

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE EXERGOECONOMICA DA CASCA DE EUCALIPTO COMO COMBUSTÍVEL PARA GERAÇÃO DE VAPOR

[CON-2016-0230](#)

Resumo: Com a atual corrida energética, onde são procuradas opções alternativas à utilização de combustíveis fósseis e fontes não renováveis de energia, o aproveitamento de resíduos sólidos mostra-se como um caminho importante a ser seguido visando a redução na emissão de poluentes e a ampliação da matriz energética nacional. No Brasil há uma grande área de floresta plantada para fins diversos, sendo o eucalipto uma das espécies predominantes devido sua forte utilização na indústria de construção civil e principalmente de papel e celulose, sendo esta última uma grande geradora de resíduos sólidos como galhos e cascas de eucalipto. Desta maneira a casca de eucalipto foi estudada neste trabalho como combustível em uma caldeira. A partir de uma revisão bibliográfica realizou-se o cálculo de reações químicas de combustão de dois tipos de combustíveis: o primeiro, a fonte alternativa (cascas de eucalipto) e o segundo, o carvão mineral, uma vez que é comumente utilizado para queima em caldeiras. Através disso, pôde-se calcular variáveis como relações de massa de ar e combustível, temperatura de chama da fornalha e eficiências em fases específicas do processo. Além disso, foi realizada uma análise de custos comparando ambos processos visando expor a viabilidade econômica do uso da fonte alternativa estudada, levando-se em consideração que a casca de eucalipto é rejeito do processo na indústria de papel e celulose. Finalmente, concluiu-se que a casca de eucalipto apresenta-se como um combustível satisfatório na operação de caldeiras visando a geração de vapor.

Palavras-chave: Energia, Casca de Eucalipto, Fontes Alternativas, Combustão, Resíduos Sólidos.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a otimização dos processos produtivos verifica-se como sendo de grande relevância, pois visa minimizar despesas e maximizar os lucros. A energia utilizada nos processos de produção caracteriza-se como parte significativa de tais custos, sendo um seguimento a ser constantemente estudado e otimizado (INEE, 2001).

O fórum econômico mundial lançou um relatório em 2013 mostrando que o consumo mundial de energia aumentou 27% desde de o ano 2000, com 87% do abastecimento de energia primária sendo representada por combustíveis fósseis como petróleo e carvão mineral. Sabe-se que se há uma elevação dos preços dos combustíveis fósseis, logo a utilização dos resíduos sólidos como fonte substitutiva parcial ou total na geração de energia pode ser um caminho para a redução de custos e melhoramento da rentabilidade de empresas que utilizam os combustíveis tradicionais. No caso da indústria de papel e celulose pode-se utilizar a casca e outros rejeitos do eucalipto como fonte de energia, além de tal ação ser uma vertente direta para resolução do problema ambiental da “destinação de resíduos” (Energy Information Administration, 2005 e Wander, 2001).

A madeira, como combustível, pode ser classificada em três grandes grupos, são eles: resíduos industriais, resíduos florestais e provenientes de florestas energéticas. Dentre os resíduos industriais podem ser citadas a serragem, a maravalha (cepilho), a casca das árvores e a lenha. Especificando, a casca provém do descascamento na fábrica e em campo das toras utilizadas no processo de fabricação de celulose e papel (Calegari et al., 2005).

Estudos demonstram que a utilização de resíduos sólidos é bastante viável em determinados casos para a produção de energia. No setor agrícola pode-se tomar como exemplo a casca de arroz (Diniz, 2004).

Na indústria florestal o aproveitamento de lenha e posterior transformação da mesma em lascas permite a utilização destas como combustível para caldeiras, possuindo um poder calorífico de 3300 kcal/kg, sendo assim um combustível auxiliar interessante (Winck, 2011).

Outra alternativa é a utilização de casca de coco, a qual vem sendo amplamente empregada como combustível para caldeiras (Silva, 2012).

No que se refere aos resíduos gerados na indústria sucroalcooleira estudos demonstram que o PCI (poder calorífico inferior) do bagaço de cana seca é de 4.250 kcal/kg, o palhico apresenta-se com um PCI de 4.061 kcal/kg, assim, tais resíduos mostram-se viáveis para serem utilizados como combustíveis em caldeiras (Paoliello, 2006 e Torrezan, 2003).

Além da utilização de matéria prima agrícola, a reutilização de fragmentos de pneus como combustível auxiliar demonstra-se extremamente viável. Fragmentos de pneus possuem poder calorífico aproximado de 7200 à 7800 kcal/kg. Em caldeiras adequadas, permite-se a queima completa de tais resíduos, emitindo gases normais da combustão e pequenas quantidades de dióxido de enxofre. No entanto, essa quantidade é menor do que a emitida pela maioria dos carvões utilizados nos Estados Unidos (Lacerda, 2001).

A casca de cacau apresenta condições favoráveis para utilização como combustível, tal fato deve-se aos seus resultados de caracterização terem sido equivalentes a outros resíduos já utilizados como combustíveis sólidos. Baseando-se na produção de amêndoas secas acumuladas na região cacaueira da Bahia, onde se tem grande parte da produção de cacau no Brasil, a quantidade de casca gerada é equivalente a 107,6 MW e pode ser utilizada para gerar calor em sistemas geradores de calor (Pereira, 2013).

