

140 - COMBUSTÃO DE BRIQUETES DE RESÍDUOS DE CATUABA E CARVALHO GERADOS EM INDÚSTRIA DE AROMAS

Isabel Narloch Cardoso⁽¹⁾

Graduanda em Engenharia Química, Universidade da Região de Joinville - UNIVILLE.

Ygor Matheus Pereira⁽²⁾

Graduando em Engenharia Química, Universidade da Região de Joinville - UNIVILLE.

Ana Paula Kurek⁽³⁾

Química Industrial e Mestre em Engenharia de Processos, UNIVILLE; Doutora em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC e pós-doutoranda no Mestrado em Engenharia de Processos, UNIVILLE.

Ozair Souza⁽⁴⁾

Engenheiro Químico, Universidade do Sul de Santa Catarina, mestre e doutor em Biotecnologia pela Universidade de São Paulo - USP. Professor dos Departamentos de Engenharia Química e Engenharia Ambiental e Sanitária e Mestrado em Engenharia de Processos, UNIVILLE.

Noeli Sellin⁽⁵⁾

Engenheira Química, Universidade Estadual de Maringá – UEM; Mestre e Doutora em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Professora dos Departamentos de Engenharia Química e Engenharia Ambiental e Sanitária e Mestrado em Engenharia de Processos, UNIVILLE.

Endereço⁽⁵⁾: R. Paulo Malschitzki, 10, Zona Industrial Norte, CEP 89219 710, Joinville/SC, Brasil; Tel: (47) 3461 9209; E-mail: nsellin@yahoo.com.br

RESUMO

Resíduos agrícolas e agroindustriais estão sendo cada vez mais empregados como biomassa para geração de energia. Porém, assim como a lenha e o carvão, a queima de biomassa vegetal gera gases de combustão como CO, SO_x e NO_x, que devem ser monitorados e controlados de acordo com legislação pertinente e vigente. Visando contribuir com o aproveitamento de resíduos de uma empresa de aromas e extratos, biomassas de catuaba e carvalho foram caracterizadas por análise químicas e físicas e submetidas à secagem. A catuaba foi triturada e os dois resíduos foram submetidos à análise granulométrica e ao processo de briquetagem por compactação mecânica. Os briquetes apresentaram excelente aspecto visual, qualidade e combustibilidade. Durante a combustão dos briquetes dos dois resíduos, não houve formação significativa de óxidos sulfurados. Porém, houve liberação de NO_x e CO, sendo que a quantidade deste último, para o resíduo carvalho, foi acima do limite descrito na legislação, devido à dificuldade de ajustar oxigênio em excesso.

PALAVRAS-CHAVE: Biomassa, Energia, Emissões Atmosféricas.

INTRODUÇÃO

A grande disponibilidade de resíduos agroindustriais faz com que sejam cada vez mais empregados como biomassa e fonte alternativa de energia, diminuindo a exploração de recursos naturais e o seu descarte no meio ambiente (WILAIPON, 2009). Numa indústria de aromas e extratos diversas matérias-primas como carvalho, catuaba, mate e guaraná são utilizados e uma grande quantidade de resíduos sólidos é gerada. Em 2018, foram produzidas cerca de 46 toneladas de resíduo de catuaba e 95 toneladas de carvalho no processo de fabricação de extratos.

Resíduos agrícolas e agroindustriais, geralmente, apresentam baixa densidade e elevada umidade, promovendo altos custos com transporte e armazenamento, além de baixo poder calorífico, ocasionando baixa eficiência energética em processos de combustão (FELFI *et al.*, 2011). Uma forma de minimizar esses fatores é a compactação dos resíduos para transformá-los em briquetes, aumentando sua densidade aparente e energética.

Durante a combustão de biomassas vegetais, ocorre a liberação de gases como CO₂, CO, NO_x e SO_x, entre outros, cujas emissões devem estar dentro dos limites permissíveis por normas vigentes (WIELGOSINSKI *et al.*, 2016).

Visando avaliar o aproveitamento como biomassa combustível, neste trabalho, resíduos catuaba e carvalho, provenientes de uma indústria de aromas e extratos, foram submetidos previamente à secagem, à caracterização física e química e à briquetagem. Os briquetes foram caracterizados por análises físicas e, posteriormente, queimados em um combustor. Os gases gerados foram analisados e seus teores comparados com os permissíveis pelo CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), para CO e NO_x e pelo SEMA (Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos), para concentrações de SO_x.

