

<https://www.overleaf.com/project/61f46958aef625cfe6e4b688>

# SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE TRANSMISSÃO DE CALOR EM UM CHILLER

## MEC 1802 – TRANSMISSÃO DE CALOR – T03 (2021.2)

Juliano Fernandes D. T. de Brito,<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Av. Sen. Salgado Filho, 3000  
Lagoa Nova, Natal – RN, 59078-970.

britojuliano99@gmail.com

**Resumo.** *Os ciclos de refrigeração são usados largamente na indústria para o controle de reações químicas, processos alimentícios e na indústria têxtil. Com isso, esse trabalho tem como objetivo o estudo e simulação do resfriamento do mosto cervejeiro através de um chiller de imersão. Foram realizadas simulações numéricas através da linguagem de programação python e utilizando as bibliotecas numpy, matplotlib e pandas. Portanto, foi possível calcular o tempo de resfriamento com diversos parâmetros diferentes, como aumento e diminuição do fluxo de água de resfriamento e diferentes tamanhos de chiller. Assim, foi possível inferir que existe um tamanho limite do chiller e sua influência do fluxo de água no resfriamento.*

**Palavras chaves:** *Ciclo de refrigeração, Chiller de imersão, Python*

### 1. Introdução

O processo de fabricação de cerveja consiste em três etapas: mostura, fervura e fermentação. Primeiramente, é feita a mostura ou sacarificação: mistura-se grãos, malte de cevada, trigo, entre outros ingredientes, em um recipiente com água a temperatura específica (entre 50°C a 70°C) para que ocorra tanto a dissolução dos carboidratos dos grãos na água quanto a quebra dos carboidratos maiores, geralmente amidos em maltose, pelas enzimas presentes nos grãos, gerando o que se chama de mosto cervejeiro.

Após esse processo, é realizada a fervura, que tem como objetivo esterilizar o mosto, volatilizar compostos desagradáveis que passaram para a mistura no processo anterior, diminuição do volume e também a adição do lúpulo. Este, que de acordo com Durello, é uma planta: “rica em resinas (que conferem amargor), polifenóis (com propriedades antioxidantes) e óleos essenciais (que conferem aroma).

A extração dos compostos que conferem amargor, acontece em temperaturas mais elevadas. Já os compostos aromáticos, como os óleos essenciais, não necessitam de temperaturas altas para sua extração, como também são voláteis e vaporizam em temperaturas acima de 70°C. Por causa disso, deve-se resfriar rapidamente o mosto logo ao fim da fervura, para que se atinja os principais objetivos desse processo: pasteurizar o mosto e deixar os níveis de amargor, aroma e sabor de acordo com a receita.

Após, é realizada a fermentação, onde as leveduras inoculadas no mosto transformarão os açúcares presentes em CO<sub>2</sub> e álcool, este também deverá ser feito em temperatura controlada para que o resultado seja o desejado. Assim, o processo cervejeiro é composto de várias etapas que necessitam do controle

de temperatura, tanto para aquecimento quanto para resfriamento, na qual ocorre transferência de calor por condução e por convecção.

No processo de resfriamento do mosto após a fervura podem ser usados vários equipamentos, porém o mais comumente utilizado por cervejeiros caseiros é o chiller de imersão, por ser a maneira mais acessível para esse fim.



**Figura 1. Chiller de imersão**

Por esses motivos esse trabalho tem como objetivo a simulação do resfriamento do mosto cervejeiro utilizando um chiller de imersão utilizando métodos computacionais.

## **2. Metodologia**

### **2.1. Considerações Gerais**

Para a simulação do resfriamento, foi utilizado a linguagem python em conjunto com as bibliotecas numpy, matplotlib e pandas, por sua sintaxe ser simples, além de conseguir trabalhar com matrixes de tamanho elevado.

