

Uso do simulador de processos no estudo da engenharia química: uma aplicação no processo de produção de cerveja**Using the process simulator in chemical engineering study: an application in the beer production process**

DOI:10.34117/bjdv5n8-039

Recebimento dos originais: 14/07/2019

Aceitação para publicação: 19/08/2019

Camilla Rocha de Oliveira Fontoura

Graduanda em Engenharia Química pela Universidade de Vassouras

Instituição: Universidade de Vassouras

Endereço: Av. Expedicionário Oswaldo de Almeida Ramos, nº 280 – Centro, Vassouras – RJ, Brasil

E-mail: camilla.rchfontoura@gmail.com

Sávio de Meneses Leite Asevedo

Graduando em Engenharia Química pela Universidade de Vassouras

Instituição: Universidade de Vassouras

Endereço: Av. Expedicionário Oswaldo de Almeida Ramos, nº 280 – Centro, Vassouras – RJ, Brasil

E-mail: saviomeneses@icloud.com

Miguel Rascado Fraguas Neto

Mestre em Química pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Instituição: Universidade de Vassouras

Endereço: Av. Expedicionário Oswaldo de Almeida Ramos, nº 280 – Centro, Vassouras – RJ, Brasil

E-mail: fraguas@uss.br

Lígia Marcondes Rodrigues dos Santos

Mestre em Ciências pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Instituição: Universidade de Vassouras

Endereço: Av. Expedicionário Oswaldo de Almeida Ramos, nº 280 – Centro, Vassouras – RJ, Brasil

E-mail: limarcondes@gmail.com

Cristiane de Souza Siqueira Pereira

Doutorado em Tecnologia em Processos Químicos e Bioquímicos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Instituição: Universidade de Vassouras

Endereço: Av. Expedicionário Oswaldo de Almeida Ramos, nº 280 – Centro, Vassouras – RJ, Brasil

E-mail: crispereirauss@gmail.com

RESUMO

De acordo com a legislação brasileira, a cerveja é definida como a bebida obtida pela fermentação alcoólica do mosto cervejeiro, oriundo do malte de cevada e água potável, por ação da levedura, com adição de lúpulo (BRASIL, 1997). É uma bebida de ampla produção e consumo, por isso, apresenta importância no mercado econômico nacional e mundial. Devido a isso, a Universidade de Vassouras adquiriu uma planta de produção que permite a fabricação de 70 L de mosto por batelada. A planta pode operar com uma produção máxima de 400 L/mês e eficiência de 60%, e é possível fabricar qualquer estilo de cerveja, trazendo uma grande flexibilidade e oportunidades de aprendizagem. Nesse sentido, foi elaborada uma simulação computacional visando o desenvolvimento de uma nova técnica de aprendizagem, que servirá para posteriores estudos do processo de cerveja nos cursos de graduação e pós-graduação da Universidade de Vassouras/RJ. O simulador de processos ProSimPlus® foi utilizado para a previsão do processo produtivo. Assim, para a simulação, consideraram-se os dados de entrada para a produção de uma cerveja tipo Pilsen puro malte sendo: 15 kg de malte, 54 L de água na tina de mostura, 25 L de água na clarificação, 48 g de lúpulo na fervura e 12 milhões de células de levedura mL^{-1} utilizado como inóculo para fermentação. O modelo do reator utilizado no processo foi o reator em batelada. A simulação do processo foi reproduzida de forma satisfatória obtendo-se um teor de 4,96% em álcool, de acordo com o range obtido experimentalmente e na literatura. Com o cenário simulado, estudos futuros podem ser realizados objetivando encontrar máximos rendimentos para o processo de diferentes tipos de cerveja.

Palavras-chave: simulação de processo, ProSimPlus, produção de cerveja

ABSTRACT

According to Brazilian legislation, beer is defined as the beverage obtained by the alcoholic fermentation of brewer wort from barley malt and potable water through yeast action, with the addition of hops (BRASIL, 1997). It is amply produced and consumed worldwide, and, thus, displays importance in both the Brazilian national and world economic market. Because of this, Vassouras University, located in Rio de Janeiro, Brazil, acquired a production plant that allow the production of 70 L of wort per batch. The plant can operate at a maximum output of 400 L/month and efficiency of 60% , and allows for the manufacturing of any style of beer, thus presenting great flexibility and learning opportunities. In this sense, a computational simulation was developed aiming the development of a new learning technique, which will serve for further beer process studies in undergraduate and postgraduate Vassouras University courses. The ProSimPlus® process simulator was used to predict the technical feasibility of the production process. The input data for the production simulation of a pure malt-type Pilsen beer were as follows: 15 kg of malt, 54 L of water in the vat, 25 L of water during the clarification step, 48 g of hop during the boil stage and 12 million yeast cells mL^{-1} used as the fermentation inoculum. The reactor model used in the process was a batch reactor. The process simulation was reproduced in a satisfactory way in the assessed simulations. The simulation yield was evaluated in relation to the experimental, obtaining a content of 3.7% in alcohol, according to the range obtained experimentally and in literature. Future studies can be performed with the simulated scenario, aiming at obtaining maximum yields for the production of different types of beer.

Key words: process simulation, ProSimPlus, beer production

1. INTRODUÇÃO

A cerveja, de acordo com a legislação brasileira, pode ser definida como a bebida obtida a partir da fermentação alcoólica do mosto cervejeiro oriundo do malte de cevada e água potável, por ação da levedura, com adição de lúpulo (BRASIL, 1997).

De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria Cervejeira, o Brasil aparece como Já somos o terceiro maior fabricante mundial, com 13,3 bilhões de litros produzidos, atrás, somente, da China (46 bilhões) e dos Estados Unidos (22,1 bilhões) (SINDICERV, 2019). Entretanto, em relação ao consumo, os números são mais moderados.