METODOLOGIA

OBTENÇÃO E SECAGEM DOS RESÍDUOS

As biomassas de catuaba e carvalho foram obtidas de uma indústria de aromas e extratos, localizada no norte de Santa Catarina, após o processo de extração por percolação com solução hidroetanólica. Devido ao elevado teor de umidade, os resíduos foram previamente secos em estufa a 70 °C até umidade em torno de 15%. Devido à presença de lascas grosseiras, a catuaba foi triturada em um moinho de facas com uma malha de aproximadamente 2 mm.

CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

Análise Granulométrica: foi realizada segundo a norma ASTM E828-81 (2004), utilizando um agitador de peneiras eletromagnético, por 15 min e velocidade de 40 rpm. Foram utilizadas peneiras com aberturas entre 0,2 e 2,36 mm.

Análise química aproximada: foram determinados os teores de umidade (%U), materiais voláteis (%MV), cinzas (%) e carbono fixo (%CF) dos resíduos por termogravimetria (secagem em estufa a vácuo e queima em mufla). O teor de umidade foi determinado segundo a norma ASTM E871-82 (2013), materiais voláteis (%MV) a ASTM E872-82 (2006) e teor de cinzas a ASTM 1755-01 (2007). O teor de carbono fixo foi determinado diminuindo-se os teores de cinzas e materiais voláteis de 100%.

Poder calorífico superior (PCS): foi determinado a partir dos resultados da análise aproximada, conforme Equação 1, descrita por Sohnia *et al.* (2018 *apud* Vieceli *et al.*, 2018).

$$PC = 0,3536.CF + 0,1550.MV - 0,0078.CZ \quad \text{Equação (1)}$$

Onde, CF é carbono fixo, MV materiais voláteis e CZ o teor de cinzas.

Densidade aparente dos resíduos: foi determinada pelo Método da Proveta, a partir da relação entre massa e volume do material, segundo o Manual de Métodos de Análise do Solo, da EMBRAPA (1997) e realizada em triplicata.

OBTENÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E COMBUSTÃO DOS BRIQUETES

Briquetagem dos resíduos: foi realizada por compactação mecânica em um dispositivo de bancada, que consiste de um cilindro-pistão, ambos em aço inox, sendo o cilindro envolto por uma resistência elétrica para aquecimento e isolado termicamente. Este dispositivo foi acoplado a uma máquina de ensaio mecânico de materiais, modelo EMIC DL1000, com um sistema de aquisição de dados via computador usando o *software* TESC 3.0 e pertencente ao CAMEGI – UNIVILLE. A compactação foi realizada numa velocidade de 200 mm/min, a 30 °C e 90 MPa. Essas condições foram definidas visando obter menor gasto energético e briquetes com qualidade (SAPELINI, 2017; VIECELI *et al.*, 2018).

Propriedades viscoelásticas: as propriedades módulo de compactação, índice de porosidade, densidade final, densidade crítica, energia de compactação e taxa de compactação foram determinadas durante a compactação.

Faborode e O'Callaghan (1986) descreveram o comportamento da compactação de materiais fibrosos como uma relação entre a pressão aplicada na matéria-prima e a taxa de compressão (razão entre a densidade final e a densidade inicial), sendo expressa conforme a Equação 2.

$$\sigma k = \frac{k0}{b} [e^{b(r-1)} - 1]$$

Equação (2)

Onde, σk é a pressão de compactação (MPa); $k0$ é o módulo de compactação (MPa), que representa a resistência do material à compactação; b é o índice de porosidade (Adimensional), que expressa a porosidade ou o relaxamento da acomodação do material antes da compressão; e r é a taxa de compressão (Adimensional), definida como a razão entre a densidade em determinada fase de compressão pela densidade inicial do material. O módulo de compactação, o índice de porosidade e a energia de compactação foram determinados pelo ajuste da equação utilizando o software Origin Pro 7.0.

Densidade energética: foi determinada multiplicando-se a densidade final dos briquetes pelo poder calorífico.

Resistência à compressão mecânica: foi determinada em uma Máquina Universal Emic 100 kN, com velocidade de 1 mm/min, pertencente ao CAMEGI-UNIVILLE. A carga foi aplicada de maneira longitudinal ao briquete até sua ruptura, sendo empregados 5 briquetes de cada resíduo.

