

Energy integration of a xylitol producing plant, using a heat exchanger cycle

Integração energética de uma planta produtora de xilitol, utilizando um ciclo de trocadores de calor

Article Info:

Article history: Received 2022-10-01 / Accepted 2022-10-27/ Available online 2022-10-27

doi: 10.18540/jcecv18iss8pp14822-01e

Fernanda Carlos Monteiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8140-9638>

Universidade Federal de São João del-Rei, Brasil

E-mail: fernandacarlosmonteiro23@gmail.com

Boutros Sarrouh

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2699-4851>

Universidade Federal de São João del-Rei, Brasil

E-mail: bsarrouh@ufsj.edu.br

Resumo

O presente trabalho propõe uma integração energética a partir de um ciclo de trocadores de calor dentro de uma planta produtora de xilitol, com o objetivo da redução dos custos de operação e emissões de gases poluentes ao meio ambiente. A partir do fluxograma de produção de xilitol, foi possível realizar o levantamento das correntes quentes que precisam ser resfriadas e das correntes frias que precisam ser aquecidas, e assim realizar o posicionamento dos trocadores de calor em formato cíclico para que todas as correntes de saída dos trocadores de calor sejam aproveitadas, reduzindo assim o consumo com utilidades (vapor e água) externa ao processo para aquecer ou resfriar os equipamentos que necessitam atingir uma determinada temperatura. Os cálculos do balanço de energia pro processo foram realizados para os dois cenários estudados, sem integração e com integração energética na presença de um ciclo de trocadores de calor. A partir desses resultados conclui-se que houve uma redução no consumo de utilidades quentes (vapor) de 100% e utilidades frias (água) de 41,97%. Assim, é possível afirmar que a integração energética por ciclo de trocadores de calor nesse caso, tornou o processo viável desde o ponto de vista produtivo ao ambiental, pois além das reduções com o custo de produção, devido a economia com utilidades quentes (vapor) e utilidades frias (água), também é possível reduzir a emissão de gases na atmosfera. **Palavras-chave:** Xilitol. Integração energética. Trocador de calor. Utilidades. Bagaço da cana-de-açúcar.

Abstract

The present work proposes an energy integration from a heat exchanger cycle inside a xylitol production plant, with the objective of reducing operating costs and emissions of polluting gases to the environment. From the xylitol production flowchart, it was possible to survey the hot streams that need to be cooled and the cold streams that need to be heated, and thus carry out the positioning of the heat exchangers in a cyclic format so that all the output streams of the heat exchangers are used, thus reducing consumption of utilities (steam and water) external to the process to heat or cool the equipment that needs to reach a certain temperature. The energy balance calculations for the process were performed for the two scenarios studied, without integration and with energy integration in the presence of a heat exchanger cycle. From these results it can be concluded that there was a reduction in the consumption of hot utilities (steam) of 100% and cold utilities (water) of 41.97%. Thus, it is possible to affirm that the energy integration by cycle of heat exchangers, in this case, made the process viable from the productive and environmental point of view, because in addition to the reductions in the production cost, due to the savings with hot utilities (steam) and cold utilities (water), it is also possible to reduce the emission of gases in the atmosphere.

Keywords: Xylitol. Energy integration. Heat exchanger. Utilities. Sugarcane bagasse.

1. Introdução

No Brasil a demanda por subprodutos derivados do setor agrícola cresceu muito nos últimos anos, como por exemplo, o uso de materiais lignocelulósicos como o bagaço da cana-de-açúcar para produção de etanol de segunda geração e de xilitol (Souza, 2018). O bagaço da cana-de-açúcar é o principal resíduo agrícola gerado no país e cerca de 75% é utilizado como combustível para queima de caldeiras na produção de açúcar e álcool, restando aproximadamente 25% (Bai et al., 2021), que podem ser destinados principalmente para a produção de etanol e xilitol, reduzindo impactos ao meio ambiente com o descarte desse resíduo.

O xilitol é uma alternativa ao consumo de sacarose, produzido por meio de processos químicos onde há a conversão de xilose, componente encontrado no bagaço da cana-de-açúcar. Apresenta um poder adoçante semelhante ao da sacarose, porém cerca de 40% menos calórico, favorecendo o seu consumo (Jiang et al., 2020). Atualmente, há uma grande diversidade de produtos alimentícios que utilizam o xilitol como, as balas, goma de mascar, chocolates e geleias (Santos et al., 2022). Outra utilidade que está em crescente estudo é o uso do xilitol em cremes dentais com o objetivo da ação anti-cárie que ele proporciona (Souza, 2019).