Dados da Organização Mundial da Saúde (OMS) de 2018 mostram que a cerveja é o segundo tipo mais consumido de bebida (34,3%), precedido por bebidas destiladas (44,8%). Considerando as Américas, a situação é inversa: a cerveja é a mais consumida (53,8%). No Brasil, a proporção de consumo corresponde à 62% de cerveja, 34% destilados e 3% de vinho (OMS, 2018).

Segundo a legislação brasileira (Decreto nº 2.314, de 4 de setembro de 1997, e Lei nº 8.918, art. 66, de 14 de julho de 1994), a cerveja é classificada mediante cinco itens, resumidos na Figura 1 (ROSA & AFONSO, 2015).

Figura 1 – Classificação das Cervejas no Brasil

1 - Pela fermentação	
Alta fermentação (12 – 15 °C)	
Baixa fermentação (5 – 10 °C)	
2 - Extrato primitivo (quantidade de substâncias dissolvidas (extrato) do mosto, que deu origem à cerveja – parágrafo 7º do artigo 64 do Decreto 2314)	
Leve	Acima de 5,0% até 10,5% em massa
Comum	Acima de 10,5% até 12,5% em massa
Extra	Acima de 12,5% até 14,0% em massa
Forte	Acima de 14,0% em massa
3 - Cor	
Clara	menos de 20 unidades EBC
Escura	20 ou mais unidades EBC
4 - Teor alcoólico	
Sem álcool	menos de 0,5% em volume de etanol
Alcoólica	igual ou maior que 0,5% em volume de etanol
5 - Teor de extrato (final)	
Baixo	Até 2% em massa
Médio	2% a 7% em massa
Alto	mais de 7% em massa

Fonte: ROSA & AFONSO (2015)

As cervejas *Lager* são as mais consumidas no cenário global e correspondem à 99% das vendas de cerveja no Brasil. Sua fermentação ocorre a baixas temperaturas e o teor alcoólico se apresenta geralmente entre 4 e 5%. A maior representante destas em consumo no Brasil é a Pilsen, com características de sabor leve, cor dourada e clara e teor alcoólico entre 3 e 5%, se adequando melhor ao clima local e correspondendo a 98% do total de consumo (ROSA & AFONSO, 2015).

1.1. PROCESSO PRODUTIVO CERVEJA

Em 1516, na Bavária, região meridional da Alemanha, foi estabelecida a *Reinheitsgebot* (Lei de Pureza da Cerveja), que definia cerveja como a bebida produzida exclusivamente por malte, lúpulo e água. Nessa época, ainda não conheciam a levedura, que atua como um agente de transformação bioquímica dos ingredientes via fermentação alcoólica (AQUARONE et al., 2001). Atualmente, admite-se a utilização de adjunto provedora de carboidratos simples, respeitando o teor máximo destes de 45%, ou outros ingredientes que melhorem o processo ou o sabor da bebida.

Ainda que existam variações de aromas e sabores entre as cervejas fabricadas pelas grandes indústrias e as cervejarias artesanais, estas seguem o mesmo processo de fabricação. Segundo Aquarone et al. (2001), o processo produtivo pode ser resumido em três fases: produção do mosto, processo fermentativo e acabamento da cerveja. A primeira etapa envolve desde a moagem do malte até a clarificação do mosto. Já a segunda é subdividida em fermentação e maturação. Por fim, o acabamento envolve filtração, carbonatação, pasteurização, dentre outras operações que podem ser realizadas.

O malte ingressa na linha de produção, após a moagem, e recebe água, sendo submetido a aquecimento, com controle de temperatura. Nessa etapa de mosturação, enzimas são liberadas para promover a hidrólise do amido, convertendo-o em açúcares menores. Definem-se algumas das principais características do produto final, como teor alcoólico, corpo, cor e até mesmo formação e retenção da espuma, todas determinadas de acordo com a quantidade e tipos de maltes empregados e/ou pelas temperaturas e tempos de processo (KUNZE, 2006).

Após a mosturação, o mosto é separado da parte sólida insolúvel, composto basicamente pela casca do malte, restos de parede celular e proteína coagulada. Estes irão compor a torta de filtro, pela qual o mosto será separado. Normalmente essa etapa é subdividida em duas: na primeira, a fração líquida atravessa o meio filtrante, compondo o

mosto primário; na segunda, realizam-se lavagens com água para recuperar o extrato retido no meio (AQUARONE et al., 2001).

À etapa final da fase de preparo do mosto, este segue para a operação de fervura, cuja função é esterilização do mosto de forma a eliminar possíveis microrganismos contaminantes, substâncias voláteis prejudiciais à qualidade da cerveja e que podem conferir sabores e aromas desagradáveis a mesma. Acarreta também na extração e isomerização dos alfas ácidos do lúpulo e estabilização do mosto sobre diversos aspectos como bioquímico, biológico, coloidal, além de conferir aroma e paladar (AQUARONE et al., 2001).

Após seu preparo, o mosto recebe a levedura e é colocado em tanques fermentadores. Nesse período, os açúcares do mosto são transformados em álcool e gás carbônico. Uma vez concluída a fermentação, a cerveja passa por um processo de maturação. Nesse período, sutis transformações ocorrem para aprimorar o sabor da cerveja. Ao fim dessa etapa, a cerveja está praticamente concluída, restando apenas um processo de filtragem, que visa eliminar partículas em suspensão (CERVIERI et al., 2014).