Segundo Vale et al. (2007) uma tonelada de casca de café seca, possui um poder energético de cerca de 3.933.000 kcal, podendo ser utilizada não só para gerar calor em fornalhas, mas também para geração de energia em pequenas comunidades onde a produção desse resíduo apresenta-se de maneira mais significativa.

Tratando-se do poder calorífico, os resíduos agrícolas apresentam certa semelhança à madeira, de tal modo merecem toda atenção no momento de sua utilização como combustível. Alguns exemplos de resíduos com potencial para serem utilizados são sabugo de milho, casca de amendoim e palha de trigo (Silva, 2001).

O estudo sobre utilização de resíduos sólidos como combustíveis avança a cada dia, de acordo com Jannuzzi (2003), a utilização de biomassa é de grande interesse para o país, ganhando relevância ao tratar-se de sua aplicação na geração de eletricidade, combustíveis para transporte e sistemas de geração de vapor. Sendo o mais importante a redução de custo da matéria-prima incluindo os custos de coleta e transporte.

Observando tais pontos, o presente artigo tem por objetivo estudar o rendimento da casca de eucalipto como combustível alternativo empregado em uma caldeira, assim como avaliar a sua viabilidade de aplicação se comparado com combustível já utilizado convencionalmente.

1.1. Combustível e combustão

Denomina-se combustível todo material que pode ser queimado para liberar energia térmica. Sendo os combustíveis mais conhecidos constituídos primariamente em hidrogênio e carbono. Eles são denominados como combustíveis de hidrocarbonetos e indicados pela fórmula geral C_nH_m . Os combustíveis de hidrocarbonetos existem em todas as fases, pode-se citar como exemplos a gasolina, o gás natural e o carvão (Çengel, 2006).

Combustíveis diferentes possuem propriedades distintas. Sendo assim, ao selecionar um combustível para ser empregado em uma caldeira, queimador ou fornalha deve-se levar em conta as vantagens e desvantagens do mesmo, adaptando de modo que a escolha forneça o melhor custo benefício. Questões a serem analisadas passam pela quantidade de calor produzida, custo, segurança, condições de armazenamento e transporte, emissão de poluentes, disponibilidade de entrega, mão-de-obra para manipulação, influência sobre a qualidade e o tipo de equipamento. Ao analisar todos os fatores como um conjunto, mesmo que um combustível tenha um custo mais elevado que o outro, a economia adquirida pelas vantagens oferecidas pode compensar o seu uso (Lopes et al., 2001).

1.1.1. Teoria da combustão

Quando se está avaliando a geração de vapor em uma caldeira a termodinâmica se atenta em caracterizar as condições de entrada do líquido neste dispositivo e as condições do vapor na sua saída. Porém, em uma primeira análise, não se estuda o processo de transferência de calor dos gases de combustão para a tubulação por onde se desenvolve o escoamento de líquido ou vapor. Transpondo esse raciocínio para um sistema reativo, através da termoquímica é possível definir o estado dos reagentes e produtos em condição de equilíbrio, sem se preocupar com os detalhes das reações químicas envolvidas. Assim, conhecendo as condições de uma mistura de um combustível e oxigênio é possível realizar a determinação da composição, temperatura e a pressão dos produtos de combustão em equilíbrio (Çengel, 2006 e Lacava, 2014).

Todo processo de combustão precisa atender a princípios básicos que assegurem economia ou eficiência na queima do combustível. Sendo a combustão definida como um conjunto de reações químicas nas quais os elementos combustíveis se combinam com o oxigênio, liberando energia quando o combustível atinge a temperatura de ignição. Para que ocorra a combustão são necessários três elementos: temperatura, oxigênio e combustível (Lopes et al, 2001).

Uma boa combustão precisa liberar toda a energia química contida no combustível e com um mínimo de perdas relacionadas à combustão incompleta, seja pelo fator falta ou excesso de ar, umidade do combustível, processo de turbulência e mistura inadequada do ar durante a operação, entre outros fatores (Lopes et al, 2001). Para que a combustão ocorra de maneira eficiente, é necessário que a temperatura seja igual ou superior à temperatura de ignição para iniciar e manter a queima auto sustentável do combustível durante o processo. Existindo uma temperatura mínima que a fornalha deve propiciar para que ocorra a ignição do combustível (Lopes et al., 2001).

Alguns valores de temperatura de ignição mostrados na Tab.1.

Tabela 1. Temperatura de ignição de alguns combustíveis (Lopes et al., 2001).

Combustível	Temperatura de ignição, °C
Carvão vegetal	340 a 400
Monóxido de carbono	640 a 655
Gás liquefeito do petróleo (GLP)	500
Madeira	300

Um outro fator importante a ser observado é a mistura ou turbulência ar com combustível. É necessário que o comburente e o combustível sejam colocados em contato íntimo. Para isso, é preciso que o combustível sólido seja dividido de forma conveniente a adequar-se ao equipamento de queima e os combustíveis líquidos pulverizados. Isto, além de propiciar a combustão completa, conduz a projetos de fornalhas com dimensões reduzidas, quando criados projetos específicos. É necessário também que os fatores tempo e espaço sejam suficientes para que ocorra a reação de combustão. É preciso um tempo para que todo o combustível na fornalha seja consumido e transformado em gases de combustão (Lopes et al, 2001).

