

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ESTUDO DA APLICAÇÃO DE BIOMASSA PROVENIENTE DA CASCA DE MACADÂMIA COMO FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA

Lucas Henrique Pagoto Deoclecio, lucashenrique.pagoto@gmail.com

Eriky Fonseca dos Santos, erikyf-s@hotmail.com

Huarley Pratte Lemke, huarley@ifes.edu.br

Ryck Andrade Boroto, ryckb@ifes.edu.br

Filipe Arthur Firmino Monhol, filipe.monhol@ifes.edu.br

Instituto Federal do Espírito Santo, Coordenadoria de Eng. Mecânica, Br 101 Norte, Km 58, Litorâneo, São Mateus, ES

Resumo: Atualmente é de grande interesse a busca por fontes alternativas na matriz energética. Há grande necessidade de combustíveis eficientes que tenham a capacidade de suprir a demanda energética, poluindo menos, reduzindo custos e impactos sobre o ecossistema. A biomassa se destaca como uma realidade promissora que atende a esses quesitos. Assim, o presente trabalho tem por objetivo explorar o potencial da casca da macadâmia como combustível alternativo. Foi realizada uma análise de viabilidade da utilização dessa biomassa em substituição a um combustível convencional na alimentação de caldeiras de pequeno e médio porte. Buscou-se, com base na caracterização elementar do resíduo, encontrar a suas vantagens e limitações. Para se determinar a qualidade dessa alternativa foi realizada uma comparação com o carvão lignite, visto ser um combustível amplamente conhecido e empregado para tal fim. Foi priorizada uma análise exérgica, visto ser mais representativa, para as comparações entre os combustíveis. Cálculos da quantidades de poluentes lançados por massa de combustível queimado e uma análise de custos também foram realizados. Foi observado que a casca de macadâmia possui um melhor desempenho custo/benefício em comparação com o carvão e capacidade de geração de vapor não muito inferior.

Palavras-chave: casca de macadâmia, biomassa, combustível alternativo.

1. INTRODUÇÃO

A humanidade tem um grande desafio a vencer no século XXI: encontrar alternativas eficazes para suprir a demanda de consumo de forma sustentável. Buscar a harmonia e o equilíbrio do meio ambiente será uma tarefa difícil, mas que pode receber grande auxílio das novas tecnologias e inovações que estão surgindo.

O uso da bioenergia se revela ser uma opção inteligente e com potencial, visando um consumo consciente e sustentável, pois reaproveita resíduos sem destinação específica, e que provavelmente terminariam em aterros sanitários. Segundo o World Energy Outlook 2011, elaborado pela Agência Internacional de Energia (IEA), a participação das energias renováveis não hidrelétricas na matriz energética mundial será de 15% em 2035, sendo que em 2009 essa participação era de 3%.

O Atlas de Bioenergia do Espírito Santo (2013, p. 20) define biomassa como sendo “(...) todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia”. Segundo dados da Rede Política de Energias Renováveis – REN21, o balanço realizado até o final de 2013, China, Estados Unidos, Brasil, Canadá e Alemanha continuaram a ser os melhores países com capacidade total de energia renovável. A demanda de biomassa continuou a crescer de forma constante nos setores de energia e transportes. O consumo total de energia primária de biomassa atingiu cerca de 57 exajoules (EJ) em 2013, dos quais quase 60% foi biomassa tradicional, e o restante foi bioenergia moderna (sólido, gás e líquido combustível). Processos de aquecimento representaram a maioria da utilização de biomassa, subindo cerca de 1% para uma estimativa de 296 gigawatts - térmicos (GWth). A capacidade energética mundial associada à biomassa passou de 5 GW para 88 GW (REN21, 2014).

O Atlas de Bioenergia do Espírito Santo, (2013, p. 11), estima que “(...) a quantidade de biomassa existente na terra é da ordem de dois trilhões de toneladas, o que significa cerca de 400 toneladas per capita. Em termos energéticos, isso corresponde a mais ou menos 3.000 EJ por ano, oito vezes mais do que o consumo mundial de energia primária, da ordem de 400 EJ por ano.”

As vantagens do uso da biomassa na produção de energia são o baixo custo produtivo e operacional; o fato de se tratar de insumo renovável, permitir o reaproveitamento de resíduos e ser bem menos poluente do que outras fontes de energia, (...) e também sua alta densidade energética e facilidades de armazenamento, conversão e transporte. (Atlas de Bioenergia do Espírito Santo, 2013, p. 11).

1.1. Uma fonte de Energia Promissora

O presente trabalho buscar explorar o potencial uso da casca da macadâmia, como combustível sólido em caldeira. A noqueira macadâmia (*Macadamia integrifolia*) é uma árvore frutífera originária das florestas subtropical da Austrália (Perdoná *et. al.*, 2012; Fletcher *et. al.*, 2010; Mcfadyen *et. al.*, 2012), pertencente à família Proteaceae (Schneider *et. al.*, 2012), que produz uma noz de alto valor no mercado internacional, com grande aceitação entre os consumidores (Dierberger, Netto, 1985; Chung *et. al.*, 2013).

Tabela 1. Características da casca de macadâmia (Toles *et. al.*, 1998; apud Maia *et. al.*, 2012, p. 1; Strezov *et. al.*, 2007; apud Maia *et. al.*, 2012, p. 2).

Carbonização da casca (%)			Principais componentes (%)				
Cinzas	Voláteis	Carbono Fixo	Lignina	Celulose	Hemicelulose	Cinzas	Umidade
0,4	79,7	19,9	47,6	25,8	11,7	0,0-2,0	10,0

A Tab. 1 traz valores da caracterização e dos constituintes da casca de macadâmia. A cada tonelada de noz produzida, são geradas cerca de 70 a 77% de resíduos de casca, em geral usados em atividades de jardinocultura, produção de mudas (Penoni *et. al.*, 2011; Pimentel *et. al.*, 2007 apud Maia *et. al.*, 2012, p. 1) ou ainda queimados como combustível em caldeiras (Wechsler *et. al.*, 2011; Poltronieri *et. al.*, 2005) e a densidade do epicarpo da macadâmia está em torno de 0,680 g/cm³ (Toles *et. al.*, 1998; apud Maia *et. al.*, 2012, p. 1).