O envase pode ser feito em garrafas, latas ou barris. Nessa fase, a cerveja é submetida à pasteurização, a fim de garantir esterilidade microbiológica ao produto, o que resulta em maior prazo de validade. Quando não pasteurizada, a cerveja recebe o nome de chope (ou chopp), e geralmente é envasada em barris de alumínio. Em uma unidade de grande escala, o processo produtivo descrito pode ser concluído em até dez dias. Já em uma microcervejaria, ou na produção artesanal, em que se buscam características bastante particulares de aroma e sabor, o tempo de produção pode ultrapassar os vinte dias (CERVIERI et al., 2014).

Devido à complexidade bioquímica da cerveja e a gama de possibilidades de intervenções para criação de novos produtos, a simulação deste processo se faz interessante. Os estudos e formulações de projetos através da simulação auxiliam na redução de custos e visualização de melhorias para processos complexos (PROSIMPLUS, 2019).

1.2. O USO DE SIMULADORES DE PROCESSOS

Segundo Perlingeiro (2005), há duas atividades fundamentais para a Análise de Processos, sendo ambas baseadas em modelos matemáticos que representam o processo: o dimensionamento e a simulação. O primeiro visa o cálculo das dimensões principais dos equipamentos e do consumo de utilidades e insumos para atender o projeto e o segundo visa reproduzir um processo já dimensionado em outras condições visando otimizá-lo. Dessa

forma, é possível estudar as respostas do processo frente a mudanças sem, de fato, implementá-las inicialmente.

Por muitos anos, desenvolvimentos e melhorias na indústria química dependiam de uma abordagem por tentativa e erro. No entanto, os elevados custos de testes experimentais em escalas piloto e industrial, em termos de tempo e dinheiro, e as atuais capacidades de simulação colocaram grande pressão na modelagem e simulação de equipamentos e processos como ferramentas para análise, design e otimização sistemáticas de processos (MARTÍN, 2015).

Dessa forma, é de suma importância que o profissional tenha contato com ferramentas de simulação desde o início de sua formação. Como relatado por Rodrigues et al. (2006), o uso de tais ferramentas torna o aprendizado mais construtivo, dinâmico e transforma o aluno em agente de seu próprio aprendizado, visto a necessidade de iniciativa, experimentação de múltiplos cenários e avaliação de aprendizado com tais situações.

Tais softwares são ferramentas multidisciplinares e há uma variedade de opções no mercado (Aspen Plus, HYSYS.Process, EMSO, COCO, ProSimPlus), em versões pagas e softwares livres.

Os simuladores dividem-se em dois grandes grupos: sequenciais modulares e baseados em equações. O primeiro grupo fornece uma interface mais amigável ao usuário, entretanto torna seu uso mais restrito ao impor condições pelo modelo implementado. O segundo grupo, por sua vez, permite ao usuário trabalhar diretamente com o modelo matemático, flexibilizando o uso e adaptando às necessidades do usuário (RODRIGUES et al., 2006).

O presente trabalho fez uso do software ProSimPlus®, um simulador de processos desenvolvido por uma empresa de software de engenharia da Europa e empregado na melhoria de projetos, possibilitando cenários de otimização de eficiências das plantas industriais minimizando impactos ambientais. O simulador oferece mais de 70 operações unitárias, desde as mais simples até algumas mais específicas e está presente em 73 países, entre fábricas e nível acadêmico (PROSIMPLUS, 2019).

Visando o desenvolvimento de novas técnicas de aprendizagem e o aprimoramento destas, o objetivo do trabalho foi desenvolver uma simulação computacional do processo de produção de uma cerveja Pilsen produzida na Cervejaria Escola da Universidade de Vassouras. O cenário simulado servirá para posteriores estudos de otimização do processo dentro dos cursos de graduação e pós-graduação da Universidade de Vassouras/RJ.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Como informações de entrada da simulação consideraram-se os dados obtidos da planta piloto da Cervejaria Escola da Universidade de Vassouras (Figura 2), a partir de uma receita padrão de uma cerveja tipo Pilsen e dados de literatura a respeito da composição do malte e do lúpulo.

A unidade de produção é composta por moinho de rolos, uma brassagem e 2 tanques de fermentação de aço inox de 200 L de capacidade. A brassagem é composta por 3 tanques de aço inox ligada por tubulações, bombas e um trocador de calor que permitem a fabricação de 70 L de mosto por batelada. A planta pode operar com uma produção máxima de 400 L/mês e eficiência de 60%, e é possível fabricar qualquer estilo de cerveja, trazendo uma grande flexibilidade e oportunidades de aprendizagem.

Figura 2 - Unidade piloto da Cervejaria Escola da Universidade de Vassouras



Fonte: O autor

A formulação alimentada ao simulador foi composta por:

- 15 kg de malte;
- 54 litros de água na tina de mostura;
- 25 litros de água na clarificação;
- 48 gramas de lúpulo na fervura;
- Dosagem de 1 milhão de células/mL/°P de leveduras

A Tabela 1 apresenta as variáveis operacionais (temperatura e tempo) especificadas nas etapas do processo.

Tabela 1 – Especificações de temperatura e tempo da produção da cerveja tipo Pilsen

Etapa	Temperatura (°C)	Tempo
Mosturação	50 a 78	30 a 180 min
Clarificação	78 a 80	60 a 120 min
Fervura	100	60 a 90 min
Resfriamento	12 a 18	1 h
Fermentação	11 a 20	3 a 7 dias
Maturação	0	7 a 30 dias

Fonte: elaborado pelos autores

Para implementação da simulação, recorreu-se à literatura para obtenção de informações a respeito de características químicas e de processo que pudessem ser implementadas a fim de representar a produção cervejeira.

