

ESTUDO DA FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA EM CORRENTES DE GLICOSE E MALTOSA: UMA ABORDAGEM DIDÁTICA VIA SIMULAÇÃO NO DWSIM

Isabela S. S. Silva; Adam Tabacof; Cláudia F. S. Lirio

*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro – Campus Rio de Janeiro – Engenharia Química
isasabbatino@outlook.com*

Palavras-Chave: Simulador de processos, Software aberto, Cerveja

Introdução

A cerveja é estimada de compor 78% do total das bebidas alcoólicas consumidas mundialmente (HERNÁNDEZ-MORA, 2022). Além de sua importância econômica e social, a fabricação de cerveja apresenta grande potencial para o ensino de Engenharia Química, pois envolve uma sequência de operações unitárias que permite explorar, de forma aplicada, conceitos de termodinâmica, balanço de massa e energia, fenômenos de transporte e cinética de reações (AQUARONE *et al.*, 2001). A principal transformação química promovida durante o processo de produção da cerveja é a fermentação alcoólica, onde os açúcares presentes na cevada são convertidos em etanol.

O processo produtivo da cerveja é iniciado pela malteação, no qual o grão de cevada é submetido a um processo de germinação controlada a fim de que enzimas sejam desenvolvidas e o amido seja modificado. Essa etapa ocorre através da adição da água cervejeira e do malte moído na tina de mostura. No início do processo, a água pré-aquecida entra em contato com o malte moído liberando as enzimas α -amilase e β -amilase (JUNIOR *et al.* 2009). Segundo Rosa e Afonso (2015), a temperatura máxima nesta etapa é de 72°C para evitar a inativação dessas enzimas. Durante o tratamento enzimático ocorre a hidrólise do amido disponibilizando os açúcares como glicose, maltose e dextrinas, que são açúcares de cadeia longa não fermentáveis. Reinold (1997) apud Junior et al. (2009) afirma que dentre os carboidratos formados pela hidrólise do amido, apenas glicose, maltose e maltotriose são fermentados. De acordo com Briggs (2004), os monossacarídeos são consumidos pelas leveduras em maior extensão e mais rapidamente, já a maltotriose é fermentada lentamente e de forma incompleta, enquanto as dextrinas não são fermentáveis. No intuito de assegurar o controle preciso de temperatura (entre 10 e 25°C), os fermentadores são revestidos por uma camisa externa de fluido refrigerante (amônia ou etilenoglicol). Na sequência o mosto é clarificado através de uma operação de filtração, na qual a água é adicionada para lavagem do bagaço, o que também aumenta o rendimento da extração de açúcares. A adição de lúpulo acontece na etapa de fervura, agregando amargor e aroma à cerveja. Posteriormente o malte é resfriado antes de ser direcionado a fermentação. O processo de fermentação em cervejarias é desenvolvido através da conversão processada pela levedura de glicose, em etanol e gás carbônico, sob condições anaeróbicas (JUNIOR *et al.* 2009). Após a fermentação, a cerveja é resfriada a 0°C e acontece a separação da maior parte da levedura por decantação. A etapa seguinte é a de maturação, que pode levar de 6 a 30 dias, a depender da cervejaria. É durante a maturação que ocorrem transformações sutis que aprimoram o sabor da cerveja.

No tocante ao teor alcoólico a cerveja pode ser denominada de cerveja: sem álcool (teor alcoólico inferior a 0,5%), de baixo teor alcoólico (superior a 0,5% e inferior ou igual a 2%). O produto denominado tão somente de cerveja é aquele com teor alcoólico superior a 2% e inferior ou igual a 5,4% (Anuário da cerveja, 2025).