Ferreira (2013, p. 17) “Teve como objetivo principal de caracterizar a utilização de partículas de casca de noz macadâmia na produção de painéis particulados de madeira de *Eucalyptus saligna*. Para isso produziu-se painéis com diferentes quantidades da casca”. O uso de resíduos agrícolas tem sido cada vez mais utilizado. Maia *et. al.*, (2012) utilizou da casca de macadâmia para a produção de bi carvões com uma das propostas de melhorar as propriedades físicas e químicas do solo, conduzindo ao aumento de produtividade. Materiais de origem vegetal são capazes de produzir carbonos ativados. Poinern (*et. al.*, 2011) investigou o potencial de uso das cascas de macadâmia como um precursor orgânico para a produção de um material de carbono ativado.

Atualmente, o Brasil é o 6º lugar no ranking de exportação de macadâmia, possui uma área aproximada de 6.500 hectares plantados de macadâmia, com produção anual de 5500 toneladas de amêndoa em casca. O resultado é superior em 14,8% à produção de 2013, de acordo com dados da Associação Brasileira de Noz Macadâmia, (2014).

Campos (2009), destaca em seu estudo para determinar o poder calorífico da macadâmia, que o valor encontrado ficou dentro de uma faixa de variação de 2,39%, considerado aceitável e ao comparar o resultado obtido com o apresentado por outros autores na literatura (Parikh, *et. al.*, 2005) verifica-se que o valor está dentro da margem dos ensaios realizados. “Pode ser verificado que a casca de macadâmia é uma matéria prima que pode ser destinada à produção de carvão ativado como fonte de energia, tendo em vista o elevado teor de carbono fixo e teores voláteis, os baixos teores de cinzas e poder calorífico que é da mesma ordem de grandeza, de madeiras como pinus e eucaliptos.” (Campos, 2009, p. 3).

A escolha desta biomassa para o estudo de geração de energia é justificada pelo seu alto poder calorífico, cerca de 21,0 MJ/Kg na base seca (Parikh *et. al.*, 2005). Para outros resíduos utilizados em caldeiras, o poder calorífico é bem menor, como exemplo a casca de cacau 16,4 MJ/kg, palha de milho 12,6 MJ/kg, e a casca de café 13,5 MJ/kg. Aliado a este fato, tem-se que processamento da amêndoa gera uma grande quantidade de resíduos: a taxa média de retorno é de 25%, ou seja, a cada 25g de amêndoa produzida, 75g de resíduos são gerados (Pimentel *et. al.*, 2007). Estes dois fatores combinados servem de grande incentivo para pesquisas de fins energéticos.

2. METODOLOGIA

Para determinar as principais propriedades da macadâmia para o uso como combustível, utilizamos a consulta em diversas literaturas. Como a cultura é relativamente recente no país, estudos e dados técnicos são escassos. Poucas instituições têm investido em pesquisas nesta área, e uma das pioneiras é o Instituto Agrônomo (IAC) (Pimentel, *et. al.*, 2007).

O equipamento selecionado para a utilização da casca de macadâmia foi a caldeira aquatubular, modelo BME 3000 encontrada na sede da empresa em Ribeirão Preto – SP, para combustíveis sólidos como resíduos florestais e agroindustriais: bagaço de cana, cascas, cavacos, serragem, e outros resíduos. A caldeira foi escolhida com base na seleção do produto agrícola em estudo. Elas possuem um maior rendimento, maior produção de vapor, e maior superfície de aquecimento. As caldeiras da série BME 3000 possuem como características técnicas a capacidade de produção de vapor de 20 a 300 t/h, pressão de vapor de até 120 kgf/cm², temperatura de vapor saturado ou superaquecido até 530 °C, e são

auto suportadas por sua base. Os dados e propriedades do equipamento foram fornecidos pela empresa BME Sistemas de Energia, no qual tem experiência no fornecimento de caldeiras e desaeradores térmicos.

Foi calculado a vazão do combustível, a eficiência exergética da caldeira, temperatura de chama do combustível, eficiência exergética da fornalha e a emissão de poluentes. Estes dados foram comparados ao carvão lignite, aos quais apresentamos os resultados obtidos.

Primeiro, foi obtida a fórmula mínima equivalente dos combustíveis com base na fração mássica de cada componente do combustível na base seca. O resultado dessa caracterização foi a caracterização dos combustíveis na base molar que foi então aplicada na Eq. (1), conforme os conceitos apresentados por Turns (2000), que é a equação da combustão completa na forma genérica.

$$C_j H_t N_r O_i S_u + a \times \gamma(O_2 + 3,76 N_2 + n_v H_2 O) + \text{cinzas} \rightarrow b CO_2 + c H_2 O + d SO_2 + e N_2 + f O_2 + \text{cinzas} \quad (1)$$

Onde j, t, r, i e u representam o número de átomos de cada componente do combustível em questão na fórmula mínima equivalente, a, b, c, d, e e f são coeficientes da reação de combustão de cada combustível e γ é o excesso de ar.

Os resultados destes coeficientes podem ser vistos na seção 3.1. Para se obter a equação completa da combustão a Eq. (2) foi utilizada para se obter o número de moles de água no ar, conforme os conceitos apresentados por Borgnakke e Sonntag (2009).

$$\frac{n_v}{n_{O_2} + n_{N_2} + n_v} = \frac{\phi \cdot P_{sat}(T_o)}{P_{atm}} = \frac{\phi \cdot P_{sat}(25^\circ)}{P_{atm}} \quad (2)$$

Onde n_v é o número de moles de água no ar, n_{O_2} e n_{N_2} são o número de moles de oxigênio e nitrogênio no ar respectivamente, $P_{sat}(T_o)$ é a pressão de saturação do vapor na temperatura do ar atmosférico, P_{atm} é a pressão atmosférica e ϕ é a umidade relativa do ar.