Embora sejam grandes as vantagens da utilização do xilitol para a saúde humana, sua produção é cara e trabalhosa, pois requer um alto número de etapas e de reagentes, como catalisadores e um extenso processo de purificação. (Souza, 2018; Rédua et al., 2019) além de uma grande demanda de energia. Devido a esses fatores, estudos buscam uma maneira alternativa de produção, visando a redução dos custos de produção. Uma dessas alternativas é a implementação da integração energética em uma planta produtora de xilitol.

A integração energética é um processo na qual ocorre a combinações de correntes, correntes quentes que precisam ser resfriadas e de correntes frias que precisam ser aquecidas. Seu propósito é recuperar calor e economizar utilidades, como energia, vapor e água (Mendes, 2018), esse processo é realizado por meio do uso de trocadores de calor. Trocador de calor é o nome dado ao equipamento que faz com que fluidos distintos em temperaturas diferentes troquem calor por meio de uma parede sólida que os separam (Incropera, 2008). O principal trocador de calor utilizado nas indústrias é o trocador de calor do tipo casco e tubo.

Com isso, o objetivo desse trabalho é avaliar a integração energética por meio de um ciclo de trocadores de calor em uma planta produtora de xilitol, em busca de minimizar os custos de produção com utilidades quentes (vapor) e frias (água), além da redução das emissões gases poluentes e resíduos ao meio ambiente.

2. Metodologia

2.1. Elaboração do fluxograma

O fluxograma da produção de xilitol mostrado na Figura 1 foi adaptado do fluxograma proposto por Mendes (2018).

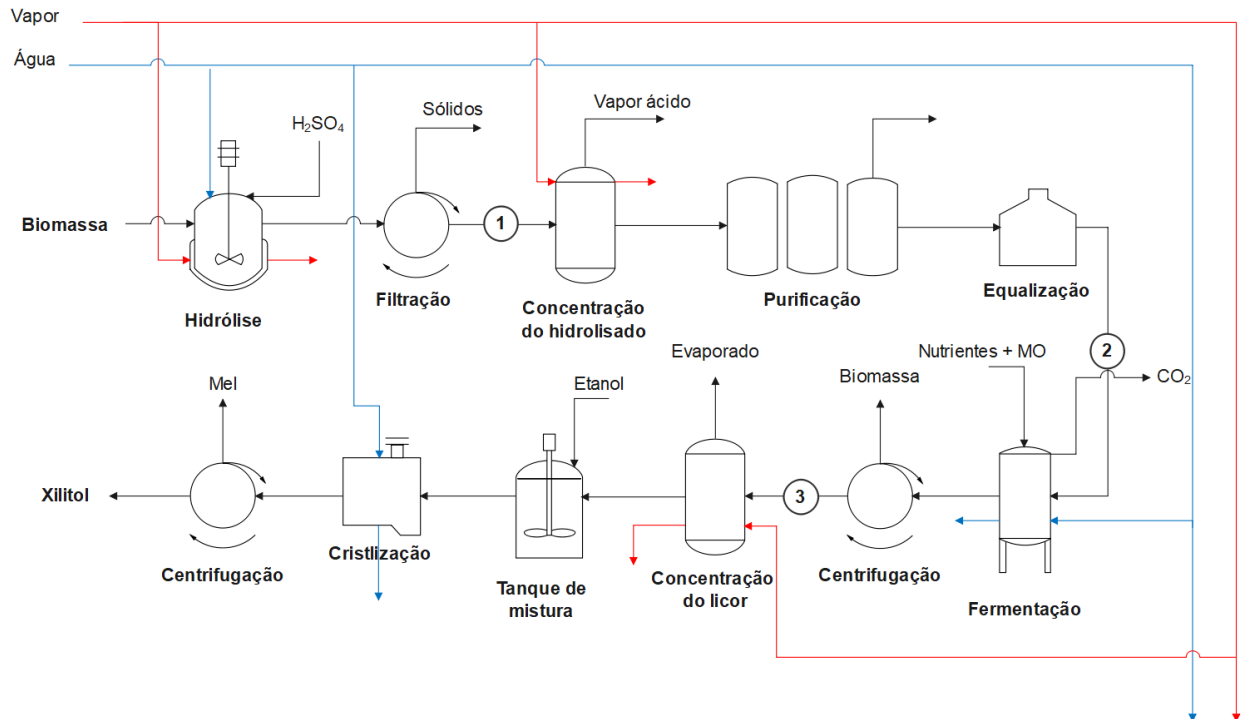


Figure 1 – Fluxograma de produção do xilitol (Autores).

