

ESTUDO DE POSSÍVEIS FONTES DE COMBUSTÍVEL COM BASE NO PODER CALORÍFICO E EXERGIA QUÍMICA PARA FUNDIÇÃO DE ALUMÍNIO

STUDY OF POSSIBLE FUEL SOURCES BASED ON THE CALORIFIC VALUE AND CHEMICAL EXERGY FOR ALUMINIUM MELTING FURNACE

¹*Eduardo Marques Vieira.

²Eduardo Silva Farias.

¹Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Vitória. E-mail: eduardomarquescontato@outlook.com.

²Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Vitória. E-mail: eduardoslvfarias@gmail.com.

*Autor de correspondência

Artigo submetido em 23/09/2020, aceito em 18/12/2020 e publicado em 24/05/2021.

Resumo: O alumínio é amplamente utilizado no mundo moderno, possuindo muitas aplicações e uma qualidade especial: a possibilidade de ser reciclado. No entanto, para que o alumínio seja fundido e reutilizado é necessária uma fonte de calor. No presente artigo, procura-se analisar possíveis fontes de combustíveis para a fundição, de uma quantidade pré-determinada de massa, em um corpo de prova de alumínio, buscando o mais adequado ao uso. O trabalho foi realizado com base em cálculos termodinâmicos, utilizando-se unicamente do poder calorífico e da exergia química dos combustíveis. Dentre os combustíveis estudados estão a gasolina, o etanol, o diesel, o biodiesel proveniente de diversas fontes de óleos, óleos vegetais e gases naturais distribuídos em diversos estados do Brasil. Este artigo não leva em consideração as perdas de calor para o meio externo, mas admitindo as mesmas condições para todos os combustíveis, é possível apresentar uma boa comparação de volume e massa de combustível estimado, mesmo com tal simplificação. O óleo de soja se apresentou como uma possível alternativa de substituição aos combustíveis mais difundidos atualmente (gás natural, gasolina, etanol e diesel) e sendo o mais viável para utilização dentre os óleos estudados. Os biodieseis, embora tenham sido menos viáveis do que o diesel derivado do petróleo, se tornam uma boa alternativa em quesito da filosofia de energia mais limpa. O gás natural do estado do Espírito Santo foi superior no quesito de poder calorífico e exergia química comparado aos outros gases naturais das outras localidades consideradas.

Palavras-chave: termodinâmica; combustíveis; alumínio; poder calorífico; exergia.

Abstract: Aluminum is widely used in the modern world, having many applications and a special quality: the possibility of being recycled. However, for the aluminum to be melted and reused, a heat source is required. This paper aims to analyze possible sources of fuels for the smelting of a predetermined aluminium mass amount, analyzing the most suitable for use. All of this was done based on thermodynamic calculations, using only the calorific value and chemical exergy of the fuels. Some of the fuels studied are gasoline, ethanol, diesel, biodiesel from different oil sources, vegetable oils and natural gases distributed in several states in Brazil. This paper does not consider the heat losses to the external environment, but assuming the same conditions for all fuels, it is possible to present a good comparison of estimated fuel volume and mass, even with such simplification. The soybean oil was presented as a possible alternative to replace the most widespread fuels today (natural gas, gasoline, ethanol and diesel) and is the most viable for use among the studied oils. Biodiesels,

although less viable than petroleum-based diesel, become a good alternative in terms of the cleaner energy philosophy. The natural gas of the state of Espírito Santo was superior in terms of calorific value and chemical exergy compared to other natural gases from other locations considered.

Keywords: thermodynamics; fuels; aluminium; calorific value; exergy.

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é um material muito empregado no setor metalmeccânico e sua reciclagem é um dos seus pontos fortes. Segundo a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL), desde 2014, o Brasil importa mais do que exporta o alumínio primário (alumínio fundido pela primeira vez). Assim, Chaves (2018) explica que embora a reciclagem já seja significativa (cerca de 35%) quando comparada com a média mundial (cerca de 27,1%), ainda há espaço para o Brasil aumentar a taxa de reciclagem.