O ar fornecido para a combustão em quantidade suficiente para a queima completa de carbono, hidrogênio, enxofre e outros elementos presentes no combustível que possam oxidar é chamado de ar teórico, sendo o mesmo calculado com base na análise elementar do combustível. Na prática, a quantidade de ar teórico não é suficiente para promover a combustão completa. Sendo assim, a quantidade real de ar necessária é maior, sendo por isso denominada excesso de ar, e comumente expressa como uma porcentagem da quantidade do ar teórico. Em geral, utilizam-se excessos de 1% a 2% para combustão de combustíveis gasosos, 5% a 10% para líquidos e acima de 25% para sólidos como o carvão (Lacava, 2014 e Lopes, 2001 e Çengel, 2006).

1.2. Combustível: casca de eucalipto

O resíduo analisado neste trabalho trata-se da casca de eucalipto, a escolha foi realizada levando em conta a grande quantidade de floresta plantada no Brasil, assim como pensando na aplicação da casca como combustível na indústria de papel e celulose, grande consumidora desse tipo de madeira. No ano de 2012, a área de plantio de eucalipto totalizou 5.102.030 hectares, representando um crescimento de 4,5% se comparado ao ano anterior devido, principalmente, ao estabelecimento de novos plantios frente à uma demanda futura dos projetos relativos ao ramo de papel e celulose. A Fig. 1 mostra um histórico do plantio em área no Brasil no período de 2006-2012 (ABRAF, 2013):

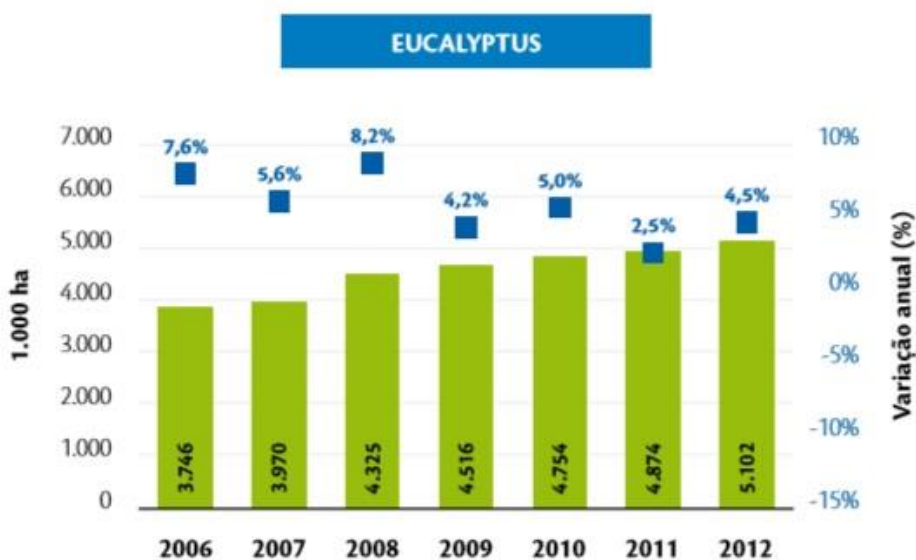


Figura 1. Plantio de eucalipto por hectare no Brasil.

Como tratam-se de resíduos, o custo a ser considerado seria o transporte dos mesmos até a queima, assim como uma possível trituração como pré-tratamento. Não existindo custo para obtenção, tratando-se de um aproveitamento interno.

1.2.1. Determinação de quantidade de casca

Ao analisar uma determinada área de plantio com eucalipto, pode-se relatar tanto o volume de madeira como o de casca esperado que sejam produzidos por hectare de floresta. Trata-se então de uma quantidade bruta de casca disponível para uma determinada área plantada, por exemplo, metros cúbicos de casca por hectare (Foelkel, 2005).

Existem espécies que chegam a ter entre 25% a 30% do volume de seu tronco comercial como sendo casca. No entanto, as espécies comerciais de eucaliptos de reflorestamento possuem entre 10% a 18% de seu tronco comercial como sendo de casca. Quanto às árvores clonais melhoradas geneticamente para alto incremento volumétrico os percentuais variam de 9% a 12% de casca em volume (Foelkel, 2005).

1.2.2. Constituição Básica de casca

As cascas de eucaliptos são basicamente constituídas de duas camadas, sendo elas denominadas casca interna e casca externa ou ritidoma. Assim como representado na Fig. 2 (Foelkel, 2005):

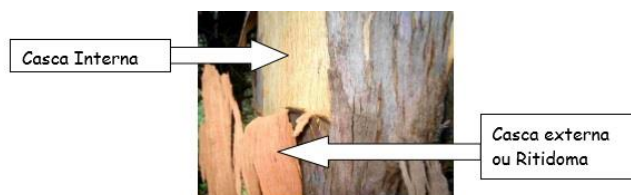


Figura 2. Camadas de casca de eucalipto.

