

**INSTITUTO FEDERAL**  
Minas Gerais  
Campus Avançado Arcos

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS  
GERAIS - *CAMPUS* ARCOS  
ENGENHARIA MECÂNICA

Felipe Fernandes Lopes  
João Victor Oliveira Rodrigues  
Leonardo Simões Nascimento

# **Otimização do Refrigerador de Cerveja Aplicando Convecção Forçada**

Arcos-MG

Julho/2019

Felipe Fernandes Lopes  
João Victor Oliveira Rodrigues  
Leonardo Simões Nascimento

## **Otimização do Refrigerador de Cerveja Aplicando Convecção Forçada**

Trabalho Acadêmico Integrador apresentado  
ao Departamento de Engenharia Mecânica do  
*Campus Arcos* do Instituto Federal de Edu-  
cação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais  
(IFMG).

Instituto Federal de Minas Gerais  
Campus Arcos  
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof Dr. Francisco de Sousa Júnior

Arcos-MG  
Julho/2019

# RESUMO

O projeto desenvolvido tem como finalidade aprimorar a eficiência do refrigerador de cerveja construído por Fernandes, Nascimento e Rodrigues (2018), com o intuito de obter uma melhor capacidade frigorífica do ciclo de refrigeração. Para tal, foi feito um estudo da prática de transferência de energia pelo calor através da convecção forçada, onde utilizou-se um dispositivo soprador para promover a troca de calor no tubo capilar. Por meio dos resultados obtidos nos experimentos foi possível verificar que a queda de temperatura das latas de cerveja ocorreu em menor tempo quando utilizado um dispositivo soprador no tubo capilar para promover a troca de calor, viabilizando a aplicação deste dispositivo para melhorar a eficiência do equipamento e fornecer uma maior faixa de temperatura de operação do refrigerador.

**Palavras-chave:** Refrigeração. Transferência de calor. *COP*.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>4</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b>	<b>4</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo geral</b>	<b>4</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1.1	Ciclo de refrigeração por compressão de vapor ideal	5
<b>2.2</b>	<b>Mecanismos de transferência de calor</b>	<b>7</b>
2.2.1	Condução	7
2.2.2	Convecção	7
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>8</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais</b>	<b>8</b>
<b>3.2</b>	<b>Métodos</b>	<b>8</b>
3.2.1	Convecção natural: Capacidade frigorífica	8
3.2.2	Convecção natural: Temperatura de estabilização	10
3.2.3	Convecção forçada	12
3.2.3.1	Coeficiente de transferência de calor	12
3.2.4	Convecção forçada: Capacidade frigorífica	15
3.2.5	Convecção forçada: Temperatura estabilização	16
3.2.6	Parametrização do ciclo	17
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>19</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>22</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>23</b>
	<b>APÊNDICE A – MEMORIAL DESCRITIVO</b>	<b>24</b>
	<b>APÊNDICE B – MANUAL DE UTILIZAÇÃO</b>	<b>27</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O homem sempre busca maneiras de satisfazer suas necessidades e conforto. Desde os antepassados buscava-se maneiras de conservar alimentos e beber água fresca. Os chineses há séculos antes de Cristo usavam gelo natural colhido das superfícies de lagos congelados para conservar seu chá (FERRAZ; GOMES, 2008). No Brasil, em 1856, aproximadamente 1.762 toneladas de gelo natural cortado de lagoas congeladas aos redores de Boston chegavam ao Rio de Janeiro (HEROLD, 2011).

Um dos grandes contribuintes para a Revolução Industrial do século XIX foi a refrigeração artificial. E o crescimento da população e a evolução dos meios de transporte como ferrovias e navios possibilitaram o aumento na demanda do gelo (HEROLD, 2011).

No Rio de Janeiro, em 1887, o imigrante suíço Joseph Villiger fundou a primeira fábrica de gelo junto a primeira cervejaria da cidade que produzia a cerveja Brahma. Já em 1923, as fábricas de gelo haviam se multiplicado por todo Brasil (HEROLD, 2011).

O presente projeto possui como objetivo de estudo a aplicação de dispositivos que otimizem a transferência de calor do refrigerador desenvolvido por Fernandes, Nascimento e Rodrigues (2018), buscando aprimorar a eficiência de refrigeração.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho se justifica tendo em vista a importância dos equipamentos de refrigeração para o conforto humano e a conservação de alimentos e bebidas. Como são sistemas complexos, poucos profissionais visam especializar-se na área de refrigeração. Deste modo, as chances de uma melhoria contínua na eficiência desses equipamentos diminuí. Por essa razão, este projeto busca além do aperfeiçoamento educacional e profissional, melhorias na capacidade frigorífica do equipamento através da utilização de dispositivos que otimizem a transferência de calor.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho objetiva aprimorar a eficiência do refrigerador de cerveja construído por Fernandes, Nascimento e Rodrigues (2018), com o intuito de obter uma melhor capacidade frigorífica do ciclo de refrigeração pelo estudo e compreensão prática da transferência de energia pelo calor.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisão bibliográfica da transferência de energia pelo calor e do escoamento externo em corpos rombudos, para projeção de uma melhor transferência térmica;
- Elaboração e execução de testes experimentais e simulação computacional para obter propriedades em diferentes condições de escoamento;
- Validação do sistema remodelado, verificando sua eficiência em relação ao seu mecanismo de refrigeração;
- Especificação da faixa de operação do refrigerador de acordo com o dispositivo soprador utilizado.

# 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

## 2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

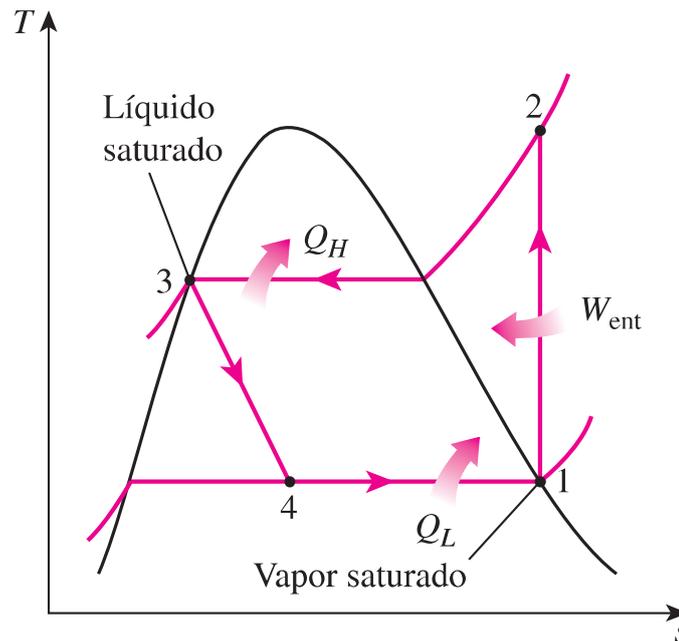
Quando uma xícara de café a alta temperatura é deixada sobre a mesa o café esfria. Isso ocorre devido transferência de energia do café para o ambiente. Por experiência sabe-se que essa transferência sempre ocorre do corpo quente para o corpo frio, e para realizar o processo inverso é necessário o fornecimento de trabalho (ÇENGEL, 2014).

Os dispositivos que realizam a transferência de calor do corpo com baixa temperatura para outro a alta temperatura são os refrigeradores, e seus ciclos de trabalho são denominados ciclos de refrigeração. Dentre esses ciclos os mais conhecidos são o ciclo de refrigeração por compressão de vapor, o ciclo de refrigeração por compressão a gás, refrigeração em cascata, por absorção e refrigeração termoelétrica (BOLES; ÇENGEL, 2013).

### 2.1.1 CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR IDEAL

O ciclo de refrigeração por compressão de vapor é o mais utilizado em sistemas de condicionamento de ar e bombas de calor. Os quatro processos são representados na figura 1 e descritos a seguir.