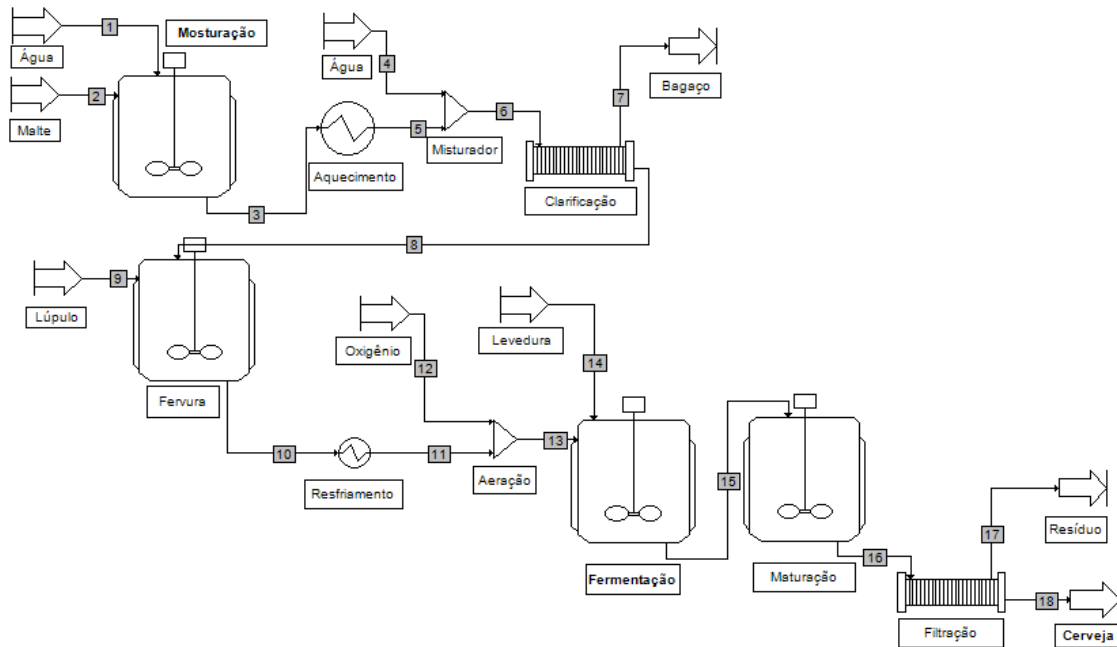
O malte é majoritariamente composto por amido, cuja proporção em base seca é de cerca de 58%. Essa proporção é ainda maior em alguns adjuntos (Briggs, 2004). Na etapa de mosturação, ocorre a conversão do amido em açúcares fermentescíveis. A medição do extrato formado consiste no percentual de sólidos no mosto ou na cerveja, sendo este composto por 92% de carboidratos. Destes, considerando um mosto com 12% (peso/volume) de extrato com 69,2 a 77,5% de açúcares fermentescíveis, 7,5 a 10% correspondem a monossacarídeos glicose e frutose, 3,3 a 4,2% a sacarose, 46,7 a 49,2% a maltose, 11,7 a 14,2% a maltotriose e o restante a dextrinas (SILVA, 2016). Os monossacarídeos são consumidos pelas leveduras em maior extensão e mais rapidamente, enquanto a maltotriose é fermentada lentamente e de forma incompleta. Dextrinas, por sua vez, são provenientes da degradação parcial do amido e não são fermentáveis (BRIGGS, 2004).

A simulação corresponde a uma representação simplificada do processo, adequando-se às limitações do software. As considerações serão descritas ao longo do detalhamento na discussão dos resultados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 representa o fluxograma de processo produtivo da cerveja tipo Pilsen elaborado utilizando o software ProSimPlus.

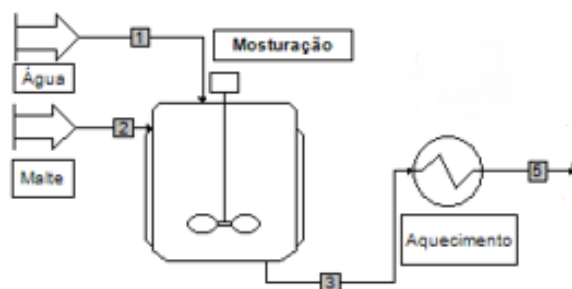
Figura 3 – Fluxograma do processo produtivo de cerveja



Fonte: elaborado pelos autores

A operação de mosturação (Figura 4) foi considerada em duas etapas. Na primeira, ocorre a alimentação em um reator tanque (*Reactor Tank*), sendo considerados 60 minutos a 67°C para conversão total do amido. A segunda etapa corresponde à mudança de temperatura (rampa unitária de temperatura), sendo o mosto aquecido por 5 minutos a 78°C. Essa etapa foi representada em um trocador de calor (*Cooler/Heater*).

Figura 4 – Representação da etapa de mosturação



Fonte: elaborado pelos autores

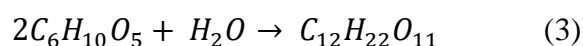
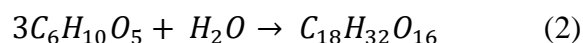
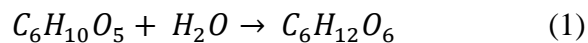
A Tabela 2 apresenta as características das correntes envolvidas nessa etapa.

