



UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS CERRO LARGO
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

ANDREI CORTES CARDOSO

DETERMINAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO DE MICROCERVEJARIAS

CERRO LARGO

2019

ANDREI CORTES CARDOSO

DETERMINAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO DE MICROCERVEJARIAS

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal da Fronteira Sul.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Cassol

CERRO LARGO

2019

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Cardoso, Andrei Cortes
Determinação do consumo energético de
microcervejarias / Andrei Cortes Cardoso. -- 2019.
41 f.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Cassol.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de
Engenharia Ambiental e Sanitária, Cerro Largo, RS ,
2019.

1. Gasto energético. 2. Cerveja. 3. Troca térmica. 4.
Condução. 5. Convecção. I. Cassol, Prof. Dr. Fabiano,
orient. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III.
Título.

ANDREI CORTES CARDOSO

DETERMINAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO DE MICROCERVEJARIAS

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção de grau de Graduação de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul.

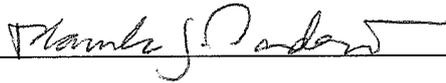
Orientador. Prof. Dr. Fabiano Cassol

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em: 02/12/2019.

BANCA EXAMINADORA:



Prof^o Dr. Fabiano Cassol – UFFS



Prof^a. Dra. Manuela Gomes Cardoso – UFFS



Prof^o Dr. Thiago de Cácio Luchese – UFFS

RESUMO

A eficiência energética dos processos industriais está diretamente relacionada aos gastos energéticos de manufatura, evidenciando a relevância de sua avaliação e otimização. Em microcervejarias, devido a utilização de energia para aquecimento e resfriamento, a modelagem energética tenta descrever os gastos térmicos de todas as suas etapas de produção: mosturação, filtragem, fervura, resfriamento, fermentação, maturação e pasteurização. Desta forma, este trabalho tem como objetivo descrever a solução analítica, correspondente às trocas condutivas e convectivas de calor, em uma microcervejaria para a caracterização do gasto energético para a produção de cerveja. Foram utilizadas equações de troca térmica disponíveis na literatura, assim como dimensões e propriedades físicas de cada material ou insumo, adaptando-as para a realidade das microcervejarias. Todas as sete etapas do processo de fabricação da cerveja foram modeladas para um volume de produção final de 10 hL de cerveja. A maior demanda energética foi observada na fervura, com 68.335,08 Wh consumidos, possivelmente por ter a maior variação de temperatura ao longo do processo; seguido pela mostura e pasteurização, com 60.688,78 e 44.210,09 Wh fornecidos, respectivamente. Já as perdas térmicas foram de 1.213,67; 1.106,56; 3.548,05; 102.422,22; 2.617,74; 45.293,40 e 1.157,85 Wh para a mostura, filtração, fervura, resfriamento, fermentação, maturação e pasteurização, respectivamente. A modelagem proposta para a quantificação das parcelas de ganhos e perdas energéticas ao longo do processo de fabricação da cerveja, permitem que seja possível a identificação dos locais onde uma possível otimização seja necessária, uma vez que o equipamento pode estar operando com gastos energéticos desnecessários.

Palavras-chave: Gasto energético. Cerveja. Troca térmica. Condução. Convecção.

ABSTRACT

The energy efficiency of industrial processes is directly specialized in manufacturing costs, highlighting the relevance of their evaluation and optimization. In microbreweries, due to the use of energy for heating and cooling, an economic model uses the description of thermal costs of all production steps: mashing, filtering, boiling, cooling, fermentation, maturation and pasteurization. Thus, the main grain is to describe an analytical solution, corresponding to conductive and convective heat exchanges, in a microbrewery to characterize the energy expenditure for beer production. Heat exchange equations available in literature were used, such as variations and characteristics of each material or input, adapting to the reality of microbreweries. All seven steps of the brewing process were modeled for a final beer production volume of 10 hL. The highest energy demand was reached, with 68,335.08 Wh consumed, possibly due to greater temperature variation throughout the process; followed by mashing and pasteurization, with 60,688.78 and 44,210.09 Wh selected, respectively. The thermal losses were 1,213.67; 1,106.56; 3,548.05; 102,422.22; 2,617.74; 45,293.40 and 1,157.85 Wh for mashing, filtration, boiling, cooling, fermentation, maturation and pasteurization, respectively. A proposed modeling for the quantification of the consumption and energy parcels along the brewing process allows identify places where a possible optimization is needed, since the equipment may be operating with energy expenditure.

Keywords: Energy expenditure. Beer. Thermal exchange. Conduction. Convection.

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------|---|
| A | Área de troca térmica (m^2) |
| c_p | Calor específico à pressão constante ($J/kg \cdot K$) |
| D | Diâmetro (m) |
| f | Fator de conversão ($3600J/Wh$) |
| Gr | Número de Grashof (adimensional) |
| g | Aceleração da gravidade (m/s^2) |
| h | Coefficiente convectivo ($W/m^2 \cdot K$) |
| k | Coefficiente condutivo de troca térmica ($W/m \cdot K$) |
| L | Altura (m) |
| m | Massa (kg) |
| \dot{m} | Vazão mássica (kg/s) |
| Nu | Número de Nusselt (adimensional) |
| Pr | Número de Prandtl (adimensional) |
| q | Fluxo térmico (W) |
| Q | Consumo energético (Wh) |
| R | Resistência térmica (W/K) |
| r | Raio (m) |
| Re | Número de Reynolds (adimensional) |
| T | Temperatura ($^{\circ}C$) |
| t | Tempo (h) |

| | |
|-------------|--|
| V | Volume (m^3) |
| z | Velocidade média (m/s) |
| β | Coefficiente de dilatação térmica (K^{-1}) |
| ΔT | Varição da temperatura ($^{\circ}C$) |
| ρ | Massa específica (kg/m^3) |
| λ_m | Calor para mudança de fase (J/kg) |
| σ | Tensão superficial (N/m) |
| ϑ | Viscosidade cinemática ($mPas$) |
| μ | Viscosidade dinâmica ($mPas$) |

Subscritos

| | |
|------|-------------|
| cond | Condutivo |
| conv | Convectivo |
| e | Externo |
| f | Final |
| ferm | Fermentação |
| form | Fornecida |
| h | Hidráulico |
| l | Líquido |
| L | Lã de rocha |
| i | Interno |

| | |
|----------|----------------|
| p | Perdida |
| past | Pasteurização |
| s | Superfície |
| v | Vapor saturado |
| 0 | Inicial |
| ∞ | Ambiente |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Etapas do processo de produção de cerveja | 17 |
| Figura 2 – Condução e convecção em uma placa de metal | 19 |
| Figura 3 – Rampa de temperatura da etapa de mostura..... | 31 |
| Figura 4 – Curva ajustada para dados experimentais: (a) açúcares totais e (b) álcool etílico .. | 32 |
| Figura 5 – Curvas ajustadas para álcool etílico e glicose | 33 |
| Figura 6 – Gráfico da quantificação da energia inserida (a) e perdida (b) pelo sistema..... | 37 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Coeficientes empíricos da correlação de Rohsenow | 23 |
| Tabela 2 – Receita utilizada na produção da cerveja (BONJOUR, 2004). | 28 |
| Tabela 3 – Geometia do tanque de acordo com a etapa de produção de cerveja e sua respectiva equação para o cálculo da área | 28 |
| Tabela 5 – Condições de entrada e saída da temperatura (T), volume (V), viscosidade (μ) e calor específico (cp) do mosto/cerveja de cada etapa do processo. | 30 |
| Tabela 6 - Condições do material dos equipamentos. Coeficiente convectivo interno (hi), coeficiente convectivo externo (he), área interna (Ai), área externa (Ae) e volume comercial do tanque (V)..... | 36 |
| Tabela 4 – Balanço geral de ganhos e perdas energéticas | 36 |

SUMÁRIO

| | |
|---------------------------------------|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 3 MODELAGEM TÉRMICA | 17 |
| 3.1 MOSTURA | 18 |
| 3.2 FILTRAÇÃO | 21 |
| 3.3 FERVURA | 22 |
| 3.4 RESFRIAMENTO | 23 |
| 3.5 FERMENTAÇÃO | 24 |
| 3.6 MATURAÇÃO | 25 |
| 3.7 PASTEURIZAÇÃO | 25 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 28 |
| 5 CONCLUSÕES | 38 |
| REFERÊNCIAS | 39 |

1 INTRODUÇÃO

O custo de produção de qualquer produto é um fator chave entre o lucro ou o prejuízo de uma empresa. Esse aspecto se estende a toda linha de produção, fazendo com que cada etapa do processo produtivo agregue valor ao produto final. O aperfeiçoamento dos processos, e ocasionalmente dos equipamentos, acabam por resultar em uma minimização dos custos de produção e, conseqüentemente, redução de matéria-prima e rejeitos advindos da produção.

A eficiência energética tem atenção especial no meio industrial pois interfere diretamente na qualidade e nos custos de produção, inclusive na indústria alimentícia. Dentre essas indústrias, o setor de cervejarias está exigindo equipamentos com maior volume de produção e precisão nos processos produtivos, tendo cada vez mais que garantir altos índices de rentabilidade (FONTANA, 2009). Na União Européia, a eficiência energética das indústrias já é uma prioridade para os países membros, visando o crescimento sustentável ao longo dos anos. Para tanto, as indústrias devem melhorar progressiva e sistematicamente a utilização de recursos baseados na eficiência energética (ZOGLA et al., 2015).

