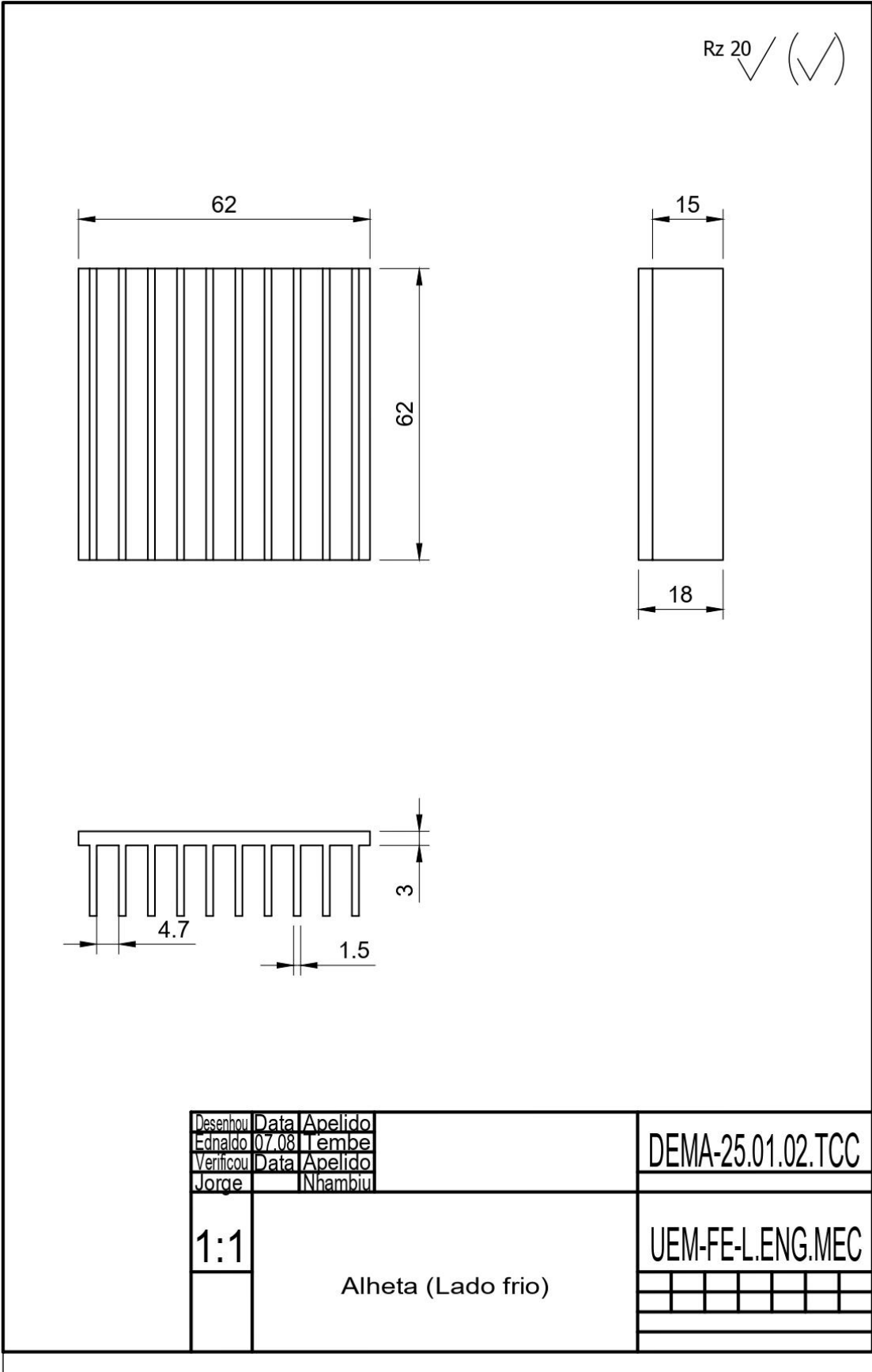
Anexo XIII. Ilustração das alhetas (lado quente) e (lado frio), e da serpentina, respectivamente