Figura 1 – Ciclo de refrigeração



Fonte: (BOLES; ÇENGEL, 2013)

- 1-2. Compressão isentrópica: No estado 1 o fluido é comprimido por um compressor, o que eleva sua pressão e conseqüentemente a temperatura. O fluido então sai no estado 2 (entrada do condensador) como vapor superaquecido (MORAN; SHAPIRO; BOETTNER, 2013).
- 2-3. Transferência de calor no condensador: No estado 2 o fluido entra no condensador e realiza uma troca térmica a pressão constante com a vizinhança até chegar ao tubo capilar (estado 3) (MORAN; SHAPIRO; BOETTNER, 2013).
- 3-4. Estrangulamento através de um dispositivo de expansão: No estado 3 o fluido entra no tubo capilar como líquido saturado e é estrangulado até a pressão do evaporador (estado 4), o que causa também uma queda brusca na temperatura do fluido (MORAN; SHAPIRO; BOETTNER, 2013).
- 4-1. Absorção de calor no evaporador: No estado 4 o fluido entra no evaporador como mistura de líquido-vapor, e através do calor absorvido da vizinhança evapora-se completamente. O fluido então retorna ao compressor fechando o ciclo de refrigeração (MORAN; SHAPIRO; BOETTNER, 2013).

O coeficiente de performance ( $COP$ ) que é uma medida da eficiência do ciclo de refrigeração e a capacidade frigorífica ( $Q_L$ ), que corresponde ao calor absorvido no evaporador, são dados pelas equações 1 e 2, respectivamente. Onde  $W_{(liq)}$  é o trabalho

elétrico do compressor,  $\dot{m}$  é a vazão mássica, e  $h_1$  e  $h_4$  são as entalpias de entrada do compressor e entrada do evaporador, respectivamente.

$$COP = \frac{Q_{(L)}}{W_{(liq)}} \quad (1)$$

$$Q_L = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (2)$$

## 2.2 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor é a ciência que estuda as taxas de transferência de energia. Essa transferência pode ocorrer por condução, convecção ou radiação, e seu estudo é de grande importância para a construção dos refrigeradores (ÇENGEL, 2014).

### 2.2.1 CONDUÇÃO

É a transferência de energia de partículas mais energéticas para partículas menos energéticas que as rodeiam, e ela pode ocorrer em líquidos, sólidos ou gases. A taxa da transferência de energia por condução depende da geometria das superfícies em contato, da espessura, do material empregado e também da diferença de temperatura entre as duas superfícies (ÇENGEL, 2014).

### 2.2.2 CONVECÇÃO

É a transferência de energia que ocorre entre uma superfície e um fluido. Pode existir a convecção natural: onde pela variação da temperatura do fluido, as forças de flutuação induzidas pelas diferenças de densidade causam o movimento do fluido, ou a convecção forçada: onde o fluido é forçado a fluir pela superfície por meios externos, como um ventilador, soprador, o vento, etc. Nesse caso, quanto maior for o movimento do fluido sobre a superfície maior será a transferência de calor (ÇENGEL, 2014).

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para verificar a capacidade frigorífica do refrigerador de cerveja no experimento estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 – Materiais

	Descrição	Qtd
1	Termômetro de 5 pontos	1 und
2	Latas de cerveja	12 unds
3	Cronômetro	1 und
4	Refrigerador de cerveja	1 und
5	Dispositivo soprador	1 und

Fonte: Próprios autores

### 3.2 MÉTODOS

Primeiramente foi feita uma pesquisa exploratória com o objetivo de proporcionar maior familiaridade com o assunto em questão, realizando-se um levantamento bibliográfico e análise de exemplos. Estudos de casos foram feitos para coletar dados acerca dos mecanismos que otimizam a transferência de calor do refrigerador. Desse modo, com o objetivo de facilitar e organizar o desenvolvimento destas atividades, a metodologia empregada na montagem desse projeto foi dividida em duas etapas:

Etapa 1: Elaboração das etapas dos testes utilizados para promover a troca de calor e aquisição das peças e equipamentos necessários para a realizar os experimentos laboratoriais.

Etapa 2: Com as peças necessárias adquiridas, foram executados testes experimentais e simulação computacional para obter propriedades em diferentes condições de escoamento, que serviram de base para relacionar a temperatura ambiente com a velocidade do escoamento externo.

#### 3.2.1 CONVECÇÃO NATURAL: CAPACIDADE FRIGORÍFICA

Foi verificado que a capacidade frigorífica calculada no projeto anterior estava incorreta, pois seu valor foi superior ao caso ideal (Tabela 2). Como isso seria uma violação da segunda lei da termodinâmica, foram realizados novos testes nos 4 pontos do refrigerador (Figura 2) (ponto 1: entrada do compressor; ponto 2: saída do compressor; ponto 3: entrada

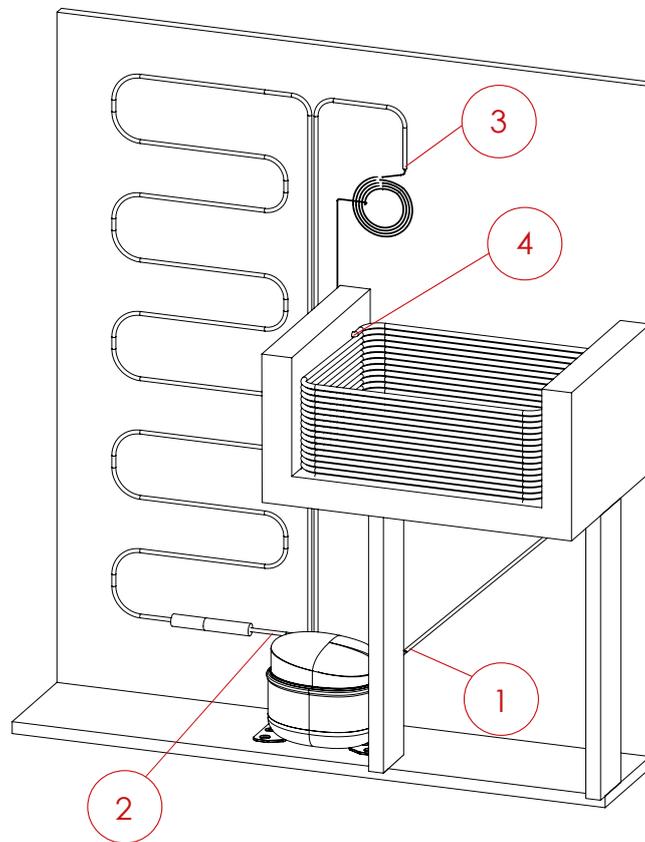
do tubo capilar; ponto 4: entrada do evaporador) utilizando um termômetro de cinco pontos.