Segundo, para o cálculo da relação ar-combustível, foram utilizadas as Eq. (3) e (4), mostradas a seguir, de acordo com Shapiro (2013).

$$\frac{A}{F} = \frac{a\gamma(n_{O_2} + n_{N_2} + n_v)MW_{ar}}{1 MW_{combustível}} \quad (3)$$

$$MW = \frac{\sum n_i \cdot MW_i}{\sum n_i} \quad (4)$$

Onde A/F é a razão ar/combustível em kg/kg e MW é a massa molar de uma mistura de gases. As massas molares dos combustíveis foram obtidas pela aplicação do somatório do numerador da Eq. (4), $\sum n_i \cdot MW_i$.

Terceiro, para o cálculo da vazão de combustível, utilizou-se a Eq. (5), conforme os conceitos apresentados por Shapiro (2013), para a eficiência energética da caldeira:

$$\eta_{cal} = \frac{\dot{m}_v(h_{as} - h_{ae})}{\dot{m}_c PCI} \quad (5)$$

Onde, $\dot{m}_v$ é a vazão de vapor, h_{as} e h_{ae} as entalpias de saída e entrada da água respectivamente, $\dot{m}_c$ é a vazão de combustível e PCI é o poder calorífico inferior. Contudo, antes de se utilizar a Eq. (5), foi necessário converter o poder calorífico superior (PCS) dos combustíveis encontradas na literatura para PCI para tal a Eq. (6) foi aplicada conforme proposto por Lora e Nascimento (2004). Nesses cálculos foram utilizados o PCI, uma vez que na maioria dos processos industriais, incluindo os processos de combustão na geração de vapor em caldeiras, a água presente nos gases de combustão encontra-se no estado de vapor, indicando que calor latente de condensação não foi aproveitado (Shapiro, 2013), onde h_{alv} é o calor de vaporização da água.

$$PCI = PCS - \frac{c \times MW_{H_2O}}{n_{combustível} \times MW_{combustível}} h_{alv} \quad (6)$$

Quarto, a capacidade de geração de vapor (CGV) foi calculado, de acordo com Lora e Nascimento (2004), como mostrado na Eq. (7).

$$CGV = \frac{PCI_{combustível}}{(h_{as} - h_{ae})} \quad (7)$$

Quinto, o cálculo da eficiência exergética na caldeira (ε_{cal}) foi feito através da Eq. (8), conforme os conceitos apresentados por Shapiro (2013):

$$\varepsilon_{cal} = \frac{\dot{m}_v[(h_{as} - h_{ae}) - T_0(S_{as} - S_{ae})]}{\dot{m}_c \times E_{combustível}^Q} \quad (8)$$

Onde s_{as} e s_{ae} são as entropias da água na saída e na entrada da caldeira respectivamente e ainda a exergia química do combustível ($E_{combustível}^Q$) é dada pela Eq. (9), de acordo com Lora e Nascimento (2004):

$$E_{combustível}^Q = [PCI + 2442W]\phi + 9417,5 \quad (9)$$

Para esse cálculo considera-se os valores de umidade dos combustíveis (W) e sua composição química, onde ϕ , de acordo com Lora e Nascimento (2004), é dado pela Eq. (10). Os dados de composição são obtidos das Tab. 2 e 3.

$$\phi = \frac{1,0438 + 0,1882 \frac{H}{C} - 0,2509 \left(1 + 0,7256 \times \frac{H}{C} \right) + 0,0383 \frac{H}{C}}{1 - 0,3035 \frac{O}{C}} \quad (10)$$

Sexto, a temperatura de chama adiabática, conforme os conceitos apresentados por Shapiro (2013), foi obtida com base na Eq. (11).

$$\eta_{for} = \frac{\dot{m}_g(h_{tc} - h_o)}{\dot{m}_c PCI} \quad (11)$$

Onde $\dot{m}_g$ é a vazão dos gases da combustão, h_{tc} é a temperatura da chama e h_s é a entalpia dos gases na saída. Previamente a vazão dos gases da combustão foi calculado através da Eq. (12), conforme apresentado por Shapiro (2013),

$$\dot{m}_g = \dot{m}_c + \dot{m}_c \cdot \frac{A}{F} \quad (12)$$

Sétimo, a eficiência exergética na fornalha (ε_{for}), conforme os conceitos apresentados por Shapiro (2013), é dada pela razão da vazão exergética dos gases da combustão e pela vazão exergética química do combustível, sendo calculado pela Eq. (13).

$$\varepsilon_{for} = \frac{\dot{m}_g[(h_{tc} - h_o) - T_0(S_{tc} - S_o)]}{\dot{m}_{combustível} \times E_{combustível}^Q} \quad (13)$$

Onde h_{tc} , h_o , S_{tc} e S_o são as entalpias e entropias na temperatura de chama e na temperatura de referência respectivamente.

Oitavo, o cálculo da emissão de poluente foi feito com base na vazão de combustível e na quantidade de moles de poluentes gerados por moles de combustível. Para isso a Eq. (14) foi aplicada, conforme apresentado por Shapiro (2013).

$$\dot{m}_s = \frac{n_s \times MW_s}{1 MW_{combustível}} \times \dot{m}_c \quad (14)$$

Onde $\dot{m}_s$ é a vazão mássica da substância analisada que pode ser CO₂ ou SO₂ e n_s é igual aos coeficientes b e d da Eq. (1) para o CO₂ e SO₂ respectivamente.

Por último, foi feita uma análise de custos entre a casca de macadâmia e o carvão lignite com base na eficiência dos combustíveis e no preço de cada um.

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

3.1. Cálculos das Reações Químicas de Combustão

De acordo Arruda, (2014) o excesso de ar (γ) para combustão de sólidos é de aproximadamente 30%, valor que adotamos neste trabalho. Ceron (2010) define os valores usuais para coeficiente de excesso de ar na faixa 1,25 a 1,35 para o bagaço em todas as fornalhas. Dados do Instituto Nacional de Meteorologia – Inmet, a umidade relativa média e a temperatura compensada média para a cidade de São Mateus, ES, são 77% e 26°C, respectivamente. Estes dados foram obtidos através de uma média aritmética das medidas de áreas do ano de 2014. A caracterização elementar da casca de macadâmia por porcentagem do peso na base seca pode ser vista na Tab. 2.

