

## **ESTUDO DE UM TROCADOR DE CALOR PARA RESFRIAMENTO DE MOSTO CERVEJEIRO: OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CERVEJA**

CLERICI, Naiara Jacinta<sup>1\*</sup>; LERMEN, Andréia Monique<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Campus Cerro Largo, Rua Jacob Reinaldo Haupenthal, 1.580, Cerro Largo-RS, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis, Cerro Largo, RS, Brasil.

\*Autor Correspondente: [naiaraj.clerici@gmail.com](mailto:naiaraj.clerici@gmail.com)

### **RESUMO**

A fabricação de cerveja artesanal vem ganhando inúmeros adeptos e o meio científico, através da literatura, vem enfatizando trabalhos no sentido de suprir a necessidade deste novo mercado. O resfriamento do mosto muitas vezes torna o processo dispendioso, em relação ao parâmetro tempo, visto que o mosto deve ser resfriado de uma forma que permita certa eficiência ao processo de produção e que não cause custos elevados. Este novo mercado de produção, trata-se de um processo em batelada em pequena escala, diferentemente da cerveja produzida em escala industrial que conta com o respaldo técnico mais afortunado. No presente trabalho é desenvolvido o estudo de um trocador de calor para resfriamento de mosto cervejeiro. Dados utilizadas no decorrer do trabalho: o corpo a ser resfriado (mosto quente) possui volume de 10 litros, já o corpo que subsidiará a troca transiente (trocador de calor), no caso o chiller (serpentina), possui um comprimento de 10 metros, o material deste trocador de calor é o alumínio, seu diâmetro externo de tubo é de 10 milímetros e sua espessura de tubo é de 1 milímetro, o meio de resfriamento entre o mosto e a serpentina será a água, ou seja ela estará dentro da estrutura física do chiller, a vazão desta água é referente ao valor da rede de distribuição, no valor de  $2,2 \times 10^{-4} m^3/s$ . Foi notável a viabilidade de trocadores de calor em

convecção forçada para realizar o resfriamento do mosto cervejeiro, com uma economia de 1580 litros de água.

**Palavras chave:** Economia; Mosto cervejeiro; Otimização; Serpentina; Transferência de calor e massa.

## **STUDY OF A HEAT EXCHANGER TO COOL BEER COOLING: OPTIMIZATION OF THE BEER PRODUCTION PROCESS**

### **ABSTRACT**

The manufacture of craft beer has been gaining numerous followers and the scientific environment, through literature, has been emphasizing work in order to supply the need of this new market. Wort cooling often makes the process costly, in relation to the time parameter, since the wort must be cooled in a way that allows a certain efficiency to the production process and does not cause high costs. This new production market is a small-scale batch process, unlike beer produced on an industrial scale that has the most fortunate technical support. In the present work, the study of a heat exchanger for cooling beer wort is developed. Data used during the work: the body to be cooled (hot must) has a volume of 10 liters, while the body that will subsidize the transient exchange (heat exchanger), in this case the chiller (serpentine), has a length of 10 meters, the material of this heat exchanger is aluminum, its external tube diameter is 10 millimeters and its tube thickness is 1 millimeter, the cooling medium between the wort and the coil will be water, that is, it will be inside the physical structure of the chiller, the flow of this water refers to the value of the distribution network, in the amount of  $2.2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ . The viability of heat exchangers in forced convection to cool the wort was remarkable, with an economy of 1580 liters of water.

**Keywords:** Economy; Brewing must; Optimization; Serpentine; Heat and mass transfer.

## **1 INTRODUÇÃO**

Vivemos em uma sociedade capitalista em constante movimento, no qual os níveis de estresse são intensos, como rota de fuga, as pessoas, costumam desenvolver diferentes modos para sair da rotina, e ter-se então momentos de descanso físico e intelectual, uma boa prática

para tal, é proporcionado, pelo consumo adequado de cerveja, bebida reconhecida mundialmente, e que possui milhares de adeptos, visto suas propriedades, que acabam por desacelerar a rotina de muitos, e que buscam nela, uma sensação de felicidade e bem estar.