Como tecnologia utilizada para o processo industrial de reaproveitamento da sucata do alumínio, a ABAL (2020) mostra que os fornos utilizados para a fundição são do tipo rotativos, rotativos selados, *sidewell* sem sal, de indução e de plasma. Os fornos rotativos têm um rendimento metálico de 50% a 60%. Já os fornos rotativos selados têm um rendimento de até 85%. Os fornos *sidewell* são de tecnologia mais moderna em comparação aos demais. Os fornos de indução são os menos utilizados enquanto os fornos de plasma estão em desenvolvimento.

Os fornos citados acima possuem seus combustíveis pré-determinados pelo próprio projeto do forno, por exemplo, o diesel e o gás natural são amplamente utilizados. Todavia, sabe-se que um dos desafios da engenharia é buscar fontes cada vez mais limpas de energia. Para o caso pontual do alumínio, Morais (2015) abordou os fatores da logística do processo, sendo obtidos bons resultados para a redução de energia elétrica e extração da bauxita, que é a matéria prima para a obtenção do alumínio. Assim sendo, é importante ampliar o leque de possíveis

fontes de combustível a fim de possibilitar uma maior diversidade de possíveis combustíveis a serem empregados, analisando a eficiência global do processo.

Para analisar estes combustíveis é necessário indicadores de qualidade de queima e por isso se faz necessário o estudo dos combustíveis baseado no poder calorífico e na exergia.

Portanto, este artigo visa estabelecer as fontes de combustíveis mais adequadas para fundir alumínio, analisando de modo comparativo, os poderes caloríficos e a exergia por meio de cálculos termodinâmicos, ou seja, um estudo teórico.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A média entre a temperatura do estado morto (25°C) e a temperatura de fusão do alumínio (660°C) é $342,5^{\circ}\text{C}$. De acordo com Brandhuber (2017), o calor específico do alumínio a 300°C é $1,01\text{ kJ/kgK}$ e este é um valor aceitável para os cálculos, pois permanece constante para todos os combustíveis e não influenciará na escolha de uma possível fonte de combustível. É ainda visto que, segundo Mees (2003), o calor latente (L) do alumínio é igual a $397,48\text{ kJ/kg}$.

Para que o alumínio seja fundido, é necessária uma fonte de calor e, para escolher um dado combustível como possível fonte de calor, se faz necessário analisar determinadas propriedades termodinâmicas.

Çengel (2013) define a propriedade termodinâmica denominada de poder calorífico como a quantidade de calor liberada pela queima completa do

combustível, na qual os produtos da combustão estão à temperatura ambiente. O poder calorífico é denominado poder calorífico inferior (PCI), quando a água é liberada sob a forma de vapor, e de poder calorífico superior (PCS), quando a água dos gases de combustão é completamente condensada.

Além do poder calorífico, Çengel (2013) explica que uma parcela da energia da fonte é inevitavelmente rejeitada como energia indisponível. Assim, se fez necessário uma propriedade que considere apenas o trabalho útil disponível pela fonte. Então, Moran (2013) corrobora a exergia como o máximo trabalho possível obtido entre o sistema até que este entre em equilíbrio com o ambiente (estado morto). Sendo o estado morto considerado tipicamente como 25°C e 1 atm.

Kamate (2009) explica que o bagaço de cana com 50% de umidade possui exergia química igual a 9889 kJ/kg. Ainda é explicado a propriedade Φ , sendo a razão da exergia química pelo poder calorífico inferior de combustível e sendo igual a 1,28, ou seja, o poder calorífico inferior do bagaço com 50% de umidade é de 7725 kJ/kg. Além disso, Da Silva (2008) mostrou que para 50% de umidade, o poder calorífico superior é igual a 9519 kJ/kg e 1000 kg/m³. Realizando uma média entre o PCI e PCS tem-se PC igual a 8622 kJ/kg.