Tabela 2 – Característica das correntes de entrada e saída da mosturação

	Corrente 1	Corrente 2	Corrente 3	Corrente 5
Água (kg/h)	54,00	0,00	53,59	53,59
Amido (kg/h)	0,00	9,00	0,00	0,00
Lignina (kg/h)	0,00	2,85	2,85	2,85
Celulose (kg/h)	0,00	2,25	2,25	2,25
Glicose (kg/h)	0,00	0,00	1,00	1,00
Sacarose (kg/h)	0,00	0,00	0,40	0,40
Dextrina (kg/h)	0,00	0,00	2,02	2,02
Maltotriose (kg/h)	0,00	0,00	1,33	1,33
Maltose (kg/h)	0,00	0,00	4,67	4,67
Vazão Total (kg/h)	54,00	14,10	68,10	68,10
Temperatura (°C)	67,00	25,00	67,00	78,00

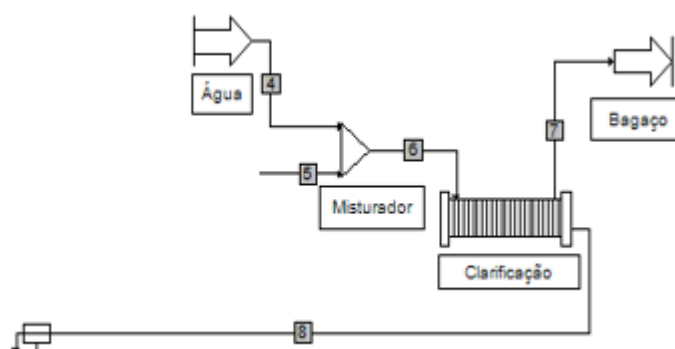
Fonte: elaborado pelos autores

As conversões consideradas para a etapa de mosturação correspondem às reações de hidrólise do amido, representadas pelas equações 1 a 3 a seguir.



Posteriormente, o mosto formado segue para a etapa de clarificação (Figura 5), representado por um filtro na simulação (*Plate Frame Filter*). Nessa etapa se faz necessária a adição de 25 litros de água para lavagem do bagaço, que atua como um meio filtrante para o mosto, aumentando o rendimento da extração de açúcares. O bagaço, mais importante subproduto da indústria cervejeira, foi representado de forma simplificada pela composição fibrosa existente na casca do malte, cujos principais componentes são hemicelulose (15-29%), celulose (16-21%) e lignina (19-28%). O conteúdo proteico corresponde de 24 – 39% (MARTINS, 2014). A Tabela 3 exibe as correntes de entrada e saída dessa etapa.

Figura 5 – Representação da etapa de clarificação



Fonte: elaborado pelos autores

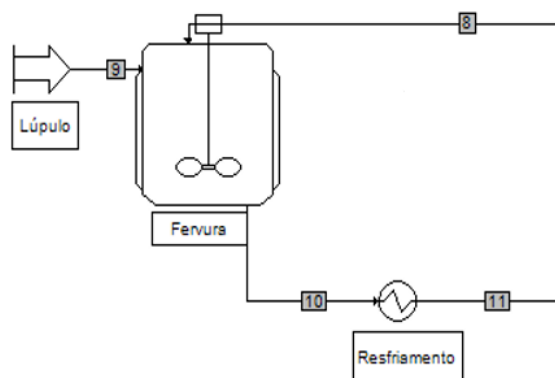
Tabela 3 – Característica das correntes de entrada e saída da clarificação

	Corrente 4	Corrente 6	Corrente 7	Corrente 8
Água (kg/h)	25,00	78,59	0,02	78,56
Maltotriose (kg/h)	0,00	1,33	3,86E-03	1,32
Maltose (kg/h)	0,00	4,67	1,36E-03	4,67
Glicose (kg/h)	0,00	1,00	2,91E-04	1,00
Sacarose (kg/h)	0,00	0,40	1,16E-04	0,40
Dextrina (kg/h)	0,00	2,02	5,87E-04	2,02
Lignina (kg/h)	0,00	2,85	2,85	0,00
Celulose (kg/h)	0,00	2,25	2,25	0,00
Vazão Total (kg/h)	25,00	93,10	5,13	87,97
Temperatura (°C)	25,00	74,70	74,70	74,70

Fonte: elaborado pelos autores

A etapa de fervura (Figura 6) foi conduzida em um reator tanque (*Reactor Tank*). Nesta, ocorre em conjunto a lupulagem, responsável pelo amargor e aroma da cerveja.

Figura 6 – Representação da etapa de fervura



Fonte: elaborado pelos autores

As substâncias relacionadas ao amargor característico do lúpulo são os alfa-ácidos. Representam um grupo de compostos quimicamente semelhantes, principais responsáveis por conferir o amargor durante o processo de fabricação de uma cerveja, a composição e a concentração destes compostos é variável de acordo com a variedade do produto (SPIES, 2018).

Em base seca, os alfa-ácidos correspondem de 2 a 15% em peso do lúpulo. Os principais representantes desse grupo são: adhumulona, cohumulona, humulona, prehumulona e posthumulona. O maior destaque vai para a primeira, que representa valores até 15% e a cohumulona e a humulona que apresentam concentrações de 20 a 50% do total de ácidos (SPIES, 2018).

O sabor amargo é obtido após a isomerização dos ácidos citados durante a fervura. A cinética de formação dos isômeros corresponde a uma reação de primeira ordem, em que, na faixa de temperatura de trabalho (90 a 100°), a taxa de formação do modelo cis é sempre superior ao modelo trans, devido à demanda de energia requerida para formação (SPIES, 2018).

Após a fervura, o mosto é resfriado a uma temperatura de 12°C e segue para a fermentação. Tabela 4 representa as características das correntes envolvidas nessa etapa.