A discussão sobre questões de sustentabilidade energética está se inserindo aos poucos no mercado brasileiro, uma vez que o mercado de microcervejarias está cada vez mais desenvolvido, devido à valorização dos consumidores para com as cervejas artesanais. Uma pesquisa de 2015 da Associação Brasileira da Indústria da Cerveja aponta que o país é o 3º maior produtor do mundo (SEBRAE, s.d.).

Como a produção de cerveja é regida por diversas trocas térmicas ao longo do seu processo de produção, o conhecimento de como cada etapa irá ocorrer e quanto de energia consumirá é de extrema importância. Especificamente na produção de cerveja há diversos processos que requerem altas taxas de troca térmica (aquecimento ou resfriamento), como é o caso da mosturação, fervura, resfriamento, fermentação e pasteurização. Os processos de mosturação e fervura são os que mais necessitam de calor, seja para aquecer ou apenas para manter a temperatura elevada (CORRÊA, 2017).

A exigência do consumidor para com a qualidade das cervejas, sobretudo as artesanais, vem aumentando ao longo dos últimos anos (GERHARDT, 2017). Isso cria a necessidade de que as empresas de produção de cerveja se adequem a essas novas exigências do público consumidor e reavaliem seu processo produtivo. Com este panorama, a concepção de um modelo térmico, correspondente à troca de calor com o meio em todas as etapas de

produção, mostra-se válido para se ter uma caracterização do gasto energético para a produção de cerveja.

Essa investigação justifica-se pelo fato de que os gastos energéticos associados aos equipamentos do processo fabril pouco são levados em consideração no processo produtivo. Com isso, espera-se investigar acerca da escolha do material isolante, processos que podem ser otimizados, quantificação dos gastos com energia térmica, utilização de fontes energéticas sustentáveis, entre outros pontos que podem significar a economia energética.

Com uma correta modelagem térmica das condições de uma microcervejaria, produtores de cervejas artesanais poderão aplicar o modelo nas suas instalações para verificar possíveis gastos energéticos dos seus equipamentos, identificando pontos com gastos excessivos. Além de novas empresas do ramo poderem usar o modelo como base para o desenvolvimento de equipamentos mais eficientes e ambientalmente corretos, tendo maior poder de concorrência e visibilidade no mercado.

O objetivo desse trabalho é realizar a modelagem térmica do processo produtivo da cerveja tomando como base dimensões comuns aplicadas à microcervejarias. O trabalho leva em consideração a exploração das parcelas condutivas e convectivas de transferência de calor, a fim de obter um valor global de taxa de calor, assim como realizar a caracterização de quanto cada etapa impacta no resultado final do consumo energético.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A modelagem matemática vem sendo aplicados em diversos ramos da sociedade, como na maximização de lucro que um gerente de negócios realiza para uma companhia; o gerenciamento dos recursos para controlar taxas de colheitas; agricultores controlam suas plantações para maximizar o rendimento, entre outros. Todas essas aplicações possuem variáveis que podem ser controladas para se obter o resultado mais próximo dos interesses do investidor (MEERSCHAERT, 2013).

Na indústria alimentícia são criados modelos matemáticos para diferentes finalidades, desde propriedades físicas dos insumos utilizados até fenômenos que interferem no seu processamento, otimizando a exploração de alternativas que aumentem a eficiência do processo como um todo (DJEKIC et al., 2019). Há pesquisas que modelam a cinética da moagem de alimentos. Pois, devido às características variadas, estas são de difícil determinação, e, devido à sua importância no processo, exige uma descrição matemática detalhada (SRIDHAR; SOMMER, 2014).

Dentro da indústria alimentícia o ramo das cervejas artesanais vem crescendo cada vez mais nos últimos anos, tornando-se um investimento atrativo, visto que o aumento em suas qualidades sensoriais é valorizado pelo consumidor (TSCHOEKE et al, 2019). Processos cervejeiros utilizam intensivamente energia elétrica e térmica, utilizada para elevar e reduzir a temperatura de diversas fases da sua produção.

A problematização da perda e do consumo térmico é muito bem exposto por Zogla et al. (2015), onde os autores trabalham com testes de *benchmark* para mostrar a eficiência energética do processo da produção da cerveja. Utilizam-se equações dos princípios da transferência condutiva e convectiva alteradas com a variável tempo. Os autores destacam que os processos de *benchmark* não são comuns em pequenas e médias indústrias, o que deve ser melhor investigado, pois essa medida fornece um parâmetro para a melhoria da eficiência energética.

Olajire (2012) aponta que a indústria da cerveja é umas das que mais consomem energia e água e que a geração de águas residuárias, resíduos sólidos e emissões atmosféricas continuam sendo os principais desafios ambientais do ramo. Como solução para a melhor gestão da energia térmica, o autor propõe o uso do calor residual que pode ser obtido do próprio processo ou de subprodutos com alto poder calorífico, como os grãos após passar pela mosturação.

A abordagem sobre a redução de demanda energética nas cervejarias requer uma visão integrada entre uma melhor eficiência energética, a recuperação de energia e o desenvolvimento de fontes adicionais de energia. Uma forma plausível é a otimização do balanço de água quente para reduzir o consumo de energia. Esse ponto de vista pode ser identificado por uma auditoria de eficiência energética, a qual visa o apontamento de melhoramento de algum processo, desde que não comprometa a qualidade da cerveja (SCHELLER; MICHEL; FUNK, 2008).

Muster-Slawitsch et al. (2011) apresenta, em seu estudo, o conceito do *Green Brewery*, que objetiva explorar a redução do consumo de energia térmica em cervejarias e desenvolver ferramentas para alcançar essa redução. De forma semelhante, Olajire (2012) aponta que esse conceito deve incluir: o balanço de energia, demanda mínima de energia térmica, otimização do processo, integração de calor e de energia renovável.

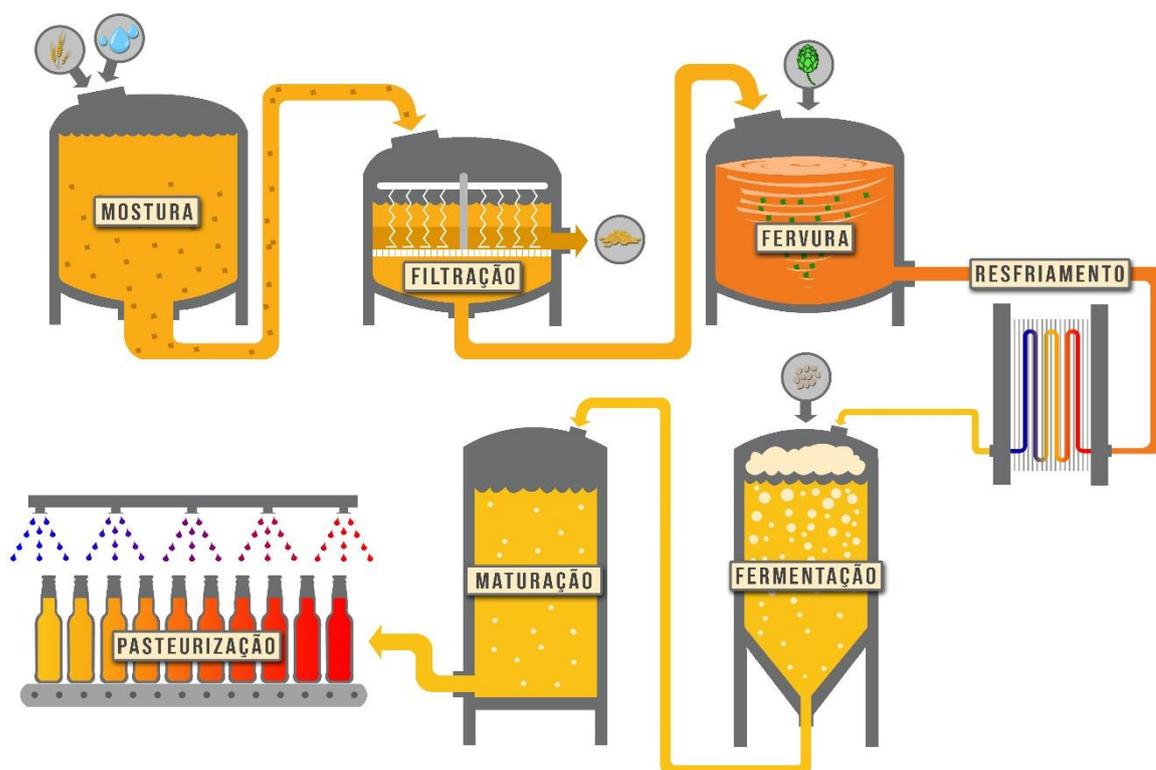
Sturm et al. (2013) descrevem a dificuldade de cervejarias de pequeno porte em possuir a eficiência necessária para competir com as de médio e grande porte, frente ao constante aumento no preço dos combustíveis e matéria-prima para a produção da cerveja. Investigou-se cervejarias de médio porte no Reino Unido para identificar medidas para a redução da demanda de energia e água. Segundo os autores, ao utilizar um isolamento térmico melhor e a implementação de medidas básicas de recuperação de calor, poderiam reduzir em 20% a demanda por energia em um período de retorno de 1,3 anos.