Já Lora (2001) mostra que a palha da cana possui um PCI de 15.174 kJ/kg e exergia química igual a 17.228 kJ/kg. Complementando, Padilla (2016) encontrou um PCS igual a 17.490 kJ/kg. Semelhantemente ao bagaço, realizando uma média, temos PC igual a 17.359 kJ/kg. Já no que se diz respeito a massa específica, é difícil ser mensurado, pois varia de acordo com o grau de compactação. Contudo, Camargo (2020) indicou que uma boa estimativa para a palha bruta, ou seja, não triturada, é de 30,6 kg/m³.

De acordo com Çengel (2013), o PCI da gasolina é 44.000 kJ/kg e o PCS é 47.300 kJ/kg, o que pode nos dar uma aproximação de PC igual a 45.650 kJ/kg. Já o etanol apresenta um PCI de 26.810 kJ/kg e um PCS de 29.670 kJ/kg, logo, PC é 28.240 kJ/kg. Van Der Vorst (2013) indicou que a exergia da gasolina é de 43.000 kJ/kg e Ometto (2010), após uma série de estudos sobre o etanol, forneceu um valor de exergia igual a 29.430 kJ/kg. Já pelo Sindipetro (2015), a massa específica da gasolina se situa entre 0,7300 e 0,7700 g/ml ou g/cm³ e a massa específica do etanol está entre 802,9 e 811,2 kg/m³. Com uma média simples e convertendo para kg/m³, considera-se uma massa específica da gasolina igual a 750,0 kg/m³ e do etanol igual a 807,1 kg/m³.

Neto (2000) faz uma análise sobre diversas propriedades dos óleos de babaçu, dendê e soja, do óleo diesel e dos biocombustíveis de mamona, babaçu, dendê e algodão. Sendo destacado o poder calorífico e a massa específica destes combustíveis na Tabela 1. A massa específica do óleo de soja não foi descrita por Neto, porém Souza (2014) explica que o óleo de soja possui uma massa específica de 915,5 kg/m³.

Lopes (2016) simulou a produção do biodiesel a partir do óleo de palma, também chamado de óleo de dendê, onde foi descrito que no processo havia uma entrada de 39.409 MJ/h com uma vazão de 1000 kg/h, ou seja, o óleo de dendê possui exergia química igual a 39.409 kJ/kg. Além disso, ao fim do processo o autor obteve como resultado 33.392 MJ/h com uma vazão mássica de 843,8 kg/h, ou seja, 39.573 kJ/kg de exergia do biodiesel. Com base neste processo descrito por Lopes fica ainda nítido que a diferença entre os óleos e os biodieseis é o fato de que o biodiesel é produzido a partir do processamento e tratamento do óleo vegetal.

Da Silva (2017) mostra que a exergia química do óleo de soja é igual a 39.439 kJ/kg.

De acordo com Ferreira (2014), a exergia do óleo de babaçu é $2,36 \cdot 10^7$ kJ com um total de 630 kg, ou seja, o óleo possui uma exergia específica de 37.460 kJ/kg. E após o processo de obtenção do biodiesel, tem-se uma exergia de $2,23 \cdot 10^7$ kJ com 586 kg, logo, a exergia específica do biodiesel de babaçu 38.055 kJ/kg.

Em seu estudo, Yaşar (2016) define que a exergia do biodiesel de algodão é dada por 87,3 kW, em que a vazão mássica é 0,00186519 kg/s. Portanto, a exergia específica do biodiesel de algodão é aproximadamente 46.805 kJ/kg.

Monteiro (2013) realizou um estudo comparativo entre o diesel convencional e

o biodiesel proveniente da mamona. Assim, foi concluído que a exergia do diesel é de 44.980 kJ/kg e a do biodiesel da mamona é de 38.480 kJ/kg.

Já Ferrarini (2015) faz o estudo energético e exergético para o uso do gás natural proveniente das regiões do Espírito Santo, Bahia, Rio de Janeiro, Ceará, além do Nordeste em geral. Já segundo a Comgás (2020), o gás natural possui 0,766 kg/m³, sendo considerado os gases naturais estudados com a mesma massa específica.