Para a simulação foi utilizado o método dos volumes finitos para os elementos dentro do chiller, onde foi realizado um balanço de energia para cada elemento, e um balanço de energia para todo o sistema, com interações de 0.1s e cada elemento com  $D_{interno}$  de diâmetro e 0.1 m de comprimento. As simulações foram realizadas para uma panela com 25Kg de mosto e usando os seguintes parâmetros para o resfriamento:

1. Comprimento do Chiller de 10 m com fluxo de água de 0.1 kg/s
2. Comprimento do Chiller de 15 m com fluxo de água de 0.1 kg/s

3. Comprimento do Chiller de 20 m com fluxo de água de 0.1 kg/s
4. Comprimento do Chiller de 25 m com fluxo de água de 0.1 kg/s
5. Comprimento do Chiller de 30 m com fluxo de água de 0.1 kg/s

A transferência de calor foi modelada utilizando as seguintes considerações :

1. Transferência de calor ocorrendo somente devido a ação do chiller.
2. Convecção natural da parte superior do líquido da panela com o ar nula.
3. Não ocorre transferência de calor com a parte externa da panela.
4. Mosto cervejeiro como um líquido quiescente.
5. Sem perda de carga no fluido de resfriamento
6. Condução apenas na direção axial do trocador de calor
7. Convecção interna no interior do chiller
8. Convecção externa entre o líquido da panela e o chiller.

, O chiller foi modelado como um tubo reto de tamanho variável, diâmetro interno de 50 mm, diâmetro externo de mm. O material utilizado foi o alumínio Liga 2024-T6 com as seguintes propriedades:

Propriedades do alumínio a 300K	
Ponto de Fusão (K)	775
$\rho(kg/m^3)$	2770
$C_p(J/(kg \cdot K))$	875
$k(W/(m \cdot K))$	177
$\alpha(m^2/s)$	$73 \cdot 10^6$

Tabela 1:Propriedades do alumínio.

Tanto o líquido de resfriamento quanto o mosto foram modelados com as seguintes propriedades:

Propriedades da água	
$\rho(kg/m^3)$	1000
$C_p(J/(kg \cdot K))$	4180
$k(W/(m \cdot K))$	0.64

Tabela 2:Propriedades da água.

As propriedades, número de Prandtl  $Pr$ , viscosidade  $\mu$ , coeficiente de expansão  $\beta$  variam significativamente na faixa de temperatura do trocador de calor efetuou-se um regressão linear entre a temperatura máxima e temperatura mínima de operação, assim as propriedades foram calculadas conforme as equações abaixo.

$$\mu = (298 + 8 \cdot (T - 300)) \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

$$Pr = 5.83 - 0.05 \cdot (T - 300) \quad (2)$$

$$\beta = (276.1 + 6.77 \cdot (T - 300)) \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

A transferência de calor foi calculada utilizando o método do coeficiente global de transferência de calor. Os coeficientes relativos a condução, convecção interna e externa foram calculadas nas seções posteriores.

## 2.2. Condução de calor

Para a condução de calor no chiller foi utilizada a geometria cilíndrica considerando a condução de temperatura apenas na direção radial e desconsiderando os efeitos da condução na direção axial, devido ao pequeno gradiente de temperatura que ocorre nessa direção.

A partir dos dados da tabela 1 foi calculada a resistência a condução conforme a equação abaixo:

$$R_{conducao} = \frac{\ln(R_{out}/R_{in})}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot k} \quad (4)$$

## 2.3. Convecção interna

A convecção interna foi calculada utilizando as seguintes considerações para o escoamento:

1. Escoamento interno com temperatura de parede constante.
2. secundário devido ao trocador de calor ser um tubo helicoidal desprezível.