A última coluna da Tab. 2 representa os valores dos coeficientes j, t, r, i e u da Eq. (1) para a casca de macadâmia. Estes valores foram substituídos na Eq. (1).

$$CH_{1,1005} N_{0,00057} O_{0,5471} S_{6,89 \times 10^{-5}} + a \times \gamma (O_2 + 3,76 N_2 + 0,1191 H_2 O) + 0,0882 g \frac{\text{cinzas}}{\text{mol}} \\ \rightarrow b CO_2 + c H_2 O + d SO_2 + e N_2 + f O_2 + 0,0882 g \frac{\text{cinzas}}{\text{mol}} C$$

Após o balanço dos elementos a equação da combustão genérica completa da casca de macadâmia, Eq. (1), fica da seguinte forma:

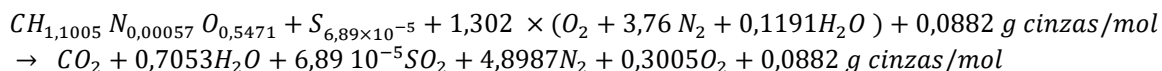


Tabela 2. Caracterização elementar e frações molares da casca macadâmia (Parikh, p. 489, 2005).

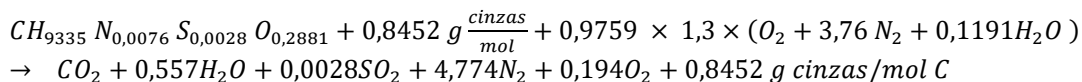
Elemento	Fração mássica g(i)/g(total) [%]	Massa molar g(i)/mol (i)	mol (i)/g total	mol (i)/mol de carbono
C	54,41	12	4,5342	1,000
H	4,99	1	4,9900	1,1005
N	0,36	14	0,0257	0,0057
O	39,69	16	2,4806	0,5471
S	0,01	32	0,0003	$6,89 \times 10^{-5}$
Cinzas	0,40			0,0882 g cinzas /mol

Para a comparação com a casca de macadâmia o carvão escolhido foi o carvão lignite German Braunkohle. A caracterização elementar desse carvão por porcentagem do peso na base seca pode ser vista na Tab. 3.

Tabela 3. Caracterização elementar e frações molares do carvão lignite (Parikh, p. 489, 2005).

Elemento	Fração mássica g(i)/g total	Massa molar g(i)/mol (i)	Mol (i)/g total	kmol i / kmol carbono
C	63,89	12	5,3242	1,0000
H	4,97	1	4,9700	0,9335
N	0,57	14	0,0407	0,0076
O	24,54	16	1,5338	0,2881
S	0,48	32	0,0150	0,0028
Cinzas	4,50			0,8452

Da mesma forma que para a casca de macadâmia, a equação da combustão genérica completa do carvão lignite é dada por:



3.2. Relação Ar-Combustível

Aplicando a Eq. (4), obtemos a massa molar média do ar (MW_{ar}) igual a 28,57 kg/kmol. As massas molares equivalentes da casca de macadâmia ($MW_{macadâmia}$) e do carvão ($MW_{carvão}$) e são dadas pelo somatório das massas moleculares de cada componente que compõe o combustível pelos coeficientes das últimas colunas das Tab. 2 e 3 e são iguais a 22,02 kg/kmol e 18,58 kg/kmol respectivamente.

Assim da Eq. (3) temos:

$$\frac{A}{F_{macadâmia}} = 8,243 \text{ kg ar/kg combustível} \text{ e } \frac{A}{F_{carvão}} = 9,518 \text{ kg ar/kg combustível}$$

3.3. Vazão de Combustível

Adotou-se, para efeitos de cálculos a utilização da vazão de combustível da caldeira da empresa BME Sistemas de Energia, modelo BME 3000. Dados da caldeira: Capacidade de 20 a 300 toneladas/hora de vapor; pressão de vapor até 120 kgf/cm²; temperatura de vapor superaquecido até 530°. Configuração da caldeira definidas para este trabalho: capacidade: 20 ton/hora (5,55 kg/s); Pressão: 20,39 kgf/cm² (20 bar); temperatura: 440° (713K) (BME Sistemas de Energia, 2015).

Considerando que a caldeira opera em um sistema que trabalha de acordo com o ciclo Rankine, podemos considerar que a água entra na caldeira como líquido saturado a pressão de 20 bar e sai como vapor superaquecido à temperatura de 440°C e pressão de 20 bar. O valor do PCS (poder calorífico superior) da casca de macadâmia é 21.010 KJ/Kg. O valor do PCS do carvão lignite úmido é 25.100 kJ/kg (Parikh *et. al.*, 2005). Utilizando a Eq. (6) para obter o PCI com base no PCS e assumindo a temperatura de vaporização da água a 100 °C, os PCIs dos combustíveis foram calculados:

$$PCI_{macadâmia} = 9.708 \text{ kJ/kg} \text{ e } PCI_{macadâmia} = 23.882 \text{ kJ/kg}$$

A eficiência energética da transferência de calor do combustível para o vapor de trabalho é uma função da arquitetura da caldeira. De acordo com Arruda (2014) a eficiência energética média de uma caldeira é de 90%. Assim é possível calcular a vazão de combustível necessário na caldeira, de acordo com a Eq. (5).

Substituindo os valores na Eq. (5), temos as vazões mássicas de combustível mostrada na Fig. 1. A vazão de combustível da casca de macadâmia obtido foi de 0,759 kg/s e do carvão 0,626 kg/s, sendo a vazão da casca de macadâmia 17,52 % maior que a vazão de carvão lignite, devido ao PCI do carvão lignite ser superior ao PCI da casca de macadâmia.

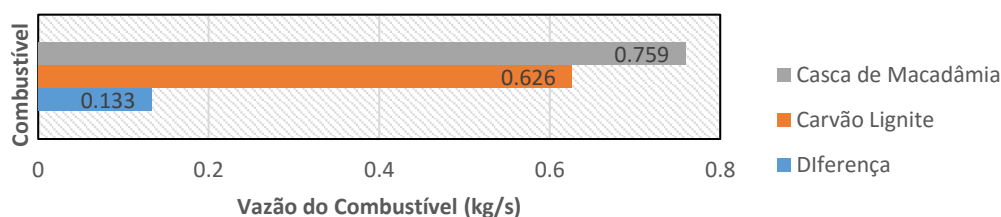


Figura 1. Vazão de combustível necessária para gerar 5,55 kg/s de vapor nas condições estabelecidas previamente e a diferença entre elas.