Tabela 2 – Dados do projeto anterior

Capacidade frigorífica ideal	Capacidade frigorífica real
$Q_L = 550,60 \text{ W}$	$Q_L = 554,35 \text{ W}$

Fonte: Fernandes, Nascimento e Rodrigues (2018)

Figura 2 – Representação esquemática do refrigerador



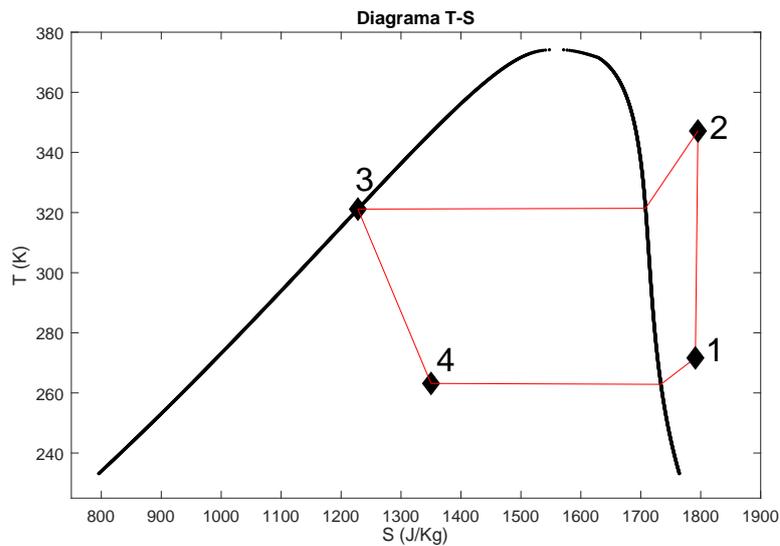
Fonte: Próprios Autores

Aferido as temperaturas, foi confeccionado o diagrama T-S do refrigerador de cerveja através do *software CoolProp* (Figura 3), onde a capacidade frigorífica e o coeficiente de performance foram obtidos pelas equações 1 e 2, respectivamente.

$$Q_L = 495 \text{ W}$$

$$COP = 2,17$$

Figura 3 – Diagrama T-S para convecção natural



Fonte: Próprios Autores

### 3.2.2 CONVECÇÃO NATURAL: TEMPERATURA DE ESTABILIZAÇÃO

Foi realizado outro experimento utilizando o termômetro de cinco pontos, agora para medir a variação da temperatura das latas de cerveja dentro da caixa térmica durante um período de tempo de 4 horas (Figura 4). Para realizar o teste, foram inseridas doze latas de cerveja no interior da caixa térmica, priorizando o contato das mesmas com a tubulação de cobre do evaporador. Os cinco pontos do termômetro foram colocados em contato com as latas e a caixa térmica foi fechada. Feito isso, mediu-se as temperaturas em intervalos de 15 minutos durante um período de 4 horas, onde as temperaturas obtidas foram plotadas no gráfico (Figura 5).

Figura 4 – Experimento com as latas de cerveja



Fonte: Próprios Autores

Através deste experimento foi notado que as temperaturas apresentaram um comportamento assintótico, aproximado ao de uma função exponencial, ou seja, com o passar do tempo as temperaturas das latas tendem a se estabilizar em um valor de temperatura. Visto isso, foi desenvolvida uma equação diferencial que prevê a temperatura de estabilização das latas de cerveja.

A taxa de variação da temperatura em função do tempo é dada pela equação diferencial de primeira ordem baseada na lei de resfriamento de Newton:

$$\frac{dT}{dt} = \lambda(T_0 - T) - C_r \quad (3)$$

Onde  $C_r$  é a constante térmica de resfriamento,  $\lambda$  é a constante térmica de aquecimento,  $T$  é a temperatura da cerveja, e  $T_0$  é a temperatura ambiente. Desenvolvendo a equação obtém-se;

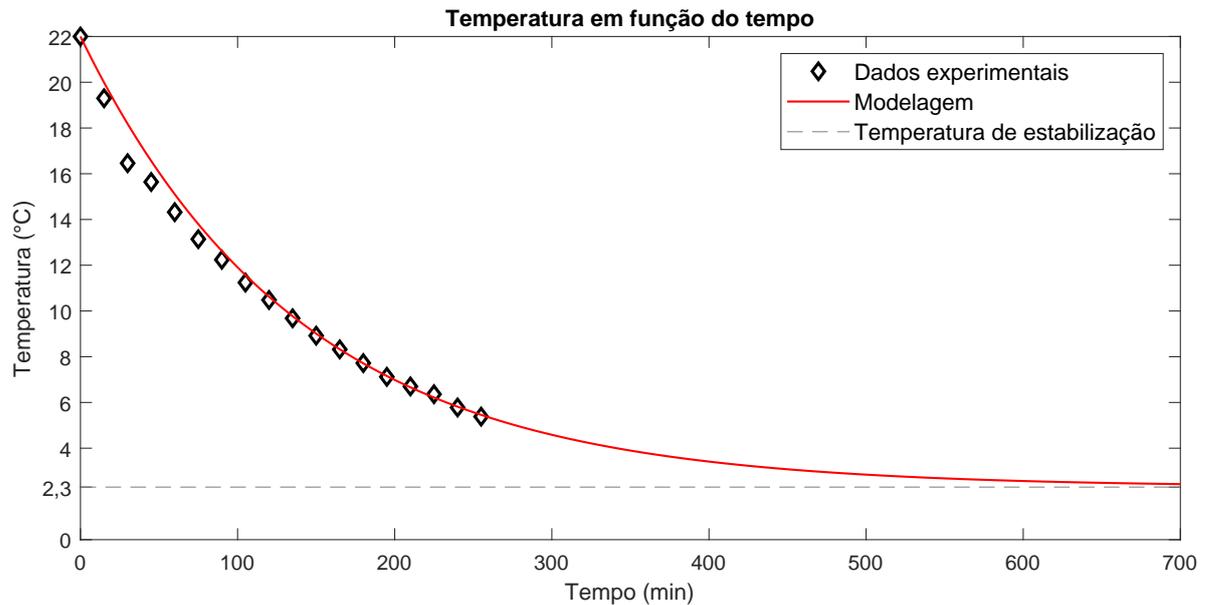
$$T = (T_0 - \frac{C_r}{\lambda}) + (\cancel{T} + \frac{C_r}{\lambda} - \cancel{T_0}) \cdot e^{-\lambda t} \quad (4)$$

Com base nas temperaturas medidas foram obtidos os valores das constantes  $\lambda = 0,00718$  e  $C_r = 0,14145$ , conforme a metodologia utilizada por Fernandes e Nascimento (2018). Dessa forma substituindo os valores de  $\lambda$  e  $C_r$  na equação 4, a temperatura em função do tempo é dada pela equação 5:

$$T(t) = 2,3 + 19,7 \cdot e^{-0.0072 \cdot t} \quad (5)$$

Com o uso das temperaturas medidas (representados pelos pontos no gráfico) e com a realização da modelagem, obteve-se o gráfico da temperatura em função do tempo apresentado na Figura 5. Quando o tempo tende à infinito, a exponencial tende à zero e assim a temperatura de estabilização das latas de cerveja se torna aproximadamente 2,3°C. Atingida após cerca de 10 horas.

Figura 5 – Gráfico convecção natural



Fonte: Próprios Autores

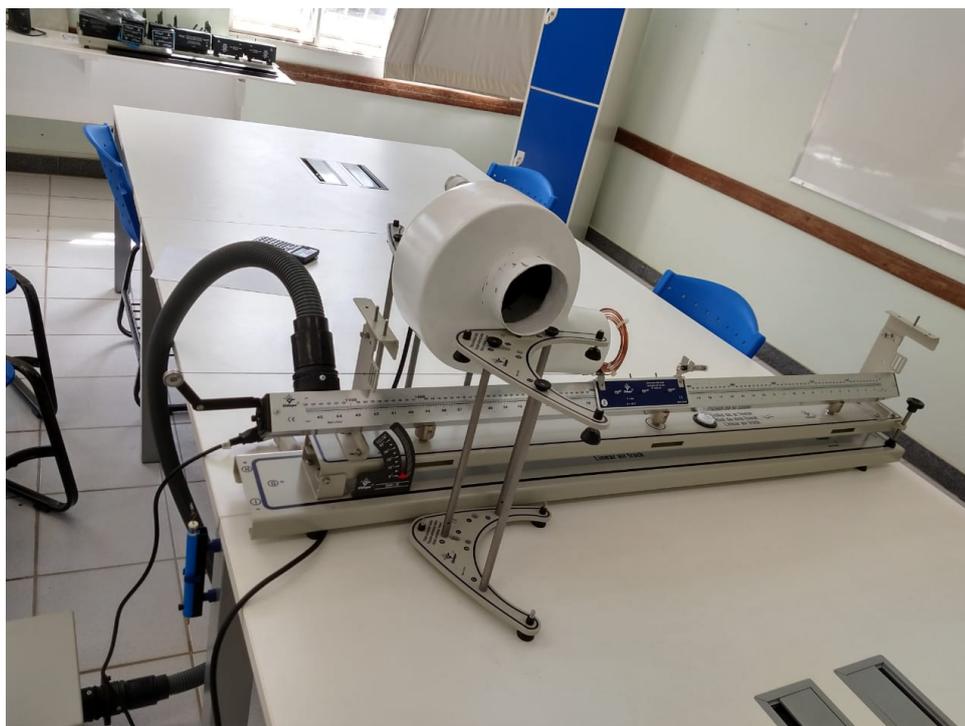
### 3.2.3 CONVECÇÃO FORÇADA

Após a análise da capacidade frigorífica por convecção natural do ciclo de refrigeração, foi acoplado ao tubo capilar do refrigerador um dispositivo que promove a troca de calor forçada, com o intuito de melhorar a eficiência do equipamento. Diante desta conjuntura, para o cálculo da transferência de calor por convecção forçada é preciso calcular propriedades que influenciam diretamente no escoamento externo, como o coeficiente de transferência de calor.