Uma das abordagens que vem ganhando destaque no contexto acadêmico é o uso de simuladores de processos. Softwares comerciais amplamente utilizados na indústria, como Aspen Plus e Aspen Hysys, apresentam licenças de alto custo, o que pode restringir seu acesso em instituições públicas de ensino. Nesse cenário, o DWSIM surge como alternativa promissora: trata-se de um simulador de código aberto, gratuito e com ampla gama de recursos, incluindo pacotes termodinâmicos, reatores, colunas de destilação e operações auxiliares (RODRIGUES, 2022). Estudos recentes (TANGSRIWONG *et al.*, 2020; CRUZ *et al.*, 2021) demonstram que os resultados obtidos com o DWSIM apresentam elevada concordância com os de softwares comerciais, com diferenças inferiores a 5% em diversas aplicações.

Beltrán (2021), por sua vez, realizou a simulação e modelagem de um processo de produção de cerveja artesanal à base de quinoa utilizando o software DWSIM. O autor comparou os resultados de balanços de massa obtidos pelo simulador àqueles calculados manualmente obtendo um erro percentual de 7,88%, concluindo que a simulação gerou um resultado em teor de etanol próximo ao esperado pelo balanço de massa. O teor alcoólico mássico igual a 5,34% foi encontrado para as simulações realizadas no DWSIM, o qual foi comparado ao valor de 5% obtido experimentalmente através do estudo da produção de cerveja orgânica a partir da quinoa.

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial do software DWSIM 9.0.4 na modelagem e simulação da etapa de fermentação no processo de produção de cerveja, visando à sua aplicação como ferramenta didática no ensino de Engenharia Química e Técnico em Química. Especificamente, buscou-se: (i) selecionar uma rota do processo cervejeiro; (ii) identificar as limitações do software para sua representação; (iii) realizar simulações computacionais da etapa de fermentação do processo selecionado.

Material e Métodos

Inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico abrangente sobre o processo de produção de cerveja, contemplando as operações unitárias envolvidas (mosturação, fermentação, filtração e maturação), os fundamentos bioquímicos da fermentação alcoólica e trabalhos científicos que utilizaram o DWSIM em simulações de bebidas fermentadas. Essa etapa permitiu a seleção de uma rota tecnológica e a definição de parâmetros de processo (temperatura, pressão, composição inicial) compatíveis com dados experimentais reportados na literatura.

Com base nessas informações foi desenvolvido o fluxograma para a simulação. Optou-se pelo pacote termodinâmico Non-Random Two Liquid (NRTL), adequado para sistemas líquido-líquido com comportamento não ideal, considerando a solubilidade de etanol em água e a formação de CO₂.

As correntes de entrada, representando a corrente de malte foram:

- caso a- 1000 kg/h de uma solução aquosa de glicose a 12% , 1 bar, 25°C;
- caso b- 1000 kg/h de uma solução aquosa (8,5% de maltose, 1,6% glicose), 1 bar, 25°C.

No caso (a), adotou-se uma base simples para iniciar as simulações. Já no caso (b) foi seguida a mesma formulação estudada por Fontoura *et al.* (2019), 54 kg/h de água para a etapa de mostura, 25 kg/h de água para a clarificação e 9 kg/h de amido – ajustando a composição da corrente de entrada para uma vazão mássica total de 1000 kg/h e distribuindo o amido entre maltose e glicose. Com intuito de melhor apresentar a realidade do consumo dos açúcares fermentáveis na produção da cerveja, assumiu-se a conversão total de glicose em etanol e CO₂ (para os dois casos). A conversão da maltose foi considerada parcial, de 90% em etanol e CO₂, considerando o resíduo da maltose reportado por Fontoura *et al.* (2019).