O número de Reynolds foi calculado para determinar se o escoamento era turbulento ou laminar, conforme a equação abaixo:

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\mu_{interno} \cdot \pi \cdot D_{interno}} \quad (5)$$

Caso o número de reynolds fosse menor que 10000 o Número de Nursselt, utilizando a consideração de calor na parede do tubo uniforme, foi calculado pela equação abaixo

$$Nu_{interno} = 3.66 \quad (6)$$

Caso o escoamento tivesse reynolds maior que 10000 o número de Nursselt, considerando escoamento interno turbulento com aquecimento pela equação abaixo:

$$Nu_{interno} = 0.023 \cdot Re_{interno}^{4/5} \cdot Pr_{interno}^{0.4} \quad (7)$$

A partir do número de Nursselt, e das características do chiller e do fluido é possível calcular o coeficiente de convecção h por meio da equação abaixo.

$$h = \frac{k \cdot Nu_{interno}}{D_{interno}} \quad (8)$$

## 2.4. Convecção Externa

A convecção externa foi modelada como uma convecção natural, em um cilindro horizontal longo.

Para a convecção externa foi utilizada a hipótese que a temperatura da superfície externa ( $T_s$ ) do Trocador de calor é a media das temperaturas entre o fluido externo, mosto, e o fluido interno, água, pela equação abaixo.

$$T_s = \frac{T_{fluidoexterno} - T_{fluidointerno}}{2} \quad (9)$$

O número de Rayleigh e o número de Nusselt para esse tipo de escoamento foi calculado a partir das equações abaixo.

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_{inf})}{v \cdot \alpha} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} a &= (0.387 \cdot Ra_{out}^{1/6}) \\ b &= (1 + ((0.559/Pr_{out})^{9/16}))^{8/27} \\ Nu_{out} &= (0.6 + a/b)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

O coeficiente de convecção para o escoamento externo foi calculado analogamente a equação 8.

## 2.5. Coeficiente de global de Transferência

A partir dos cálculos tanto dos coeficientes de convecção interno e externo como para a condução é possível calcular um componente global de transferência de calor, por meio da equação abaixo.

$$U_{global} = \frac{1}{\frac{1}{h_{externo}} + \frac{1}{h_{interno} + R_{conducao}}} \quad (12)$$

## 2.6. Balanços de energia

Foi realizado para cada elemento da simulação um balanço de energia, com as seguintes considerações: Parcela da transferência de calor de na direção axial igual a equação a baixo:

$$Q_{Axial} = m \cdot cp \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (13)$$

Considerando que para cada instante de tempo a temperatura da superfície é constante, o fluxo de calor pode ser calculado como:

$$Q_{superficie} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad (14)$$

Onde  $\Delta T_{ml}$  que é a media logaritmica entre temperaturas de entrada do fluido e de saída do fluido e do foi considerada apenas como a média aritmética, por causa que a diferença entre a entrada e a saída de temperatura no elemento ser pequena, dada por:

$$\Delta T_{ml} = \frac{T_{fin} + T_{out}}{2} \quad (15)$$

Assim foi possível calcular o diferencial de temperatura do fluido de resfriamento pela seguinte equação.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{m} \cdot cp \cdot (Q_{Axial} + Q_{superficie})}{\rho \cdot cp \cdot dx \cdot D_{in}^2} \quad (16)$$

Na qual a nova temperatura do elemento para cada interação foi calculada como:

$$T = T + \frac{dT}{dt} \cdot dt \quad (17)$$

Para calcular o diferencial de temperatura do mosto foi realizado um volume de controle sobre o volume de toda a panela. Na qual essa variação de temperatura foi calculada pelas equações abaixo:

