

APROVEITAMENTO EFICIENTE DO BAGAÇO DE MALTE UTILIZANDO SECADOR SOLAR

Ana Luiza Cassia Bragança¹ (IC), Maisa Tonon Bitti Perazzini (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Bagaço de malte. Eficiência energética. Modelagem matemática.

Introdução

O Brasil se apresenta, atualmente, sendo o terceiro maior produtor cervejeiro do mundo, possui o mais importante mercado sul-americano de cerveja e um dos mercados mais relevantes na economia brasileira (SINDICERV, 2022). Entretanto, apesar do sucesso e do grande poder econômico, existe uma questão socioambiental por trás da produção cervejeira: a quantidade de resíduos gerados no processo. O bagaço de malte é o principal subproduto do processo cervejeiro, sendo originado na etapa de mosturação e correspondendo a 85% de todos resíduos gerados (MUSSATTO et al., 2006). Borel (2018), avaliou que a produção de 2016 gerou 5,88 milhões de toneladas de bagaço de malte, uma vez que cada litro de cerveja corresponde a 0,03 kg de bagaço de malte seco (BECIDAN et al., 2007). Segundo a Associação Brasileira da Indústria da Cerveja (CervBrasil), a produção foi de aproximadamente 14 bilhões de litros de cerveja em 2017, o que corresponde a 420.000 toneladas de resíduo seco (BOREL, 2018). Atualmente, a maior parte deste montante é destinada à alimentação animal (bovinos, suínos, aves e caprinos). Porém este uso tem apresentado problemas para os produtores rurais, visto que, a contaminação deste material por microrganismos tem ocasionado enfermidades em bovinos, como intoxicação por fungos e micotoxinas, acidose ruminal e botulismo (BRUST et al., 2015). Para longas distâncias, o transporte do bagaço de malte se torna altamente suscetível à contaminação microbiológica, devido à elevada umidade e carga orgânica. O tratamento térmico por meio da secagem pode ser utilizado como alternativa para diminuir a umidade e agregar valor a esse subproduto da indústria cervejeira. Diversos estudos têm verificado a utilização do bagaço de malte como biomassa para bioenergia. VIEIRA, 2019, realizou o estudo de pirólise catalítica de bagaço de malte em leito fixo. Cordeiro, 2011 atestou a viabilidade econômica do bagaço de malte para fins energéticos. Como a umidade diminui o potencial energético do resíduo, o processo de secagem torna-se uma etapa imprescindível para a utilização adequada do bagaço de malte como biomassa para bioenergia.

Industrialmente, a secagem é uma das operações unitárias mais utilizadas, tendo como finalidade eliminar um líquido volátil por meio da evaporação, através do fornecimento de uma fonte de calor. Através da secagem, diversos produtos ganham uma vida útil maior, além de facilitar o transporte e a comercialização. Entretanto, a secagem requer uma grande quantidade de energia para a operação, e ainda são necessários muitos estudos a fim de otimizar o processo e garantir a viabilidade econômica do produto final, estudando os fenômenos de transferência de calor e massa de forma a relacionar de maneira qualificada o tipo de secador com o material a ser seco. Sendo assim, levando em consideração pontos econômicos e ambientais, o secador solar vem se destacando por ser um processo tecnologicamente simples e não poluente, que utiliza uma fonte de energia renovável, abundante, livre e que não pode ser monopolizada, permitindo obter produtos com qualidade desejada e com mínimo impacto ambiental. Ademais, apesar de a proposta inicial do trabalho ser trabalhar com um secador solar, não foi possível por conta do tempo, o secador acabou não ficando pronto e para que o projeto não ficasse estagnado, foi elaborado uma outra vertente para realizar o aproveitamento de bagaço de malte, através do secador rotativo, visto que este é o mais utilizado para secagem de biomassa. O presente trabalho teve como objetivo realizar a secagem estacionária do resíduo, bem como realizar a modelagem matemática utilizando o software MatLab. Tendo em vista auxiliar na gestão ambiental correta do bagaço de malte e contribuir com a tecnologia de secagem.