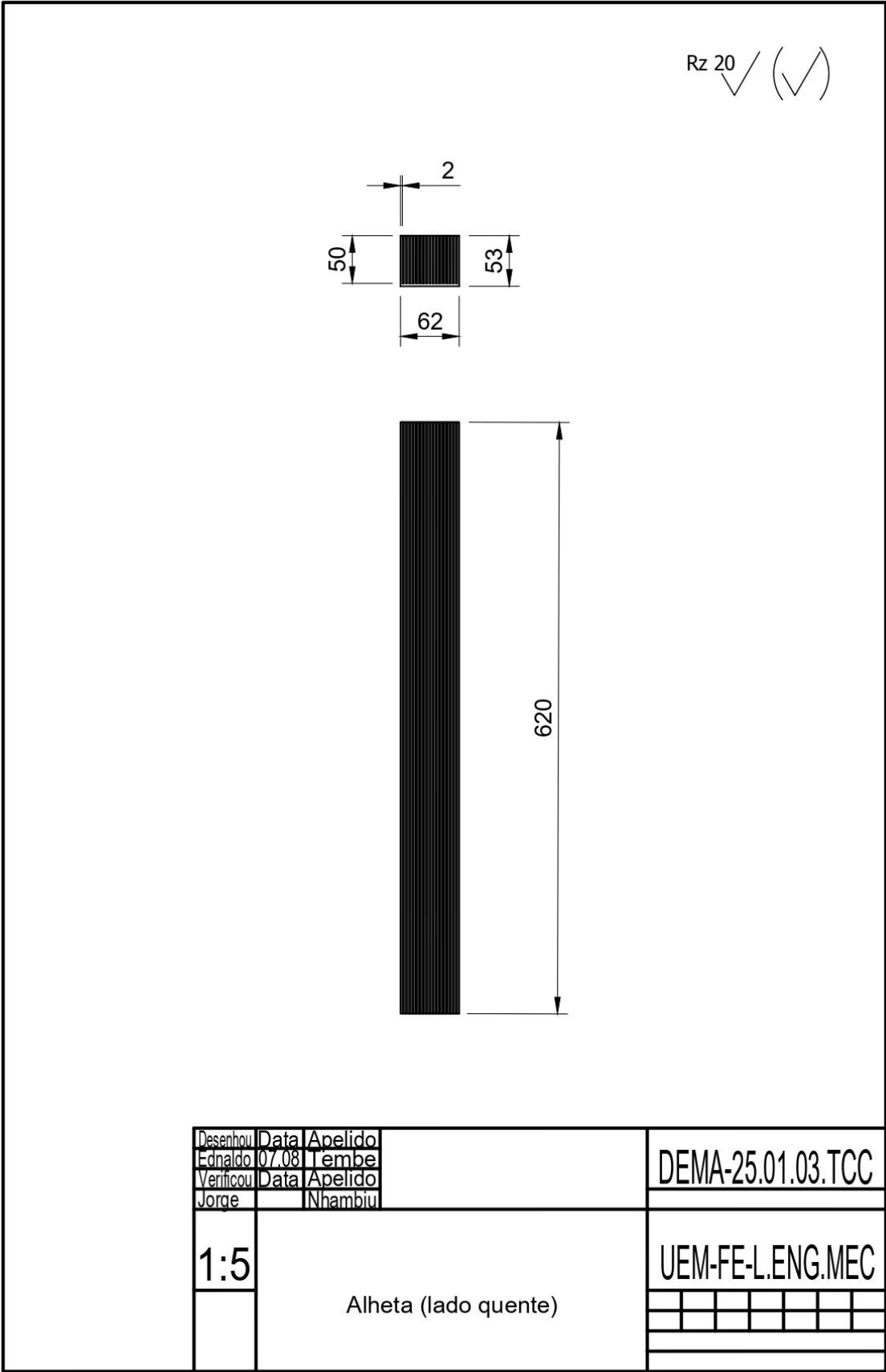
Anexo XIV. Desenho da serpentina



Anexo XV. Desenho da alheta (Lado frio)



Anexo XV. Desenho da alheta (lado quente)



Anexo XV. Desenho da máquina de arrefecimento de cerveja com dimensões de gabarito