Conforme a Figura 1, o bagaço de cada de açúcar é encaminhado para uma biorrefinaria. A primeira etapa de produção é a de hidrólise ácida, na presença de ácido sulfúrico (98%), a solução foi preparada em uma proporção 1:10 m/v, o reator utilizado é do tipo batelada, que opera a 120°C com um tempo reacional de 10 minutos e uma conversão de 80% (Sarrouh, 2009). Após a etapa de hidrólise, o hidrolisado é encaminhado para um filtro prensa para a separação das fases, a parte líquida segue no processo e a parte sólida é retirada e pode ser utilizada para a produção de etanol de segunda geração.

Na próxima etapa ocorre a operação de concentração em um evaporador a vácuo a uma temperatura de 70°C. O fator de concentração é de oito vezes, o hidrolisado concentrado então será purificado. Para a etapa purificação, são usadas colunas de troca iônica para a remoção do ácido sulfúrico. O hidrolisado purificado é enviado para um tanque de equalização.

A equalização serve para aumentar a vazão na etapa de fermentação. A fermentação ocorre na presença do microrganismo *Candida guillirmondii*, com uma rotação de 300 rpm, com tempo reacional de 54h e uma eficiência de conversão de 96%. Após 54 horas o fermentado segue para ser filtrado. A torta (parte sólida) é separada do licor (parte líquida) contendo o xilitol que segue no processo para ser concentrado. A segunda etapa de concentração é realizada em cozedores, de forma descontínua e com a utilização de vapor, a temperatura de evaporação é de 60°C. A corrente concentrada segue para o tanque de mistura, onde é misturado etanol e posteriormente é destinada para a cristalização.

É na etapa de cristalização que da origem aos cristais, com rendimento de 60% e uma pureza de 89%, o tempo para a formação dos cristais é de 2 a 3 horas. A mistura contendo os cristais de xilitol é centrifugada para a separação das fases, o mel é então retirado e os cristais de xilitol estão prontos para serem comercializados.

2.2. Seleção das correntes e posicionamento dos trocadores de calor

Após a elaboração do fluxograma é possível realizar o levantamento das correntes que precisam ser aquecidas ou resfriadas no processo. Com o levantamento das correntes, trocadores de calor para ajudar pré-aquecer ou pré-resfriar as mesmas foram adicionados. Os trocadores de calor foram adicionados com o objetivo de redução no consumo de utilidades, como água, vapor e energia.

Foram arranjados em forma de ciclo, buscando sempre o aproveitamento das correntes de utilidades de saída dos trocadores.

Após o posicionamento adequado, é possível realizar os cálculos das temperaturas de entrada e saída do fluido quente e frio, da taxa de transferência de calor e a área requerida para que ocorra a troca térmica.

As equações utilizadas foram propostas por Incropera (2008), a taxa de transferência de calor é dada pela Equação 1:

$$q = \dot{m}c_p(T_{sai} - T_{ent}) \quad (01)$$

Sendo \dot{m} a vazão mássica, c_p o calor específico, T_{sai} a temperatura de saída e T_{ent} a temperatura de entrada. Outra equação para obter a taxa de transferência de calor é a Equação 2:

$$q = UA\Delta T_{lm} \quad (02)$$

Onde, U é o coeficiente global de troca térmica, A é a área de transferência de calor e ΔT_{lm} é uma média da diferença de temperatura na qual varia com o escoamento e pode ser calculada como mostra a Equação 3:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (03)$$

Considerando que o trocador de calor é do tipo casco e tubo com escoamento de correntes contrárias, temos as Equações 4 e 5:

$$\Delta T_1 = T_{q_{ent}} - T_{f_{sai}} \quad (04)$$

$$\Delta T_2 = T_{q_{sai}} - T_{f_{ent}} \quad (05)$$

Para os cálculos de balanço de energia, foi considerada uma vazão de utilidades de 4,25m³/h. As correntes que precisam ser pré-aquecidas ou pré-resfriadas tiveram sua temperatura de saída estipuladas, da forma que fossem mais próximas da desejada possível, sempre respeitando as especificações das equações que foram usadas. As incógnitas restantes foram calculadas pelas equações acima.