Portanto, a Tabela 1 é a compilação do poder calorífico, da exergia química e da massa específica dos combustíveis acima citados.

Tabela 1: Poder calorífico, exergia química e massa específica para os combustíveis.

Combustíveis	Poder calorífico (kJ/kg)	Exergia química (kJ/kg)	Massa específica (kg/m ³)
Bagaço de cana com 50% de umidade	8.622	9.889	1.000,0
Palha de cana com 15% de umidade	17.359	17.228	30,6
Gasolina	45.650	43.000	750,0
Etanol	28.240	29.430	807,1
Óleo de babaçu	37.861	37.460	915,3
Óleo de dendê	37.430	39.409	911,8
Óleo de soja	39.417	39.439	915,5
Óleo diesel	45.288	44.980	849,7
Biodiesel de mamona	37.849	38.480	919,0
Biodiesel de babaçu	39.497	38.055	886,5
Biodiesel de dendê	39.874	39.573	859,7
Biodiesel de algodão	39.832	46.805	875,0
Gás Natural do ES	52.649	50.502	0,766
Gás Natural da BA	52.167	50.242	0,766
Gás Natural do NE	51.497	49.952	0,766
Gás Natural do RJ	50.344	49.791	0,766
Gás Natural do CE	49.074	48.337	0,766

3 PROCESSOS METODOLÓGICOS

Os cálculos termodinâmicos foram feitos a partir de uma temperatura T_0 e uma pressão P_0 equivalentes ao estado morto, que são 25°C e 1 atm, respectivamente. Admite-se ainda a utilização de 1 kg de

alumínio como corpo de prova, sendo analisado na sequência qual o combustível que teria mais gasto volumétrico para elevar a entalpia do alumínio da temperatura ambiente até o ponto de fusão.

Sabe-se, de acordo com Çengel (2013), que a quantidade de calor durante a queima do combustível é dada por

$$Q = m_{\text{comb}} PC. \quad (1)$$

onde Q é a quantidade de calor, m_{comb} é a massa de combustível e PC é o poder calorífico.

Além disso, Atkins (2012) explica que o calor latente é a diferença de entalpia entre dois estados da matéria. No caso do alumínio, os estados são líquido e sólido. Então, para que o alumínio seja fundido, é necessária uma quantidade de calor denominado de calor latente e , além deste, o calor sensível, que faz aumentar a temperatura do material, mas não altera o estado da matéria. Portanto, sabe-se que a quantidade de calor para fundir o alumínio da temperatura ambiente até o estado líquido é a soma do calor sensível Q_s e do calor latente Q_L ou seja,

$$Q = Q_s + Q_L, \quad (2)$$

na qual o calor sensível e latente são respectivamente, determinados por

$$Q_s = m_{\text{al}} c \Delta T \quad (3)$$

e

$$Q_L = m_{\text{al}} L, \quad (4)$$

onde m_{al} é a massa do alumínio, c é o calor específico do alumínio, ΔT é a variação de temperatura e L é a constante de calor latente do alumínio. Substituindo as equações 3 e 4 em 2 tem-se

$$Q = m_{\text{al}} c \Delta T + m_{\text{al}} L.$$

Reorganizando, foi obtido

$$Q = m_{\text{al}} (c \Delta T + L). \quad (5)$$

Considerando que o sistema é adiabático e que a análise do ar padrão é a mesma para cada combustível, pode-se simplificar os cálculos e considerar que a quantidade de calor fornecida pelo combustível é toda absorvida pelo alumínio. Assim sendo, a equação 5 se iguala à equação 1 e, então, foi obtida a relação

$$m_{\text{comb}} PC = m_{\text{al}} (c \Delta T + L),$$

que pode finalmente ser reescrita como

$$m_{\text{comb}} = m_{\text{al}} (c \Delta T + L) / PC. \quad (6)$$

Utilizando-se o poder calorífico da Tabela 1, a equação 6 e as propriedades adquiridas para o alumínio, é possível obter a massa de um determinado combustível. Como a Tabela 1 possui a massa específica dos combustíveis, é também possível descobrir o volume de combustível estimado por meio da equação descrita por Moran (2013):

$$V = m / \rho, \quad (7)$$

sendo V o volume, m a massa e ρ a massa específica do combustível.