Resultados e Discussão

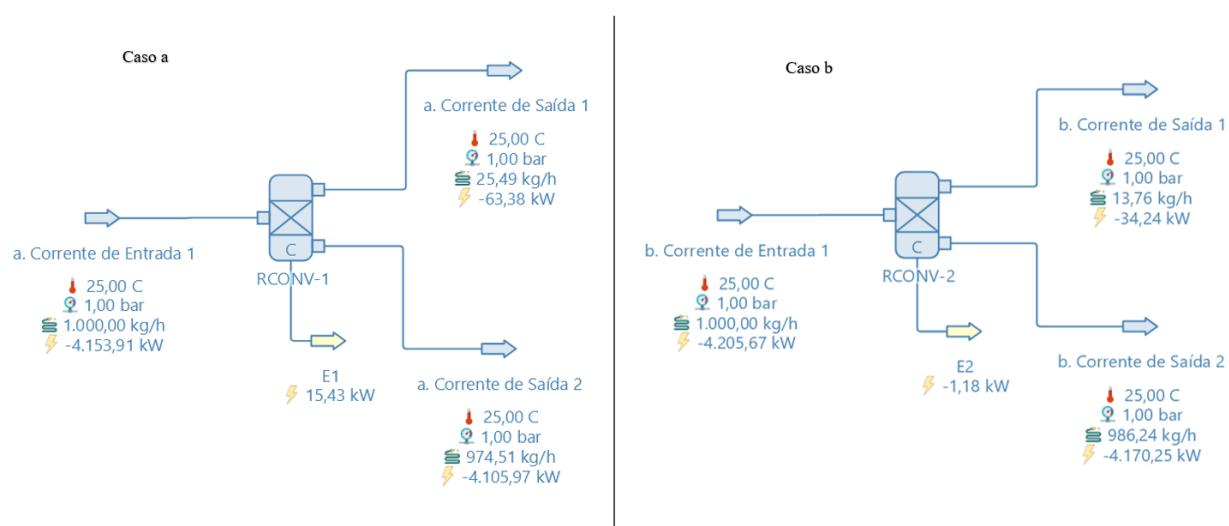
A princípio foram identificadas as limitações do DWSIM para a representação do processo produtivo de cerveja, que são:

- ausência das moléculas amido, celulose, lúpulo e compostos aromáticos em seu banco de dados termodinâmico, não havendo, assim, parâmetros confiáveis para a modelagem termodinâmica de tais moléculas, bem como a possibilidade de simulação das etapas de hidrólise e reações secundárias;
- incapacidade de representar cinética microbiana e crescimento de levedura, inviabilizando modelar a fermentação alcoólica como processo biológico, mas apenas de forma estequiométrica;
- inexistência de modelos dedicados a operações chaves na cervejaria como mosturação, filtração do mosto, fervura com lúpulo, fermentadores com agitação e transferência de massa gás-líquido, implicando na necessidade de aproximar-las por operações simplificadas, como: misturadores, *splitters* e *flash*;
- ser direcionado a simulação em estado estacionário, quando processos de cerveja são operados de forma dinâmica e em batelada.

A justificativa dessa distribuição em termos de composição advém do fato do malte ser majoritariamente composto por amido, em cerca de 58% em base seca (Briggs, 2004). Além disso, segundo Pino *et al.* (2018), na etapa de mosturação 58% do amido é convertido em açúcares fermentáveis (maltose e glicose), de forma que os 42% restantes são proteínas e dextrina. E após 1 hora de mosturação o amido é decomposto em 83% em maltose e 16% em glicose.

As Figura 1 exibem os fluxogramas simulados para os casos (a) e (b), respectivamente. Os resultados foram analisados por meio das variáveis de saída do DWSIM, incluindo composição mássica e molar das correntes de saída e fração de conversão da reação. Os dados da reação do DWSIM estão nas Tabelas 1 e 2 (caso a), e Tabelas 3 e 4 (caso b).

Figura 1 - Fluxogramas de simulação de para etapa de fermentação da glicose (caso a), e glicose e maltose (caso b)



Fonte: elaborada pelos autores

Tabela 1 - Dados da reação de conversão adaptado do display no DWSIM (caso a)

Componente	Peso Molar (g/mol)	ΔH_f (kJ/kg)	Incluído	A.C.	Coeficiente Estequiométrico
Etanol	46,0684	-5100,02	✓		+2
Água	18,0153	-13422,7			0
Dióxido de carbono	44,0095	-8941,48	✓		+2
Glicose	180,16	-5745	✓	✓	-1
Maltose	342,3	-5723,54			0