3. Resultados e discussão

3.1. Seleção e levantamento de dados

As correntes selecionadas estão destacadas da Figura 1: corrente 1, corrente de saída do filtro prensa com temperatura de 120°C que deve ser resfriada para entrar no primeiro concentrador com temperatura de operação de 70°C; corrente 2, corrente de saída do equalizador com temperatura de 80°C destinada a etapa de fermentação que deve ocorrer a 30°C e corrente 3, corrente de saída da centrífuga à 30°C que deve ser aquecida para ser direcionada ao segundo concentrador com temperatura de operação de 60°C. Os dados de vazão e suas composições estão mostrados na Tabela 1.

Table 1 – Dados das correntes selecionadas para o balanço de energia (Autores).

	Corrente 01	Corrente 02	Corrente 3
Água (kg/h)	135,49	4540,00	3630,00
Xilose (kg/h)	36,55	833,30	36,65
Xilitol (kg/h)	-	-	583,7

Para os cálculos foram considerados os calores específicos constantes, sendo o da água de 4,187 kJ/kg.K (Zanotti et al., 2016), da xilose de 4,87 kJ/kg.K (Silva et al., 2013) e xilitol de 1,47 kJ/kg.K (Zanotti et al., 2016; Tong et al., 2007). Além disso, a quantidade de ácido sulfúrico nas correntes 1 e 2 foram desconsideradas por serem muito pequenas em relação a quantidade de água.

3.2. Balanço de energia

Com os levantamentos dos dados das correntes, é possível realizar os cálculos do balanço de energia dos dois cenários avaliados. O primeiro cenário se trata do fluxograma de produção de xilitol sem a presença de trocadores de calor, conforme ilustrado pela Figura 1, já o segundo cenário há a presença de integração energética por meio de trocadores de calor.

Para o cenário na qual há a presença de trocadores de calor. É necessário realizar os cálculos de temperatura de saída do trocador de calor, da taxa de transferência de calor e da área de troca térmica. Os dados obtidos estão dispostos da Tabela 2.

Table 2 - Dados dos trocadores de calor utilizados na configuração do caso 01 (Autores).

		TD01	TD02	TD03
Fluido quente	$T_{q_{entra}}$ (K)	393,15	353,15	343,15
	$T_{q_{sai}}$ (K)	343,15	333,15	315,78
Fluido frio	$T_{f_{entra}}$ (K)	315,78	317,88	353,15
	$T_{f_{sai}}$ (K)	317,87	343,15	333,15
Taxa de transferência de calor	Q (kJ/h)	-37264,76	-461343,02	487060,04
Coefficiente global de troca térmica	U (W/m ² . K)	750	750	550
Área de troca térmica	A (m ²)	0,30	14,15	21,84

Sendo TD = trocador de calor, T_q = temperatura do fluido quente, T_f = temperatura do fluido frio, Q = taxa de transferência de calor, U= coeficiente global de troca térmica e A= área de troca térmica.

A área calculada para o primeiro trocador de calor é muito menor que as demais áreas, porém seu uso é justificável quando se obtém os resultados com o consumo de utilidades mais a frente, já que o trocador de calor 01 supre a necessidade de utilidade fria externa para resfriar o processo. Já o trocador de calor 02 e 03 apresentam uma área de troca térmica maior, pois necessitam de um espaço maior para que a transferência de troca térmica ocorra e as temperaturas finais propostas sejam atingidas.

Após os dados obtidos pela Tabela 2, é possível então realizar os cálculos do balanço de energia nos equipamentos posteriores aos trocadores de calor, pois em alguns casos a presença apenas do trocador de calor não foi suficiente para atingir a temperatura final desejada do fluido.

O balanço de energia então foi calculado para os equipamentos de concentração 01 e 02 e o fermentador, considerando os dois cenários estudados. A Tabela 3 apresenta os dados obtidos pelo cálculo do balanço de energia levando em consideração o fluxograma sem trocadores de calor e com trocadores de calor.

Table 3 - Vazão das utilidades quente/fria requeridas por cada equipamento para os dois casos (Autores).