Já para a parte exérgica, Çengel (2013) explica que o balanço de exergia para um sistema fechado é dado por

$$E_{\text{calor}} - E_{\text{trabalho}} - E_{\text{destruída}} = \Delta E_{\text{sistema}}.$$

Como a variação de exergia do sistema é apenas associada a exergia química e não há exergia associada ao trabalho e exergia destruída, a equação é resumida por

$$[1 - (T_0/T)] Q = E^{\text{qui}},$$

na qual, manipulando é obtido

$$Q = m_{\text{comb}} e^{\text{qui}} / [1 - (T_0/T)], \quad (8)$$

onde T_0 é a temperatura do estado morto, T é a temperatura da fonte e e^{qui} é a exergia química específica.

Igualando a equação 8 com a equação 5 tem-se

$$m_{\text{comb}} e^{\text{qui}} / [1 - (T_0/T)] = m_{\text{al}} (c \Delta T + L).$$

Então, é possível obter a quantidade de massas dos combustíveis usado para a fundição do alumínio como sendo

$$m_{\text{comb}} = m_{\text{al}} [1 - (T_0/T)] (c \Delta T + L) / e^{\text{qui}}. \quad (9)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando-se das equações 6, 7 e 9, com os dados da Tabela 1 para cada combustível, é possível obter os dados da

massa de combustível necessária para se fundir 1 quilograma de alumínio puro e registrar esses dados na Tabela 2.

Tabela 2: Massa e volume estimados com base no poder calorífico e exergia química.

Combustíveis	Massa estimada pelo PC (kJ/kg)	Massa estimada pela exergia (kg)	Volume estimado pelo PC (L)	Volume estimado pela exergia (L)
Bagaço de cana com 50% de umidade	0,028284621	0,071496402	0,02828462	0,07149640
Palha de cana com 15% de umidade	0,01404862	0,041039466	0,45910524	1,34115902
Gasolina	0,005342169	0,01644251	0,00712289	0,02192335
Etanol	0,008635623	0,024024054	0,01069957	0,02976590
Óleo de babaçu	0,006441193	0,01887421	0,00703725	0,02062079
Óleo de dendê	0,006515362	0,017940773	0,00714560	0,01967622
Óleo de soja	0,006186924	0,017927126	0,00675797	0,01958179
Óleo diesel	0,00538487	0,015718718	0,00633738	0,01849914
Biodiesel de mamona	0,006443235	0,018373906	0,00701114	0,01999337
Biodiesel de babaçu	0,006174393	0,018579107	0,00696491	0,02095782
Biodiesel de dendê	0,006116015	0,017866422	0,00711413	0,02078216
Biodiesel de algodão	0,006122464	0,01510582	0,00699710	0,01726379
Gás Natural do ES	0,004631997	0,013999998	6,04699322	18,27676035
Gás Natural da BA	0,004674794	0,014072448	6,10286477	18,37134173
Gás Natural do NE	0,004735616	0,014154146	6,18226588	18,47799790
Gás Natural do RJ	0,004844073	0,014199914	6,32385480	18,53774681
Gás Natural do CE	0,004969434	0,014627054	6,48751164	19,0953711

Os combustíveis sólidos estudados foram o bagaço e a palha da cana, na qual a palha se tornou mais proveitosa em quesito de massa estimada para a fundição, mas o bagaço foi superior em relação ao volume estimado. Para o processo de fundição do alumínio em larga escala, ambos não são a melhor escolha, visto que os combustíveis líquidos foram mais satisfatórios no

critério de seleção. Entretanto, em empresas de produção sucroalcooleira, em que alguns casos o bagaço e a palha são descartados, estes combustíveis podem ser aproveitados para fornecer mais exergia ao processo de produção em regeneradores de calor.