Combustão e análise dos gases: a combustão foi realizada em um combustor projetado por Sapelini *et al.* (2014) e a ignição iniciada com gás propano. Para quantificar as emissões de CO, SO_x e NO_x foi utilizado um analisador com células eletroquímicas, modelo Chemist 504S do fabricante Ecil. Foram realizadas medições a cada 1 min, durante 10 min. A análise foi feita em triplicata. Para cálculo de potência, a massas dos briquetes queimados foram previamente medidas. A emissão de CO₂ não foi monitorada, pois esse gás é considerado inerte, devido aos vegetais utilizarem-no no processo fotossintético.

Na Figura 1 estão as fotos do dispositivo de compactação dos resíduos, da sonda analisadora dos gases acoplada ao combustor e do analisador de gases.

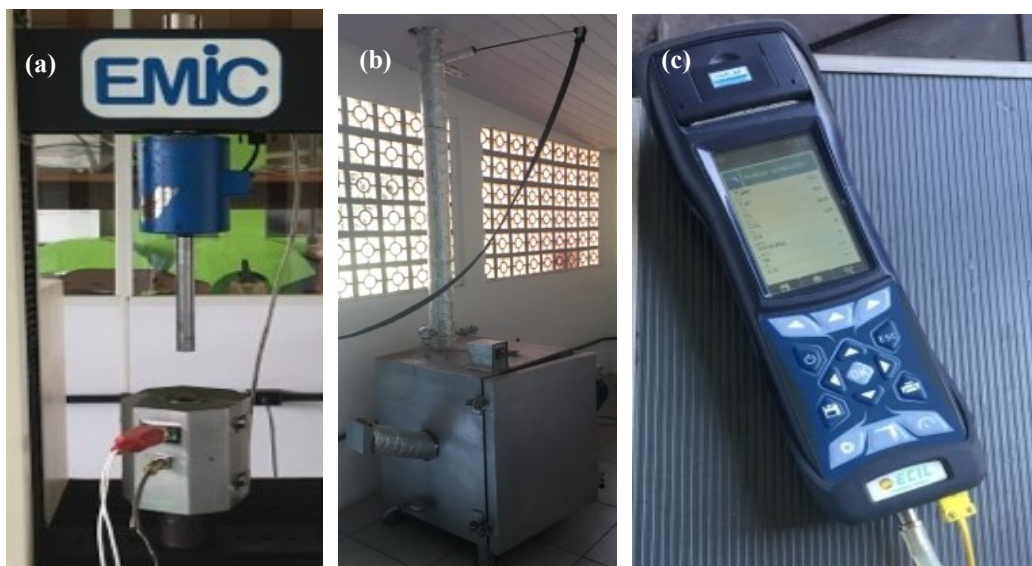


Figura 1: (a) Dispositivo de compactação mecânica, (b) sonda acoplada ao combustor e (c) analisador de gases.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

Na Figura 2 são apresentadas fotos dos resíduos catuaba e carvalho e na Tabela 1 os resultados da análise granulométrica, análise química aproximada e poder calorífico.



Figura 2: Resíduos de (a) catuaba e (b) carvalho.

Tabela 1: Análise granulométrica, química aproximada e poder calorífico dos resíduos.

Parâmetro	Catuaba	Carvalho
Granulometria	89,9% entre 1,25 e 1,7 mm	83,1% entre 1,25 e 1,7 mm
Umidade (%)	35,06 ± 0,01	41,1 ± 0,21
Materiais Voláteis (%)	61,72 ± 0,01	58,47 ± 0,25
Cinzas (%)	2,61 ± 0,01	0,37 ± 0,01
Carbono Fixo (%)	35,7	41,2
Poder calorífico superior (MJ/kg)	22,2	23,7

Da Tabela 1, nota-se que a maioria das partículas de catuaba (89,9%) e de carvalho (83,1%) apresentou diâmetros entre 1,25 e 1,7 mm, ideais para o processo de compactação, promovendo boa área de contato entre as partículas do material. Os resíduos avaliados por Sapelini (2017) e Vieceli *et al.* (2018) apresentaram granulometrias semelhantes às encontradas neste trabalho.