#### 3.2.3.1 COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Devido a geometria do tubo capilar ser de um corpo *rombudo*, o esforço predominante é o arrasto de pressão. Porém, para número de *Reynolds* intermediários, tanto o arrasto de pressão e atrito devem ser considerados (ÇENGEL; CIMBALA, 2015). Assim, foi definido um coeficiente de arrasto total ( $C_d$ ) para a geometria do tubo capilar através da realização de um experimento com um túnel de vento (Figura 6). Os dados obtidos estão dispostos na Tabela 3.

Figura 6 – Experimento túnel de vento



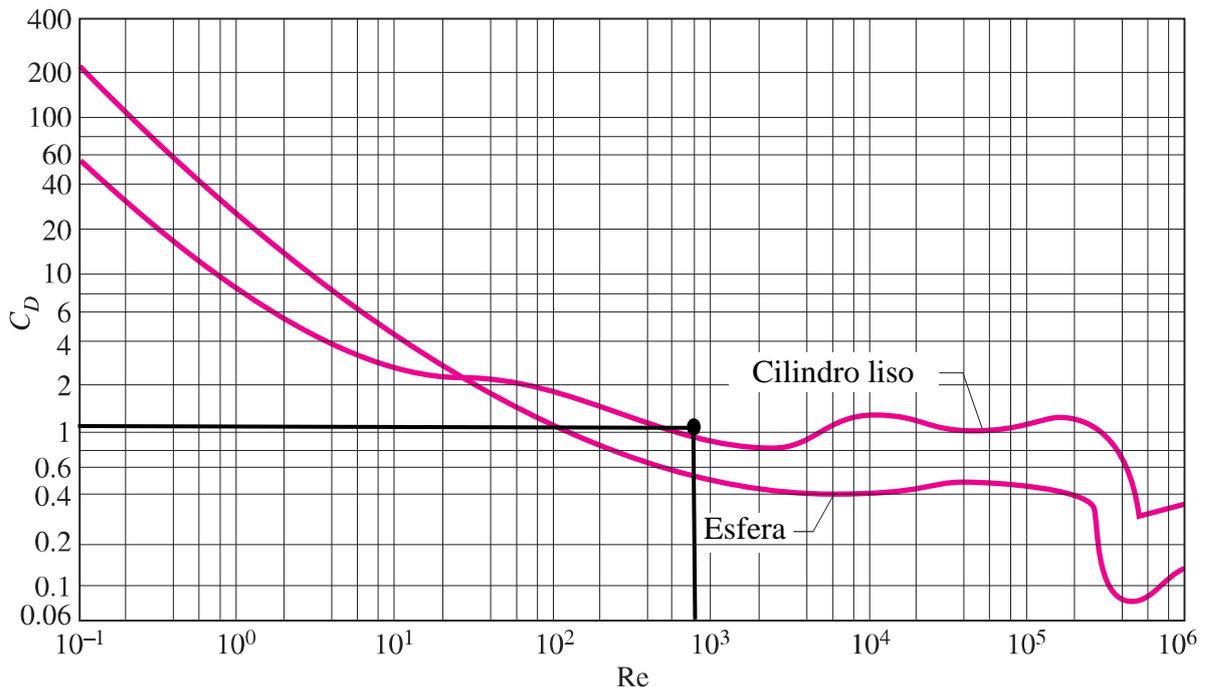
Fonte: Próprios Autores

Tabela 3 – Dados do experimento

	Descrição	Resultado
1	Força de arrasto ( $F_D$ )	0,26 N
2	Velocidade do escoamento externo ( $V$ )	10 m/s
3	Coefficiente de arrasto ( $C_d$ )	1,073
4	Número de <i>Reynolds</i> ( $Re$ )	$1,1022 \times 10^3$
5	Número de <i>Prandtl</i> ( $Pr$ )	0,707

Fonte: Próprios autores

Para o coeficiente de arrasto e o número de *Reynolds* obtidos pelo experimento, verifica-se que o escoamento no tubo capilar se aproxima de um escoamento cruzado sobre cilindros, conforme figura 7.

Figura 7 –  $C_d$  em função do Reynolds

Fonte: Adaptado de Çengel e Cimbala (2015)

Dessa forma, para obter o valor do coeficiente de transferência de calor ( $h$ ), foi utilizado o número de *Nusselt* para escoamento cruzado sobre cilindros (Equação 6) (ÇENGEL, 2014). Onde  $D$  é o diâmetro da tubulação e  $k$  a condutividade térmica do ar.

$$Nu = \frac{hD}{k} = 0,3 + \frac{0,62Re^{\frac{1}{2}}Pr^{\frac{1}{3}}}{[1 + (0,4/Pr)^{\frac{2}{3}}]^{\frac{1}{4}}} \left[ 1 + \left( \frac{Re}{282000} \right)^{\frac{4}{5}} \right]^{\frac{4}{5}} \quad (6)$$

Para  $Pr$  e  $Re$  vide tabela 3, o número de *Nusselt* é:

$$Nu = 16,8$$

E assim, o coeficiente de transferência de calor é:

$$h = 255,15 \text{ W/m}^2\text{k}$$

De acordo com Çengel (2014) o valor de  $h$  calculado está na faixa para coeficientes de transferência de calor com convecção forçada (Figura 8), pois uma incerteza de até 15% nesse coeficiente é considerada aceitável.

Figura 8 – Faixa dos coeficientes de transferência de calor

Tipo de convecção	$h$ , $W/m^2 \cdot ^\circ C$
Convecção livre de gases	2–25
Convecção livre de líquidos	10–1000
Convecção forçada de gases	25–250
Convecção forçada de líquidos	50–20,000
Ebulição e condensação	2500–100,000

Fonte: Adaptado de Incropera, DeWitt e Bergman (2000)

O coeficiente de transferência de calor é utilizado para calcular o calor dissipado ao longo do tubo capilar devido à convecção forçada. Este calor dissipado pode ainda ser utilizado para verificar a diferença de temperaturas entre a superfície externa e interna do tubo capilar (ÇENGEL, 2014). A diferença de temperaturas calculada foi de 0,002 °C, valor considerado desprezível para fim de cálculos. Dessa forma a utilização das temperaturas superficiais não resulta em erros significativos.