Estudos avaliando o impacto energético na produção de cerveja têm evoluído de forma lenta. Pouco se tem investigado a respeito das características do processo e inovações no setor são raras. Muitas das iniciativas são oriundas de outros setores, como a utilização de sistemas para pré-aquecimento de água, cogeração de energia (técnicas oriundas da indústria energética) ou mesmo iniciativas de reúso de água. Os equipamentos têm sofrido modificações apenas por força da legislação, que busca adequar o processo às melhores técnicas de produção para produtos alimentícios (uso do inox ao invés do cobre como material para os tanques de brassagem). Assim, a busca por referências é escassa, o que sugere uma necessidade de investimentos no setor.

3 MODELAGEM TÉRMICA

No processo de fabricação de cerveja artesanal podemos considerar sete etapas que envolvem troca térmica com o meio: mostura, filtração, fervura, resfriamento, fermentação, maturação e pasteurização. Ao longo do processo produtivo, são adicionados alguns insumos, assim como também podem ser retirados. A Figura 1 mostra o esquema da produção de cerveja com base nas etapas citadas acima.

Figura 1 – Etapas do processo de produção de cerveja



Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente o malte previamente moído é levado para o tanque de mostura, onde é adicionado água (etapa 1). Após diversas rampas de temperatura, os açúcares depositados no grão em forma de amido são convertidos a diversos tipos de açúcares que ficam livres na parcela líquida do mosto. O mosto passa então por um processo de filtração (etapa 2), para que apenas a parte líquida avance no processo. Essa porção líquida é levada para a fervura (etapa 3), juntamente com o lúpulo, afim de conferir amargor e sabores à cerveja. Ao fim da fervura, o mosto deve passar por um trocador de calor (etapa 4) para diminuir a sua temperatura e poder ser colocado em contato com a levedura, uma vez que essas são sensíveis

à altas temperaturas. Já nos fermentadores (etapa 5), as leveduras consomem os açúcares extraídos do malte e o transforma em álcool etílico e gás carbônico. Após certo tempo, a cerveja é levada para tanques de maturação (etapa 6), para assegurar melhores aromas e sabores. Por fim, já engarrafada, a bebida passa pelo processo de pasteurização (etapa 7) para inativação de quaisquer microrganismos presentes, estendendo a vida útil do produto.

Todos esses processos, em menor ou maior grau, passam por trocas térmicas de aquecimento ou resfriamento. Há diversas variáveis que influenciam nessa constante tentativa de se chegar no equilíbrio térmico, como por exemplo: o metal utilizado na estrutura dos tanques, no tipo de isolamento e na área superficial dos tanques. Existem 3 tipos de troca térmica: a condutiva, a convectiva e a radioativa. Sendo que essa última não será abordada nesse estudo por ser considerada uma parcela insignificante devido à baixa temperatura do sistema.

Nesta seção será realizada a modelagem das etapas apresentadas, com equações já consolidadas da transferência de calor, adaptadas para o processo de produção de cerveja.

3.1 MOSTURA

A mostura é a etapa na qual mistura-se o malte, já moído, com a água, aquecendo a mistura em diferentes rampas de temperatura (TOZETTO, 2017). Esse cozimento tem por finalidade converter, através da ação enzimática, o amido presente no malte em açúcares fermentáveis, necessários para a produção da bebida alcoólica (ABOUMRAD, 2015).

3.1.1 Energia perdida

A formulação para a análise da perda de energia térmica, do tanque para o meio, considera a variação da temperatura (ΔT) e o somatório das resistências térmicas (R) que o fluxo térmico deverá percorrer. Matematicamente a taxa de transferência de calor (q_p) é descrita como:

$$q_p = \frac{\Delta T}{\sum R} \quad (3.1)$$

A variação de temperatura ao longo do processo consiste na diferença entre a temperatura do mosto (T_m) no tanque de mosturação e a temperatura do ar ambiente (T_∞). As resistências envolvidas correspondem à de condução (R_{cond}), através das paredes do tanque, e

de convecção (R_{conv}), entre o mosto e a parede do tanque e entre a parede do tanque e o ar externo. Desse modo, a equação (3.1), resume-se em:

$$q_p = \frac{T_m - T_\infty}{\sum R_{cond} + \sum R_{conv}} \quad (3.2)$$

A resistência condutiva, considerando que o tanque tenha uma geometria cilíndrica, leva em consideração o raio interno (r_i) e externo (r_e), o coeficiente condutivo (k) e a altura (L) do tanque de mostura, como descrito na equação (3.3):

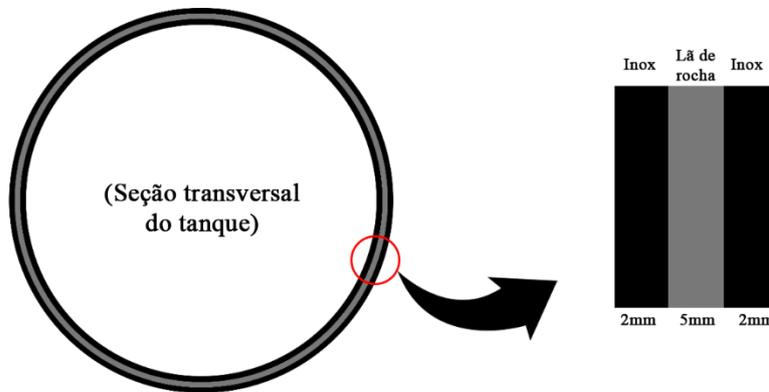
$$R_{cond} = \frac{\ln(r_e/r_i)}{2\pi kL} \quad (3.3)$$

Já a resistência convectiva leva em consideração o coeficiente convectivo (h) do fluido e a área (A) de contato onde o fluxo térmico age, como a equação (3.4) expõe:

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \quad (3.4)$$

Na figura 2, podemos ver a organização das paredes dos tanques, onde ocorre a condução e convecção e as resistências condutivas geradas.

Figura 2 – Condução e convecção em uma placa de metal



Fonte: Elaborado pelo autor.

O fluxo térmico das perdas energéticas ocorre de dentro para fora. Nessa ordem o calor encontra primeiramente a resistência da convecção do mosto ($R_{conv,mosto}$), a resistência condutiva da chapa de inox ($R_{cond,inox}$), a resistência condutiva da lã de rocha ($R_{cond,lã}$), a resistência condutiva da segunda chapa de inox e a resistência convectiva do ar ($R_{conv,ar}$), como mostrado na equação (3.5):

$$q_p = \frac{T_m - T_\infty}{R_{conv,mosto} + R_{cond,inox} + R_{cond,lã} + R_{cond,inox} + R_{conv,ar}} \quad (3.5)$$

Substituindo as equações (3.3) e (3.4) na equação (3.5) e adicionando a variável tempo (t) para mensurar temporalmente o gasto energético, temos a equação de perda de energia térmica completa:

$$Q_p = q_p \cdot t = \frac{T_m - T_\infty}{\frac{1}{h_e A_e} + \frac{\ln(r_{1,e}/r_{1,i})}{2\pi k L} + \frac{\ln(r_{L,e}/r_{L,i})}{2\pi k L} + \frac{\ln(r_{2,e}/r_{2,i})}{2\pi k L} + \frac{1}{h_i A_i}} \cdot t \quad (3.6)$$

onde a área interna do tanque (A_i) e a área externa (A_e) diferenciam-se de acordo com a espessura total do tanque. Ambos coeficientes convectivos apresentados na equação 3.6 precisam ser determinados para cada etapa do processo, onde estes dependem do tipo de fluido e suas características físicas. Como nos dois casos da mostura a convecção é natural, podemos utilizar o número de Grashof (Gr) para essa determinação, cuja equação é apresentada a seguir:

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (3.7)$$

onde g é aceleração da gravidade, β é o coeficiente de dilatação térmica, T_s é a temperatura da superfície e ν é a viscosidade cinemática do fluido. Também será necessário o número de Prandtl (Pr), que pode ser determinado levando em consideração o calor específico (c_p), a viscosidade dinâmica (μ) e o coeficiente condutivo (k) do fluido, expressos matematicamente na equação (3.8):

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (3.8)$$

O gradiente de temperatura adimensional gerado na superfície pode ser correlacionado por uma fórmula de interpolação que é uma função do número de Prandtl $f(Pr)$:

$$f(Pr) = \frac{0,75Pr^{1/2}}{(0,609 + 1,221Pr^{1/2} + 1,238 Pr)^{1/4}} \quad (3.9)$$

Por fim, substituindo os resultados obtidos pelas equações (3.7), (3.8) e (3.9) e os valores do coeficiente condutivo (k) e da altura (L), chegamos no coeficiente convectivo (h) desejado:

$$h = f(Pr) \frac{4k}{3L} \left(\frac{Gr}{4}\right)^{1/4} \quad (3.10)$$

3.1.2 Energia fornecida

A energia térmica fornecida ao sistema, necessária ao aquecimento do mosto, é dada pela equação (3.11), que leva em consideração a massa, o calor específico e a variação da temperatura inicial e final do mosto.

$$Q_{forn} = mc_p \Delta T \quad (3.11)$$

Para a unidade do fluxo de calor fornecido ficar igual à unidade do fluxo de calor perdido, adicionamos um termo f , que converte a unidade de Joules (J), dada pela equação (3.11), à unidade resultante da equação (3.6), em Wh (Watt-hora). Esse novo termo de conversão é igual a 3600 J/Wh, de modo que a equação final seja:

$$Q_{forn} = \frac{mc_p(T_f - T_0)}{f} \quad (3.12)$$

3.2 FILTRAÇÃO

Nesta etapa ocorre a separação do bagaço do malte (casca e grão) e dos adjuntos adicionados anteriormente (sólidos) da porção líquida. Para se obter maior rendimento na produção, ocorre a lavagem do bagaço do malte, ou seja, a sua porção sólida, onde se extrai o máximo possível dos açúcares fermentáveis presentes (ROSA; AFONSO, 2015).