Tanto a catuaba como o carvalho apresentaram altos teores de umidade para o processo de briquetagem, de 35,1 e 41%, respectivamente. Desta forma, foram submetidos à secagem antes da compactação, obtendo umidade final de 14,5% para a catuaba e 14,1% para o carvalho. O teor de umidade ideal em biomassas é de 10 a 15% (GROVER e MISHRA, 1996). Os resíduos de catuaba e carvalho apresentaram baixos teores de cinzas (2,61 e 0,37%) e altos teores de materiais voláteis (61,7 e 58,4%), carbono fixo (35,7 e 41,2%) e poder calorífico superior (22,2 e 23,7 MJ/kg), respectivamente. Sapelini (2017) e Vieceli *et al.* (2018) encontraram valores semelhantes em seus estudos com os mesmos resíduos. De acordo com Ujjinappa e Spreepathi (2018), essas características contribuem para baixa produção de fumaça e altas inflamabilidade e geração de calor durante a combustão.

CARACTERIZAÇÃO DOS BRIQUETES

Na Figura 3 são mostradas fotos dos briquetes de catuaba e carvalho e na Tabela 2 as propriedades dos briquetes.



Figura 3: Briquetes de (a) catuaba e (b) carvalho.

Tabela 2: Propriedades dos briquetes.

Propriedades	Catuaba	Carvalho
Densidade aparente - resíduo (kg/m ³)	401,2	306,1
Densidade final - briquete (kg/m ³)	1602,7	1198,9
Densidade energética - briquete (MJ/m ³)	35659,2	28377,5
Módulo de compactação, ko (MPa)	3,42	15,8
Índice de porosidade, b (Adimensional)	1,137	0,926
Densidade crítica, ρ_c (kg/m ³)	352,8	330,5
Energia de compactação, E_c (J)	664,6	1462,2
Taxa de compactação, r (Adimensional)	3,99	3,92
Resistência mecânica briquete (MPa)	1,58 ± 0,16	0,71 ± 0,29

Da Figura 3 (a) e (b) verifica-se que os briquetes de biomassas de catuaba e carvalho apresentaram-se bem compactados, considerando que não houve adição de ligante para auxiliar na ligação das partículas do resíduo. De acordo com Ugwu e Agbo (2013), ligantes como amido, melão e argila diminuem o esfarelamento de briquetes.

Da Tabela 2, verifica-se que antes da compactação, o resíduo catuaba apresentou densidade aparente de 401,2 kg/m³ e após briquetagem a densidade final foi de 1602,7 kg/m³, maiores que os valores do carvalho, de 306 e 1198,9 kg/m³, respectivamente. Os dois resíduos apresentaram altas densidades energéticas, a catuaba de 35659,2 MJ/m³ e o carvalho de 28377,5 MJ/m³. Essa propriedade é importante no estudo do emprego de biomassa para geração de energia e é diretamente proporcional ao poder calorífico do resíduo (HOSSAIN *et al.* 2017).

O módulo de compactação da catuaba (3,42 MPa) foi menor do que o do carvalho (15,79 MPa), sendo essa propriedade um indicativo da resistência das partículas à compactação, quanto menor esse valor, mais fácil sua aglomeração (SAPELINI, 2017). Esses resultados corroboram com a menor energia de compactação da catuaba (664,6 J) do que para o carvalho (1462,2 J) e maior densidade crítica do primeiro resíduo (352,8 kg/m³) em relação ao segundo (330,5 kg/m³), pois quanto maior o valor da densidade crítica, mais rápido o briquete será formado e melhor será a sua qualidade (FABORODE e O'CALLAGHAN, 1986). Sapelini (2017) encontrou valores de densidade crítica variando entre 192,2 e 419,8 kg/m³ para o mate, dependendo da temperatura e pressão empregadas.

A taxa de compactação da catuaba (3,99) e do carvalho (3,92) foi bem semelhante. Geralmente, quanto menor a densidade inicial, maior o nível de compressão. O índice de porosidade representa o estado final de compactação e está diretamente relacionado com a densidade inicial do material, ou seja, quanto maior seu valor, maior o índice de porosidade e, portanto menor a porosidade, o que explica o maior índice para a catuaba (1,137) em relação ao carvalho (0,926) (PRÁ, 2016).