Fonte: elaborada pelos autores

Os seguintes dados de reação de conversão foram utilizados no DWSIM para o caso (a): calor de reação = - 221,9 MJ/kmol (25°C), usando glicose como componente base da conversão a 100%. A Tabela 3 exibe os resultados da simulação em percentuais, para o caso (a), indicando a produção de uma corrente líquida com teor alcoólico igual a 6,26% e uma corrente gasosa rica em dióxido de carbono após o consumo total da glicose. A corrente 1 representa a composição da fase gasosa, enquanto a corrente de saída 2 corresponde a fase líquida. A fermentação da glicose e maltose é expressa de forma simplificada pelas Equações 1 e 2.



Tabela 2 - características em % das correntes de entrada e saída do fermentador (caso a)

	a. Corrente de Entrada 1	a. Corrente de Saída 1	a. Corrente de Saída 2
Água (%)	88	1,27	90,27
Etanol (%)	0	1,27	6,26
Dióxido de Carbono (%)	0	97,46	3,47
Glicose (%)	12	0	0

Fonte: elaborada pelos autores

No caso (b) observa-se a fermentação da glicose (Equação 1) e da maltose (Equação 2). Os resultados da simulação estão exibidos pela Tabela 4. Através da Tabela 4 é possível

identificar uma corrente líquida com teor alcoólico igual a 4,99% e resíduo de 10% de maltose, além de uma corrente gasosa rica em dióxido de carbono. A conversão parcial de maltose foi feita com base na literatura (Briggs, 2004); Fontoura *et al.*, 2019). Ao simularem todo o processo produtivo no ProSimPlus, Fontoura *et al.* (2019) representaram a composição mais realista em todas as correntes, já que além do amido, representaram a lignina, celulose, sacarose, dextrina, maltotriose, dentre outros compostos mais complexos presentes no lúpulo. Após a fermentação, no entanto, os açúcares fermentáveis apresentaram um resíduo iguais a: 2% em glicose, 10% em sacarose, 12 % em maltotriose e 10 % em maltose.

Os seguintes dados de reação de conversão foram utilizados no DWSIM para o caso (b): calor de reação = - 312,858 MJ/kmol (25°C), usando maltose como componente base da conversão a 90%.

Tabela 3 - Dados da reação de conversão adaptado do display no DWSIM (caso b)

Componente	Peso Molar (g/mol)	ΔH_f (kJ/kg)	Incluído	A.C.	Coeficiente Estequiométrico
Etanol	46,0684	-5100,02	✓		+4
Água	18,0153	-13422,7	✓		-1
Dióxido de carbono	44,0095	-8941,48	✓		+4
Glicose	180,16	-5745			0
Maltose	342,3	-5723,54	✓	✓	-1

Fonte: elaborada pelos autores

Tabela 4 - características em % das correntes de entrada e saída do fermentador (caso b)

	b. Corrente de Entrada 1	b. Corrente de Saída 1	b. Corrente de Saída 2
Água (%)	89,9	1,28	90,73
Etanol (%)	0	1,05	4,99
Dióxido de Carbono (%)	0	97,67	3,42
Glicose (%)	1,6	0	0

Maltose (%)	8,5	8,26E-38	0,86
-------------	-----	----------	------

Fonte: elaborada pelos autores

Para aproximar o modelo computacional da realidade industrial, realizou-se uma análise complementar considerando a capacidade máxima de atuação das leveduras no processo fermentativo. De acordo com Nascimento e Fonseca (2015) a concentração máxima de biomassa é 1,518 kg/m³ em um meio cultivado com glicose. Para o caso (a), partindo-se desse valor e da densidade da solução de glicose utilizada na simulação (1074 kg/m³), estimou-se o volume útil do reator (0,819 m³). Através do produto entre o volume útil do reator e a concentração de leveduras calculou-se a massa total de leveduras presentes no meio, obtendo-se 1,33 kg de biomassa não convertida. Desta forma, do total de 61,05 kg/h de etanol inicialmente previsto, deve-se descontar a fração não convertida, que foi utilizada para o crescimento das próprias leveduras. O valor corrigido resulta em 59,72 kg/h de etanol efetivamente produzido, o que corresponde a 6,12%.