Durante a filtração a perda térmica se dá de modo semelhante ao que ocorre na mostura. Sendo assim, podemos fazer a mesma consideração que na etapa anterior, considerando as perdas condutivas e convectivas através da equação (3.6), alterando apenas o número de resistências condutivas, já que nessa etapa não temos isolamento térmico presente. Portanto, a equação (3.6) se reduz a:

$$Q_p = \frac{T_m - T_\infty}{\frac{1}{h_e A_e} + \frac{\ln(r_e/r_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_i A_i}} \cdot t \quad (3.13)$$

Um ponto importante é o modo diferenciado como o mosto se comporta no interior do tanque de filtração, uma vez que há a recirculação do mosto por meio de uma bomba. Assim, a convecção interna se dá de modo forçado, portanto utiliza-se o método de Nusselt para a determinação do coeficiente convectivo interno, conforme a correlação de Dittus-Boelter:

$$Nu = 0,23 Re^{0,8} Pr^{0,3} \quad (3.14)$$

Para a aplicação da equação (3.14) precisamos determinar o número de Prandtl (Pr) e o número de Reynolds (Re). O número de Pr leva em consideração para sua determinação o calor específico do fluido (c_p), a viscosidade dinâmica (μ) e o coeficiente condutivo (k), expresso matematicamente como:

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad (3.15)$$

Já o número de Reynolds considera a massa específica do fluido (ρ), sua velocidade média de escoamento vertical (z), o diâmetro (D) e a viscosidade dinâmica (μ), conforme o seguinte:

$$Re = \frac{\rho z D}{\mu} \quad (3.16)$$

Por fim, podemos determinar o coeficiente convectivo interno através da equação 3.17, onde o resultado da equação 3.14 é aplicado juntamente com o coeficiente condutivo do material (k) e o seu diâmetro hidráulico (D).

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D} \quad (3.17)$$

3.3 FERVURA

É a etapa da produção que mais demanda consumo energético. Fator importante quando se trata de gastos econômicos (TELES, 2007). Na fervura, a perda térmica pode ser modelada com a aplicação da equação (3.13). Já o ganho energético depende de outros fatores, pois há a formação de bolhas quando a temperatura chega no ponto de ebulição. Isso caracteriza um modo particular de convecção forçada, a ebulição nucleada.

A transferência de calor para esse modo de regime se baseia na viscosidade dinâmica do mosto (μ_l), calor para mudança de fase do mosto (λ_m), aceleração da gravidade (g), massa específica em estado líquido (ρ_l) e em estado de vapor saturado (ρ_v), tensão superficial (σ), calor específico em fase líquida ($c_{p,l}$), excesso de temperatura (ΔT_e) e o número de Prandtl (Pr), como descrito pela equação (3.15).

$$q_{eb} = \mu_l \lambda_m \left(\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right)^{1/2} \left(\frac{c_{p,l} \Delta T_e}{C_{s,f} \lambda_m Pr^n} \right)^3 \quad (3.18)$$

O coeficiente $C_{s,f}$ e o expoente n dependem da combinação superfície-fluido, são variáveis determinadas experimentalmente. Alguns valores representativos destes parâmetros

são apresentados na Tabela 1. O excesso de temperatura é dado pela diferença entre a temperatura de superfície (T_s) e a temperatura de saturação (T_{sat}).

Tabela 1 – Coeficientes empíricos da correlação de Rohsenow

| Combinação superfície fluido | $C_{s,f}$ | n |
|------------------------------|-----------|-----|
| Água-cobre | | |
| Riscada | 0,0068 | 1,0 |
| Polida | 0,0128 | 1,0 |
| Água-aço inoxidável | | |
| Tratada quimicamente | 0,0133 | 1,0 |
| Polida mecanicamente | 0,0132 | 1,0 |
| Esmerilhada e polida | 0,0080 | 1,0 |
| Água-latão | 0,0060 | 1,0 |
| Água-níquel | 0,006 | 1,0 |
| Água-platina | 0,0130 | 1,0 |
| N-Pentano-cobre | | |
| Polida | 0,0154 | 1,7 |
| Esmerilhada | 0,0049 | 1,7 |
| Benzeno-cromo | 0,0001 | 1,7 |
| Álcool etílico-cromo | 0,0027 | 1,7 |

Fonte: AZEVEDO, 2000.

3.4 RESFRIAMENTO

Ao final da fervura todas as conversões enzimáticas com auxílio de inserção de calor estão finalizadas e prontas para receber a adição de levedura e seguir para os tanques de fermentação. Entretanto, as altas temperaturas não permitiriam a sobrevivência das leveduras, uma vez que são organismos vivos e sensíveis às altas temperaturas.

Neste caso, o mosto passa por uma etapa de resfriamento. Quanto mais rápido este ocorrer, menores são as chances de contaminação e perda de qualidade do produto final. Neste sentido, comumente são utilizados trocadores de calor do tipo placas, que possuem elevada eficiência e são largamente empregados na indústria alimentícia. No equipamento, o

mosto aquecido passa por um lado da placa e água da rede, em temperatura ambiente, circula pelo outro lado, trocando calor, mas sem entrar em contato um com o outro.

Há vários métodos para a verificação da taxa de calor trocado nesses equipamentos. Neste estudo utilizaremos uma análise global, mais simplificada. Para isso, utilizamos a equação (3.19), uma vez que determinando a quantidade de energia térmica do lado do trocador onde escoar o fluido quente, temos a mesma taxa que no lado frio do trocador, matematicamente descrita como:

$$q = \dot{m}c_p\Delta T \quad (3.19)$$

onde \dot{m} é a vazão mássica do fluido, c_p é o calor específico e ΔT é a diferença de temperatura entre antes e depois do trocador de calor entre a entrada e a saída do mosto.

3.5 FERMENTAÇÃO

Segundo PARCUNEV (2012), a quantidade de CO_2 liberada durante a fermentação é um indicador da atividade das leveduras, que revelam a geração de energia térmica em meio ao mosto. A fermentação pode ser descrita pela seguinte equação:



onde temos a fórmula molecular da frutose, gerando 2 moléculas de álcool, mais duas moléculas de gás carbônico e mais calor. Esse calor gerado está diretamente ligado à atividade das leveduras. A equação básica apresentada por COLOMBIÉ (2007) para o conhecimento dessa taxa de geração térmica é:

$$q_{ferm} = \frac{23500 \cdot 2,17}{180} V \frac{d(CO_2)}{dt} \quad (3.21)$$

onde o termo 23500 significa as calorias por mol de açúcar consumido, 180 é a massa molar da glicose em g/mol, V é o volume e $\frac{dCO_2}{dt}$ é a taxa temporal de geração de CO_2 . Vale ressaltar que a modelagem que o autor realizou foi para o estudo da fermentação de vinho, com frutose ($C_6H_{12}O_6$) como açúcar fermentável. Como neste estudo a cerveja possui como açúcar fermentável a glicose ($C_6H_{12}O_6$), de mesma fórmula molecular da frutose, considerou-se adequado utilizar a mesma modelagem descrita pelo autor, como uma aproximação para o processo de fermentação da cerveja.

3.6 MATURAÇÃO

O objetivo da maturação é melhorar as características do sabor e aroma da cerveja. Esta etapa é feita em temperaturas baixas, cerca de 12°C, para promover a sedimentação das leveduras, proteínas e polifenóis residuais, assim retirando esses compostos e obtendo uma cerveja mais clarificada (CARRERA, 2015). Para a modelagem da perda térmica utiliza-se a equação (3.13). A diferença dos processos anteriores é que, aqui, o tempo de retenção da cerveja é maior, cerca de 20 dias.

3.7 PASTEURIZAÇÃO

A temperatura de referência de aquecimento para os cálculos de transferência de calor deve seguir a temperatura mínima capaz de inativar os possíveis microrganismos presentes na totalidade do volume da garrafa de cerveja. Para tanto, é necessário que se conheça o ponto mais frio da garrafa, garantindo que o mínimo de Unidades de Pasteurização (UP) seja atingida em todos os pontos do seu interior (FONTANA, 2009).

O ponto frio localiza-se a uma distância de 30 mm do fundo da garrafa, considerando seu eixo central. A garrafa utilizada para a modelagem é do Tipo A, em vidro pirex e com volume de 600ml, que atualmente é o tipo mais utilizado pelas cervejarias brasileiras (FONTANA, 2009). Como a única temperatura que importa é a do ponto frio, a temperatura no interior da garrafa pode ser considerada como sendo isotérmica e igual ao do ponto frio.