Dentro dos vários processos realizados para a fabricação de cerveja, podemos citar, desde a colheita da cevada até a pasteurização, mas o mais importante e delicado é o resfriamento da cerveja, o processo final. Nesta etapa um líquido de cozimento, chamado de mosto, resultado do cozimento e filtração dos cereais que dão origem a cerveja, sofre um tratamento térmico através de sua passagem por um trocador de calor. A pasteurização é um método pelo qual os microrganismos presentes na cerveja são inativados através do calor e garante maior estabilidade ao produto. Essa etapa é realizada elevando-se a temperatura da cerveja a aproximadamente 75°C e a mantendo assim por alguns segundos, antes de resfriá-la (BOTH et al., 2011).

Neste trabalho fica proposto o dimensionamento de um trocador de calor que opere nas condições impostas e que terá a função de provocar um resfriamento da cerveja. Tendo como objetivo principal, verificar o melhor tempo de resfriamento utilizando o equipamento chiller de imersão estático no mosto e sobre agitação (convecção natural e convecção forçada) e, obter o volume de água fria para esse resfriamento para ambos os casos de convecção, como consequência será possível saber qual o tipo de sistema é mais eficaz, e logo que irá demandar de menor volume de água possível para o resfriamento do mosto cervejeiro (ZAGO, 2018).

Processos em batelada são frequentemente usados em operações industriais, visto que o reator onde ocorre o processo é carregado e, após certo tempo de reação, é descarregado, seu frequente uso se dá em operações de pequena escala, como é o caso proposto. Os processos de transferência de calor presentes são tipicamente transientes, envolvendo um líquido com volume fixo que pode ser aquecido ou resfriado.

Em suma, este trabalho apresenta a construção teórica e modelamento matemático de um trocador de calor para realizar o processo de pasteurização para uma cervejaria artesanal. A função desse trocador é resfriar ao máximo uma corrente quente a aproximadamente 100°C,

onde deve ser resfriada até atingir 25°C, utilizando somente água fria a temperatura de 21°C como líquido de arrefecimento. Onde o chiller de resfriamento está estático no mosto e onde este é agitado (convecção natural e convecção forçada), com o objetivo principal, deve-se

responder qual o tempo de resfriamento para os dois casos e qual o volume de água fria utilizada para os dois casos.

## **2 DESENVOLVIMENTO E DEMONSTRAÇÃO DOS RESULTADOS**

### **2.1 REFERENCIAL TEÓRICO**

Conforme Kakaç et al. (2012), trocadores de calor são instrumentos que demonstram o fluxo de energia térmica entre dois ou mais fluidos em diferentes temperaturas. Estes equipamentos possuem diversas aplicações, nas quais incluem produção de energia, indústrias de processos, química e de alimentos, eletrônicos, engenharia ambiental, entre outros.

Segundo Mohammed et al. (2012) em grande parte de suas aplicações, o tamanho do equipamento é um fator chave devido a restrições de espaço, além de influenciar na eficiência de troca térmica, podendo a mesma ser consideravelmente aumentada se o tamanho do trocador de calor é diminuído.

Trocadores de calor são classificados em diversas categorias, tais como apresentado por Incropera et al. (2008). Um dos tipos de trocador de calor que possui tamanho reduzido, porém grande área de troca térmica é o tipo serpentina, que também apresenta elevado coeficiente de transferência de calor devido à elevada turbulência induzida, como demonstrado por Prabhanjan et al. (2002). Khairul et al. (2013) mostram que há ainda, uma contribuição secundária para o processo de transferência de calor em um trocador deste tipo, devido às forças centrífugas presentes na serpentina, um escoamento em espiral é formado, induzindo um segundo padrão de escoamento, que consiste em dois vórtices perpendiculares à direção do fluxo axial, com isso o processo de transferência de calor se dá por difusão na direção radial, bem como por convecção.