Já no caso (b), assumindo a densidade de uma solução aquosa a 8,5% de maltose e 1,6% de glicose (20°C) como aproximadamente 1035 kg/m³ e partindo-se do mesmo valor para a concentração máxima de biomassa (1,518 kg/m³), o volume útil estimado para o reator é de 0,85 m³. O valor obtido para a biomassa não convertida é igual a 1,33 kg. Assim, fazendo a correção do total de 49,22 kg/h de etanol inicialmente previsto, obtemos 47,89 kg de etanol produzido, correspondendo a 4,85%.

Os valores da concentração alcoólica em bebidas são representados em concentração volumétrica, sendo que nas simulações apresentadas as frações mássicas correspondem a frações volumétricas de ~7,97% (caso a) e ~6,36% (caso b). Como cervejas tipo pilsen tradicionalmente possuem teor volumétrico entre 4,2 e 5,6% (FULGÊNCIO *et al.* 2021), é necessário realizar ajustes de correção para superar de forma didática as limitações da ferramenta de simulação. O ajuste feito neste estudo é um exemplo de como promover a representação de maneira mais fiel o comportamento real do processo, uma vez que parte do substrato é direcionada ao crescimento celular e não à formação de etanol.

Do ponto de vista pedagógico, os resultados confirmam o potencial do DWSIM como ferramenta de ensino, permitindo explorar conceitos fundamentais como balanço de massa, comportamento de fases e estequiometria de reações bioquímicas em um ambiente virtual seguro. A comparação entre os dois cenários facilita a visualização do impacto da conversão na composição das correntes e na eficiência do processo, tornando o aprendizado mais interativo e aplicado.

Apesar das simplificações adotadas, a modelagem foi suficiente para validar o uso do software no estudo do processo fermentativo e forneceu uma base para etapas futuras. Com isso, pretende-se ampliar a modelagem para incluir as etapas de mosturação, clarificação e acabamento do produto, bem como avaliar o impacto de variáveis operacionais como temperatura, pH e concentração de substrato no rendimento da fermentação.

Conclusões

A realização da simulação do processo fermentativo no DWSIM proporcionou uma compreensão aprofundada dos princípios fundamentais da conversão de glicose em etanol e dióxido de carbono, evidenciando tanto o potencial quanto às limitações de uma abordagem computacional simplificada. Embora o modelo não tenha permitido a inclusão de moléculas complexas presentes no processo cervejeiro real, como amido, celulose, proteínas e compostos do lúpulo, a escolha de focar na fermentação direta revelou-se adequada para atender aos objetivos da pesquisa, possibilitando a análise de parâmetros críticos como a conversão de

substrato e a produção de produtos. Os resultados obtidos mostraram-se coerentes com a estequiometria teórica da reação, reforçando a confiabilidade do modelo e confirmando que, mesmo em condições simplificadas, é possível reproduzir com precisão a dinâmica fundamental da fermentação. Paralelamente, o estudo da capacidade máxima de leveduras ofereceu uma compreensão importante sobre a influência do crescimento celular na eficiência do processo, demonstrando que a biomassa limitada interfere diretamente na produção de etanol. Assim, a atividade consolidou o DWSIM como uma ferramenta didática e de pesquisa eficiente, fornecendo uma base sólida para o desenvolvimento de modelos mais complexos, que incorporem pacotes termodinâmicos avançados e espécies químicas adicionais, de modo a aproximar ainda mais a simulação da realidade industrial e fomentar o aprimoramento contínuo do estudo de processos bioquímicos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e ao IFRJ pelo apoio financeiro.