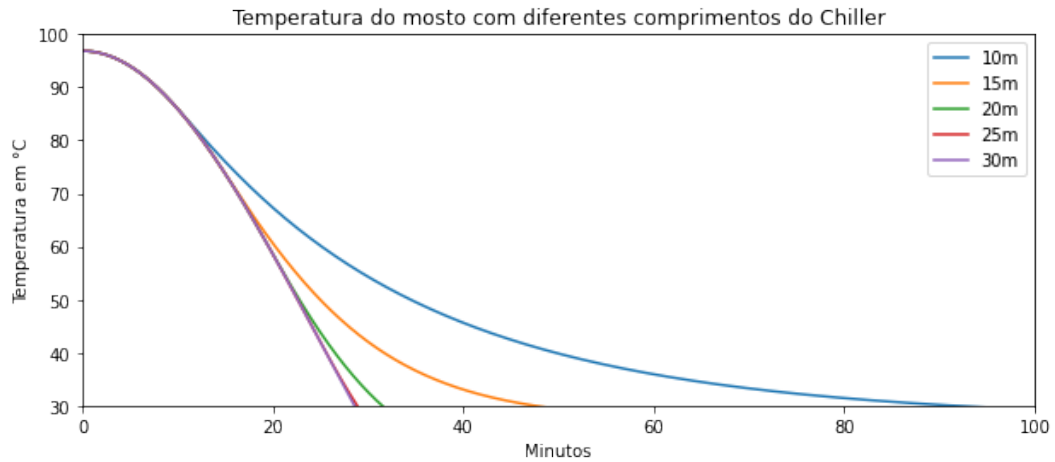
$$Q_{fluido} = T_{fin} - T_{fout} \cdot \dot{m} \quad (18)$$

$$\frac{dT}{dt} = Q_{fluido} / m_{mosto} * cp \quad (19)$$

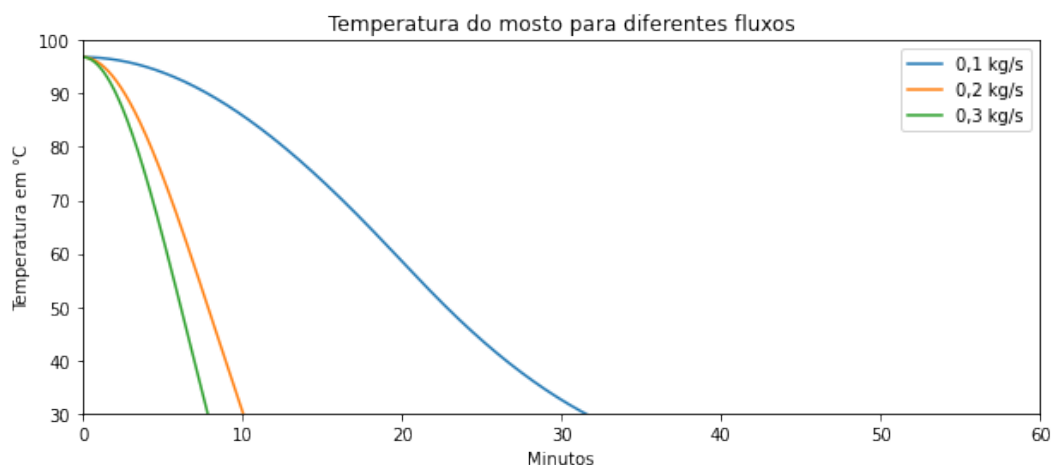
$$T = T + \frac{dT}{dt} \cdot dt \quad (20)$$

### 3. Resultados

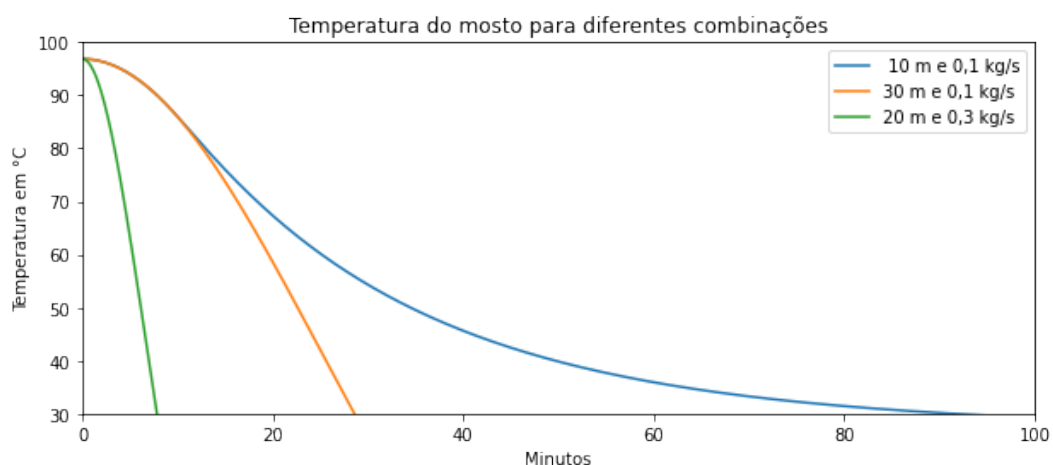
A partir das simulações foi possível prever o tempo de resfriamento para cada uma das situações citadas nas considerações gerais, como é possível ver nas imagens 2 , 3 e 4.