De acordo com Both et al. (2011), existem vários fatores que influenciam na hora de determinarmos a transição de temperatura em um trocador de calor, assim temos como

exemplo: I) Temperaturas terminais: a diferença de temperatura entre fluido de trabalho e fluido refrigerante; II) Área de contato (geometria do trocador): área que separa os dois fluidos acima citados, quanto maior, mais eficiente a troca de calor; III) Material do trocador: geralmente deve possuir um coeficiente de condutibilidade térmica elevado, cobre e o alumínio, são amplamente utilizados; IV) Velocidade do escoamento: quanto maior a

velocidade de escoamento, maior a turbulência criada, e por conseguinte maior o coeficiente de troca de energia; V) Fator de sujeira: deve ser evitado qualquer efeito de acúmulo ou incrustação; VI) Perda de carga dentro do trocador: quanto maior a perda de carga, menos eficiente será o trocador de calor (BOTH et al., 2011).

Existem diversas maneiras para resfriar o mosto de cerveja, este resfriamento é essencial para que sejam retirados materiais sólidos que são formados durante a fervura. Os resfriadores devem ser construídos sempre com materiais atóxicos, um sistema que permite o processo é por meio da água e gelo, sendo o tipo mais rudimentar de resfriamento possível, são necessários dois recipientes que possam ser colocados um dentro do outro, o recipiente interno recebe o mosto, enquanto o externo recebe água e gelo. E o outro equipamento usado é o Chiller de imersão, o qual usaremos neste trabalho e que é uma espécie de serpentina, que deve ser inserida dentro do recipiente na qual o mosto foi fervido. Em uma das extremidades da serpentina é colocada água fria, esta água fria flui por dentro do recipiente onde se encontra o mosto, absorvendo o calor do mosto, logo após o líquido que corre pela serpentina é descarregado pela outra extremidade.

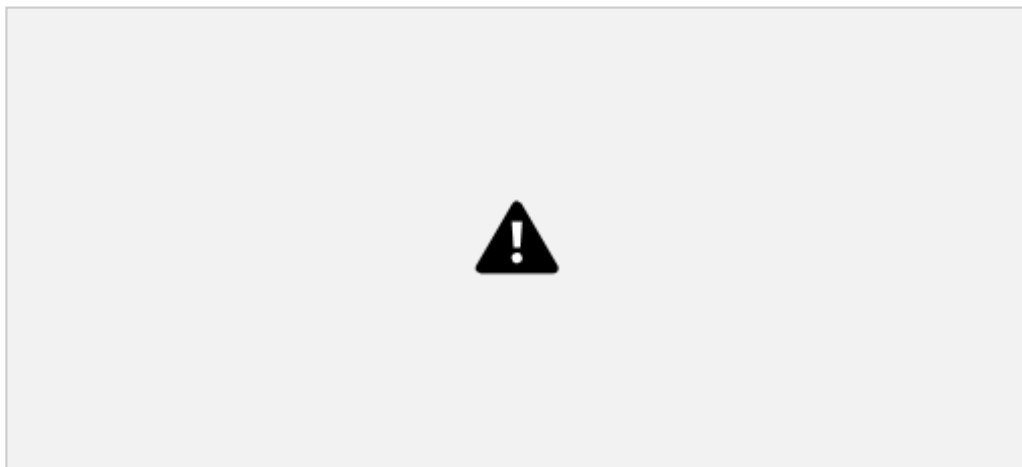
## 2.2 MATERIAL E MÉTODOS

A realização dos cálculos efetivou-se utilizando o sistema de equações do método Efetividade-NUT. Para dar início, realizou-se o cálculo da vazão de água da rede de distribuição para abastecimento público. Como cada ponto da rede de distribuição possui uma vazão específica, uma vez que depende do diâmetro da tubulação referente a cada sistema de rede residencial ou urbano, e também das condições de pressões presentes nas tubulações.