A casca externa é composta de tecidos quase que completamente mortos. Já a casca interna quase que completamente viva e ativa, localizada para o lado de fora em relação a medula do tronco e imediatamente ao lado do câmbio vascular vide Fig. 3 (Foelkel, 2005).

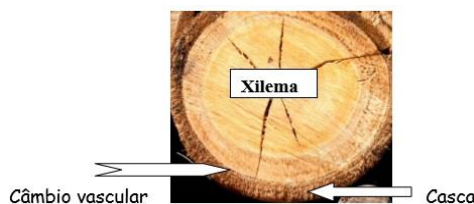


Figura 3. Localização da casca interna.

Segundo estudos realizados por Brito (1978) com cascas de diferentes espécies de eucalipto, existem diferenças na quantidade do teor de carbono fixo, sendo que para espécies com maior teor de carbono fixo a queima deverá se processar de maneira mais lenta e com menor formação de chama.

2. METODOLOGIA

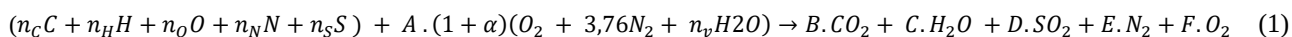
Com base na literatura disponível, especificações de fabricantes, catálogos e tabelas, foram obtidos parâmetros iniciais para a realização dos cálculos. Pôde-se determinar, por exemplo, o modelo de caldeira que atenderia o processo de geração de energia estudado, o PCI do eucalipto, a porcentagem de excesso de ar na queima do combustível na caldeira assim como outros dados importantes para a obtenção dos resultados buscados.

Além disso foram obtidos dados relativos ao carvão mineral, sendo o mesmo utilizado como parâmetro comparativo com a casca de eucalipto, haja vista sua comum aplicabilidade em queima em caldeiras.

2.1. Balanceamento da equação de combustão

Para o cálculo de rendimentos na caldeira, foi realizado o balanceamento da equação de combustão. Considerou-se uma massa de 1kg de combustível e a partir da análise elementar mássica do combustível, conforme indicada na Tab. 2, obteve-se a proporção de ar e de produtos formados para cada 1 kg de combustível. Os cálculos foram realizados para a casca de eucalipto e para o carvão mineral.

A equação de reação química pode ser escrita de maneira genérica conforme Eq. 1:



Onde n_i é dado pela Eq. 2:

$$n_i = \frac{\text{massa do componente } i \text{ para 1kg de combustível}}{\text{Massa molar do componente } i} \quad (2)$$

α representa o excesso de ar dado pelo tipo de caldeira escolhida;

n_v é a fração de vapor no ar úmido, calculado pela Eq. 3.

$$\frac{n_v}{1+3,76+n_v} = \frac{P_{sat @ 25^\circ C}}{P_{tot}} \cdot \phi \quad (3)$$

Sendo ϕ a umidade relativa do ar;

A é o coeficiente molar do ar e B, C, D, E e F são os coeficientes molares para cada produto obtido na reação de combustão referente a 1 kg de combustível.

Tabela 2. Análise elementar em base mássica da casca de eucalipto e do carvão (Vieira 2005)

	Elemento =>	C	H	O	N	S
Casca de Eucalipto	[% mássica]	47,5	6	44	1	1,5
Carvão	[% mássica]	82,7	3,8	1,35	Não avaliado	Não avaliado

De acordo com Lopes (2001), $\alpha = 0,35$, pois para combustíveis sólidos deve-se haver um excesso de ar maior que 25%. Desse modo, foi adotado 35% como excesso de ar para o sistema;

Foi escolhida Aracruz - ES como local de instalação do sistema pois neste município há empresas que trabalham com a queima de cascas de eucalipto, dando assim mais aplicabilidade ao estudo. Segundo o site da Prefeitura Municipal de Aracruz-ES, a umidade relativa média do ar (ϕ) neste município é de 87%. Logo $n_v = 0,13319$;

2.2. Relação ar combustível

Para o cálculo da razão mássica entre ar e combustível utiliza-se a Eq. 4:

$$AC = \frac{A \cdot (1+\alpha) \cdot (1+3,76+n_v)}{1 \text{ Kg}} \cdot M_{AR} \quad (4)$$

Onde, M_{AR} é a massa molecular do ar.

2.3. Determinação da caldeira e de parâmetros de entrada e saída

A caldeira selecionada para o dimensionamento foi do modelo BI-GM do fabricante Benecke, de onde foram retiradas as especificações de pressão de trabalho e a vazão mássica de vapor. O rendimento da caldeira foi obtido em Eletronuclear (1998). Na Tab. 3 encontram-se listados os parâmetros para o início do dimensionamento.