Na pasteurização as perdas e ganhos de energia térmica ocorrem através da garrafa de vidro, de maneira semelhante às etapas anteriores, alterando-se apenas as propriedades físicas do volume de controle (FONTANA, 2009). As garrafas são colocadas lado a lado em um tanque circular onde recebem inicialmente um banho de água quente e, após permacer por um determinado tempo nesse banho inicial, um banho de água gelada, a fim de resfriar a garrafa e interromper o processo de aquecimento, o que poderia comprometer a qualidade final da cerveja se atingir temperaturas muito altas.

Os trabalhos de FALLER (2017) e FONTANA (2009) são semelhantes na definição de UP. Utilizou-se a metodologia do primeiro autor com o parâmetro numérico principal da definição básica de UP (1,393) do segundo autor. Portanto, para definirmos a temperatura em que a cerveja deve chegar para que os microrganismos sejam inativados, utiliza-se a expressão mais geral de UP, comum na indústria de bebidas:

$$UP = \int_0^{t_p} 1,393^{T(t)-60} dt \quad (3.22)$$

onde T é a temperatura de pasteurização, variável de acordo com o tempo t , e o limite t_p é o tempo do processo de pasteurização. Para resolvermos a equação (3.22), consideramos primeiramente uma temperatura T_0 e aquecemos o sistema até uma temperatura de pasteurização T_p , a uma taxa de temperatura em relação ao tempo k_s (°C/min), na forma:

$$T = T_0 + k_s \cdot t \quad (3.23)$$

Para obter a quantidade de UPs apenas durante a etapa de aquecimento, isto é, até imediatamente antes de atingir 60°C, consideramos o tempo t_p apenas durante o aumento da temperatura. Desse modo:

$$t_p = \frac{T_p - T_0}{k_s} \quad (3.24)$$

Substituindo a equação (3.23) na equação (3.22), temos:

$$UP = \int_0^{t_p} 1,393^{T_0+(k_s \cdot t)-60} dt \quad (3.25)$$

Para simplificar a resolução da integral, isola-se os termos constantes do expoente da função:

$$UP = 1,393^{T_0-60} \cdot \int_0^{t_p} 1,393^{k_s \cdot t} dt \quad (3.26)$$

Finalmente resolvendo a equação (3.26), temos:

$$UP = 1,393^{T_0-60} \cdot \left[\frac{1,393^{k_s \cdot t_p} - 1}{k_s \cdot \ln(1,393)} \right] \quad (3.27)$$

Substituindo a equação (3.24) na equação anterior, multiplicando os termos e reorganizando, tem-se:

$$UP = \frac{1,393^{T_p-60} - 1,393^{T_0-60}}{k_s \cdot \ln(1,393)} \quad (3.28)$$

Esta formulação traduz o ganho de UPs onde há variação de temperatura, sendo a etapa de aquecimento e resfriamento da pasteurização. Para o caso onde a temperatura se mantém constante em todo o volume da garrafa, quando se atinge 60°C e mantém essa temperatura por certo tempo, a integral da equação (3.22) pode ser resolvida com os termos que nela constam, resultando em:

$$UP = t_p \cdot 1,393T_p^{-60} \quad (3.29)$$

Uma vez com o modelo das UPs, conhecemos exatamente as temperaturas iniciais e finais, assim como o tempo de cada banho, podendo substituí-las nas equações (3.12) para determinação do calor fornecido e da equação (3.13) para a determinação da energia térmica perdida:

$$Q_p = q_p \cdot t = \frac{T_s - T_\infty}{\frac{1}{h_e A_e} + \frac{\ln(r_e/r_i)}{2\pi k_{vidro} L} + \frac{1}{h_i A_i}} \cdot t \quad (3.30)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros utilizados em todas as etapas para a determinação da taxa de transferência de calor, assim como a determinação de variáveis cujo conhecimento é necessário, foram definidos com base na receita de uma cerveja Pilsen, o estilo mais consumido no mundo. Os ingredientes foram extraídos da receita denominada *Northern German Pilsner*, de BONJOUR (2004), e os quantitativos foram extraídos de WECONSULTORIA (2014).

A temperatura ambiente será considerada de 22°C, correspondente à média anual de temperatura da região onde se situa o município de Cerro Largo (INMET, 2018). Os ingredientes para a receita escolhida são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Receita utilizada na produção da cerveja (BONJOUR, 2004).

| Ingrediente | Massa (kg) |
|---|------------|
| Malte Pilsner | 222,00 |
| Lúpulo - Hallertauer Tradition (60 min) | 1,22 |
| Levedura - Bohemian Lager (Wyeast Labs #2124) | 0,51 |

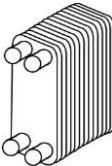
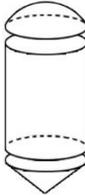
Fonte: adaptado de BONJOUR, 2004 e WECONSULTORIA, 2014.

Todos os tanques do processo de produção da cerveja são fabricados em inox 304, o mais utilizado no meio alimentício. Esse metal possui 2 mm de espessura e coeficiente de condutividade térmica (a 20°C) de 15 W/m · K (ROLMETAIS, 2019). A camada isolante, que fica no centro de duas chapas de inox, é normalmente de lã de rocha, a qual possui 5 mm de espessura e coeficiente condutivo de 0,04 W/m · K (PROTOLAB, s.d.).

A área da superfície será determinada para o tanque de cada etapa, sendo possível dividi-los em três partes: superior, central e inferior. A geometria utilizada em cada etapa é apresentada na Tabela 3, onde G é a geratriz do cone, h é a altura da porção cônica e L a altura da porção cilíndrica.

Tabela 3 – Geometria do tanque de acordo com a etapa de produção de cerveja e sua respectiva equação para o cálculo da área

| Etapa | Geometria | Área (A) |
|-------|-----------|----------|
|-------|-----------|----------|

| | | |
|------------------------|---|---|
| Mostura (I) |  | SUPERIOR: $G\pi(R + r)$ CENTRAL: $2\pi rL$ INFERIOR: $G\pi r$ |
| Filtração (II) |  | IDEM (I) |
| Fervura (III) |  | IDEM (I) |
| Resfriamento* (IV) |  | N/A |
| Fermentação (V) |  | SUPERIOR: $2\pi r h$ CENTRAL: $2\pi r L$ INFERIOR: $G\pi r$ |
| Maturação (VI) |  | IDEM (V) |
| Pasteurização (VII) |  | 0,046 m ² (FONTANA, 2009) |

*Variável de acordo com o trocador de calor utilizado. A Área deste equipamento não é considerado na modelagem do presente estudo.

N/A: Não se aplica.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao longo do processo, as propriedades do mosto referentes à produção de cerveja foram consideradas como sendo as da água, por esta representar a maior proporção na mistura (cerca de 85%) e justificar sua utilização, exceção feita à mostura, onde a proporção é de 17,2% de malte e 82,8% de água. Sendo o calor específico do malte de 2005 J/kgK (RIBEIRO, 2006) e o da água de 4186 J/kgK, podemos chegar em um calor específico do mosto de 3.711,8 J/kgK.

Tabela 4 – Condições de entrada e saída da temperatura (T), volume (V), viscosidade (μ) e calor específico (c_p) do mosto/cerveja de cada etapa do processo.

| Etapa | T (°C) | | V (L) | | μ (mPas) | c_p (J/kgK) |
|---------------|---------|-------|---------|-------|--------------|---------------|
| | Entrada | Saída | Entrada | Saída | | |
| Mostura | 22,0 | 76,0 | 1136 | 1136 | 0,58 | 4180 |
| Filtração | 76,0 | 75,5 | 2050 | 1176 | 0,39 | 4195 |
| Fervura | 75,5 | 99,8 | 1176 | 1000 | 0,32 | 4203 |
| Resfriamento | 99,8 | 12,0 | 1000 | 1000 | 0,49 | 4184 |
| Fermentação | 12,0 | 12,0 | 1000 | 1000 | 1,22 | 4189 |
| Maturação | 12,0 | 12,0 | 1000 | 1000 | 1,22 | 4189 |
| Pasteurização | 12,0 | 35,0 | 1000 | 1000 | 0,96 | 4181 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