Para tal, a partir do uso de ferramentas de fácil acesso e de maneira convencional, fez-se o uso de um balde de margarina de 15 kg, no qual a densidade da margarina é no valor de 0,9 kg/L, logo procedeu-se o cálculo do volume. Para fins experimentais, ligou-se a torneira na maior velocidade possível, colocou-se o balde embaixo da torneira, no mesmo

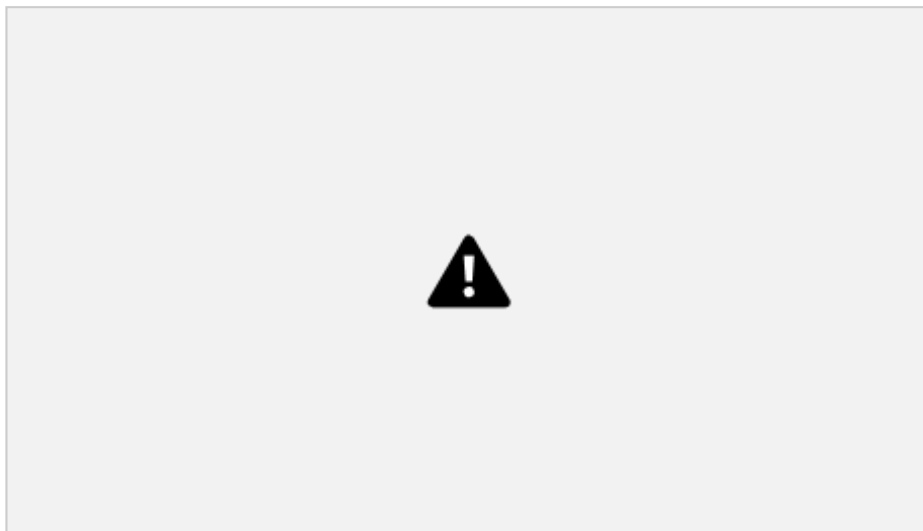
instante o cronômetro foi ligado e cronometrou-se o tempo levado para atingir o volume máximo atribuído ao balde. Em seguida, desligou-se instantaneamente a torneira e os valores adquiridos foram um tempo de aproximadamente 76 segundos para o enchimento de 16,67 litros ( $V = m/D$ ), visto que o balde contém uma massa de  $m = 15\text{kg}$  e densidade  $D = 0,9\text{ kg/L}$ . A medição da vazão da água da torneira ( $Q = V/T$ ), resultou em 0,22 L/s ou  $2,2 \times 10^{-4}\text{ m}^3/\text{s}$ .

Tabela 1- Parâmetros utilizados para o equacionamento do trocador de calor



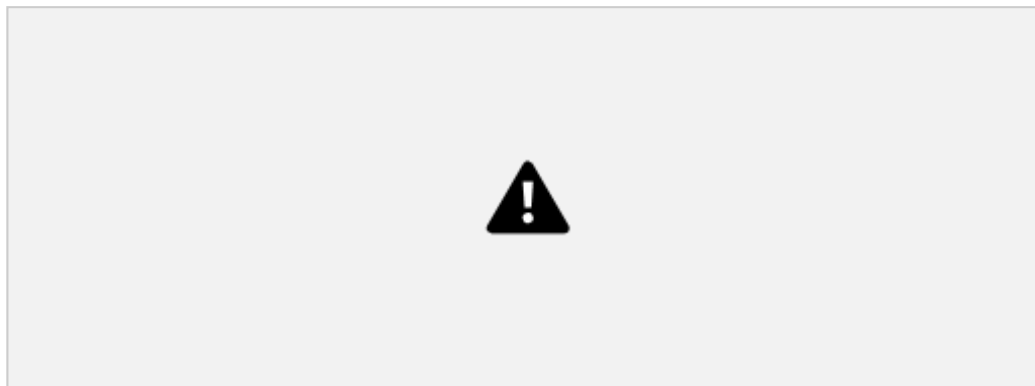
Fonte: Autoras, 2020.

Tabela 2 - Propriedades termofísicas dos fluidos considerando a temperatura de filme



Fonte: Autoras, 2020.

Tabela 3- Resultados da determinação do coeficiente global de transferência de calor



Fonte: Autoras, 2020.

### 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi realizado o cálculo para convecção natural, ou seja, quando o equipamento chiller de imersão está estático no mosto, utilizando o equacionamento para um cilindro longo horizontal. Utilizando  $\Delta T$  = Diferença de temperatura entre a superfície e o fluido (K);  $\mu$  = Viscosidade ( $m^2/s$ );  $\alpha$  = Difusividade térmica ( $m^2/s$ );  $L$  = Comprimento (m);  $g$  = Gravidade;  $\beta$  = Coeficiente de expansão térmico (K), com resultado  $Ra$  (convecção natural) =  $3,3 \times 10^6$ .