Tabela 3. Parâmetros de entrada da Caldeira

Vazão mássica vapor[kg/s]	1,4
PCI eucalipto [kJ/kg] (SANTIAGO, 2013)	14300
PCI carvão [kJ/kg] (ARAUTERM, 2015)	18840
T vap (entrada) [°C]	80
T vap (saída) [°C]	350
Entalpia (entrada) [kJ/kg]	335,02
Entalpia (saída) [kJ/kg]	3137,7
Rend. Caldeira (ELETRONUCLEAR, 1998)	0,85
To [K]	298
W eucalipto. (SANTIAGO, 2013).	0,30
Entropia (T chama) [kJ/kg.K]	1,0756
Entropia (T saída) [kJ/kg.K]	6,9583

A turbina escolhida foi uma turbina a vapor de um estágio e suas especificações foram obtidas no catálogo Turbinas a Vapor Simples Estágio da NG metalúrgica, definindo, assim, a temperatura de saída do vapor na caldeira. De Santiago

(2013) foram retirados os dados referentes ao PCI e a umidade da casca do eucalipto. As entalpias foram encontradas de acordo com a temperatura de entrada e saída do vapor em tabelas termodinâmicas (ÇENGEL, 2006).

Para a caldeira selecionada tem-se também as especificações do fabricante Benecke para a fornalha, de onde foi retirada a sua eficiência. Os valores de entalpia e entropia dos gases na saída e entrada da caldeira foram baseados em tabelas termodinâmicas.

2.4. Equações para cálculo de eficiência exergética na caldeira

A eficiência exergética é útil para a comparação entre recursos energéticos onde busca-se saber qual é o mais e o menos eficaz entre os dois, ou até mesmo para avaliar a eficácia de um recurso energético implementado num sistema, buscando melhorias (SHAPIRO, 2006). Para a caldeira selecionada a eficiência exergética pode ser encontrada a partir da Eq. 5, onde se tem a razão entre as condições exergéticas do vapor formado e a exergia química do combustível, que pode ser obtida a partir do PCI e da composição química do mesmo, conforme mostrado por Lora e Nascimento (2004).

$$\varepsilon_{caldeira} = \frac{\dot{m}_v[(h_s - h_e) - T_0(s_s - s_e)]}{[(PCI + 2442.W). \Phi + 9417.S]. \dot{m}_c} \quad (5)$$

A vazão mássica de combustível foi obtida pela Eq. 6 a partir da eficiência energética da caldeira (η), conforme fornecida pelo fabricante. O termo Φ que leva em consideração a composição química do combustível é dado, conforme mostrado por Lora e Nascimento (2004), pela Eq. 7.

$$\dot{m}_c = \frac{Q_{\text{útil}}}{\eta \cdot PCI} = \frac{\dot{m}_v(h_s - h_e)}{\eta \cdot PCI} \quad (6)$$

$$\Phi = \frac{1,0438 + 0,1882 \frac{H}{C} - 0,2509 \left(1 + 0,7526 \frac{H}{C}\right) + 0,0383 \frac{H}{C}}{1 - 0,3035 \frac{O}{C}} \quad (7)$$

2.5. Equações para cálculo de eficiência exergética na fornalha

Para o cálculo da eficiência exergética da fornalha da caldeira selecionada, onde se tem a razão entre as condições exergéticas do fluxo de gás de combustão formado e a exergia química do combustível, utiliza-se a Eq. 8 a seguir:

$$\varepsilon_{fornalha} = \frac{\dot{m}_g(h_{tc} - h_s) - T_0(s_{tc} - s_s)}{[(PCI + 2442.W). \Phi + 9417.S]. \dot{m}_c} \quad (8)$$

Assim, seguem listados na Tab. 4 os dados iniciais para a fornalha da caldeira.

Tabela 4. Parâmetros de entrada Fornalha (BENECKE)

Vazão mássica de gás máxima [kg/s]	17,101
Vazão mássica vapor[kg/s]	1,4
PCI eucalipto [kJ/kg]	14300
T gases (T _s) [°C]	400
Entalpia (h _s) [kJ/kg]	684,34
To [K]	298
W	0,30
Entropia (s _s) [kJ/kg.K]	2,4985

Segundo o site do fabricante da caldeira, a melhor eficiência de combustão da fornalha gira em torno de 98,5%. Assim, é possível calcular a entalpia para a temperatura adiabática de chama h_{tc} , através da Eq. (9) a seguir:

$$\eta_{combustão} = \frac{\dot{m}_g(h_{tc} - h_s)}{\dot{m}_c \cdot PCI} \quad (9)$$

Os gases da combustão foram considerados como ar na forma de gás ideal. Assim, através da entalpia encontrada, foi possível encontrar a temperatura adiabática de chama e a entropia para esta temperatura utilizando tabelas termodinâmicas para ar como gás ideal.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Eq. (10) e (11) referem-se à combustão do eucalipto e do carvão mineral, respectivamente. A Tab. 5 fornece os resultados comparativos para a casca de eucalipto como combustível e para o carvão.