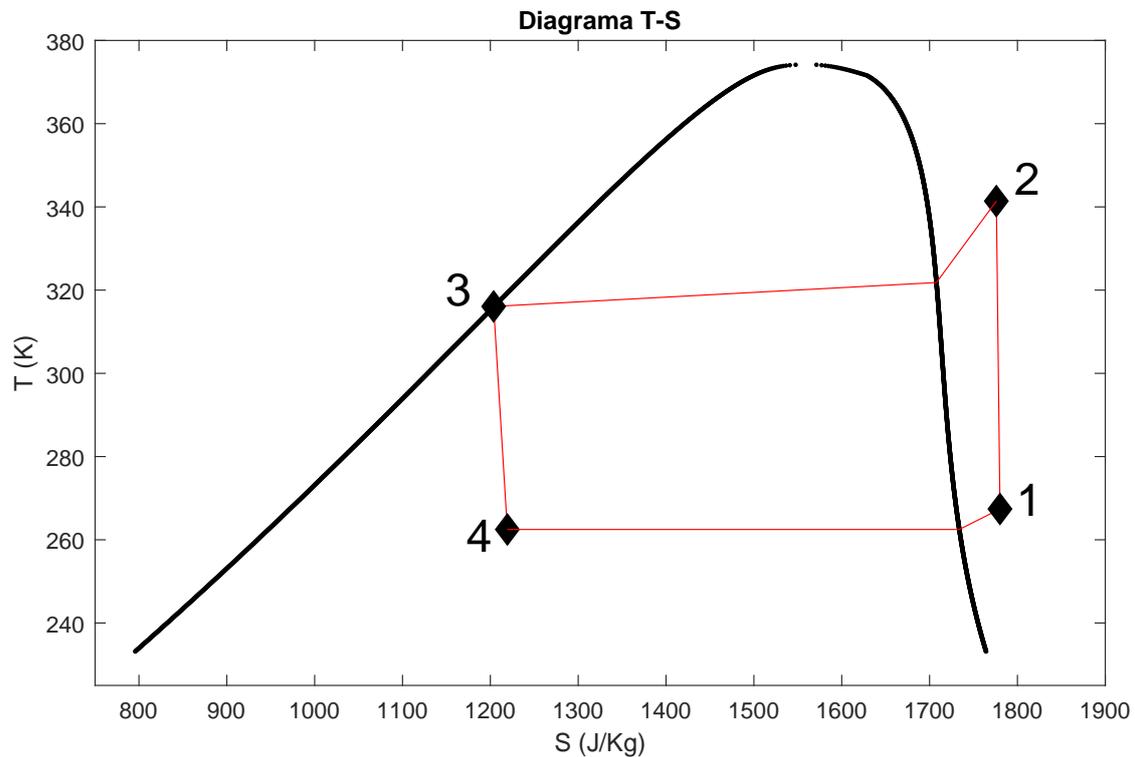
### 3.2.4 CONVECÇÃO FORÇADA: CAPACIDADE FRIGORÍFICA

Utilizando um dispositivo soprador no tubo capilar, foi realizado o mesmo procedimento como na convecção natural de medir as temperaturas nos 4 pontos do refrigerador (Figura 2). E assim, confeccionado o diagrama T-S através do *software CoolProp* (Figura 9), foi calculado a capacidade frigorífica e o *COP* de acordo com as equações 1 e 2, respectivamente.

$$Q_L = 676 \text{ W}$$

$$COP = 2,55$$

Figura 9 – Diagrama T-S com Convecção Forçada



Fonte: Próprios Autores

### 3.2.5 CONVECÇÃO FORÇADA: TEMPERATURA ESTABILIZAÇÃO

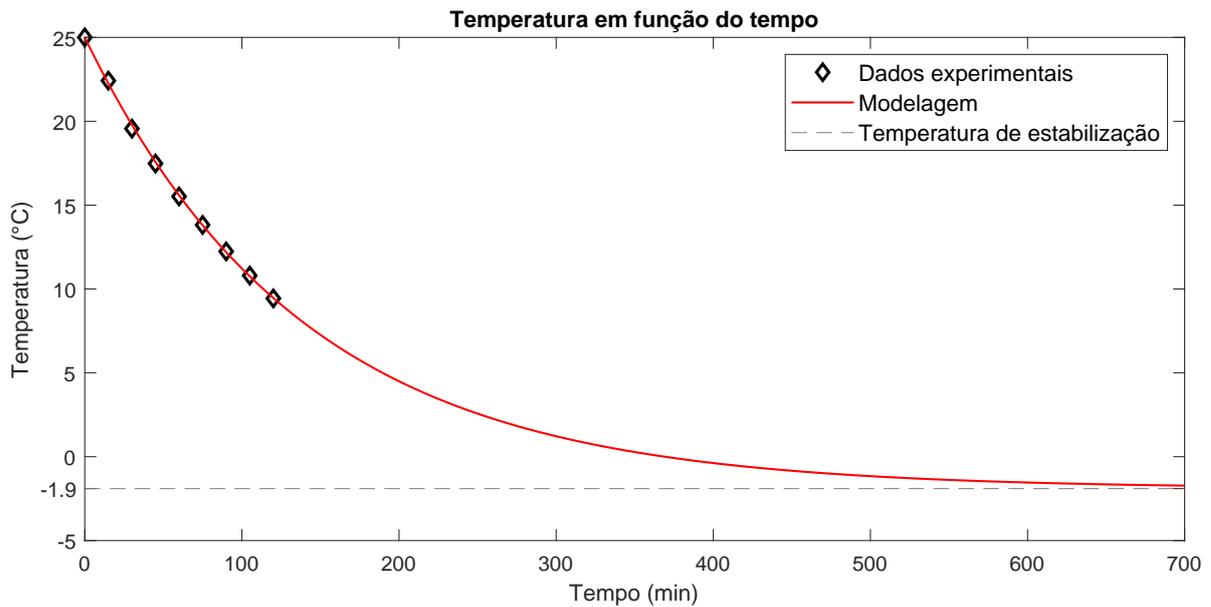
Analogamente para convecção natural, foi realizado o mesmo experimento de medir as temperaturas das latas de cerveja dentro da caixa térmica. Porém, com o dispositivo soprador atuando no tubo capilar.

Através da equação diferencial desenvolvida anteriormente (Equação 4), e dos dados coletados com o experimento, de forma análoga, foi obtido o valor da constante de resfriamento  $C_r = 0,19314$ . Já a constante de aquecimento se mantém, e dessa forma, a temperatura em função do tempo é dada pela equação 7.

$$T(t) = -1,9 + 26,9 \cdot e^{-0.0072 \cdot t} \quad (7)$$

Os dados coletados (representados pelos pontos no gráfico) e a modelagem são apresentados na figura 10. Onde a temperatura de estabilização das latas de cerveja após 10 horas de operação é de aproximadamente  $-1,9 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Figura 10 – Gráfico com Convecção Forçada