Dentre os óleos vegetais testados teoricamente, tanto com base no poder

calorífico e na exergia, o que demandou a menor quantidade necessária de massa de combustível para fundir o alumínio foi o óleo de soja. Assim sendo, tornou-se o óleo vegetal mais viável para utilização na fonte. Em contrapartida, o óleo vegetal de pior escolha com base no poder calorífico foi o de dendê, enquanto com base na exergia química foi o de babaçu. Todavia, salienta-se que a diferença não foi exorbitante, por isso todos os óleos vegetais estudados neste trabalho se apresentam como uma fonte viável para uso na fundição do alumínio.

Houve um resultado aproximado para o etanol, a gasolina e o diesel, sendo que o óleo diesel se mostrou melhor do que os biodieseis estudados com relação a massa estimada para o processo. No entanto, Ghassan (2003) explica que há uma forte tendência em substituir os combustíveis provenientes do petróleo por fontes mais limpas de energia e, por isso, os biodieseis em geral se mostraram como uma alternativa ao diesel.

Dentre os gases naturais proveniente de diferentes estados do Brasil, o gás natural do estado do Espírito Santo foi superior aos demais em quesito de poder calorífico e de exergia, o que influenciou para ser o gás natural com o menor custo mássico necessário para o processo de fundição.

Relembrando que para realizar esses cálculos, assumiu-se que não haveria troca de calor com o meio externo, assim, o valor necessário da massa de cada combustível na prática seria diferente dos valores obtidos na Tabela 5. No entanto, para efeitos meramente comparativos de combustíveis, é possível fazer tal simplificação, pois impõe a todos os combustíveis a mesma situação de troca de calor e, assim sendo, nenhum deles se sobressai com algum tipo de vantagem.

5 CONCLUSÕES

O presente artigo destacou possíveis fontes de combustíveis para a substituição aos utilizados atualmente, apresentando as estimativas mássicas e volumétricas dos combustíveis, com base em seus poderes caloríficos e exergias químicas, tendo a hipótese de que o sistema é adiabático e que a análise do ar padrão é a mesma para cada combustível analisado.

Como proposta para futuras pesquisas, sugere-se a desconsideração da hipótese de sistema adiabático envolvidas nos cálculos e buscar considerar a variação real da exergia durante a fundição, por meio de simulações computacionais, métodos analíticos ou experimentais. Além disso, propõe-se uma análise termoeconômica a respeito dos combustíveis estudados, mensurando os gastos com combustíveis de maneira exata.

REFERÊNCIAS

- ABAL, Associação Brasileira do Alumínio. Disponível em: <<http://www.abal.org.br>>. Acessado em 17 de setembro de 2020.
- ABAL, Associação Brasileira do Alumínio. **Reciclagem**. Disponível em: <<http://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/reciclagem/>>. Acessado em 14 de setembro de 2020.
- ATKINS, Peter; JONES, Lorreta. **Princípios de química**: questionando a vida moderna e o meio ambiente. Tradução: Ricardo Bicca de Alencastro. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- BRANDHUBER, Cássio Cunha Pacheco. **Construção e avaliação de um sistema recuperador de calor por fluxo de ar na solidificação do alumínio**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