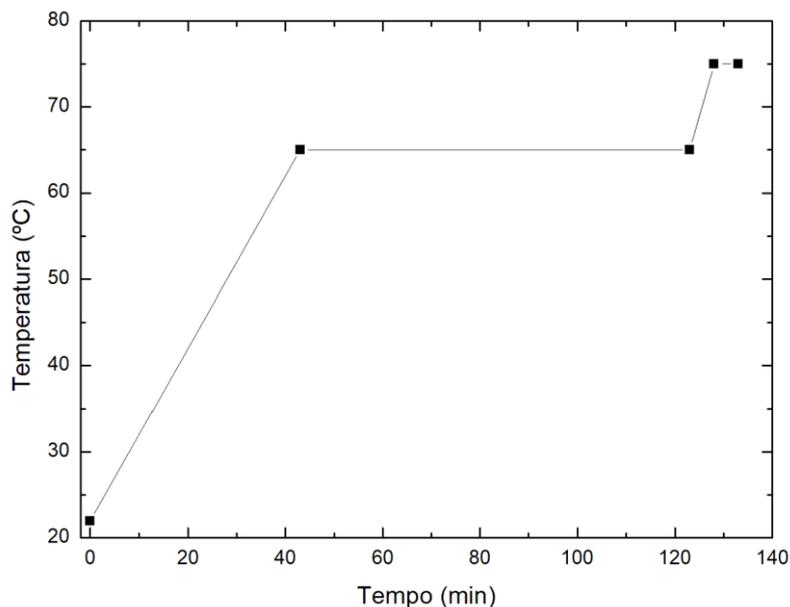
O tanque de mostura tem geometria cilindro-cônica e suas medidas foram determinadas com base na proporção padrão de 1:1,5 do diâmetro em relação à altura. Ao aumentar proporcionalmente esses valores, chegamos no volume requerido de acordo com a receita utilizada e o volume final de cerveja, que para esse estudo foi definido em 10hL (1000 L). Aplicando esses valores chegamos a um diâmetro de 0,947 m e altura de 1,420 m. A porção superior caracteriza-se como sendo um tronco de cone com 30° de inclinação e diâmetro da abertura superior de 0,185 m. O diâmetro da base do cone, comum à parte cilíndrica do tanque, é de 0,947 m. A parte inferior do tanque possui formato cônico com inclinação de 5°, de modo a garantir total escoamento do conteúdo interno. A área superficial da porção cônica superior é de 0,782 m², da parte cilíndrica central de 4,230 m² e da parte cônica inferior de 0,710 m², totalizando 5,718 m² de área de troca térmica interna. Para a área externa, adiciona-se a espessura das duas chapas de inox e a de isolante térmico, de modo que fica acrescida, neste caso, de 0,009 m em toda a extensão do tanque, resultando em uma área externa de 5,853 m².

Os ingredientes básicos da cerveja são água e malte moído. Inicialmente são inseridos 222,0 kg de malte, o que corresponde a um volume de 166,48 L ao se considerar um volume específico de 0,75L/kg, e 799,13 L de água, totalizando um volume de 965,61 L, justificando o uso de um tanque comercial de 1500 L .

Com os dados apresentados acima, aplicamos a equação (3.6) e (3.12) em quatro momentos distintos. O primeiro na fase de aquecimento do mosto, levando a mistura água-malte de 22 para 65°C em 43 min; a segunda mantém a temperatura em 65°C durante 80 min;

a terceira eleva a temperatura para 75°C em 5 min; e a quarta mantém a temperatura em 75°C por 10 min, conforme a figura 3.

Figura 3 – Rampa de temperatura da etapa de mostura



Fonte: Elaborado pelo autor.

A segunda etapa na produção da cerveja é a filtração do mosto, onde ocorre a separação do bagaço do mosto. As dimensões desse tanque diferem na proporção 1:2 de altura em relação ao diâmetro (ZEGLA, 2015). Como o tanque comercial deve ser de 2000 L, as dimensões serão de aproximadamente 1,49 para o diâmetro e 1,15 para a altura. A área foi determinada considerando a parte superior como sendo um tronco de cone com 30° de inclinação e a parte inferior com 5° de inclinação; essas medidas resultaram em uma área total interna de 9,28 m² e externa de 9,44 m². Durante esse processo mais 777,00 L de água são inseridos, com a finalidade de “lavar” os nutrientes residuais presentes no bagaço. O processo completo, já somando com a recirculação do mosto, deve durar cerca de 40 min, perdendo um total de 357,8 Wh de energia térmica.

De acordo com PALMER; PROZINSKI (2018) a vazão pode ser calculada como sendo 1/30 do volume total de mosto. Adaptando para o nosso problema, onde o volume total nessa etapa é de 1.742,5 L, então a vazão de filtração deverá de 58,1 L/min.

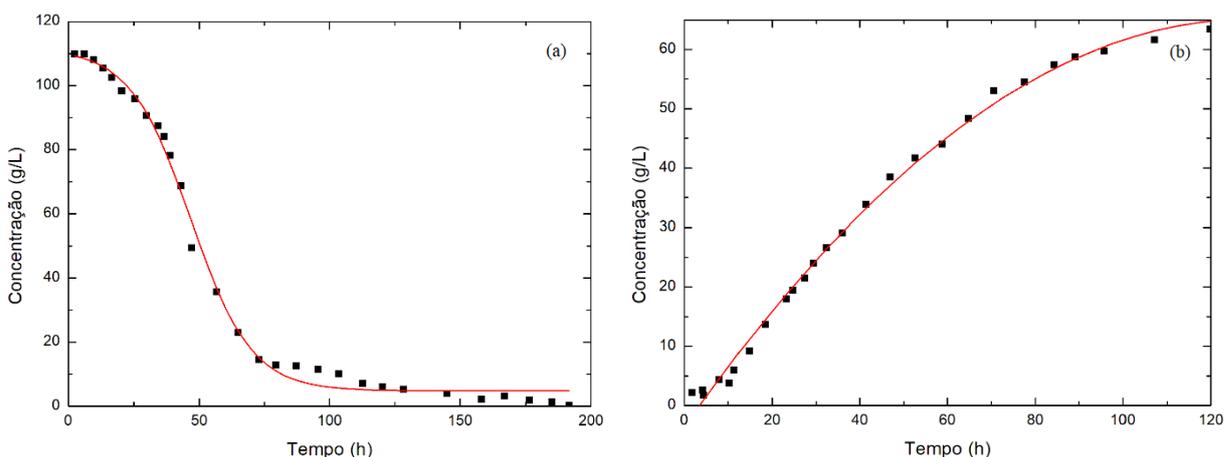
O tanque de fervura possui as mesmas dimensões comerciais que o tanque de mostura, de 1500 L, que deve ser maior que o volume de mosto para permitir a execução do *Whirlpool*. O volume inicial de mosto deve ser de 1176,50 L, sendo que durante a fervura cerca de 15% desse volume irá evaporar (WILSON; BOOER, 1978), restando 1000L de mosto.

Nesta etapa o mosto é aquecido da temperatura em que sai da etapa anterior, de 75,5°C, até a temperatura de ebulição durante 70 min. A pressão atmosférica local é, em média, de 1010 hPa (INMET, 2018). Consultando uma tabela termodinâmica encontramos, pela relação de pressão, que a temperatura de ebulição neste caso é de 99,85°C. Para esse aquecimento são inseridos 27.969,4 Wh e perdidos 2.283,0 Wh de energia térmica, de acordo com as equações 3.6, 3.12 e 3.18.

No resfriamento do mosto, a temperatura deve ser levada de 99,85°C para 12°C o mais rapidamente possível para evitar contaminações. A troca de energia térmica é realizada em um trocador de calor, de modo que para determinar a quantidade de calor cedida basta aplicar a equação (3.19). Desse modo, para uma vazão mássica de 0,55 kg/s, tempo de 30 min e utilizando o calor específico da água, temos um total de 102.247,6 Wh de energia térmica trocados durante o processo.

Na fermentação, a quantidade de energia térmica que atua no processo depende diretamente da atividade das leveduras que atuam sobre as moléculas de glicose presentes. Como o presente estudo é teórico, buscou-se na literatura um modelo experimental que explique o comportamento ao longo do tempo da porção de açúcares e do álcool etílico presentes no mosto, como mostra a Figura 4.

Figura 4 – Curva ajustada para dados experimentais: (a) açúcares totais e (b) álcool etílico



Adaptado de: ANDRÉS-TORO, 1998.

Os dados de ANDRÉS-TORO (1998) foram utilizados para gerar as curvas ajustadas aos pontos, para que assim tenhamos as equações de cada uma. Para o ajuste dos dados acerca da glicose utilizou-se uma curva do tipo sigmóide com o modelo de Boltzmann, que gerou a curva cuja equação é:

$$y_{glicose} = \frac{111,68 - 4,82}{1 + e^{(x-46,80)/11,68}} + 4,82 \quad (4.1)$$

Já para o álcool etílico, utilizou-se um modelo polinomial para gerar a curva de ajuste, resultando na equação (4.2).

$$y_{álcool} = -0,0041x^2 + 1,0604x - 3,6754 \quad (4.2)$$

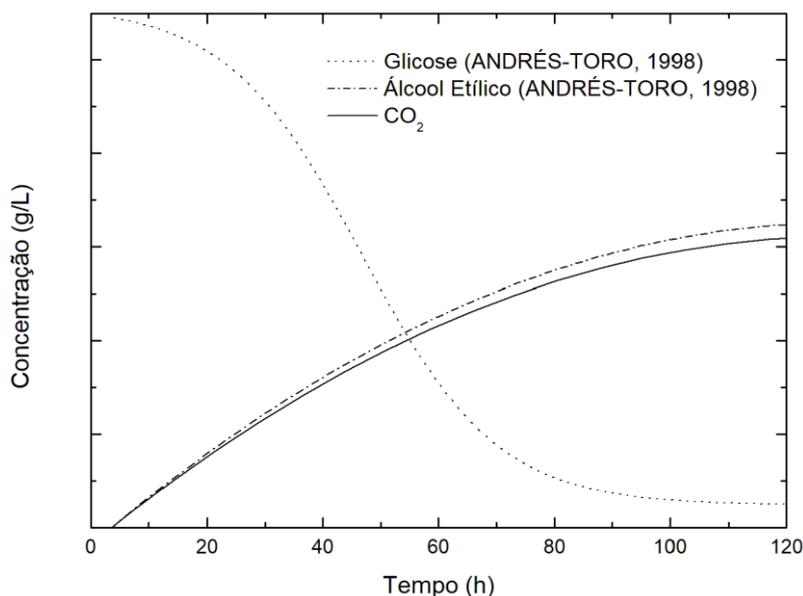
Com as duas equações geradas podemos agora obter as concentrações de glicose e de álcool etílico para um mesmo tempo (t), possibilitando o cálculo das concentrações do gás carbônico.