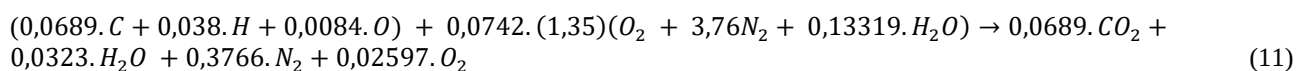
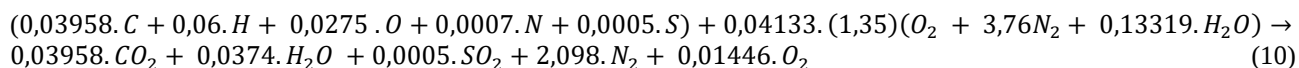


Tabela 5. Resultados referentes à caldeira para carvão e eucalipto

	Eucalipto	Carvão
$\dot{m}_c$ [kg/h]	1162,3	884,6
AC [kg ar/kg comb.]	7,9	14,2
$\epsilon_{caldeira}$	0,668	0,883
$\epsilon_{fornalha}$	0,8417	0,9012

Após a verificação dos resultados obtidos, observa-se que o carvão mineral se comparado com o combustível alternativo (casca de eucalipto) mostra-se mais eficiente na caldeira, assim como apresenta maior eficiência exergética de fornalha com um percentual comparativo superior de 5,95%.

No entanto, os resultados apresentados pela casca de eucalipto mostram-se satisfatórios, evidenciando grande capacidade de utilização como uma via alternativa. Os valores encontrados são próximos ao carvão, que é combustível mais utilizado e mais conhecido, e se enquadram dentro de parâmetros apresentados por outros combustíveis utilizados/estudados. De tal forma que, o que era antes visto como rejeito pode ser trabalhado, de outro ponto de vista, como fonte de energia e retorno financeiro.

3.1. Análise de custos

Segundo Foelkel (2005), muitas empresas consideram que a casca do eucalipto pode ser considerada um combustível de custo zero, por ser um dejetto que advém de suas principais linhas de produção. Contudo para utilização desse combustível seria necessário um investimento inicial com um equipamento de secagem de dimensões suficientes para retirar a elevada umidade da vazão de combustível utilizada. Com base no mostrado por Queiroz (2003), em um exemplo genérico, considerou-se nesse presente trabalho um custo de investimento inicial de cerca de R\$ 400.000 com equipamentos de secagem com capacidade máxima de até 20 ton/h de um sólido com até ~30% de umidade, que é o caso do eucalipto, conforme indicado por Santiago (2013). O preço foi considerado bem maior do que o observado no mercado em geral para mostrar a situação para o pior caso. Ainda segundo Freitas et al. (2006), o custo estimado com secagem de biomassa é de cerca de 149,76 R\$/ton, levando em conta custos fixos e variáveis. Esse custo de operação pode ser encarado, portanto, como o custo por tonelada do combustível derivado de casca de eucalipto.

Para o caso do carvão supõe-se que nenhuma modificação considerável será realizada para utiliza-lo como combustível na caldeira, uma vez que esses equipamentos já são dimensionados para operar a carvão, portanto considerar-se-á um custo inicial nulo. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, no Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2008, p. 131), o custo da tonelada do carvão mineral é de R\$ 245,00 (considerando a taxa de cambio do dólar R\$3,50).

Sendo assim, foi realizada uma análise, levando em conta as vazões calculadas de cada combustível em uma operação de 12 horas diária, para saber em quanto tempo será obtido um retorno financeiro em relação à utilização da casca de eucalipto que, embora demande um custo de investimento inicial alto com equipamentos para garantir sua qualidade como combustível, possui um custo por tonelada utilizada muito menor do que o carvão. A Fig. 4 apresenta essa análise dos custos no decorrer do tempo de operação.

Observa-se que embora possua um investimento inicial considerável, a utilização do eucalipto torna-se mais vantajosa a partir de um pequeno intervalo de tempo de cerca de 27 meses. Esse pequeno intervalo se deve ao alto consumo de combustível no estudo de caso apresentado no presente trabalho. Logo, mesmo com o carvão apresentando maior poder calorífico que o eucalipto, o eucalipto mostra-se com o uma excelente alternativa em um aspecto econômico para ser utilizado como combustível para a caldeira. Porém, devem-se levar em conta outros fatores para que a escolha seja realizada. Estes outros aspectos podem ser abordados num possível estudo posterior.

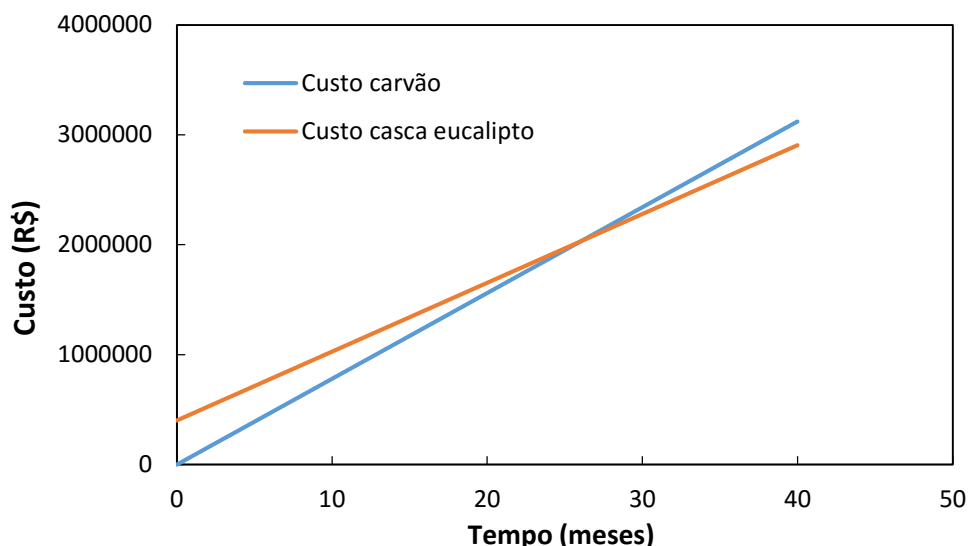


Figura 4. Análise de custos da utilização dos combustíveis.