3.4. Capacidade de Geração de Vapor (CGV)

A capacidade de geração de vapor foi obtida pela Eq. (7) e um comparativo entre os combustíveis é mostrado na Fig. 2. Para casca de macadâmia a CGV foi de 8,122 quilogramas de vapor por quilograma de combustível e para o carvão 9,841 quilogramas de vapor por quilograma de combustível, tendo o carvão um rendimento de 21,65 % superior a macadâmia na geração de vapor por quilograma de combustível.

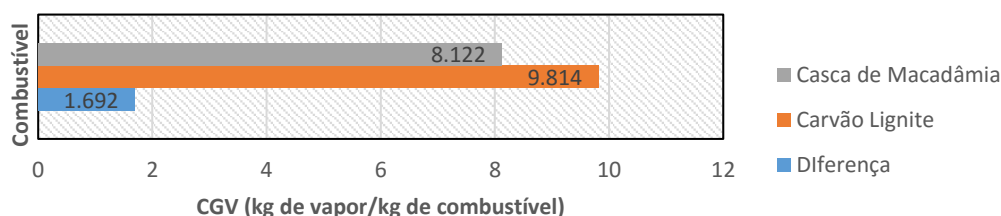


Figura 2. Quilogramas de vapor gerados para cada quilograma de combustível queimado e diferença entre estes.

3.5. Eficiência Exergética na Caldeira

A eficiência exergética da caldeira é a razão da vazão exergética do vapor pela vazão exergética química do combustível, conforme a Eq. (8). A eficiência exergética com casca de macadâmia é de 25% e com carvão 28%. As eficiências exergéticas da caldeira são mostradas na Fig. 3.

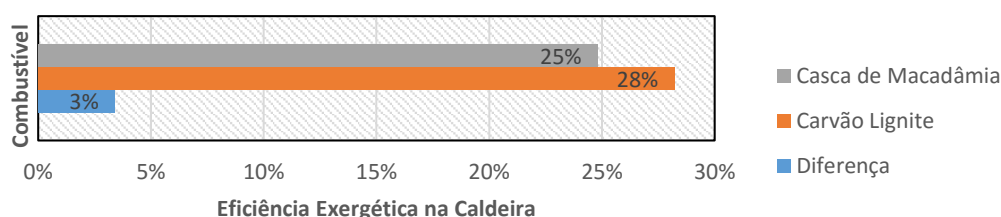


Figura 3. Eficiência exergética da caldeira e a diferença entre elas.

3.6. Temperatura de Chama

Não foi encontrado na literatura a temperatura de chama nem a entalpia de formação da casca de macadâmia. Portanto a temperatura de chama de cada combustível foi estimada supondo uma eficiência da fornalha de 100% na Eq. (11), que calcula o valor da eficiência energética da fornalha da caldeira. Os gases da combustão foram modelados como o ar. A massa molecular da mistura dos gases da combustão e do ar são parecidas, o que torna a modelagem dos gases da de exaustão como ar uma aproximação razoável. Os valores de massa molecular de acordo com a Eq. (4) são iguais a 29,47 kg/kmol, 29,73 kg/kmol e 28,57 kg/kmol para casca de macadâmia, para o carvão lignite e para o ar respectivamente.

Aplicando a Eq. (11) para a casca de macadâmia, obteve-se a entalpia da temperatura de chama: 2392,95 kJ/kg que, pela Tab. A 22, (Shapiro, 2013, p. 756), corresponde a temperatura de chama de 2.110 °C. Para o carvão obteve-se a entalpia da temperatura de chama de 2.543,68 kJ/kg, assim obteve-se a temperatura de chama de aproximadamente 2.231 °C. Esses valores estão expressos na Fig. 4.

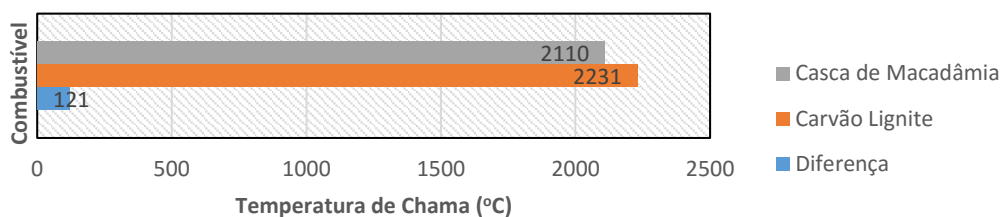


Figura 4. Temperatura adiabática de chama de cada combustível e a diferença entre elas, em graus Celsius.

3.7. Eficiência Exergética da Fornalha

A eficiência exergética da fornalha para a casca da macadâmia obtida foi de 48% e de 55% para o carvão. Esses valores estão expressos na Fig. 5.

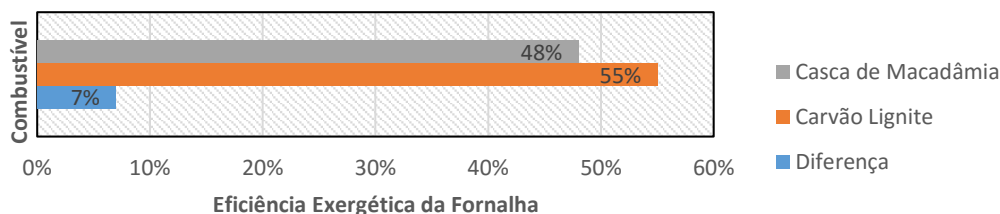


Figura 5. Eficiência exergética da fornalha e a diferença entre elas.

3.8. Emissão de Poluentes

Aplicando Eq. (14), as emissões de CO₂ e de SO₂ da combustão da casca de macadâmia são 1,52 kg/s, $1,52 \times 10^{-4}$ kg/s respectivamente e respectivamente e 1,48 kg/s e 0,006 kg/s para o carvão lignite, como mostrado nas Fig. 6 e 7.