Utilizando a equação (3.21), podemos estabelecer uma relação direta entre a concentração de álcool etílico e de gás carbônico por meio de suas massas molares, que são de 46,07 g/mol e 44,01 g/mol, respectivamente. Fazendo esses cálculos para intervalos de tempo de 2 horas, é possível gerar dados suficientes para ajustá-los em uma equação de ajuste polinomial (equação (4.3)) e plotar uma curva.

$$y_{CO_2} = -0,0039x^2 + 1,0130x - 3,5111 \quad (4.3)$$

As curvas de glicose e álcool etílico, extraídos da bibliografia, e a curva para o dióxido de carbono, gerada a partir das anteriores, são apresentadas na figura 5.

Figura 5 – Curvas ajustadas para álcool etílico e glicose



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com todo o processo de fermentação modelado em relação à progressão da geração de gás carbônico, podemos substituir o termo $\frac{dCO_2}{dt}$ da equação (3.17) pela equação derivada da equação (4.3):

$$y_{CO_2}' = -0,0078x + 1,0130 \quad (4.4)$$

Levando em consideração que a fermentação ocorre em 120 horas, o volume de mosto é de 1000 L e a nossa equação derivada, obtemos um total de 7.066,7 Wh de energia térmica gerada durante a fermentação, quantidade de calor esta que deve ser retirada do tanque de fermentação, através de processos de resfriamento alcançados com o auxílio de energia elétrica, garantindo a estabilidade do processo.

Durante a maturação toda a conversão de glicose para álcool etílico já ocorreu. Nesta etapa ainda podem ser encontradas algumas leveduras residuais, mas com pouca ou nenhuma atividade. O foco do processo de maturação é a estabilização de sabores e decantação de qualquer partícula que por ventura ainda esteja presente na cerveja.

Nesta etapa da produção a única troca térmica que ocorre é em relação à perda de energia para o meio. Nesse sentido, consideramos que a temperatura do ambiente é de 22°C e que o tanque de maturação está refrigerado a 12°C, sob ação de motor de refrigeração. A área do tanque segue o mesmo raciocínio dos anteriores, o corpo é cilíndrico, a porção inferior é cônica com 5° de inclinação, porém a porção superior neste caso é uma calota esférica, assim como a da fermentação, resultando em uma área total de 5,64 m². O tempo de maturação é de 15 dias e os coeficientes de convecção interno e externo são 15,66 e 2,60 W/m²K, respectivamente. Substituindo esses valores na equação (3.13) obtemos um total de transferência de calor de 13.346,9 Wh.

Na pasteurização, com a cerveja já envasada nas garrafas de 600 ml, a temperatura inicial é igual a temperatura ambiente, de 12°C. Inicialmente, as garrafas passam a ser aquecidas até a temperatura de pasteurização de 60°C a uma taxa de 2°C/min, sob banho de água aquecida por asperção. Ao atingir a temperatura de pasteurização, deve-se mantê-la durante 13,5 min. Por fim, no banho frio, a temperatura final deve ser fixada em 35°C, como parâmetro de segurança para os trabalhadores que manuseiam as garrafas após o término do processo, com taxa de decréscimo de -1°C/min.

A partir dos parâmetros apresentados, utilizou-se a equação (3.28) para a determinação da quantidade de UPs durante o aquecimento e resfriamento das garrafas e a equação (3.29) para a fase estacionária, onde a temperatura de pasteurização é atingida; aplicando as

equações temos que as UPs foram de 1,52; 13,50 e 3,04 para a fase de aquecimento, de pasteurização e de resfriamento, respectivamente. Com isso, totaliza-se 18,01 UPs, valor que está dentro da faixa recomendada, de 15 a 25, por EBC (1995).

Para determinar a energia fornecida na pasteurização devemos saber que cada garrafa possui massa de cerveja de 0,6 kg, calor específico de 4186 J/kgK e as temperaturas de 60 e 12°C. Aplicando a equação (3.12) obtemos uma troca de energia térmica de 26,54 Wh por garrafa.

A energia perdida na pasteurização pode ser determinada sabendo-se que a temperatura inicial é de 60°C e final de 35°C, coeficiente convectivo da cerveja determinado por Grashof de 1,25 W/mK, uma área de 0,046m², coeficiente condutivo do vidro de 0,75 W/mK, raio externo de 0,0375m e interno de 0,0337m, tempo de 30 min e altura de 28cm.

O coeficiente convectivo do ar foi determinado pelo método de Nusselt. Para sua determinação levou-se em consideração que o diâmetro da garrafa é de 75mm, fluxo mássico (G) de 30m³/h e viscosidade do fluido (μ) de 1,002 mPas; resultando em um número de Reynolds (Re) de 389,68. O número de Prandtl é determinado com o calor específico da água e coeficiente condutivo de 0,61 W/mK, o que resulta em um Pr de 6,88.

Para o número de Nusselt o resultado foi de 48,48. Aplicando todos esses resultados na equação (3.17), temos um coeficiente convectivo do fluxo de água externo, do banho para aquecimento/resfriamento, de 37,86 W/m²K.

Substituindo os valores discutidos acima na equação (3.13), obtemos um total de energia térmica perdido para o meio de 0,34 Wh por garrafa.

Como o volume total de cerveja produzido é de 1000 L, podemos fazer uma relação direta da quantidade de energia térmica trocada com o número de garrafas necessárias para comportar o volume total. Considerando que cada garrafa comporta 600 mL, precisamos de um total de 1666 garrafas. Portanto, ignorando as influências que as garrafas da vizinhança poderiam acometer a vazão ou o modo que o banho ocorre na garrafa principal de análise, o fornecimento total de energia térmica na pasteurização foi de 44.115,1 Wh e a perda total foi de 472,5 Wh.

Os coeficientes convectivos interno e externo, condizentes ao mosto e ao ar, respectivamente, foram determinados pelo método de Grashof, de acordo com a equação (3.10) para a etapa da pasteurização. Alguns parâmetros estão listados na Tabela 4 para todas as etapas de produção. Para o coeficiente convectivo do mosto consideramos a viscosidade de

2,09 $mPa \cdot s$, o calor específico de 3.711,8 J/kgK e o coeficiente condutivo da água de 0,61 W/mK .

Aplicando a equação (3.10) chegamos em um coeficiente convectivo do mosto de 22,5 W/m^2K , conforme a Tabela 5. Para o ar as propriedades são: viscosidade de 0,0172 $mPa \cdot s$, calor específico de 1.004,16 J/kgK e coeficiente condutivo de 0,03 W/mK , resultando em um coeficiente convectivo para o ar de 3,8 W/m^2K .

Tabela 5 - Condições do material dos equipamentos. Coeficiente convectivo interno (h_i), coeficiente convectivo externo (h_e), área interna (A_i), área externa (A_e) e volume comercial do tanque (V).

| Etapa | h_i (W/m^2K) | h_e (W/m^2K) | A_i (m^2) | A_e (m^2) | V (L) |
|---------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|----------|
| Mostura | 23,7 | 0,9 | 5,72 | 5,85 | 1500 |
| Filtração | 25,8 | 1,1 | 9,28 | 9,44 | 2000 |
| Fervura | 38,3 | 1,2 | 7,51 | 7,66 | 1500 |
| Resfriamento | - | - | - | - | - |
| Fermentação | 10,8 | 0,7 | 5,64 | 5,78 | 1000 |
| Maturação | 10,8 | 0,7 | 5,64 | 5,78 | 1000 |
| Pasteurização | 0,5 | 37,8 | 0,046 | 0,046 | 0,6 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela a seguir são apresentados todos os ganhos e perdas térmicas ao longo das sete etapas de produção de cerveja.