	Eq. 1	Eq. 2	Eq. 3
Sem TD (kg/dia)	0,38	11,39	4,95
Com TD (kg/dia)	0	6,83	0

Sendo o Eq. 1 = primeiro concentrador, Eq. 2 = fermentador e Eq. 3 = segundo concentrador.

Pela Tabela 3, é possível afirmar que a presença do arranjo de trocadores de calor em ciclo é favorável para a redução do consumo com utilidades quentes e frias e por consequência a minimização com os custos de operação. Com o uso dos trocadores de calor o consumo de utilidade quente reduziu 4,95kg/dia e o consumo de utilidade fria de 4,94 kg/dia, os cálculos foram considerando que a planta produtora de xilitol opera em três turnos, ou seja, 24 horas por dia.

Mendes (2018) realizou um trabalho sobre a avaliação de subsídios técnicos e econômicos em uma biorrefinaria integrada a uma usina de açúcar e álcool para a produção de xilitol, nesse estudo a integração energética ocorreu por meio da análise Pinch e foram adicionados dois trocadores de calor para o aproveitamento das correntes, com a adição dos trocadores de calor foi possível obter uma redução de 53% no consumo de água, ocasionando uma redução de 20% nos custos do produto.

O trabalho citado comprova que embora os custos iniciais com os trocadores de calor sejam altos, há um retorno desses custos com o tempo, devido a redução do consumo de energia, água e vapor, além de reduzir os impactos ambientais causados na produção do xilitol. A Figura 2 mostra o fluxograma de uma planta produtora de xilitol com a integração energética utilizando os trocadores de calor em formato cíclico.

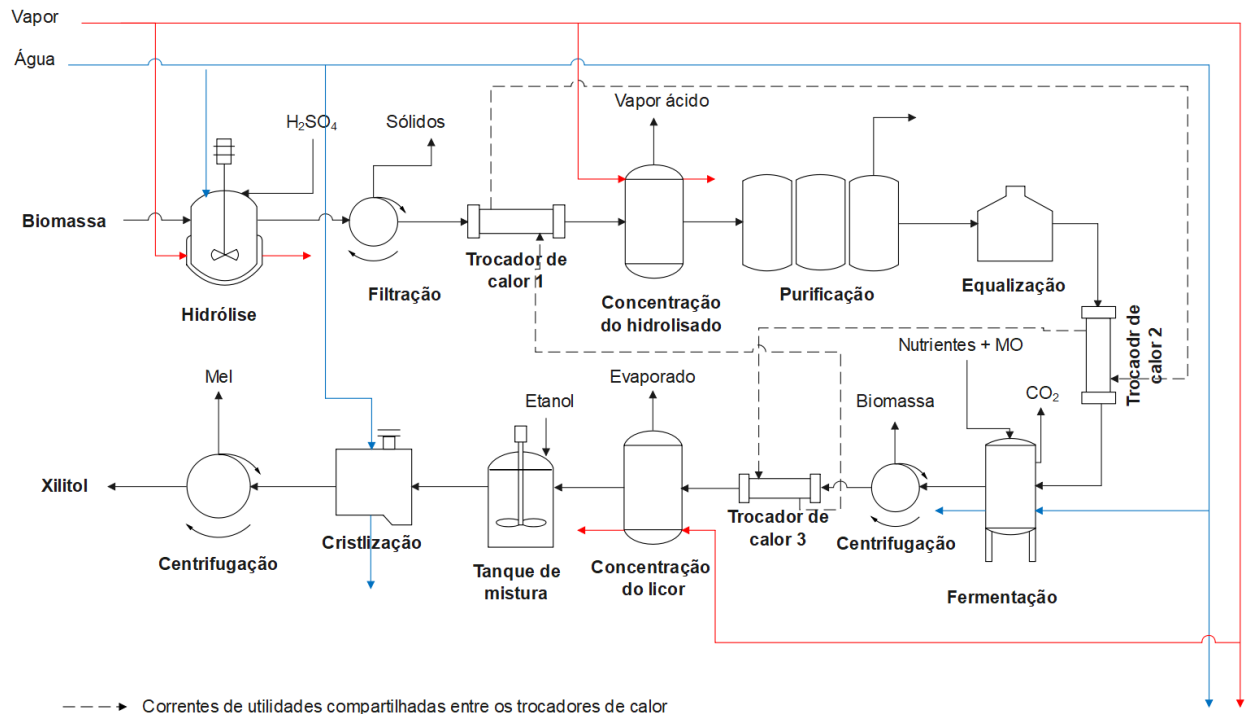


Figure 2 - Fluxograma de produção do xilitol com integração energética utilizando trocadores de calor (Autores).