- CAMARGO, Júlia MO et al. **Characterization of sugarcane straw and bagasse from dry cleaning system of sugarcane for cogeneration system.** Renewable Energy, 2020.
- CHAVES, Carlos Alberto et al. **Benefícios da reciclagem de materiais - O caso do alumínio.** Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo, v. 3, n. 3, p. 111-134, 2018.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica.** Tradução: Paulo Maurício Costa Gomes; revisão técnica: Antonio Pertence Júnior. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- COMGÁS. **Características do gás natural.** Disponível em: <<https://www.comgas.com.br/para-industria/caracteristicas-do-gas-natural/>>. Acesso em: 5 de setembro de 2020.
- DA SILVA, Marcelo Bacci; DOS SANTOS MORAIS, Anderson. **Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação.** XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro, p. 1-11, 2008.
- DA SILVA, Marina Marques. **Análise exérgica da produção do biodiesel por mistura binária de sebo bovino e óleo de soja.** 2017.
- FERRARINI, R. S.; COLOMBO, D. C. ; RIBEIRO, L. C. ; RODRIGUES, R. S. ; José J. C. S. Santos . **O Indicador mais adequado para a valoração do gás natural: Base Energética ou Exérgica.** 2015. (Apresentação de Trabalho/Congresso).
- FERREIRA, Maria Emilia Martins. **Análise exergoeconômica da produção de biodiesel de babaçu obtido por via metilica e etilica.** 2014.
- GHASSAN, T. A.; MOHAMAD, I. AL-WIDYAN. **Combustion performance and emissions of ethyl ester of a waste of vegetable oil in a water-cooled furnace.** Appl. Thermal Eng., v 23, p.285-293, 2003.
- KAMATE, S.; GANGAVATI, P. **Exergy analysis of cogeneration power plants in sugar industries.** Applied Thermal Engineering, v. 29, p. 1187-1194. 2009.
- LOPES, J. V. M.; DIAS, C. S.; CUNHA V. M. B.; PAIVA, M.; ARAÚJO, M. E. **Simulação da produção de biodiesel de óleo de palma: projeto, análise exérgica e da separação.** XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química. 2016.
- LORA, E. E. S.; ARRIETA, F. P.; CARPIO, R. C. **Eletricidade a partir do bagaço de cana.** In: Marcello Guimarães Mello. (Org.). Biomassa Energia dos Trópicos em Minas Gerais: Labmida, v.1, pp 59-81, 2001.
- MEES, Alberto Antônio. **Fusão e Solidificação.** 2003. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/cref/amees/conden.html>>. Acesso em: 5 de setembro de 2020.
- MONTEIRO, Leonardo de A. et al. **Performance impact of the application of castor oil biodiesel in diesel engines.** Engenharia Agrícola, v. 33, n. 6, p. 1165-1171, 2013.
- MORAIS, Marcos de Oliveira; BREJÃO, Antonio Sérgio; NETO, Pedro Luiz de Oliveira Costa. **A logística reversa aplicada na fundição de alumínio auxiliando na redução do consumo de energia e de bauxita.** Exatas & Engenharias, v. 5, n. 12, 2015.
- MORAN, M. J. et al. **Princípios de termodinâmica para engenharia.** Tradução: Gisele Maria Ribeiro Vieira, Paulo Pedro Kenedi, Fernando Ribeiro da Silva. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- NETO, Pedro R. Costa et al. **Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras.** Química nova, v. 23, n. 4, p. 531-537, 2000.
- OMETTO, Aldo Roberto; ROMA, Woodrow Nelson Lopes. **Atmospheric**

impacts of the life cycle emissions of fuel ethanol in Brazil: based on chemical exergy. *Journal of Cleaner Production*, v. 18, n. 1, p. 71-76, 2010.

PADILLA, Elias Ricardo D. et al. **Produção e caracterização físico-mecânica de briquetes de fibra de coco e palha de cana-de-açúcar.** *Revista virtual de Química*, v. 8, n. 5, 2016.

SOUZA & LUZ. **Propriedades de óleos empregados em flotação.** Rio Grande do Norte, 2014.

SINDIPETRO. **Teste de qualidades:** Tabelas de conversão de produtos. 2015.

VAN DER VORST, Geert et al. **Reduced resource consumption through three generations of Galantamine· HBr synthesis.** *Green Chemistry*, v. 15, n. 3, p. 744-748, 2013.

YAŞAR, Abdulkadir; ALI, Abdulkadir Abdi. **Investigação dos efeitos do diesel e do biodiesel na análise de energia e exergia em motores a diesel.** *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, v. 31, n. 1, pág. 159-174, 2016.