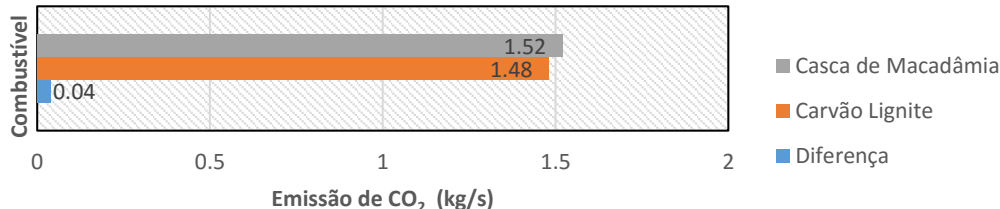


Figura 6. Emissão de CO₂ para a casca de macadâmia, o carvão lignite e a diferença entre elas.

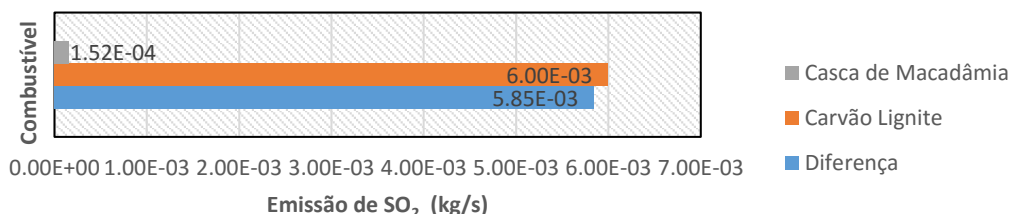


Figura 7. Emissão de SO₂ para a casca de macadâmia, o carvão lignite e a diferença entre elas.

3.9. Análise Comparativa de Custos

Schneider e Andreas (2012) estimaram o “custo com secagem de biomassa (R\$/ton) R\$ 20.00”, o qual utilizamos como parâmetro para secagem da casca de macadâmia. Segundo Macedo (2001), para reduzir os custos com transporte, os resíduos de biomassa da produção de alimentos que já estejam no local de uso, têm esses custos absorvidos pelo custo do produto principal. Além disso, a casca de macadâmia não precisa passar por um processo de trituração, como por exemplo o qual ocorre com o uso de lenha, para ser utilizada como combustível; um exemplo dessa aplicação é a sua utilização como combustível em um secador de café sem passar por um processo de trituração, na região de São Mateus, ES. Outro aspecto é que a casca de macadâmia seria simplesmente descartada, o que reduz o seu custo de aquisição, pois

seu uso como combustível prove um destino mais rentável do que seria apenas o descarte. Assim, a análise neste trabalho do custo da obtenção desse biocombustível considerou a sua utilização em uma caldeira próxima ao produtor, portanto os custos de transporte e trituração e aquisição não foram levados em conta.

Para referenciar o custo por tonelada do carvão utilizou-se as informações da BP Global (2015), em dados estatísticos para preço do carvão nos Estados Unidos, obtendo o custo de R\$ 241,50 (considerando a taxa de câmbio do dólar americano R\$3,50).

Para realizar uma análise de custo mais sensata, não se pode comparar cada combustível apenas pelo seu custo de obtenção, uma vez que um combustível pode ser barato, porém resultar em uma baixa eficiência no equipamento. Assim, deve-se levar em conta a eficiência exergética da caldeira para tal combustível, que é a capacidade de geração de trabalho útil que foi aproveitada do mesmo. Portanto, foi utilizado a relação de eficiência entre a casca de macadâmia e o carvão lignite, dada pela Eq. (15) abaixo, para ponderar o custo de cada combustível.

$$R_{\text{eficiência}} = \frac{\varepsilon_{\text{caldeira carvão}}}{\varepsilon_{\text{caldeira macadâmia}}} \quad (15)$$

Assim, a relação de eficiência é de 1,12 e nota-se que cada quilograma de carvão equivale, exergeticamente na caldeira, a 1,12 quilogramas de casca de macadâmia. Logo, pode-se obter os seguintes valores conforme Tab. 4:

Tabela 4. Relação de custos com combustível para uma mesma eficiência térmica.

Biomassa	Valor (R\$/ton)	Relação de eficiência	Custo considerando eficiência (R\$)
Carvão	241,50	1	241,50
Casca de macadâmia	20,00	1,12	22,4

Os dados apresentados na Tab. 4 indicam um custo menor para a macadâmia considerando a relação de eficiência entre os combustíveis. A casca de macadâmia tem seu valor por tonelada basicamente computando os custos de secagem, uma vez que o custo de transporte desse biocombustível pode ser dissolvido no custo de produção da amêndoa, não há a necessidade do processo de trituração e ela seria alvo de descarte sem ser reaproveitada. Diferente ocorre com o carvão, que tem seus custos com extração, transporte e comercialização, embutidos no valor por tonelada. Enquanto que o recolhimento e destinação da casca de macadâmia resolve um problema ambiental (senão provável destino seria os aterros sanitários), o carvão gera um passivo ambiental pelas condições de extração e utilização.

O cálculo da vazão de combustível de acordo como os dados da Fig. 1, a capacidade de geração de vapor de acordo com os valores obtidos e expressos na Fig. 2 e as temperaturas de chama calculadas e mostradas na Fig. 4 demonstram números muito próximo para os dois combustíveis, e asseguram a viabilidade do uso da biomassa. Isso ratifica o potencial da biomassa em estudo na comparação com o carvão, que não é um combustível comercialmente empregado como carvão, mas que se for pensado em algo que seria descartado a casca de macadâmia não fica muito atrás do carvão lignite.

De maneira geral, não se expôs grandes disparidades na comparação exergética entre os combustíveis, como expresso nas Fig. 3 e 5. Assim, mais umas vez a casca de macadâmia, ainda que com algumas perdas numéricas em relação ao carvão, evidenciou ser competitiva, com rendimentos satisfatórios, abonando e atestando o seu uso.

Quanto a emissão de poluentes, a casca de macadâmia tem emissões de CO₂ similares as do carvão, porém como a casca de macadâmia é proveniente de uma fonte renovável vegetal, ela tem a vantagem de pela fotossíntese reabsorver parte do CO₂ emitido, o que prejudica menos o desenvolvimento do efeito estufa. Uma outra vantagem da casca de macadâmia sobre o carvão lignite é que as emissões de SO₂ são muito menores. O SO₂ é um gás tóxico e é um causador da chuva ácida, logo vê-se uma grande vantagem ecológica da casca de macadâmia em relação ao carvão lignite. Como consequência disso, uma caldeira que opera com casca de macadâmia apresentará menos problemas com corrosão causada por SO₂, o que diminui os custos de manutenção e um menor gasto com a limpeza e filtragem dos gases poluentes.