4. Conclusão

A produção de xilitol a partir do bagaço da cana de açúcar é promissora visto que, não é todo o bagaço derivado da produção do açúcar e álcool que é utilizado, assim é possível agregar valor a esse resíduo. Nesse trabalho, após o uso dos trocadores de calor em formato de um ciclo, na qual há aproveitamento de todas as correntes quentes e frias nos mesmos, foi possível obter uma redução no consumo de utilidades frias de 41,97% e 100% em utilidades quentes. A partir desses resultados é possível concluir que a redução com o consumo de vapor, água e energia a partir do uso da integração energética por meio dos trocadores de calor é significativa, tornando uma produção mais vantajosa em relação à diminuição nos custos de produção e redução nos impactos ambientais resultante deste processo produtivo.

The production of xylitol from sugarcane bagasse sugar is promising since it is not all the bagasse derived from the production of sugar and alcohol which is used, so it is possible to add value to this residue. In this work, after using the exchangers of heat in the form of a cycle, in which there is harnessing all of the hot and cold currents same, it was possible to obtain a reduction in the consumption of cold utilities of 41.97% and 100% in hot utilities. From these results it is possible to conclude that the reduction with the consumption of steam, water and energy from the use of integration energy through heat exchangers is significant, making production more advantageous in relation to the decrease in production costs and reduction in environmental impacts resulting from this production process.

Agradecimentos

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001”.

Referências

- Bai, L., Su, X., Feng, J. & M, S. (2021). Preparation of sugarcane bagasse biochar/nano-iron oxide composite and mechanism of its Cr (VI) adsorption in water. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128723. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128723>.
- INCROPERA, F. P. (2008). *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. LTC.
- Jiang, W., Xing, Y., Zhang, L., Guo, X., Lu, Y., Yang, M. & Wang, J., WEI. (2020). *Journal of Applied Polymer Science*, 138 (7), 49830. <https://doi.org/10.1002/app.49830>.
- MENDES, G. V. (2018). *Subsídios técnicos e econômicos de uma biorrefinaria integrada a uma usina de açúcar para a produção de xilitol*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco, MG, Brasil.
- Rédua, R. B., Lorenzoni, B., Filho, A. V., & Laurente, R. L. (2019). Existe justificativa para o uso do xilitol na prevenção da cárie? Uma revisão de literatura. *Full Dentistry in Science*, 10(40), 128-134. [10.24077/2019;1040-128134](https://doi.org/10.24077/2019;1040-128134).
- Santos, L. S. D., de Almeida Gasparini, N., Brogiato, R. N., de Souza Chiarelli, T., de Souza, V. C. M., & Santos, J. P. F. (2022). Xilitol: avaliação da compreensão de tutores de cães acerca dos riscos de seu consumo. *PUBVET*, 16(6), 180. <https://doi.org/10.31533/pubvet.v16n06a1145.1-5>.
- SARROUH, B. F. (2009). *Estudo da Produção Biotecnológica de Xilitol em Reator de Leito Fluidizado Utilizando Bagaço de Cana-de-açúcar e Células Imobilizadas: avaliação de parâmetros operacionais e viabilidade econômica*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Lorena, SP, Brasil.
- Silva, M. A. R, Silva, M. D. R, Ferreira, AIL, Shi, Q., Woodfield, BF, & Goldberg, RN (2013). Termoquímica da α -D-xilose (cr). *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 58, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2012.09.028>.
- SOUZA, R. M. (2018). *Produção de xilitol ou linhagens de leveduras do gênero Cyberlindnera*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- Tong, B., Tan, ZC, Shi, Q., Li, YS, Yue, DT, & Wang, SX (2007). Investigação termodinâmica de vários polióis naturais (I): Capacidades caloríficas e propriedades termodinâmicas do xilitol. *Thermochimica Acta*, 457 (1-2), 20-26. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2007.02.022>.
- Zanotti, M., Ruan, Z., Bustamente, M., Liu, Y., & Liao, W. (2016). A sustainable lignocellulosic biodiesel production integrating solar-and bio-power generation. *Green Chemistry*, 18(18), 5059-5068. <https://doi.org/10.1039/c6gc90094a>.