Metodologia

Neste trabalho, foi utilizado um modelo matemático constituído de um conjunto de equações diferenciais de balanço de massa e energia para as fases sólida e gasosa e uma série de equações algébricas que descrevem a taxa de secagem, o tempo de residência e a transferência de calor no secador rotativo. Sendo a umidade de equilíbrio um parâmetro importante para a utilização da taxa de secagem, foi necessário levantar as isotermas de equilíbrio experimentalmente. Foi realizado o experimento com o bagaço de malte em

estufa a 40°C e 60°C utilizando o método estático. Foram utilizadas onze amostras com diferentes concentrações de ácido sulfúrico para cada temperatura avaliada. Para a realização do procedimento experimental, foi elaborado um aparato utilizando um pote de vidro, um copo de plástico de 150 ml, um gancho e fita adesiva, e dessa forma o bagaço de malte “in natura” foi inserido dentro do copo de plástico e no pote de vidro foi adicionado ácido sulfúrico de diferentes concentrações, cujos valores são apresentados na Tabela (1).

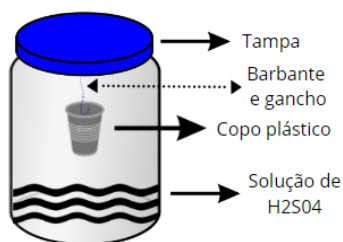
Tabela 1—Valores de atividade de água para as concentrações de H₂SO₄ com as temperaturas estudadas

Conc. H ₂ SO ₄	40°C	60°C
20%	0,878	0,890
25%	0,824	0,830
30%	0,753	0,776
35%	0,674	0,682
40%	0,574	0,584
45%	0,470	0,488
50%	0,366	0,388
55%	0,267	0,287
60%	0,178	0,199
65%	0,102	0,124
70%	0,049	0,061

Fonte: Perry e Green (1997)

Um desenho esquemático do aparato experimental pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Aparato experimental



Fonte: Pessoal (2022)

A duração dos experimentos foi, em média, de aproximadamente 35 dias, período no qual se verificou que a massa das amostras deixou de variar significativamente. Em seguida, as amostras foram levadas a uma estufa a 105 °C por um período de 14 h para a determinação da massa seca e cálculo da umidade de equilíbrio. A umidade de equilíbrio foi utilizada na Equação (1) de taxa de secagem:

$$R_w = \beta(X - X_{eq}) \quad (1)$$

Os dados da constante cinética foram obtidos por trabalhos desenvolvidos em laboratório em secador de leito fixo e camada delgada (Gerald, 2022).

O sistema de equações diferenciais provenientes de balanços de massa e energia entre a biomassa e o ar é apresentado nas Equações (2) a (5).

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{R_w H}{G_s} \quad (2)$$

$$\frac{dY}{dt} = \frac{R_w H}{G_f} \quad (3)$$

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{Q + R_w H C_{pl} T_s - R_w H [\lambda + C_{pv} (T_f - T_s)]}{G_s (C_{ps} + X C_{pl})} \quad (4)$$

$$\frac{dT_f}{dt} = -\frac{Q + R_w H (\lambda + C_{pv} T_f)}{G_g (C_{pf} + Y C_{pv})} \quad (5)$$

Sendo,

R_w : Taxa de secagem [h⁻¹]

H: Hold up (carregamento) [kg]

G_s : Vazão mássica de sólidos [kg/h]

G_f : Vazão mássica de fluidos [kg/h]

C_{pl} : Calor específico da água líquida [kJ/kg°C]

Q: Carga térmica do secador [kJ/s]

T_s : Temperatura do sólido [°C]

λ : Calor latente de vaporização da água a uma temperatura de referência [kJ/kg]

C_{pv} : Calor específico do vapor d'água [kJ/kg°C]

T_f : Temperatura do fluido [°C]

X: Umidade da biomassa em base seca [kg/kg]

Y: Umidade do fluido em base seca [kg/kg]

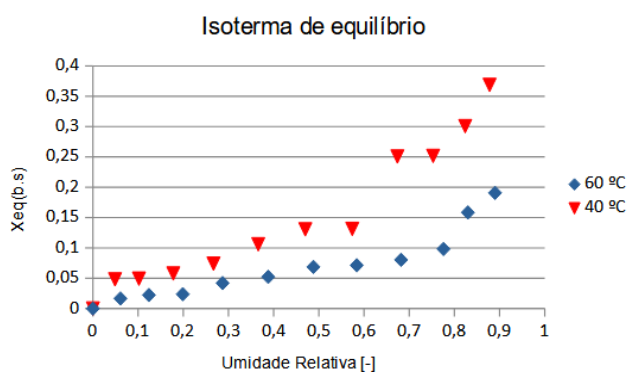
Por fim, como o intuito foi identificar a condição operacional que possuía menor consumo energético, porém que proporcionasse uma umidade final da biomassa que fosse adequada para os processos de conversão termoquímica (até 0,11 em base seca), foram variadas as seguintes condições operacionais: vazão de sólidos (G_s), temperatura de entrada do ar (T_{f0}), velocidade do ar (v_f), ângulo de inclinação e velocidade de rotação do tambor (α e N , respectivamente) e parâmetros geométricos do

secador, como comprimento e diâmetro (L e D, respectivamente). Uma série de combinações de variáveis de entrada do ar de secagem (temperatura e velocidade), vazão de sólidos, propriedades geométricas do tambor (comprimento e diâmetro) e condições operacionais do secador (velocidade de rotação e inclinação) foram realizadas. Os resultados simulados fisicamente consistentes são apresentados na próxima seção.