Os valores máximos de resistência à compressão dos briquetes de catuaba e carvalho foram de 1,58 ± 0,16 MPa e 0,71 ± 0,29 MPa, respectivamente. A maior resistência mecânica da catuaba pode ser atribuída à maior densidade final dos briquetes (1602,7 kg/m³) em relação aos de carvalho (1198,9 kg/m³). Richards (1990) afirma que a resistência à compressão dos briquetes deve ser no mínimo 0,375 MPa, já considerando tanto a pressão exercida durante o transporte do briquete como também o seu armazenamento em caixas.

QUEIMA DOS BRIQUETES E ANÁLISE DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

Na Figura 4 são mostradas fotos da chaminé do combustor durante a queima dos briquetes e dos briquetes durante e após a queima (já na forma de cinzas) e na Tabela 3 estão os resultados das emissões de CO, NO_x e SO_x durante a sua combustão.



Figura 4: (a) Chaminé durante a combustão, (b) briquetes durante a queima e (c) após a combustão na forma de cinzas.

Tabela 3: Emissões atmosféricas

Emissões Atmosféricas	Catuaba	Carvalho
CO (mg/Nm ³)	5833,8	8610,2
NO _x (mg/Nm ³)	386,9	1356,6
SO _x (mg/Nm ³)	0	0

Os briquetes de catuaba e carvalho apresentaram ótima combustibilidade, com queima rápida e com pouca cinza residual ao final do processo. Dos resultados das emissões atmosféricas, Tabela 3, verifica-se que a concentração de CO emitida durante a queima dos briquetes de catuaba foi de 5833,8 mg/Nm³, inferior ao limite máximo estabelecido pela Resolução CONAMA no. 436/2011 (7800 mg/Nm³) para combustão externa de derivados da madeira. A biomassa de carvalho emitiu uma concentração cerca de 10% acima (8610,2 mg/Nm³) do estabelecido pela resolução, o que pode ter ocorrido em função da quantidade de oxigênio em excesso ter sido superior para esse resíduo. Conforme Malat'ák *et al.* (2017), as emissões de CO podem ser diminuídas, principalmente, pelo ajuste da quantidade de oxigênio na combustão.

Para emissões de NO_x, os briquetes de catuaba liberaram concentrações de 386,9 mg/Nm³ e o carvalho de 1356,6 mg/Nm³. No entanto, a Resolução CONAMA não estabelece concentrações para a potência fornecida pela queima em questão (< 0,5 MW). Garcia *et al.* (2017) avaliaram a combustão de diferentes biomassas e obtiveram emissões de NO_x de 307 mg/m³ para casca de *Pinus* spp. e 126 mg/m³ para serragem de *Eucalyptus* spp., sendo esses valores inferiores aos limites máximos especificados pela Resolução CONAMA, de 650 mg/m³ (para potências maiores que 10 MW). Porém, os autores usaram potência de 0,08 MW, para a qual a resolução também não especifica os limites máximos. No entanto, biomassas vegetais, como catuaba e carvalho, geralmente, apresentam baixos teores de nitrogênio na sua composição (SAPELINI, 2017; VIECELI *et al.*, 2018).

Ambas as biomassas não emitiram SO_x durante a combustão, estando à princípio de acordo com a resolução do SEMA no. 016/2014, que também não especifica a concentração dessas substâncias para potências entre 0,05 e 0,15 MW. Segundo Sapelini (2017) e Vieceli *et al.* (2018), esses resíduos apresentam quantidades muito baixas de enxofre em sua composição, corroborando com a não detecção de compostos SO_x na análise dos gases de combustão.