Referências

- AQUARONE, E.; BORZANI, W.; SCHMIDELL NETTO, W.; LIMA, U. de A. **Biotecnologia industrial: biotecnologia na produção de alimentos.** v. 4. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.
- BELTRÁN, C. X. C. **Simulación y modelamiento de un proceso de producción de cerveza artesanal a base de quinua (Chenopodium quinoa).** 2021. Trabalho de titulação (Engenharia Química) – Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2021.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Anuário da Cerveja 2025: ano de referência 2024.** 1. ed. Brasília: MAPA, 2025.
- BRIGGS, D. E.; BOULTON, C. A.; BROOKES, P. A.; STEVENS, R., **Brewing Science and Practice.** 1. ed. Nova Iorque: CRC Press LCC, 2004.
- CRUZ, D.M.B.; SILVA, C.M.C.B.; MENEZES, J.D.S.; MAGALHÃES, A.M.C.; FARO, F.S. Otimização do processo de produção de biodiesel e glicerol a partir do óleo de palma e soja por modelagem no software dwsim. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7:8, 2021.
- DWSIM. About DWSIM. Disponível em: <https://dwsim.org/>. Acesso em: 12 set. 2025.
- FONTOURA, C. R. de O.; ASEVEDO, S. de M. L.; FRAGUAS NETO, M. R.; SANTOS, L. M. R. dos; PEREIRA, C. de S. S. Uso do simulador de processos no estudo da engenharia química: uma aplicação no processo de produção de cerveja. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 5, n. 8, p. 11724–11745, ago. 2019. DOI: 10.34117/bjdv5n8-039.
- FULGÊNCIO, A. C. da C.; RESENDE, G. A. P.; TEIXEIRA, M. C. F.; BOTELHO, B. G.; SENA, M. M. Determination of alcohol content in beers of different styles based on portable near-infrared spectroscopy and multivariate calibration. **Food Analytical Methods**, [S. l.], v. 14, p. 1–11, 2021.
- HERNÁNDEZ-MORA, Y. N., VERDE-CALVO, J. R., MALPICA-SÁNCHEZ, F. P., & ESCALONA-BUENDÍA, H. B., Consumer Studies: Beyond Acceptability—A Case Study with Beer. **Beverages**, v. 8, 80, 2022.
- JUNIOR, Amaro A. D.; VIEIRA, Antonia G.; FERREIRA, Taciano P.. Processo de Produção de Cerveja. **Revista Processos Químicos: Resumos Estendidos 2**, Anápolis, p. 61–71, jul. 2009.
- NASCIMENTO, V. M.; FONSECA, G. G. Avaliação fisiológica do crescimento da *Saccharomyces cerevisiae* CAT-1 em diferentes fontes de carbono a 30 e 37°C. In: **Congresso de Iniciação Científica da UFGD**, 7., 2015, Dourados. Anais [...]. Dourados: UFGD, 2015.
- PINO, S., GALLARDO, I. y PÉREZ, M., 2018. Estudio experimental de las etapas de maceración y fermentación para la obtención de cerveza a partir de malta de Sorgo. **Revista Centro Azúcar** [en línea], v. 45, n. 3, pp. 52-64, 2018.
- RODRIGUES, R. Uso do simulador EMSO em aulas de operações unitárias para projeto de trocadores de calor e evaporadores. In: **Process Systems Engineering Brazil– PSE-BR**, 2022, Paraná. Anais...Paraná: Universidade Federal do Paraná, 2022.



64º Congresso Brasileiro de Química
04 a 07 de novembro de 2025
Belo Horizonte - MG

ROSA, N. A.; AFONSO, J. C. A química da cerveja. **Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 37, n. 2, p. 98–105, maio 2015. Sociedade Brasileira de Química. DOI: 10.5935/0104-8899.20150030.

TANGSRIWONG, K.; LAPCHIT, P.; KITTJUNGJIT, T., KLAMRASSAMEE, T. SUKJAI, Y.; LAOONUAL, Y. Modelling of chemical processes using commercial and open-source software: A comparison between Aspen Plus and DWSIM. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 463, 2020, Bangkok. Anais...Bangkok: 2020.