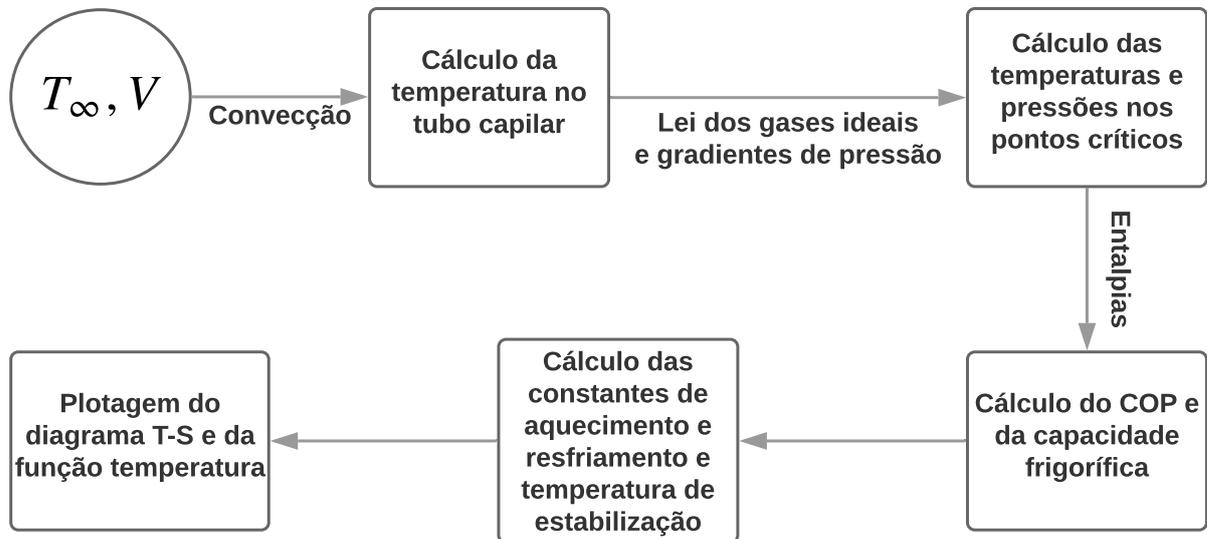
Fonte: Próprios Autores

### 3.2.6 PARAMETRIZAÇÃO DO CICLO

Com base nos dados coletados de temperaturas nos pontos críticos do sistema (Figura 2), foi possível verificar que independentemente das alterações de temperatura e pressão nos pontos, o gradiente de pressão promovido em cada componente do sistema, considerando as perdas de carga, se mantém aproximadamente constante. Tratando o fluido refrigerante como gás ideal, a densidade em cada ponto também se mantém aproximadamente constante, fornecendo uma relação entre a temperatura e a pressão em cada ponto.

A partir disso foi possível elaborar um algoritmo de simulação, que com base apenas na velocidade do escoamento de convecção forçada e na temperatura ambiente, fornece a capacidade frigorífica, a temperatura de estabilização, dentre outros parâmetros do ciclo. A lógica do algoritmo de simulação que fornece os parâmetros do ciclo está segumentada na Figura 11.

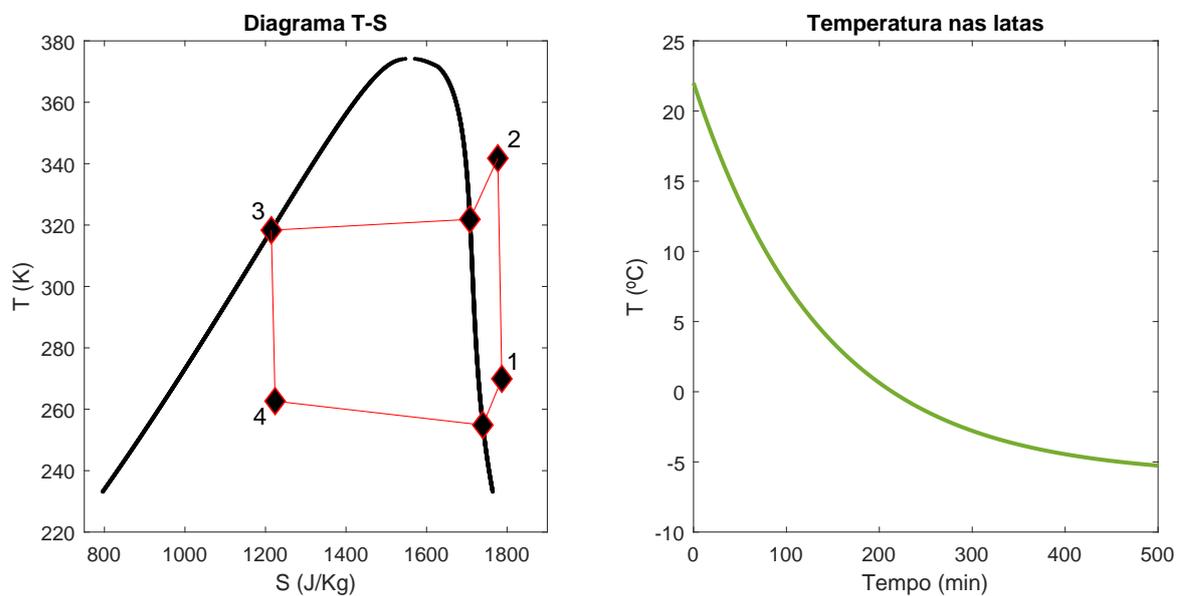
Figura 11 – Processo de simulação



Fonte: Próprios Autores

Os resultados da simulação para uma velocidade de 5 m/s e uma temperatura ambiente de 22 °C são apresentados na figura 12 e pela tabela 4 .

Figura 12 – Simulação



Fonte: Próprios Autores

Tabela 4 – Resultados

Coeficiente de transferência de calor ( $h$ )	180,3 $W/m^2$
Capacidade frigorífica ( $Q_L$ )	664,6 $W$
Temperatura de estabilização	-5,04 $^{\circ}C$
Coeficiente de performance ( $COP$ )	2,85

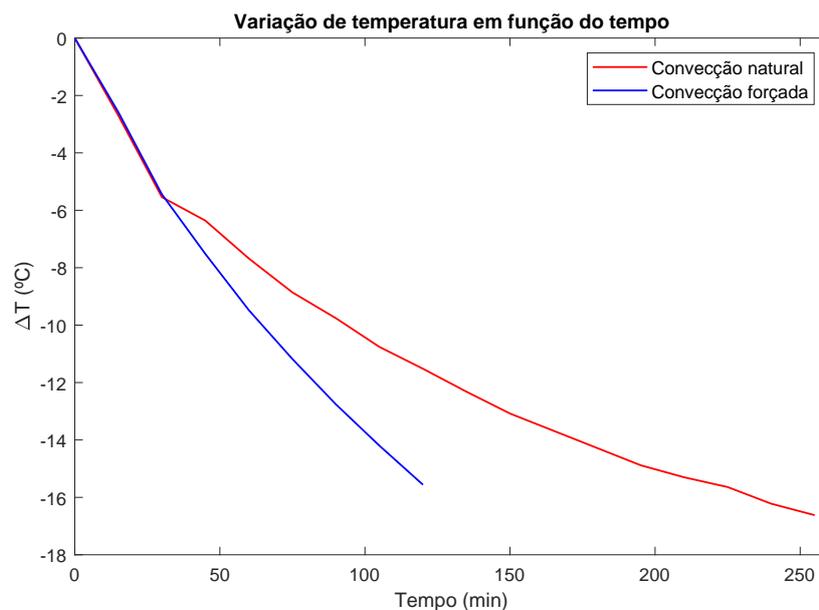
Fonte: Próprios autores

Esta parametrização também é utilizada para determinar a velocidade de escoamento por convecção forçada, necessária para obter uma temperatura específica de estabilização das latas de cervejas no interior da caixa térmica, em função da temperatura ambiente.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através dos resultados obtidos nos experimentos foi analisada a variação da temperatura com o tempo para o modo de operação do refrigerador com convecção natural ou com convecção forçada. Verificou-se que a queda de temperatura ocorreu em menor tempo quando utilizado um dispositivo soprador no tubo capilar para promover a troca de calor forçada (Figura 13), o que aumentou a eficiência do equipamento.