A casca de macadâmia tem condições de se tornar um combustível alternativo eficiente nesta primeira análise, sem um tratamento especial para o resíduo. Caso fosse aplicado a técnica de densificação, poderíamos melhorar a qualidade da biomassa na combustão (Werther *et. al.*, 2000). A densificação é um processo no qual resíduos de biomassa, como madeira ou cascas, são compactados de forma a aumentar sua densidade (Fraza, 2008). Contudo, sem muita vez a casca de macadâmia é utilizada sem que se faça a densificação, uma vez que seu poder calorífico é elevado e seu formato permite uma boa circulação do comburente.

Na capacidade de geração de vapor sugere significativa economia de combustível quanto comparado ao carvão, assim como os valores obtidos para eficiência energética. Por se tratar a casca de macadâmia de um resíduo agrícola, tem baixo custo para sua aquisição, contribuindo de forma ambiental sua utilização, quando considerarmos evitar o descarte em aterros sanitários.

4. CONCLUSÕES

Podemos concluir que a utilização do resíduo da casca de macadâmia como combustível em caldeiras de pequeno e médio porte é viável. Primeiro, a casca de macadâmia é uma fonte de combustível alternativa interessante do ponto de vista econômico devido ao seu alto poder calorífico (PCI) de 19.708 kJ/kg. Se comparado com o carvão lignite, a caldeira que utiliza casca de macadâmia tem uma capacidade de geração de 8,122 kg de vapor por kg de combustível e para o

carvão 9,814 kg de vapor por kg de combustível, uma diferença pequena (21,65%), tendo em vista os benefícios da utilização da biomassa em termos econômicos e ambientais.

Recomenda-se a utilização da casca de macadâmia para caldeira de pequeno porte, pois a área plantada da fruta e sua produção no Brasil ainda é muito pequena e por ser um combustível orgânico sua estocagem *in natura* sofre uma rápida degradação. Por se tratar de uma fonte renovável e com alta concentração de resíduo por quilo de produto (cerca de 70%), se torna uma matéria importante para considerar uma aplicação adicional para o substrato. Sua utilização faz parte da composição para uma busca sustentável em geração de energia, diversificando a matriz energética visando a sustentabilidade.

Considera-se ainda que o potencial energético da casca de macadâmia pode ser ampliado, caso haja um estudo de racionalização do seu uso e um tratamento do resíduo antes da queima. As áreas plantadas também podem ser ampliadas visto a boa receptividade que o mercado interno tem. É preciso alcançar uma rota estável na oferta da casca para garantir o abastecimento do combustível, se risco de falta do produto no mercado. A intercalação como outras fontes de biomassa seria válida e conveniente para a indústria, quando consideramos que o produto não é colhido o ano todo.

Concluímos que novos estudos são necessários e recomendamos o uso da casca de macadâmia como fonte de combustível.

5. REFERÊNCIAS

- Atlas de Bioenergia do Espírito Santo, 2013, “Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo (ASPE)”, pp. 100 Vitória, Brasil.
- Arruda, R. R., 2014, “Metodologia para análise energética e exergética de uma caldeira aquatubular com queima de bagaço de cana”. Dissertação Mestrado. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, Brasil, 88 p.
- Associação Brasileira de Noz Macadâmia, 2015. Disponível em [<http://www.abm.agr.br/inicio.php>] Acesso em 12 nov 2015.
- BME Sistemas de Energia, “Catalogo geral de caldeiras”. Disponível em [<http://www.bmese.com.br/pdfs/BME%20Catalogo%20Geral.pdf>] Acesso em 5 jun 2015.
- Borgnakke, C., Sonntag, R. E., 2009, “Fundamentos da Termodinâmica”, 7ª Ed., Blucher, São Paulo, pp. 396-397.
- BP Global, 2015. “Coal prices declined in all regions for the fourth consecutive year”. Disponível em [<http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/coal/coal-prices.html>] Acesso em 10 mar 2016.
- Campos, A. A., 2009, “Estudo Potencial Energético de Combustíveis derivados da biomassa: Construção de um calorímetro isoperibólico”. 7ª Mostra Acadêmica UNIMEP e 17º Congresso de Iniciação Científica.
- Ceron, L. P., 2010, “Controle de excess de ar em processos de combustão”, Ano VIII, Ed., 44, Revista Meio Filtrante. Disponível em [http://www.meiofiltrante.com.br/materias_ver.asp?action=detalhe&id=600&revista=n44] Acesso em 11 jun 2015.
- Chung, K. H., Shin, K. O., Hwang, H. J., Choi, K. S., 2013, “Chemical composition of nuts and seeds sold in Korea”. Nutrition Research and Practice, Seoul, Vol.7, No. 2, pp. 82-88.
- Dierberger, J.E., Netto, L.M., 1985, “Noz Macadâmia. Uma nova opção para a fruticultura brasileira”. São Paulo, Livraria Nobel S.A. pp. 119.
- Ferreira, B. S., 2013, “Propriedades físico-mecânicas de painéis particulados de eucalyptus saligna com adição de casca de noz macadâmia”. Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, pp. 86. Disponível em [http://base.repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94467/ferreira_bs_me_guara.pdf?sequence=1] Acesso em 10 jun 2015.
- Fletcher, A., Rennenberg, H., Schmidt, S., 2010, “Nitrogen partitioning in orchard-grown Macadamia integrifolia”. Tree Physiology, Oxford, Vol. 30, pp. 244-256.
- Instituto Nacional de Meteorologia – Inmet, “Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa” Disponível em [<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>] Acesso em 11 jun 2015.
- International Energy Agency – IEA, 2011, “World Energy Outlook 2011”, Sumário.
- Kanury, A., 1994, “Combustion characteristics of biomass fuels”, Combustion Science and Technology 97, pp. 469-491.
- Lora E. E. S. e Nascimento M. A. R., (2004). Geração Termelétrica: Planejamento, Projeto e Operação. Vol. 1. Ed., Interciência, Rio de Janeiro, Brasil.
- XLIII CONGRESSO DA SOBER, 2005, “Macadâmia no Estado de São Paulo”, Ribeirão Preto, Brasil.
- Mcfadyen, L. M., Robertson, D., Sedgley, M., Kristiansen, P., Olesen, T., 2012, “Effects of the ethylene inhibitor amino ethoxy vinyl glycine (AVG) on fruit abscission and yield on pruned and unpruned macadamia trees”, Scientia Horticulturae, Amsterdam, Vol. 137, pp. 125-130.
- Parikh, J., Channiwala, S. A., Ghosal, G. K., 2005, “A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels”. Fuel, No 84, pp. 487-494.
- Penoni, E. S., Pio, R., Rodrigues, F. A., Maro, L. A. C., Costa, F. C., 2011, “Análise de frutos e nozes cultivares de nogueira macadâmica”, Ciência rural, Santa Maria, Rio Grande do Sul. Vol. 41. No 12. Disponível em [<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782011001200007>] Acesso em 08 jun 2015