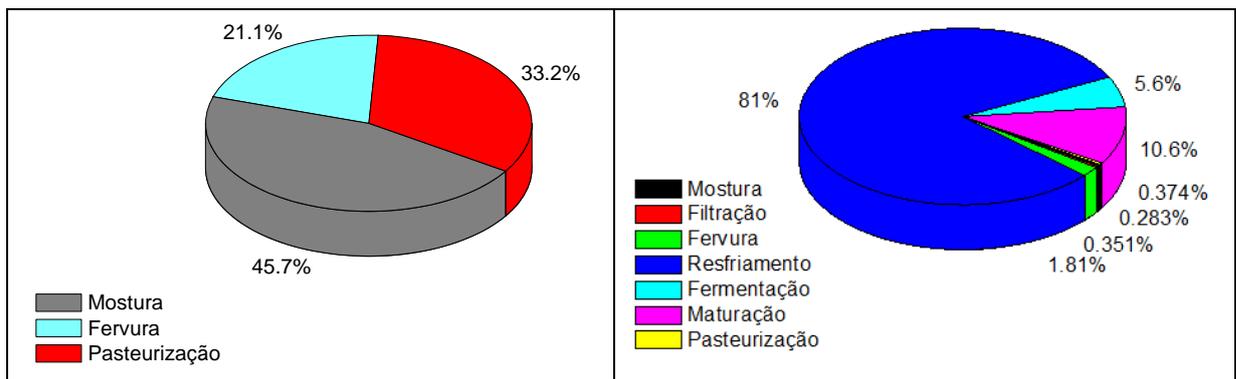
Tabela 6 – Balanço geral de ganhos e perdas energéticas

| Etapa | Ganho térmico (Wh) | Perda Térmica (Wh) | TOTAL |
|---------------|--------------------|--------------------|------------------|
| Mostura | 60.688,8 | 442,6 | 61.131,4 |
| Filtração | - | 357,8 | 357,8 |
| Fervura | 27.969,4 | 2.283,0 | 30.252,4 |
| Resfriamento | - | 102.247,6 | 102.247,6 |
| Fermentação | - | 7.066,7 | 7.066,7 |
| Maturação | - | 13.346,9 | 13.346,9 |
| Pasteurização | 44.115,1 | 472,5 | 44.587,6 |
| TOTAL | 132.773,3 | 126.217,1 | 258.990,4 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como esperado, o ganho térmico na mostura foi superior à fervura e à pasteurização. Já a troca térmica total mais expressiva foi a da etapa de resfriamento, também já esperado, uma vez que há interação intensa entre fluido quente e frio e está relacionado à maior diferença de temperatura. A pasteurização foi a segunda que mais trocou calor, neste caso possivelmente devido à maior diferença entre a temperatura inicial e final da cerveja, como ilustrado na Figura 7.

Figura 6 – Gráfico da quantificação da energia inserida (a) e perdida (b) pelo sistema



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÕES

A cerveja está ligada a grandes gastos energéticos durante as etapas de sua produção. Os ganhos e perdas energéticas podem ser descritos analiticamente por equações de transferência de calor, abrangendo a condução e a convecção. Cada etapa tem suas particularidades físicas. Uma vez que o mosto vai se modificando ao longo do processo, existem fatores que alteram os dados de entrada de cada problema.

A inserção de calor ocorre nas etapas de mostura, fervura e pasteurização, a quantidade de energia térmica que o sistema ganhou nessas etapas foi mais elevado na fervura. Por outro lado, a perda de energia térmica ocorre em todas as etapas, o resfriamento foi a que mais perdeu energia térmica, seguida da maturação e da fervura.

Nas etapas de produção de cerveja consideradas, a quantidade de calor total inserida no sistema foi de 132.773,3 Wh, enquanto que a soma das perdas energéticas é de 126.217,1 Wh. Isso pode significar que o sistema de isolamento térmico utilizado está contribuindo fortemente para a retenção da quantidade de calor que a cervejaria necessita. Esse é um ponto positivo, uma vez que o consumo energético poderia ser muito mais elevado se fossem utilizados equipamentos simples, sem isolante térmico.

Outro ponto que deve ser considerado são os valores numéricos dos parâmetros envolvidos na produção de cerveja, sobretudo os relacionados ao mosto e à cerveja final. Tem-se poucas referências na literatura para as propriedades termo físicas desse fluido, uma vez que em cada etapa do processo de fabricação, influenciadas também pelos ingredientes utilizados e o próprio modo de preparo, são diferentes.

Para trabalhos futuros propõe-se investigar detalhadamente as propriedades físicas do mosto e da cerveja, como forma de aproximar os resultados obtidos da realidade do processo. Outro ponto de influência para a mensuração mais realística de todo o processo é a utilização de dados extraídos de uma microcervejaria real para a quantificação dos parâmetros de produção, vazão, dimensões de equipamentos, etc.

REFERÊNCIAS

- ABOUMRAD, J. P. C. **Análise e Simulação das Operações de Mosturação e Fermentação no Processo de Produção de Cervejas**. 2015. 82f. Conclusão de Curso (TCC em Engenharia Química). Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.
- ANDRÉS-TORO, B., et al. A kinetic model for beer production under industrial operational conditions. **Mathematics and Computers in Simulation**, v.48, p.65-74, 1998.
- AZEVEDO, João Luís Toste de. **Apontamentos de Transferência de Calor com Mudança de Fase: Condensação e Ebulição**. Instituto Superior Técnico, 2000.
- BONJOUR, Fred. **Recipe It Takes 2: Northern German Pilsner**. 2004. Disponível em: < http://beersmith.com/Recipes2/recipe_288.htm>. Acesso em: 05 set 2019.
- CARRERA, Santiago Cadena. **Validação do processo cip como ferramenta para melhorar a qualidade e a produtividade: estudo de caso em microcervejaria**. 2015. 108f. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Alimentos). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- COLOMBIÉ, S. et al. Modeling of heat transfer in tanks during wine-making fermentation. **Food Control**, v. 18. p. 953–960, 2007.
- CORRÊA, Marcos Modolon. **Determinação da quantidade de calor requerida nos processo de brassagem e fervura de uma microcervejaria**. 2017. 54f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC em Engenharia Química). Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2017.
- DJEKIC, Ilija. et al. Cross-European initial survey on the use of mathematical models in food industry. **Journal of Food Engineering**. v. 261, p. 109–116, 2019.
- EBC Manual da boa prática. **Pasteurização de cerveja**, 1995.
- FALLER. Matemática da Pasteurização. 2017. Disponível: <<http://cervejafaller.com/2017/10/25/matematica-da-pasteurizacao/>>. Acesso em: 07 out. 2019.
- FONTANA, Daniel Horacio Giroti. **Elaboração de um modelo para o controle do processo de pasteurização em cerveja envasada (In-package)**. 2009. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- GERHARDT, Fernando Sidnei. **Desenvolvimento de um trocador de calor desmontável para o resfriamento do mosto de cerveja artesanal**. 2017. 104 f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC em Engenharia Mecânica). Centro Universitário Univates, Lajeado, 2017.
- INMET. **Temperatura média anual**. 2018. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/page&page=anomaliaTempMediaAnual>>. Acesso em: 29 out. 2019.
- MEERSCHAERT, Mark M. **Mathematical Modeling**. Oxford. Fourth Edition. 2013.

- MUSTER-SLAWITSCH, B. et al. The green brewery concept e Energy efficiency and the use of renewable energy sources in breweries. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, p. 2123-2134, 2011.
- OLAJIRE, A.A. The brewing industry and environmental challenges. **Journal of Cleaner Production**, 2012.
- PARCUNEV, I. et al. **Modeling of alcohol fermentation in brewing – some practical approaches**. 26th European Conference on Modelling and Simulation, 2012.
- PROLAB - Laboratório de Propriedades Termofísicas e Prototipação. **Tabela de condutividade térmica de materiais de construção**. s.d. Disponível em: <<http://www.protolab.com.br/Tabela-Condutividade-Material-Construcao.htm>>. Acesso em: 12 nov 2019.
- RIBEIRO, D. M et al. Thermal properties of wheat grain: Determination and modelling. v. 31, p. 462-467. **Ciência e agrotecnologia: Lavras**, 2007.
- ROLMETAIS. **Aços Inoxidáveis AISI 304**. Disponível em: < http://rolmetais.com/ficheiros/fichas_tecnicas/FT_23_ficha_tecnica_AISI_304_Site.docx.pdf >. Acesso em: 24 jul. 2019.
- ROSA, Natasha Aguiar; AFONSO, Júlio Carlos. A química da cerveja. v. 37, n. 2, p. 98-105. **Química e Sociedade: São Paulo**, 2015.
- SHELLER, L.; MICHEL, R.; FUNK, U. Efficient Use of Energy in the Brewhouse. **MBAA TQ**, v. 45, n. 3, p. 263–267, 2008.
- SEBRAE. **Microcervejarias**. s.d. Disponível em: < [http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/8818d2954be64fcda8628defef1f70f8/\\$File/7503.pdf](http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/8818d2954be64fcda8628defef1f70f8/$File/7503.pdf) >. Acesso em: 24 jul 2019.
- SRIDHAR, B.S.; SOMMER, K. Mathematical modeling of grinding kinetics of food particulates. **Food and Bioproducts Process**. v. 94, p. 392-397, 2014.
- STURM, B. et al. Opportunities and barriers for efficient energy use in a medium-sized brewery. **Applied Thermal Engineering**, v. 53, p. 397-404, 2013.
- TSCHOEKE, I. C. P. et al. Kinetic modelling of a brewery mashing: A multidimensional approach. **Food and Bioproducts Processing**. 2019.
- WECONSULTORIA. **Cerveja para caseiros: Receita para até 50 litros de cerveja**. Porto Alegre, 2014.
- WILSON, R. J. H.; BOOER, C. D. Control of the dimethyl sulphide content of beer by regulation of the copper boil. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 85. p. 144-148, 1978.
- ZOGLA, L. et al. Process benchmark for evaluation energy performance in breweries. **Energy Procedia**. v. 72, p. 202-208, 2015.