Figura 13 – Comparação



Fonte: Próprios Autores

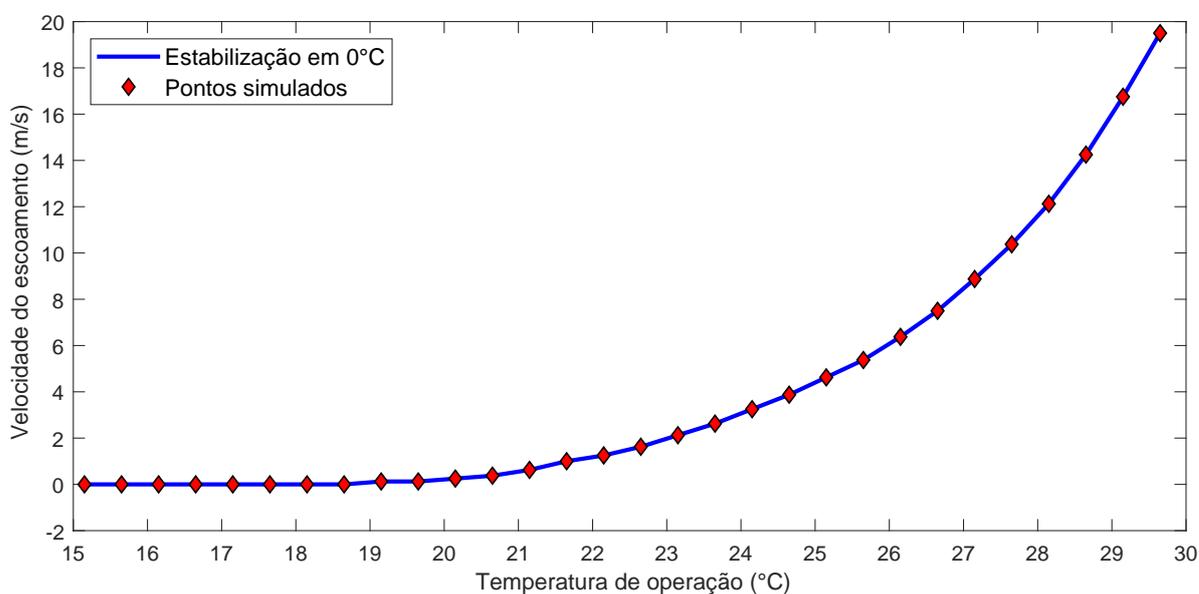
Foram realizadas várias simulações variando a temperatura ambiente e velocidade

do dispositivo soprador, obtendo uma curva de temperatura de estabilização das latas de cerveja em  $0^{\circ}\text{C}$  (Figura 14).

Para uma temperatura ambiente abaixo de  $19^{\circ}\text{C}$  a cerveja no interior da caixa térmica é mantida abaixo de  $0^{\circ}\text{C}$  mesmo sem convecção forçada (Figura 14).

Para uma velocidade de convecção forçada de  $10\text{m/s}$  (velocidade do soprador utilizado no experimento), a temperatura de estabilização da cerveja no interior da caixa térmica é mantida abaixo de  $0^{\circ}\text{C}$  desde que, a temperatura ambiente se mantenha abaixo de  $27,5^{\circ}\text{C}$  (Figura 14).

Figura 14 – Convecção forçada em função da temperatura ambiente



Fonte: Próprios Autores

Com base na figura 14 é possível especificar a faixa de temperatura de operação do equipamento para uma dada velocidade. Tornando possível obter qual a potência que o dispositivo soprador deve possuir para determinada faixa de trabalho do refrigerador.

No projeto em questão, a potência consumida para promover a convecção forçada foi de  $37\text{W}$ , o que representou um aumento de  $16\%$  ( $R\$26,64$  ao mês) no custo total do consumo de energia elétrica do equipamento. Além disso, houve um aumento de  $42\%$  na faixa de operação do sistema, já que com o dispositivo soprador a temperatura ambiente para manter as latas de cerveja a  $0^{\circ}\text{C}$  deve estar abaixo de  $27,5^{\circ}\text{C}$ . E sem o dispositivo soprador a temperatura ambiente deve estar abaixo de  $19^{\circ}\text{C}$ .

Esse aumento na faixa de operação do equipamento também é identificado pelo aumento de  $17,5\%$  no  $COP$  (Tabela 5). Porém, vale ressaltar que o refrigerador construído não teve seu desempenho comparado com outros refrigeradores comerciais devido ao fato de sua aplicação ser estritamente didática, o que torna seu  $COP$  baixo quando comparado

ao  $COP$  de um refrigerador comercial.

Na tabela 5 é apresentado os valores da capacidade frigorífica ( $Q_L$ ) e do coeficiente de performance ( $COP$ ) nos dois cenários, convecção natural e forçada. Observa-se que através da convecção forçada, houve um aumento de 36,5 % na capacidade frigorífica ( $Q_L$ ) do equipamento e 17,5 % no coeficiente de performance ( $COP$ ).

Tabela 5 – Comparação dos resultados

Convecção natural	Convecção forçada
$Q_L = 495 W$	$Q_L = 676 W$
$COP = 2,17$	$COP = 2,55$

Fonte: Próprios autores

A partir dos componentes utilizados e especificados, ao final do projeto foram elaborados o mermorial descritivo e o manual de utilização do equipamento (Apêndices A e B).

Os dados obtidos pelos experimentos podem variar caso sejam utilizados outros tubos capilares, pois não têm-se garantias que durante o processo de fabricação, todos os tubos desenvolvam propriedades iguais, como a rugosidade por exemplo, que tem grande influência no escoamento interno e externo (CHIAVERINI, 1986). Diante disso, existe a importância de controlar o processo produtivo (trefilação) através da realização de ensaios de fabricação, como o de dobramento, e assim, garantir uma menor dispersão nos dados quando alterado o tubo capilar do refrigerador.

## 5 CONCLUSÃO

O projeto desenvolvido teve como finalidade melhorar a eficiência do refrigerador de cerveja construído por Fernandes, Nascimento e Rodrigues (2018), através da adição de um dispositivo soprador que promove a convecção forçada.

Diante da conjuntura retratada neste projeto, verifica-se a importância de estudos de transferência de calor por convecção forçada, com intuito melhorar a eficiência de diversos tipos de equipamentos da área térmica.

Desta forma, o projeto atendeu aos objetivos propostos, especificando uma faixa de temperatura de trabalho para um dispositivo soprador com velocidade de  $10 \text{ m/s}$ . O que proporcionou um aumento de 42% na faixa de operação do equipamento, de modo que a cerveja seja mantida abaixo da temperatura especificada de  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

A capacidade frigorífica ( $Q_L$ ) e o coeficiente de performance ( $COP$ ) também tiveram um acréscimo de 36,5 % e 17,5 % respectivamente, com um custo adicional de R\$ 26,64 ao mês.

# REFERÊNCIAS

BOLES, M.; ÇENGEL, Y. Termodinâmica. 7<sup>a</sup> edição. *São Paulo: AMGH Editora*, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.

ÇENGEL, Y. *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*. [S.l.]: McGraw-Hill Higher Education, 2014. v. 4. Citado 4 vezes nas páginas 5, 7, 14 e 15.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Mecânica dos fluidos*. [S.l.]: AMGH Editora, 2015. v. 3. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 14.

CHIAVERINI, V. Processos de fabricação e tratamento. *vol. II*, 1986. Citado na página 21.

FERNANDES, F.; NASCIMENTO, L. *Trabalho Acadêmico Integrador IV: Máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa*. Arcos - Minas Gerais, 2018. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/1RDKBAfhduRdzeVCO14f84R4hTwH2W0qk/view?usp=sharing>>. Citado na página 11.

FERNANDES, F.; NASCIMENTO, L.; RODRIGUES, J. *Trabalho Acadêmico Integrador V: Refrigerador de cerveja*. Arcos - Minas Gerais, 2018. Disponível em: <[https://drive.google.com/file/d/1QUJ3bkHHvTa0I98Fso7Xjfi\\_-niJaImo/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1QUJ3bkHHvTa0I98Fso7Xjfi_-niJaImo/view?usp=sharing)>. Citado 4 vezes nas páginas 2, 4, 9 e 22.

FERRAZ, F.; GOMES, M. O histórico da refrigeração, fluidos refrigerantes, ozônio/processo de formação/destruição, sistemas de refrigeração, componentes se um sistema de refrigeração. *CEFET-BA, Santo Amaro*, 2008. Citado na página 4.

HEROLD, M. W. Gelo nos trópicos: a exportação de “blocos de cristais da frieza ianque” para índia e brasil. *Revista Espaço Acadêmico*, v. 11, n. 126, p. 145–161, 2011. Citado na página 4.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L. *Fundamentos de Transferência de Calor E de Massa*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000. Citado na página 15.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D. *Princípios de termodinâmica para engenharia*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2013. Citado na página 6.