Resultados e discussão

O gráfico de isoterma de equilíbrio para temperaturas de 40°C e 60°C é apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Isoterma de equilíbrio



Fonte: Pessoal (2022)

Como é possível verificar, a umidade de equilíbrio aumenta com o aumento da umidade relativa do ar e diminui com o aumento da temperatura, como esperado. A partir das 113 combinações de variáveis de entrada do ar de secagem, vazão de sólidos, propriedades geométricas do tambor e condições operacionais do secador testadas, foi comprovado que para vazões mais altas (>300 kg/s), não é interessante trabalhar com temperaturas mais baixas (<300°C), isto é, não é viável economizar energia utilizando temperaturas mais baixas, pois necessariamente, a vazão de sólidos também deverá ser baixa, o que, em termos de viabilidade do projeto, não se torna interessante. Nesse sentido, verificou-se que as simulações ficam instáveis para altas vazões de sólidos combinadas com baixas temperaturas de entrada, visto que a umidade final do sólido não atinge valor final desejado, o que iria requerer um comprimento de secador maior, o que possivelmente elevaria os custos do projeto, além de divergir da faixa recomendada de secador (de 4 a 10 L/D). Além disso, verificou-se que uma velocidade mais elevada (>2m/s) conferiu resultados simulados fisicamente mais consistentes, devido a uma maior energia térmica suprida ao sistema, o que leva a um valor de umidade final dentro da faixa desejada para a conversão termoquímica. As

trocias intensas e simultâneas de energia e massa na entrada do secador ocasionam rápida redução na temperatura inicial do ar de secagem, assim como na umidade do produto. Por esta razão, a temperatura do produto permanece consideravelmente abaixo da temperatura inicial do ar de secagem. Levando em consideração todos os pontos supracitados, a melhor combinação encontrada, visando chegar aos valores recomendados em literatura, pode ser verificada na Tabela (2).

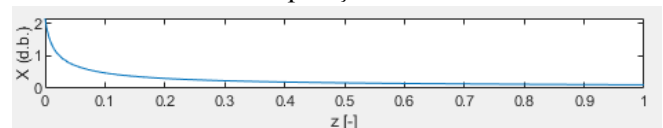
Tabela 2 - Condições operacionais de processo e dados geométricos do secador

Variáveis	Unidades de medida	Valores numéricos
Tf0	°C	370
vf	m/s	2
Gs	kg/s	350
L	m	18
D	m	1.9
N	rpm	0.55
α	°	0.2

Fonte: Pessoal (2022)

Sendo assim, o secador se encontrou dentro da faixa recomendada L/D que foi de 9.4737, já seu tempo de residência foi de $1,0043 \times 10^3$ minutos, ou seja, aproximadamente 16,8 horas. Dessa forma, a umidade final da biomassa foi de 0.1090 (base seca), se mostrando adequada para os processos de conversão termoquímica (até 0,11 em base seca). O gráfico do perfil da umidade do sólido em função da posição é apresentado na Figura 3.

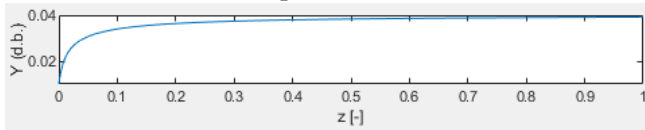
Figura 3 – Perfil da umidade do sólido em função da posição



Fonte: Pessoal (2022)

É possível observar um crescimento exponencial da umidade do gás até atingir valores próximos a 0,0392 kg água/ kg ar seco, como mostra a Figura 4. As Figuras 3 e 4 evidenciam de modo coerente a transferência de massa que ocorre entre as fases sólida e fluida.