Os valores foram extraídos do livro Incropera et al. (2008), para água saturada  $T = 301K$ ;  $\beta = 276,1 \times 10^{-6}$ ;  $\alpha = 71,7 \times 10^{-3}$ ;  $\mu = 855 \times 10^{-6}$ ;  $Pr = 5,83$ ;  $K = 613 \times 10^{-3}$ . Em seguida foi calculado o número de Nusselt. Onde:  $Ra$  = Número de Rayleigh (adimensional);  $Pr$  = Número de Prandtl (adimensional), com resultado de  $Nu_D = 25,02$ .

De acordo com Kakaç et al. (2002) e Incropera et al. (2008), o coeficiente convectivo interno, ou seja, para o fluido que circula no interior dos tubos, utiliza  $Nu_D$ : Número de Nusselt;  $K$ : Valor para a condutividade térmica do fluido (W/mK);  $D$ : Diâmetro do tubo (m), com resultado do coeficiente convectivo interno:  $hi = 1533,726$ .

Posteriormente, foi realizado o cálculo para convecção forçada, ou seja, quando o equipamento chiller de imersão está em movimento no mosto, utilizando o equacionamento através da literatura (LIMBERGER, 2013).

Onde:  $Nu_D$  = resultado para número de Nusselt;  $Re_d$  = número de Reynolds calculado posteriormente;  $f$  = fator de atrito no interior do tubo (serpentina);  $Pr = 3,15$ .

Para o cálculo de  $f$ , que se trata do fator de atrito no interior do tubo, para tubos lisos e número de Reynolds entre 3000 e 500000 é obtido pela correlação de Petrukov. Para tal necessitamos do cálculo de Reynolds, onde poderá ser concluído que a fórmula de Petrukov pode ser submetida ao cálculo de Nusselt, pois atende ao pré-requisito citado para a faixa de

valores.

Por meio de  $m_j$  = vazão mássica do mosto (kg/s);  $D$  = Diâmetro (m);  $\mu$  = Viscosidade ( $m^2/s$ ), obtém-se um resultado de **Red** = **42441,32Ns/m<sup>2</sup>**. Onde a viscosidade e a vazão mássica são correlacionadas para o mosto, referências essas advindas da literatura resultando em  **$f = 6,96 \times 10^{-3}$** .

Assim o novo número de Nusselt é, **NuD** = **79,4**. Consecutivamente obtém-se os todos os parâmetros para o cálculo do coeficiente convectivo externo: **he** = **5161 W/m<sup>2</sup>K**. Segundo Incropera et al. (2008), o coeficiente global de transferência de calor é uma parte fundamental

na análise da troca térmica, isso porque ele representa a resistência térmica total do sistema à transferência de calor entre os dois fluidos. O coeficiente global de transferência de calor U (W/m<sup>2</sup>K) é **U= 1182,36**.

O cálculo da vazão mássica para a água, em razão da vazão que por sua vez é única, baseada em teste experimental, resultou em  **$\dot{m} = 0,219Kg/s$** . De acordo com Incropera et al. (2008) deve-se realizar o balanço de energia global para os fluidos, desde que os mesmos não estejam submetidos a mudanças de fase.

O conjunto de todas análises feitas e todos os cálculos realizados até o momento, nos permitem proceder com o cálculo da variável tempo, para os dois tipos de convecção, para a forçada e para a natural, utilizando os coeficientes necessários a partir de:



Para convecção forçada obtém-se 1,39s (60s) ou 83,4minutos = 1 hora e 39 minutos = 5004 segundos e para a convecção natural: 3,37s (60s) ou 203,24 minutos = 3 horas e 38 minutos = 12168 segundos. Logo, o tempo para convecção natural foi de **T = 3, 38 horas** e o Tempo para convecção forçada foi de **T = 1, 39 horas**.