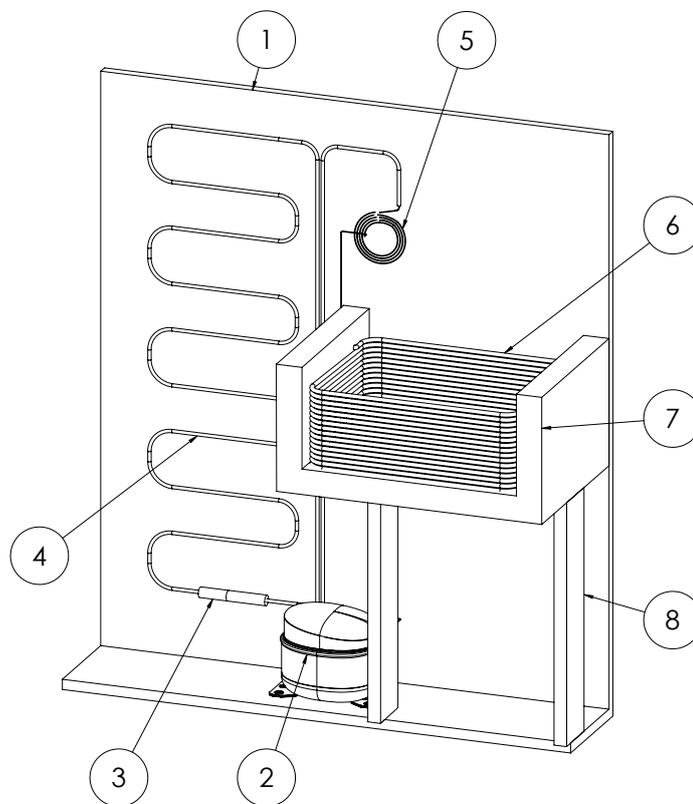
QUALITAS. *Exaustor Centrífugo CQ2T4SC*. 2018. Disponível em: <<https://www.qualitas.ind.br/exaustores-centrifugos/exaustor-centrifugo-cq2t4sc.html>>. Acesso em: 20 de junho de 2019. Citado na página 26.

# APÊNDICE A – MEMORIAL DESCRITIVO

## ESQUEMA DO REFRIGERADOR DE CERVEJA

A Figura 15 representa os componentes do refrigerador construído, e no item 2 está a descrição detalhada de cada componente.

Figura 15 – Esquema do refrigerador



Fonte: Próprios Autores

## PARTES COMPONENTES DA BANCADA - ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA

### 01 - Estrutura:

Estrutura em madeirite com as seguintes dimensões (escala em milímetros):

- Base (Comprimento x Largura x Altura): 820 x 300 x 15;

- Estrutura de apoio da tubulação (Comprimento x Largura x Altura): 820 x 15 x 1000.

A estrutura também possui dois apoios de madeira na parte inferior, e uma ligação parafusada (parafusos de 1/4" x 1/2") entre a base e a estrutura.

### 02 - Compressor:

O compressor de geladeira da marca Embraco foi utilizado para promover a circulação do fluido refrigerante dentro das tubulações. Sua especificação está detalhada na tabela 6.

Tabela 6 – Dados do compressor

Descrição	Detalhes
Voltagem ( $V$ )	120
Amperagem ( $A$ )	1,8
Frequência ( $Hz$ )	60
Diâmetro da tubulação de sucção	5/16"
Diâmetro da tubulação de recalque	1/4"
Fluido refrigerante	$R134 - a$
Proteção térmica	-

Fonte: Próprios autores

### 03 - Filtro de sílica:

Foi utilizado um filtro contendo 13 g de sílica, com a finalidade de reter impurezas e umidade residual, para que a passagem do filtro refrigerante pelo tubo capilar não seja obstruída. A tubulação de sucção e de recalque do filtro tem 5/16" de diâmetro.

### 04 - Condensador:

O condensador tem a função de promover a troca de estado físico do fluido refrigerante de vapor para líquido. Assim, foi utilizado uma tubulação de cobre com 1/4" de diâmetro, 5,5 m de comprimento e uma conformação na estrutura em 10 segmentos, ocupando a área disponível na estrutura de madeira.

### 05 - Tubo capilar:

O tubo capilar é um dispositivo utilizado para reduzir a pressão do fluido refrigerante, ocasionando a queda de temperatura. Foi utilizado um tubo capilar com 3 m de comprimento e diâmetro de 0,036".

### 06 - Evaporador:

O evaporador possui a função de absorver o calor no interior da caixa térmica. Foi utilizado uma tubulação de cobre de 5/16" de diâmetro e 9 m de comprimento. A

tubulação foi conformada em 8 segmentos dentro da caixa térmica, e diretamente em contato com a parede da caixa.

#### **07 - Caixa térmica:**

A caixa térmica é responsável por acomodar as latas de cerveja. Ela foi projetada para acomodar além da tubulação do evaporador, pelo menos 12 latas de cerveja com 350 *ml* cada. O material utilizado foi o isopor, onde as extremidades foram unidas com cola de silicone.

#### **08 - Suporte da caixa térmica:**

O suporte para apoiar a caixa térmica foi construído com as dimensões descritas abaixo:

- Base (Comprimento x Largura x Altura): 480 x 300 x 15;
- Vigas de apoio (Comprimento x Largura x Altura): 50 x 95 x 400.

#### **Dispositivo soprador especificado:**

O dispositivo soprador especificado para manter as latas de cerveja em uma temperatura abaixo de 0 °C em um ambiente com uma temperatura de até 27 °C deve apresentar, no mínimo, 10 *m/s* de velocidade de escoamento, 37 Watts de potência, e diâmetro de saída de 100 *mm*. A figura 16 mostra um modelo do dispositivo soprador que pode ser utilizado para melhorar a eficiência do equipamento.

Figura 16 – Dispositivo soprador



# APÊNDICE B – MANUAL DE UTILIZAÇÃO

A figura 17 apresenta o refrigerador de cerveja construído.

Figura 17 – Refrigerador de cerveja



Fonte: Próprios Autores

## PROCEDIMENTOS INICIAIS

- Verificar a conexão do relê, onde a ligação dos fios devem seguir o modelo na figura 18;

Figura 18 – Ligação relê



Fonte: Próprios Autores

- Se possível, posicionar as latas encostadas na tubulação dentro da caixa térmica para favorecer a troca térmica;
- Certificar que a caixa térmica está fechada (Obs: cuidado ao tampar ou destampar a caixa térmica, pois o tubo capilar está localizado nas proximidades da tampa);
- Observar se há vazamentos no compressor;
- Antes de qualquer teste, assegurar-se de que a unidade esteja corretamente nivelada, evitando assim vibração das tubulações;
- Ligar o refrigerador em uma tomada com tensão de 127 v.

## PROCEDIMENTOS APÓS A INICIALIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO

- Não encostar nas partes do equipamento que ficam expostas (como o compressor, condensador, filtro e tubo capilar), para evitar queimaduras;
- Examinar as conexões da tubulação, certificando-se de que não há vazamentos;
- Para confirmar que o refrigerador está funcionando corretamente, deve-se destampar a caixa térmica e observar se há formação de camada de gelo na tubulação do evaporador;
- Se observado perda de eficiência (as latas demoram mais de 2 horas para gelar), deve ser realizada uma manutenção no refrigerador. Que consiste em: assegurar que não há vazamento nas tubulações, realizar o procedimento de vácuo de todo sistema, e em seguida adicionar o fluido refrigerante novamente ao sistema;
- Após as latas atingirem a temperatura mínima de estabilização e não se desejar mais mantê-las refrigeradas, é realizado o procedimento de desligar o equipamento, descrito abaixo.

## PROCEDIMENTO PARA DESLIGAR O EQUIPAMENTO

- Retirar as latas da caixa térmica;
- Remover o equipamento da tomada;
- Deixar a caixa térmica aberta para evitar a formação de mofo devido a umidade da tubulação.