Tabela 4 – Característica das correntes de entrada e saída da fervura

	Corrente 9	Corrente 10	Corrente 11
Água (kg/h)	0,00	78,56	78,56
Lignina (kg/h)	0,00	2,85E-06	2,85E-06
Celulose (kg/h)	0,00	2,25E-06	2,25E-06
Glicose (kg/h)	0,00	1,00	1,00
Sacarose (kg/h)	0,00	0,40	0,40
Dextrina (kg/h)	0,00	2,02	2,02
Maltotriose (kg/h)	0,00	1,32	1,32
Maltose (kg/h)	0,00	4,67	4,67
Humulona (kg/h)	1,88E-03	0,00	0,00
Cis-Humulona (kg/h)	0,00	1,88E-03	1,88E-03

Adhumulona (kg/h)	5,63E-04	0,00	0,00
Cis-Adhumulona (kg/h)	0,00	5,63E-04	5,63E-04
Cohumulona (kg/h)	5,63E-04	0,00	0,00
Cis-Cohumulona (kg/h)	0,00	5,63E-04	5,63E-04
Vazão Total (kg/h)	3,00E-03	87,98	87,98
Temperatura (°C)	25,00	100,00	12,00

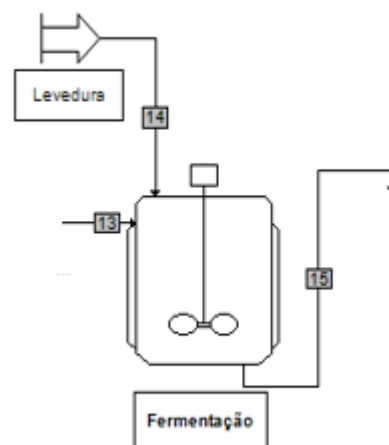
Fonte: elaborado pelos autores

Procedendo-se à etapa de fermentação, representou-se através de um misturador a aeração do mosto, visando à reprodução celular da levedura, tendo em vista que após a fervura a concentração de oxigênio no mosto é baixa (SPIES, 2018).

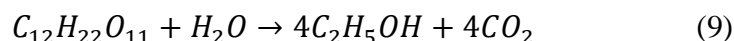
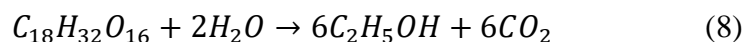
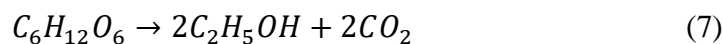
Para a fermentação e a maturação foram considerados reatores tanques separados, entretanto em unidades de fabricação estas etapas podem ser realizadas no mesmo equipamento.

A fermentação (Figura 7) tem como produto de interesse o álcool etílico formado, através de um processo anaeróbio de consumo de carboidratos fermentescíveis, como representado de forma simplificada pelas Equações 7 a 9.

Figura 7 – Representação da etapa de fermentação



Fonte: elaborado pelos autores



A equação de balanço de massa (Equação 10) para o processo de produção de cerveja foi desenvolvida por Carl Joseph Napoleão Balling, considerando as seguintes proporções para a cerveja acabada: 88-92% de água, 2,5-4% de álcool e de 5-8% de extrato seco (RIBEIRO, 2018).

$$2,0665g \text{ (Extrato)} = 1,000g \text{ (Álcool)} + 0,9565g \text{ CO}_2 + 0,11g \text{ (Levedura)} \quad (10)$$

Nessa etapa são gerados também subprodutos que conferem propriedades organolépticas à cerveja, como ésteres, ácidos e álcoois superiores, formados a partir da oxidação de álcoois e ácidos carboxílicos e reações de esterificação (ROSA & AFONSO, 2015). Para representação dessa formação, foi inserida no simulador a reação química de oxidação do etanol a ácido acético de acordo com a Equação 11. A Tabela 5 representa as correntes relativas ao fermentador.

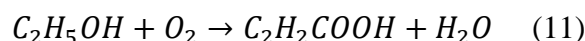


Tabela 5– Característica das correntes de entrada e saída do fermentador

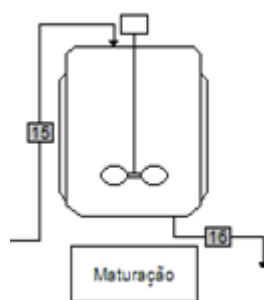
	Corrente 13	Corrente 14	Corrente 15
Água (kg/h)	0,00	78,56	78,30
Etanol (kg/h)	0,00	0,00	3,42
Dióxido de Carbono (kg/h)	0,00	0,00	3,45
Levedura (kg/h)	2,50E-02	0,00	0,04
Lignina (kg/h)	0,00	2,85E-06	2,85E-06
Celulose (kg/h)	0,00	2,25E-06	2,25E-06
Glicose (kg/h)	0,00	1,00	0,02

Sacarose (kg/h)	0,00	0,40	0,04
Dextrina (kg/h)	0,00	2,02	2,02
Maltotriose (kg/h)	0,00	1,32	0,16
Maltose (kg/h)	0,00	4,67	0,47
Cis-Humulona (kg/h)	0,00	1,88E-03	1,88E-03
Cis-Adhumulona (kg/h)	0,00	5,63E-04	5,63E-04
Cis-Cohumulona (kg/h)	0,00	5,63E-04	5,63E-04
Ácido Acético (kg/h)	0,00	0,00	0,19
Oxigênio (kg/h)	0,00	0,10	0,00
Vazão Total (kg/h)	2,50E-02	88,08	88,10
Temperatura (°C)	10,35	25,00	10,36

Fonte: elaborado pelos autores

O produto gerado segue para o tanque de maturação (Figura 8), onde será mantido à temperatura de 0°C por 15 dias, promovendo a sedimentação de partículas em suspensão.

Figura 8 – Representação da etapa de maturação



Fonte: elaborado pelos autores

Nesta fase, conforme relatado por Rosa & Afonso (2015), ocorrem mudanças sutis que promovem o aprimoramento do sabor da cerveja. Dentre essas transformações, pode-se citar fermentação secundária de carboidratos residuais, metabolização de substâncias indesejáveis – como acetaldeído, dicetonas vicinais e compostos sulfurados – e reações de esterificação entre os ácidos e os alcoóis produzidos na fermentação. Para representação dessa

transformação, tem-se a reação química expressa pela Equação 12. A Tabela 6 identifica as correntes envolvidas nessa etapa.