O volume para convecção forçada, onde Q equivale a  $2,2 \times 10^{-4} m^3/s$  e  $\Delta T = 5004$  segundos, por  $V = Q \times \Delta T$  vale **V = 1, 1 m<sup>3</sup>**.

O volume para convecção natural, onde Q equivale a  $2,2 \times 10^{-4} m^3/s$  e  $\Delta T = 12168$  segundos, por  $V = Q \times \Delta T$  vale **V = 2, 68 m<sup>3</sup>**.

O método de transferência de calor utilizado é a convecção natural e a forçada, é o



processo que se dá entre um fluido e uma superfície. Tal fenômeno ocorre através do somatório de duas ocorrências: a transferência de energia pelo movimento global do fluido e pelo movimento aleatório entre as moléculas do fluido (condução). Através da lei de resfriamento de Newton pode se calcular a taxa de transferência de calor por convecção ( $qh$ ), que leva em consideração o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h$ ), a área de troca térmica ( $A$ ) e a variação de temperatura entre os dois meios ( $\Delta T$ ).

A finalidade última foi a determinação do tempo de resfriamento e o volume de água gasta durante esse processo de resfriamento, para ambos os casos de convecção realizadas na prática de produção de cerveja, a natural e a forçada. Ou seja, quando o mecanismo de

resfriamento, denominado chiller estático é equivalente a convecção natural, já quando manualmente o chiller é movimentado, torna-se outro meio de propagação da convecção forçada. A convecção forçada é uma alternativa que busca diminuir o processo de tempo de resfriamento, que por vezes, dependendo do volume de mosto a ser resfriado, pode ser dispendioso e oneroso, em termos de tempo necessário e volume de fluido frio gasto.

Os resultados mostram que para uma convecção propagada ao natural, os custos de resfriamento seriam maiores, visto a quantidade de volume de água (fluido frio) gasto durante este tempo de resfriamento. Já para uma convecção disseminada por emprego de movimento, os resultados tornam-se mais interessantes e atrativos, para o produtor de cerveja artesanal, que necessita prosseguir com o resfriamento do mosto cervejeiro, uma vez que o tempo e o volume, tornam-se menores, e isso impacta diretamente na efetividade e potencial de aplicação do processo, isso quer dizer que nas mesmas condições de volume de mosto a ser resfriado, com o emprego de movimento, o tempo seria menor e, conseqüentemente, os custos com gasto de água seriam menores.

Uma síntese dos resultados obtidos, para a convecção natural/chiller estático, o tempo de resfriamento de 3,38 horas gera um volume de 2680 litros de água, para a convecção forçada/chiller em movimento, o tempo de resfriamento de 1,39 horas gera o volume de 1100 litros de água. Dessa forma, é notável a viabilidade de trocadores de calor em convecção forçada para realizar o resfriamento do mosto cervejeiro, além da percepção da importância do estudo sobre transferência de calor nas atividades sobre produção de cerveja artesanal.

Do ponto de vista da engenharia ambiental e sanitária, a preocupação com esse gasto de volume de água é de grande preocupação e torna-se um instrumento de divagação, em

relação às vias que poderiam ser empregadas para o reuso deste volume de água. Durante o resfriamento do mosto, para o presente caso, com a totalidade de 10 litros de mosto a ser resfriado, no melhor cenário de convecção a ser empregado, serão gastos um total de 1100 litros de água para estes 10 litros de mosto, isto quer dizer que serão necessários 110 vezes mais do fluido frio para o resfriamento do fluido quente. Assim, esse gasto caso não seja reaproveitado, torna-se um problema enorme, para o meio ambiente em geral, o que atrelado às pertinentes preocupações atuais, frente os recursos naturais finitos, como a água, se trata de um enorme debate, presente na comunidade científica bem como na esfera social, que trata sobre os usos da água, o que poderia render uma outra contextualização no sentido da engenharia ambiental, visto que nitidamente é um problema a ser resolvido. Para esse caso,

seria interessante e aconselhável, o armazenamento destes 1100 litros de água, para posterior aplicação, como se trata de uma produção artesanal, poderia ser usado no meio social e residencial do produtor, ou seja, o emprego desta água na horta, para lavagem de roupas, para lavar o carro, entre outros usos que poderiam ocupar essa água na residência do produtor de cerveja artesanal.