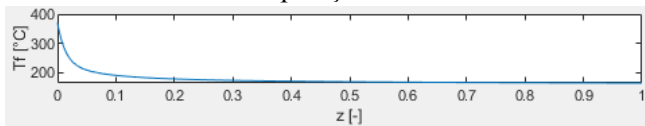
Figura 4 – Perfil da umidade do gás em função da posição



Fonte: Pessoal (2022)

Na Figura 5, é possível observar um decrescimento exponencial da temperatura do fluido, a partir de uma temperatura de entrada (T_{f0}) de 370 °C, e atingindo o valor aproximado de 163,2098 °C na saída do secador.

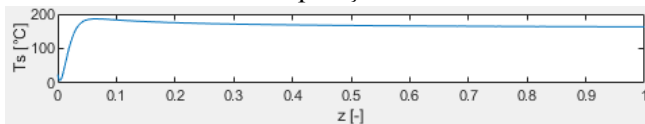
Figura 5 – Perfil da temperatura do gás em função da posição



Fonte: Pessoal (2022)

Quando a biomassa entra em contato com a fase gasosa aquecida, inicia-se a transferência de calor entre o ar e o sólido, que está a uma temperatura inicial de 25°C. A sua temperatura aumenta exponencialmente até atingir um patamar que aparenta ser o estado estacionário. A temperatura do sólido se estabiliza em um valor de aproximadamente 160°C, logo no início do secador conforme mostra a Figura 6. Pode-se observar que há um pequeno decréscimo da temperatura antes de se estabilizar, atingindo como valor máximo aproximadamente 163.0578°C.

Figura 6 – Perfil da temperatura do sólido em função da posição



Fonte: Pessoal (2022)

Os dados de saída mostram adequados, visto que valores acima de 250°C o bagaço de malte entra em combustão. Assim, o ideal é manter os dados abaixo de 200°C.

Conclusões

Os perfis de temperatura do sólido e do fluido, além de perfis de umidade do sólido e do fluido se mostraram coerentes e consistentes fisicamente. Uma vez verificada a adequação do modelo matemático, serão realizados estudos futuros de otimização, a fim de encontrar a condição mais econômica e energeticamente mais eficiente a partir dos resultados simulados pelo modelo, de tal modo que os custos operacionais e energéticos sejam balanceados para que a secagem do bagaço de malte seja viável, assim como a produção de bioenergia por meio dessa biomassa.

Agradecimento

Primordialmente, agradeço a minha mãe, que nunca mediu esforços para me apoiar. Agradeço à minha orientadora, Prof^a Dra. Maisa Tonon Bitti Perazzini e ao Prof^o Dr. Hugo Perazzini, que estiveram sempre dispostos a me amparar e ajudar de maneira cordial. Agradeço também a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo auxílio financeiro concedido.

Referências

- [1] BECIDAN M.; SKREIBERG Ø., HUSTAD J. E. Products distribution and gas release in pyrolysis of thermally thick biomass residues samples. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 78(1), 207-213. 2007.
- [2] BOREL L.D.M.S. Estudo de aplicação da pirólise rápida em leito de jorro para valorização de resíduos agroindustriais, 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.
- [3] Brasil chega a 1549 cervejarias registradas no Mapa. SINDICERV, 2022. Disponível em: <Brasil chega a 1.549 cervejarias registradas no Mapa - SINDICERV >. Acesso em: 26/09/2022.
- [4] BRUST, L. A. C. et al. Enfermidades em bovinos associadas ao consumo de Resíduos de Cervejaria. *Pesquisa Veterinária Brasileira*, v. 35, n. 12, p. 956–964, 2015.
- [5] CORDEIRO, Luana. Caracterização e viabilidade econômica do bagaço de malte oriundo de cervejarias para fins energéticos. 121. Dissertação de mestrado – Universidade Federal da Paraíba, 2011.
- [6] GERALDI, Breno. Simulação de secagem de resíduo de biomassa de açaí em secador rotativo. 74. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2022.
- [7] MARTINS, Fernanda. et al. Secagem: uma revisão. *The journal of Engineering and Exact Sciences*. Universidade Federal de São João del-Rei, 2020. Disponível em: <admin2,+11743-fernanda (1).pdf >. Acesso em: 25/09/2022.
- [8] MUSSATTO S., DRAGONE G., ROBERTO I. Brewers spent grain: generation, characteristics and potential application, *Journal of Cereal Science* 43 (1), 2006.
- [9] PERRY, R; GREEN, D.W. “Perry’s Chemical Engineers Handbook”, 8th edition, McGraw-Hill Book Company, 2007.
- [9] VIEIRA, Giovana. Estudo de pirólise catalítica de bagaço de malte em leito fixo. 71. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.