**Figura 2. Temperatura do mosto pelo tempo, para diferentes comprimentos do Chiller**



**Figura 3. Temperatura do mosto pelo tempo, para diferentes fluxos de água de resfriamento e comprimento 20 m**



**Figura 4. Temperatura do mosto pelo tempo para diferentes parametros de simulação.**

Assim foi possível observar que um maior fluxo não altera o tempo para o resfriamento total do mosto, porém tem grande influência para resfriamentos a temperaturas até 40°C.

Também foi possível observar que para um determinado fluxo existe um comprimento máximo para o chiller, como foi possível observar na imagem abaixo.





**Figura 5. Tempo de resfriamento total.**

#### 4. Conclusão

Assim foi possível realizar a simulação da transferência de calor entre o mosto cervejeiro, utilizando a linguagem de programação python simulando um processo dinâmico de transferência de calor. Os resultados foram condizentes com a realidade. Sendo assim esse trabalho cumpriu com seus objetivos de estudar os tipos transferência de calor, como também de simular numericamente um sistema dinâmico. O algoritmo de simulação pode ser utilizados para a outros problemas parecidos, como o resfriamento de fármacos ou outros fluidos que são processados em bateladas e precisam de controle de temperatura.

O algoritmo ainda pode ser melhorado, para que o sistema fique mais próximo da realidade, considerando as seguintes hipóteses como sistema com perda de carga, escoamento secundario devido ao trocador de calor ser helicoidal existente , modelagem da parte da panela, além de uma melhor regressão de maior grau das equações que descrevem as características da água podem melhorar a acurácia das simulações.

## 5. Referências

DURELLO, Renato S. et al. **QUÍMICA DO LÚPULO. Quim. Nova**, [S. l.], v. **42**, n. **No. 8**, p. **900-919**, 11 set. 2021. Disponível em: [http : //static.sites.sbq.org.br/quimicanova.sbq.org.br/pdf/RV20190148.pdf](http://static.sites.sbq.org.br/quimicanova.sbq.org.br/pdf/RV20190148.pdf). Acesso em: 25 jan. 2022.

INCROPERA, F.P., DEWITT, D.P.,

**Fundamentals of Heat and Mass Transfer**, Wiley, 4a. Ed. 1998.

**MATPLOTLIB. Documentação da biblioteca.** Disponível em: [https : //matplotlib.org/api/pyplot\\_summary.html](https://matplotlib.org/api/pyplot_summary.html). Acesso em: 25 de Jan. de 2022.

**NUMPY. Documentação da biblioteca.** Disponível em: [https : //docs.scipy.org/doc](https://docs.scipy.org/doc). Acesso em: 25 de Jan. de 2022.

**PANDAS. Documentação operacional da biblioteca.** Disponível em: [https : //pandas.pydata.org/docs/](https://pandas.pydata.org/docs/). Acesso em: 25 de Jan. de 2022.

PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

**PYTHON SOFTWARE FOUNDATION.** Python Language Site: Documentation, 2020. Página de documentação. Disponível em: [https : //www.python.org/doc/](https://www.python.org/doc/). Acesso em: 25 de Jan. de 2022

**IPYKERNEL. Documentação operacional da biblioteca** [https : //ipython.readthedocs.io/en/stable/install/kernel\\_install.html](https://ipython.readthedocs.io/en/stable/install/kernel_install.html). Acesso em: 25 de Jan. de 2022.