### **CONCLUSÃO**

O objetivo principal deste trabalho foi o dimensionamento de um trocador de calor para ser implantado em uma cervejaria artesanal. A utilização de sistemas térmicos e de trocadores de calor, além de possuir diversas aplicações, têm-se mostrado eficiente, tanto no campo industrial quanto no meio científico. A finalidade proposta foi alcançada, que por sua vez era a determinação dos parâmetros de tempo de resfriamento e como consequência deste tempo o volume a ser utilizado de água, essas determinações abrigaram todo arcabouço atrelado a ciência de transferência de calor e massa no quesito fundamentação matemática, os resultados matemáticos conseguidos, partiram da base do cálculo.

A disseminação destes se deram ao longo do trabalho, isso quer dizer que foi uma determinação teórica dos resultados, em nenhum momento o resultados adquiridos vieram de uma base experimental, quanto a produção de cerveja, o que tornou-se um desafio ao longo do desenvolvimento deste trabalho, visto que por vezes a literatura não fornece todos parâmetros necessários, o que demanda de certo referencial intelectual para se conseguir esses resultados.

Entretanto, se fosse um processo experimental para a determinação do tempo e do volume, seria um trabalho menos árduo, visto que a teoria busca imitar a prática, e vice-versa, caso fosse uma abordagem tática experimental, seria contabilizado o tempo gasto do resfriamento e o volume resultante, sem todas as bases matemáticas ilustradas.

Diante do exposto, conclui-se que o trabalho obteve êxito, uma vez havendo consistência e presença de lógica, sendo que os resultados foram compatíveis com a realidade prática, isso mostra a efetividade da abordagem de transferência e de massa, o que quer dizer que os resultados para convecção natural e forçada obedecem à lógica. Os resultados obtidos mostram menor tempo para a convecção forçada, o que obviamente na prática é o que acontece, com o emprego de um respaldo para aceleração do processo. E caso não se haja um subsídio para movimentar o chiller, o mesmo fica sob condições naturais, e logo o tempo de resfriamento será maior.

Toda essa divagação filosófica busca explicar em termos de linguagem escrita os resultados obtidos por linguagem matemática. Por fim, os resultados obtidos foram na medida do possível bons, contendo lógica: convecção forçada (mais rápida) menor tempo e menos volume de água gasto, convecção natural (mais lenta): mais tempo gasto e logo mais volume de água gasto.

### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem a Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), *Campus Cerro Largo/RS*, pelos conhecimentos adquiridos por meio da graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária.

### **REFERÊNCIAS**

BOTH, J.; VARGAS, L.; SILVEIRA, M. **Construção e Operação de um Trocador De Calor Para Resfriamento de Mosto de Cerveja**. 2012.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro, RJ. 2008.

KAKAÇ, S; LIU, H; PRAMUANJAROENKIJ, A. **Heat exchangers: selection, rating and thermal design**. 3rd. ed. Boca Raton, US: CRC Press, 615 p., 2012.

KHAIRUL, M. A; SAIDUR, R; RAHMAN, M. M; ALIM, M. A; HOSSAIN, A; ABDIN, Z. Heat transfer and thermodynamic analyses of a helically coiled heat exchanger using different types of nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 67, p. 398-403, 2013.

LIMBERGER, R. P. **Sistema de resfriamento de mosto de cerveja em processos artesanais**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 22 p., 2013.

MOHAMMED, H. A; NARREIN, K. Thermal and hydraulic characteristics of nanofluids flow in a helically coiled tube heat exchanger. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 39, p. 1375-1383, 2012.

PRABJANJAN, D. G; RAGHAVAN, G. S. V; RENNIE, T. J. Comparison of heat transfer rates between a straight tube heat exchanger and a helically coiled heat exchanger. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 29, p. 185-191, 2002.

ZAGO, P. **Estudo de um trocador de calor para produção artesanal de cerveja**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade de Caxias do Sul, 2018.