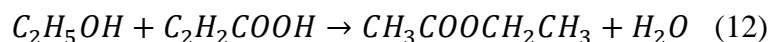


Tabela 6– Característica das correntes de entrada e saída da maturação

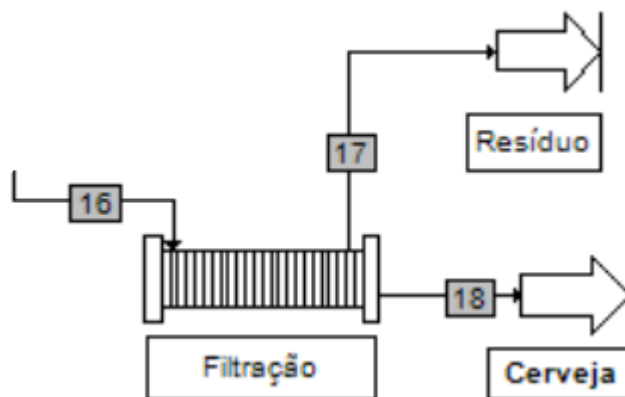
	Corrente 15	Corrente 16
Água (kg/h)	78,30	78,36
Etanol (kg/h)	3,42	3,28
Dióxido de Carbono (kg/h)	3,45	3,46
Levedura (kg/h)	0,04	0,04
Lignina (kg/h)	2,85E-06	2,85E-06
Celulose (kg/h)	2,25E-06	2,25E-06
Glicose (kg/h)	0,02	0,00
Sacarose (kg/h)	0,04	0,04
Dextrina (kg/h)	2,02	2,02
Maltotriose (kg/h)	0,16	0,16
Maltose (kg/h)	0,47	0,47
Cis-Humulona (kg/h)	1,88E-03	1,88E-03
Cis-Adhumulona (kg/h)	5,63E-04	5,63E-04
Cis-Cohumulona (kg/h)	5,63E-04	5,63E-04
Ácido Acético (kg/h)	0,19	0,00
Acetato de Etila (kg/h)	0,00	0,28
Vazão Total (kg/h)	88,10	88,10
Temperatura (°C)	10,36	0,00

Fonte: elaborado pelos autores

Por fim, representou-se no simulador uma etapa de filtração (Figura 9) responsável pela remoção de partículas ainda em suspensão, principalmente leveduras, proteínas e outras

substâncias, tornando a cerveja uma bebida de aspecto cristalino, sem alterar seu sabor. A terra diatomácea é muito utilizada como meio filtrante nas cervejarias. A Tabela 7 apresenta as características das correntes de entrada e saída desta etapa.

Figura 9 – Representação da etapa de filtração



Fonte: elaborado pelos autores

Tabela 7– Característica das correntes de entrada e saída da filtração

	Corrente 17	Corrente 18
Água (kg/h)	1,90E-04	78,36
Etanol (kg/h)	7,97E-06	3,28
Dióxido de Carbono (kg/h)	8,403-6	3,46
Levedura (kg/h)	4,26E-02	4,30E-04
Lignina (kg/h)	2,82E-06	2,85E-08
Celulose (kg/h)	2,23E-06	2,25E-08
Sacarose (kg/h)	9,69E-08	3,99E-02
Dextrina (kg/h)	4,90E-09	2,02
Maltotriose (kg/h)	3,82E-07	1,59E-01
Maltose (kg/h)	1,14E-06	4,67E-01
Cis-Humulona (kg/h)	4,55E-09	1,88E-03

Cis-Adhumulona (kg/h)	1,37E-09	5,63E-04
Cis-Cohumulona (kg/h)	1,37E-09	5,63E-04
Acetato de Etila (kg/h)	6,69E-07	2,75E-01
Vazão Total (kg/h)	4,28E-02	88,06
Temperatura (°C)	0	0

Fonte: elaborado pelos autores

Considerando a densidade do etanol como $0,789 \text{ g.cm}^{-3}$ e a densidade da cerveja Pilsen obtida em procedimento experimental de 1,009, o rendimento em álcool obtido ao final da simulação aponta um teor de 4,96% de etanol, de acordo com a faixa de trabalho para cervejas do tipo Pilsen. A fermentação não é completa, parando ao atingir uma faixa de 3% de açúcar. Na simulação, o teor de açúcar residual é de 3,04%.

O balanço de massa global do processo é representado pela Equação 13 em sua forma geral e a Tabela 8 representa os valores totais por componente ao longo do processo.

$$\text{Entradas} - \text{Saídas} + \text{Gerado} - \text{Consumido} = \text{Acúmulo} \quad (13)$$

Tabela 8 – Balanço de massa do processo simulado

	Entrada (kg/h)	Geração (kg/h)	Consumo (kg/h)	Saída (kg/h)
Acetato de etila	0,00	2,75E-01	0,00	2,75E-01
Ácido acético	0,00	1,88E-01	1,88E-01	0,00
Adhumulona	5,63E-04	0,00	5,63E-04	0,00
Água	79,00	5,60E-02	6,73E-01	78,38
Amido	9,00	0,00	9,00	0,00
Celulose	2,25	0,00	0,00	2,25
Cis-Adhumulona	0,00	2,25	0,00	2,25
Cis-Cohumulona	0,00	0,00	0,00	0,00
Cis-Humulona	0,00	0,00	0,00	0,00
Cohumulona	5,63E-04	0,00	5,63E-04	0,00