4. CONCLUSÕES

O aproveitamento de resíduos florestais, além de contribuir para a redução da disposição de forma incorreta do mesmo na natureza, possibilita uma fonte de renda extra ao gerador, agregando valor a seu processo. Esses resíduos possuem grande competitividade devido a sua disponibilidade.

Segundo as análises realizadas, a casca do eucalipto mostra-se uma boa e viável alternativa como combustível, devido a boa eficiência obtida ao ser utilizada na caldeira, o fato que privilegia a sustentabilidade florestal entre outros fatores ele demonstrou neste estudo que merece uma atenção especial. Mesmo o carvão tendo maior PCI a casca de eucalipto leva grande vantagem econômica e ambiental sobre este, então, dependendo da quantidade de combustível necessária, a casca de eucalipto se torna uma excelente alternativa.

Tal trabalho abre caminho para posteriores estudos com a utilização de outros tipos de resíduos florestais, lembrando que nem sempre o combustível necessariamente será utilizado de forma isolada, podendo servir como acréscimo ao processo com combustíveis convencionais.

5. REFERÊNCIAS

- ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas, 2013, “Anuário estatístico ABRAF 2014 ano base 2012/ ABRAF”. Brasília, Brasil.
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), (2008). Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Acesso em 15 jun 2015. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par3_cap9.pdf>
- ARAUTERM Excelência em Caldeiras e Aquecedores [página internet], “Poder Calorífico Inferior” [Acesso em: 15 de jun. de 2015]. Disponível em: <http://www.arauterm.com.br/pdf/tbl_poder_calorifico_inferior.pdf>
- Arruda, M. Z., 2006, “Análise de combustíveis de caldeiras”. Tese de graduação, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo.
- Benecke, Caldeiras Flamotubulares. [Acesso em: 12 jun. de 2015]. Disponível em: <http://www.benecke.com.br/caldeiras-detahes.php?id=7&prod_id=10&cat_id=7>.
- Bizzo W.A.; Geração, distribuição e utilização de vapor. Cap. 4 Geradores de Vapor. [Acesso em: 10 de jun. de 2015] . Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP4.pdf>>.
- Brito, J. O.; Barrichelo, L. E. G., 1978, “Características do eucalipto como combustível: análise química e imediata da madeira e da casca”. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, n.16, pp. 63-70.
- Calegari, L. et al., 2005, “Características de algumas biomassas usadas na geração de energia no Sul do Brasil”. Renabio Biomassa & Energia [online], v.2, n.1, pp. 37-46.
- Çengel, Yunus. A.; Boles, Michael A., 2006, “Termodinâmica”, 5. Ed. São Paulo: McGraw-Hill.
- Dallabona, A. R., Silva, D., Hupalo, M. F., 2007. “Estudos de eficiência térmica e de emissão de poluentes em fornos rotativos a óleo de xisto e gás natural”. PDPETRO, Campinas, São Paulo, Brasil.
- DEMEC [página da internet], Óleos combustíveis [Acesso em 10 de jun. de 2015]. Disponível em:<<http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema003/liquidos/oleocomb/index.htm>>.
- Diniz, J., 2004, “Poder calorífico da casca de arroz, caroço de pêssego, serragem de eucalipto e de seus produtos de pirólise”. Ciência e Natura, UFSM, pp. 25-32.
- Eletronuclear; 1998; “Caldeiras”

Energy Information Administration, 2005, “Whith projection 2030”. Annual Energy Outlook, U.S. Department of energy, Washington, DC.

Foelkel, C., “Casca da árvore do eucalipto: aspectos morfológicos, fisiológicos, florestais, ecológicos e industriais, visando a produção de celulose e papel”. 2005 [Acesso em 10 de jun. 2015]. Disponível em: <http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/capitulo_casca.pdf>.

Freitas, K. T.; Sousa, R. C. R.; Seye, O.; Santos, E. C. S.; Xavier, D. J. C.; Barcellar, A. A., (2006). Custo de geração de energia elétrica em comunidade isolada do Amazonas: estudo preliminar do projeto NERAM. Revista Brasileira de Energia. vol. 12, nº 1

Gasnet [página da internet], Gás Natural [Acesso em 11 de jun. de 2015]. Disponível em: <http://www.gasnet.com.br/gas_natural.asp>.

INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética., 2001, “A eficiência energética e o novo modelo no setor energético”. Rio de Janeiro, Brasil.

Jannuzzi, G. M., 2003, “Uma avaliação das atividades recente de P&D em energia renovável no Brasil e reflexões para o futuro”. Energy Discussion Paper, pp. 1-12, Campinas, Brasil.

Lacava, P. T., Elementos de combustão. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. 2014 [acesso em 15 de jun. 2015]. Disponível em:

<<ftp://161.24.15.247/lacava/AC%20285%20Elementos%20de%20Combust%E3o/Elementos%20de%20Combust%E3o%20Apostila.pdf>>.