- Perdoná, M. J., Martins, A. N., Suguino, E., Soratto, R. P., 2012, “Crescimento e produtividade de noqueira-macadâmia em consórcio com cafeeiro arábica irrigado”, Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, Vol. 47, No 11, pp. 1613-1620.
- Pimentel, L. D., Santos, C. E. M., Wagner Júnior, A., Silva, V. A., Bruckner, C. H., 2007, “Estudos de viabilidade econômica na cultura da noz macadâmia no Brasil”, Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal - SP, Vol. 29, No 3, pp. 500-507.
- Schneider, A., 2012, “Combustíveis alternativos a partir de biomassa”, Porto Alegre. Disponível em [http://moodle.escoop.edu.br/file.php/1/18_de_Maio_de_2012/ANDREAS_SCHNEIDER_-Porto_Alegre-Mai-2012_Schneider_PRT.ppt.] Acesso em 10 fev 2016.
- Schneider, L. M., Rolim, G. S., Sibierajski, G. R., Prelapantano, A., Perdoná, M. J., 2012, “Zoneamento Agroclimático de Nogueira Macadâmia para o Brasil”. Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal, Vol. 34, No 2, pp. 515-524.
- Macedo, I. C., 2001, “Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil: situação atual, oportunidades e desenvolvimento”, Secretaria Técnica do Fundo Setorial de Energia-CGEE, pp.2.
- Poinern, G. E. J., Senanayake, G., Shah, N., Thi-Le, X., Parkinson, G., Fawcett, D., 2011. “Adsorption of the aurocyanide, Au (CN) 2-complex on granular activated carbons derived from macadamia nut shells – A preliminary study”. Disponível em [http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089268751100344X#] Acesso em 10 jun 2015.
- Poltronieri, C. F., Lourenzani, A. E. B. S., Silva, A. L., 2014, “Desafios e Potencialidades do Agronegócio da Renewable Energy Policy Network”, Renewables 2014: Global Status Report.
- Shapiro, N. H., Moran, M. J. M., 2013, “Princípios de termodinâmica para engenharia” 7ª Ed., pp. 840, LTC.
- Strezov, V., Patterson, M., Zymala, V., Fisher, K., Evans, T., Nelson, P., 2007, “Fundamental aspects of biomass carbonization”, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Amsterdam, Vol. 79, pp. 91-100.
- Toles, C. A., Marshall, W. E., Johns, M. M., 1998, “Phosphoric acid activation of nutshells for metals and organic remediation: process optimization”. Journal of Chemical Technology and Biotechnology. Oxford, Vol. 72. pp. 255-263.
- Turns, S. R., 2000, “An Introduction to Combustion Concepts and Applications”, 2ª Ed., McGraw-Hill, Singapore, pp. 48.
- Wechsler, A., Zaharia, M., Crosky, A., Jones, H., Ramírez, M., Ballerini, A., Nuñez, M. Sahajwalla, V., 2013, “Macadamia (Macadamia integrifolia) shell and castor (Ricinus communis) oil based sustainable particleboard: A comparison of its properties with conventional wood based particleboard”, Materials & Design, Vol. 50, pp. 117-123.
- Werther, J., Saenger, M., Hartge, E., Ogada, T., Siagi, Z., 2000, “Combustion of agricultural residues, Progress in Energy and Combustion Science” pp. 1-27.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

STUDY OF THE APPLICATION OF THE BIOMASS FROM MACADAMIA SHELL AS AN ALTERNATIVE ENERGY RESOURCE

Lucas Henrique Pagoto Deoclecio, lucashenrique.pagoto@gmail.com

Eriky Fonseca dos Santos, erikyf-s@hotmail.com

Huarley Pratte Lemke, huarley@ifes.edu.br

Ryck Andrade Boroto, ryckb@ifes.edu.br

Filipe Arthur Firmino Monhol, filipe.monhol@ifes.edu.br

Instituto Federal do Espírito Santo, Coordenadoria de Eng. Mecânica, Br 101 Norte, Km 58, Litorâneo, São Mateus, ES

Resumo: Actually, the search for alternative sources of energy to be added to the energetic matrix it is a great deal of interest. There is a great necessity of efficient fuels that have the capacity to supply the energetic demand, with less pollution emissions, less costs and less ecological impact. The biomass distinguish itself as a promising reality that meets these requirements. Therefore, the goal of the present work is to explore the macadamia shell potential as an alternative fuel. To do so, an analyses of the feasibility of the use of this biomass as an alternative to conventional fuel of small and medium-sized boilers has being made. The advantages and disadvantages of this biomass were assessed based on its elemental characterization. To determine the quality of this alternative, a comparison between it and a lignite coal was made, since the lignite coal is a fuel largely applied to such purpose. An exergetic analyses was prioritized, due to it be more representative, in the comparison between fuels. The pollution emissions per kilogram of burned fuel were calculated, and also a cost comparison. It was concluded that the macadamia shell has a better benefit/cost when compared to the lignite coal and a not so far steam generation capacity.

Palavras-chave: macadamia shell, biomass, alternative fuel.