Dextrina	0,00	2,02	0,00	2,02
Dióxido de Carbono	0,00	3,46	0,00	3,46
Etanol	0,00	3,42	1,34E-01	3,28
Glicose	0,00	1,00	1,00	2,91E-04
Humulona	1,88E-03	0,00	1,88E-03	0,00
Levedura	2,50E-02	4,05E-01	0,00	4,30E-02
Lignina	2,85	0,00	0,00	2,85
Maltose	0,00	4,67	4,21	4,69E-01
Maltotriose	0,00	1,33	1,17	1,59E-01
Oxigênio	1,00E-01	0,00	1,00E-01	0,00
Sacarose	0,00	3,99E-01	3,59E-01	4,00E-02
Total	93,23	19,46	16,83	95,48

Considerando o sistema como um todo, o balanço de massa se resume de acordo com a Equação 14.

$$Acúmulo = 93,23 + 19,46 - 16,83 - 95,48 = 0,39 \text{ kg/h} \quad (14)$$

4. CONCLUSÃO

No presente estudo foi realizada uma simulação do processo produtivo de cerveja, utilizando o simulador de processo ProSimPlus. A justificativa do trabalho pauta-se na ausência do banco de dados do simulador, uma unidade de cervejaria e informações acerca do processo. Simulações deste tipo possibilitam uma representação próxima ao real dos processos, permitindo o desenvolvimento de novos projetos e melhor aprofundamento dos conteúdos ministrados em aula.

A simulação do processo foi reproduzida de forma satisfatória no simulador estudado. Foi avaliado o rendimento da simulação, frente ao rendimento experimental, obtendo um teor de 4,96% em álcool, de acordo com o range obtido experimentalmente e na literatura. Com o cenário simulado, estudos futuros podem ser realizados objetivando encontrar máximos rendimentos para o processo de diferentes tipos de cerveja.

Melhorias do projeto são sugeridas através do módulo Batch Reactor, que permite ao usuário o ajuste de parâmetros cinéticos e uma descrição mais completa do processo enzimático envolvido.

REFERÊNCIAS

AQUARONE, E. et al. *Biotechnology Industrial Vol. IV*. São Paulo: Edgard Blücher, 2001. P.91 -143.

BORTOLI, Daiane A. da S. et al. Leveduras e produção de cervejas-Revisão. *Bioenergia em Revista: Diálogos* (ISSN: 2236-9171), v. 3, n. 1, p. 45-58, 2013.

BRASIL. Decreto n. 2.314, de 04 de setembro de 1997. Regulamenta a Lei n. 8.918, de 14 de julho de 1994, que dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas. *Boletim IOB*, Brasília: Ministério da Agricultura, 1997.

BRIGGS, D. E.; BOULTON, C. A.; BROOKES, P. A.; STEVENS, R. *Brewing Science and Practice*. 1. ed. Nova Iorque: CRC Press LCC, 2004.

CASTILHO, M. A.; MAYMONE, A.; OLIVEIRA, L. Y. Q. Cervejaria artesanal: modelo de fábrica diferenciado com ênfase no baixo impacto ambiental a ser implantado no município de campo grande, ms. *Multitemas*, Campo Grande, MS, v. 21, n. 50, p. 303–326, 2016.

CERVIERI JÚNIOR, Osmar e colab. O setor de bebidas no Brasil. *BNDS Setorial*, n. 40, p. 93–130, 2014. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/3462/1/BS_40_O_setor_de_bebidas_no_Brasil_P.pdf>.

KUNZE, W. *Tecnología para cerveceros y malteros*. [S.l.]: Berlim: VLB, 2006. v. 1.

MARTÍN, Mariano Martín. *Introduction to Software for Chemical Engineers*. Boca Raton, CRC Press, 2015.

MARTINS, D. dos S. et al. Extração e caracterização de polpa celulósica do bagaço de malte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 2014, Natal. *Anais [...]*. [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: <http://www.abq.org.br/cbq/2014/trabalhos/13/5969-19007.html>. Acesso em: 2 jul. 2019.

MENEZES, Márcia Fernanda Teixeira de. Estudo comparativo entre cervejas Witbier: processo produtivo, aspectos físico-químicos e bioquímicos. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

OMS - Organização Mundial da Saúde. Global status report on alcohol and health 2018. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/274603/9789241565639-eng.pdf?ua=1>. Acesso em: 1 mar. 2019.

PERLINGEIRO, Carlos Augusto G. Engenharia de Processos: Análise, Simulação, Otimização e Síntese de Processos Químicos. Rio de Janeiro: Blucher, 2005.

PROSIMPLUS (2019). ProSimPlus Library (Standard versions + rate base option). Disponível em: http://www.prosim.net/bibliotheque/File/Brochures/Unit-Operations_ProSimPlus-Library-3-5-11.pdf. Acesso em: 01 jul. 2019.

RIBEIRO, Bernardo Dias et al. Microbiologia industrial, vol 2: Alimentos. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

RODRIGUES, R. et al. Ensino de cinética e cálculo de reatores químicos utilizando o simulador EMSO. In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Química. 2006. p. 3986-3993.

ROSA, Natasha Aguiar; AFONSO, Júlio Carlos. A química da cerveja. Revista Química Nova. São Paulo, v. 37, p. 98-105, 2015.

SANTOS, Lígia Marcondes Rodrigues dos et al. Influência da alta pressão hidrostática na sacarificação do mosto cervejeiro. 2016.

SINDICERV. Sindicerv, 2016. Sindicato Nacional das Indústrias de Cerveja. Disponível em: <http://www.sindicerv.com.br/mercado.php>. Acesso em: 01 jul. 2019.

SPIES, Jonathan Alberto. Estudo sobre a isomerização de alfa-ácidos de lúpulo. 2018.