Lacerda, L. P., 2001, “Pneus descartados no Brasil-Subsídios para uma reflexão sobre a problemática na Bahia”. Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil.

Lopes, R. P. et al., 2001, “Fontes de energia para secagem de café”. Associação dos engenheiros agrícolas de Minas gerais/ UFV, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

Lora E. E. S. e Nascimento M. A. R., 2004. Geração Termelétrica: Planejamento, Projeto e Operação. Vol. 1. Ed. Interciência, RJ.

Moran, M. J.; Shapiro, H. N. Princípios de termodinâmica para engenharia. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

NG Metalurgia; Turbinas à vapor simples estágio. [Acesso em: 15 jun. 2015] Disponível em: <<http://www.ngmetalurgica.com.br/wp-content/uploads/2013/05/CE.pdf>>.

Pereira, I. O., 2013, “Viabilidade da utilização da casca de cacau como combustível no aquecimento de ar para secagem de amêndoas de cacau”. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

Petrobras [página da internet], Gás liquefeito de petróleo, 2013 [Acesso em 11 de jun. de 2015]. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/minisite/assistenciaticna/>>.

Petrobras [página da internet], Gás Natural [Acesso em 11 de jun. de 2015]. Disponível em: <<http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo>>.

Poliello, J. M. M., 2006, “Aspectos ambientais e potencial energético no aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira”. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Bauru, SP, Brasil.

Prefeitura Municipal de Aracruz [pagina da internet], Informações Gerais [acesso em 10 jun. de 2015]. Disponível em: <<http://aracruz.es.gov.br/servicos/informacoes/>>.

Queiroz, D. M., 2003, Custo de secagem de grãos. Depto. de Engenharia Agrícola da UFV, CENTREINAR [Acesso em 16 de abril de 2016]. Disponível em: <http://www.centreinar.org.br/software/custo_de_secagem.pdf>.

Ravato [página da internet], Produtos [Acesso em 10 de jun. de 2015]. Disponível em: <www.ravato.com.br>.

Santiago, F.L.S.; “Aproveitamento de resíduos florestais de *Eucalyptus spp* na indústria de fabricação de celulose para geração de energia térmica e elétrica”; 2013, BOTUCATU - SP.

Silva, G. O.; Jerônimo, C. E., 2012, “Estudos de alternativas para o aproveitamento de resíduos da industrialização de coco”. Silva & Jerônimo, vol. 10, nº 10, pp. 2193 – 2208, e-ISSN: 2236-1308.

Silva, J. S., 2001, “Secagem e armazenagem de café: tecnologias e custos”. Universidade Federal de Viçosa, CBP&D-café, Viçosa, Brasil.

Torrezan, H. F., 2003, “Enleiramento Prismático de Palhico de Cana-de-Açúcar: Alguns Parâmetros de Desempenho Operacional e Eficiência Energética”. Tese de Mestrado, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

Vale, A. T. et al, 2007, “Caracterização energética e rendimento da carbonização de resíduos de grãos de café”. Cerne, v.13, pp. 416-420, n. 4, Lavras, Brasil.

Vieira, A.C., 2005, “Gaseificação de briquetes de casca de eucalipto”. Tese de Graduação, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

Wander, P. R., 2001, “Utilização de resíduos de madeira e lenha como alternativas de energias renováveis para o desenvolvimento sustentável da região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul”. 2001. 105 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Winck, P. R., 2011, “Estudo de viabilidade técnica da queima de resíduos gerados em uma indústria de tabaco para obtenção de energia térmica em uma caldeira geradora de vapor”. Tese de graduação, Universidade Federal do rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

2. RESPONSABILIDADE AUTORAL

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

EXERGY AND ECONOMIC ANALYSIS OF EUCALYPTUS BARK AS FUEL IN A BOILER FOR STEAM GENERATION

[CON-2016-0230](#)

Resumo: Due to the current race for new sources of energy, where are sought new alternatives to the consumption of fossil fuels and non-renewable energy sources, the use of solid waste appear as an important path to be followed in order to reduce the emission of pollutants and the expansion of the national energetic matrix. Brazil has a large area of planted forest for various purposes, and the eucalyptus is one of the predominant species due to its large use in the construction industry and mainly in the paper industry, the latter being a major generator of solid waste such as branches and barks. Due to the facts above, the bark of eucalyptus was studied in this work as a fuel in a flametube boiler. From a review, it was calculated the chemical reactions of combustion for two fuels: the alternate source (eucalyptus bark) and the coal as it is commonly used as fuel in boilers. Therefore, one can calculate variables such as mass ratios of air and fuel, flame temperatures of the furnace and efficiencies at specific stages of the process. In addition, a cost analysis comparing both processes to expose the economic viability of the use of alternative source studied was carried out, taking into consideration that the eucalyptus bark is a waste of the industry of paper and cellulose. Finally, it was concluded that the eucalyptus bark appears to be a satisfactory fuel to be used in boilers for steam generation.

Palavras-chave: Energy, Eucaliptus Bark, Alternative Fuel, Combustion, Solid Waste.