CONCLUSÕES

As biomassas de catuaba e carvalho apresentam grande potencial para serem empregados como combustível, pois possuem altos teores de materiais voláteis e carbono fixo, baixos teores de cinzas e alto poder calorífico superior. A compactação contribuiu para o aumento da densidade aparente e, conseqüentemente, da resistência mecânica e densidade energética das biomassas. Os briquetes apresentaram excelente combustibilidade. Durante combustão, não houve emissão de SO_x pelos resíduos, a concentração de CO foi extrapolada em relação ao CONAMA apenas pelo carvalho e ambos os resíduos liberaram NO_x, sendo que o limite máximo não é estabelecido para a potência empregada. Biomassas de carvalho e catuaba podem ser empregadas como biomassa na forma de briquetes, contribuindo para a diminuição da disposição desses resíduos em aterros, porém, deve-se ter controle nos parâmetros de combustão em função das emissões de CO.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASTM - *Annual book of ASTM standards: E828-81. Standard Test Method for Designating the Size of RDF-3 From its Sieve Analysis*, 2004.
2. _____. E 871 - 82. *Standard Test Method Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels*, 2013.
3. _____. E 872 - 82. *Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels*, 2006.
4. _____. E 1755-01. *Standard Test Method for Ash in Biomass*, 2007.
5. BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 436, 22 de dezembro de 2011. Brasília, 2011.
6. BRASIL. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (SEMA). Resolução nº 016, 15 de abril de 2014. Paraná, 2014.
7. EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de pesquisa de Solos. Manual de Métodos de Análise de Solo, 2. ed. Rio de Janeiro, 1997.
8. FAVORODE, M. O.; O'CALLAGHAN, J. R. *Theoretical analysis of the compression of fibrous agricultural material. Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 35, n. 3, p. 175-191, 1986.
9. FELFI, F. F.; MESA, J. M.; ROCHA, J. D.; FILIPPETTO, D.; LUENGO, C. A.; PIPPO, W. A. *Biomass briquetting and its perspective in Brazil. Biomass and Bioenergy*, v. 35, n. 1, p. 236-242, 2011.
10. GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. Emissões de gases do efeito estufa da queima de pellets de madeira. *Revista Floresta*, v. 47, n. 3, p. 297-306, 2017.
11. GROVER, P. D.; MISHRA, S. K. *Biomass briquetting: technology and practices*, 1996.
12. HOSSAIN, N.; JALIL, R.; MAHLIA, T. M. I.; ZAINI, J. *Calorific value analysis of azadirachta excelsa and endospermum malaccense as potential solid fuels feedstock. International Journal of Technology*, v. 8, n. 4, p. 634-643, 2017.
13. MALAT'ÁK, J.; BRADNA, J.; VELEBIL, J. *The dependence of CO_x and NO_x emission concentrations on the excess air coefficient during combustion of selected agricultural briquetted by-products. Agronomy Research*, v. 15, n. Special Issue I, p. 1084-1093, 2017.
14. PRÁ, F. B. Avaliação do Aproveitamento de Folhas Ressecadas de Bananeira na Produção de Briquetes por Extrusão. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos), Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE), Joinville, SC, 2016.
15. RICHARDS, S. R. *Physical testing of fuel briquettes. Fuel Processing Technology*, v. 25, n. 2, p. 89-100, 1990.
16. SAPELINI, C.; SELLIN, N.; LOBO, M. Avaliação da disponibilidade e propriedades de folhas ressecadas de bananeiras para produção de briquetes e desenvolvimento de combustor. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária), Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE), Joinville, 2014.
17. SAPELINI, C. Avaliação da potencialidade energética e da obtenção de briquetes dos resíduos da madeira de carvalho e erva-mate de uma indústria de extratos e aromas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos), Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE), Joinville, 2017.
18. UGWU, K.; AGBO, K. *Evaluation of binders in the production of briquettes from empty fruit bunches of Elais Guinensis. International Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 2, n. 4, 176-179, 2013.
19. UJJINAPPA, S.; SPREEPATHI, L. K. *Evaluation of Physico-Mechanical-Combustion Characteristics of Fuel Briquettes Made from Blends of Areca Nut Husk, Simarouba Seed Shell and Black Liquor. International Journal of Renewable Energy Development*, v. 7, n. 2, p. 131-137, 2018.
20. VIECELI, M. C.; MAIA, B. G. O.; SOUZA, O.; SELLIN, N. Valorização do resíduo de catuaba de uma indústria de extratos e aromas vegetais como biomassa combustível. In: Congresso Brasileiro de

- Engenharia Química – COBEQ 2018, São Paulo Anais do XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ, v. XXII, p. 1-4, 2018.
21. WIELGOSINSKI, G.; LECHTANSKA, P.; NAMIECINSKA, O. *Emission of some pollutants from biomass combustion in comparison to hard coal combustion. Journal of the Energy Institute*, v. 90, n. 5, p. 1-10, 2016.
22. WILAIPON, P. *The Effects of Briquetting Pressure on Banana-Peel Briquette and the Banana Waste on Northern Thailand. American Journal and Applied Sciences*, v. 6, n. 1, p. 167-171, 2009.