



ENEPEX

ENCONTRO DE ENSINO,
PESQUISA E EXTENSÃO

8° ENEPE UFGD • 5° EPEX UEMS

ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE COMBUSTÍVEIS EM UNIDADES SUCROALCOOLEIRAS

Luiz Henrique Alcara Morais¹; Eduardo Manfredini Ferreira²

UFGD-FAEN, C. Postal 533, 79804-970, Dourados-MS.

¹ PIBIC CNPq/UFGD, e-mail: luiz._luiz@hotmail.com

² Orientador: e-mail: EduardoManfredini@ufgd.edu.br

RESUMO

Este trabalho trata de um estudo de combustíveis potenciais de serem utilizados para geração de energia em unidades sucroalcooleiras. Os combustíveis estudados são o bagaço de cana, que já é utilizado para a geração de energia, a casca de crambe e a casca de bocaiuva. O cultivo da cana-de-açúcar é antigo no Brasil e o país é o maior produtor mundial. Logo, há grande presença de unidades sucroalcooleiras no território nacional, que podem suprir suas próprias necessidades energéticas e até produzir excedentes. O combustível já utilizado é o bagaço da cana-de-açúcar, considerando que para uma grande demanda o estudo da viabilidade de outros combustíveis para o mesmo fim se faz importante.

Palavras-chave: Energia, análise imediata, combustíveis.

1. INTRODUÇÃO

Como apresentado em HOFSETZ; SILVA (2012), a cana-de-açúcar têm sido cultivada no Brasil desde a chegada dos Portugueses, há mais de 500 anos. E, atualmente, o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com uma produção de 719,1 milhões de toneladas em 2010, que representou 43% da produção mundial ($1,69 \times 10^3$ milhões de toneladas). Segundo (ENSINAS et al., 2007), a atividade de produção de cana-de-açúcar é umas das mais importantes do Brasil, devido, principalmente, à sua eficiência e competitividade, sendo que o país já possui mais de 300 plantas em operação.

A produção de bagaço é abundante no processamento da cana-de-açúcar. Segundo HOFSETZ; SILVA (2012) para cada tonelada de cana processada é produzido 0,3 tonelada de bagaço, sendo que em 2012 produziu-se 169 milhões de toneladas de bagaço.

Atualmente, a maioria das usinas que operam com a cana-de-açúcar são auto-suficientes em energia, e podem até gerar excedentes. Em TURDERA (2013) é feita uma previsão da capacidade das usinas em operação no estado de Mato Grosso do Sul,



ENEPEX

ENCONTRO DE ENSINO,
PESQUISA E EXTENSÃO

8° ENEPE UFGD • 5° EPEX UEMS

além das que estão previstas a entrarem em operação nos próximos anos, de gerar eletricidade para a rede elétrica do estado.

No Brasil, as usinas operam em um sistema integrado de produção de açúcar, etanol e eletricidade. As configurações de cogeração seguintes são analisadas em (PELLEGRINI; DE OLIVEIRA JUNIOR, 2011) e (ENSINAS et al., 2007):

- a. Sistemas a vapor de contrapressão convencionais (Conventional backpressure steam systems – BPST): é a configuração mais utilizada no Brasil e só gera eletricidade durante a colheita;
- b. Sistemas a vapor de condensação-extração (Condensing-extraction steam systems – CEST), que são capazes de produzir eletricidade durante todo o ano;
- c. Sistemas a vapor supercrítico (Supercritical steam systems – SuSC);
- d. Ciclos combinados de gaseificação integrada de biomassa (Biomass integrated gasification combined cycles – BIGCC).

Outras culturas podem complementar a queima do bagaço de cana para aumentar a geração de eletricidade. Neste trabalho foram estudadas a casca do crambe e a casca de bocaiuva.

O crambe é um grão com 36% a 38% de óleo, utilizado na produção de biodiesel, onde a casca não é utilizada. (MATHIAS, [s.d.]

A bocaiuva pertence à família *Palmae* e é encontrada abundantemente nos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, e em outras partes do país. A polpa da bocaiuva é utilizada para produção de farinha e pode-se extrair óleo para produção de biodiesel, sendo a casca descartada nestes processos (GALVANI et al., 2005).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ANÁLISE IMEDIATA

A metodologia dos ensaios de análise imediata se baseia na norma ABNT NBR 8112 (1986), com modificações para se adequar aos recursos disponíveis.

2.1.1 SECAGEM E TEOR DE UMIDADE

Primeiramente os cadinhos são colocados na estufa (Fig. 1) a 105 °C para secá-los. Passados 40 minutos, retira-se os cadinhos e mede-se a massa. Logo após, os cadinhos são retornados à estufa, onde permaneceram por mais 10 minutos, são retirados e mede-se a massa dos mesmos novamente. Os dois valores de massa são comparados e, se houver variação, os cadinhos devem voltar à estufa por mais 10 minutos. O processo deve ser repetido até obter-se uma massa estável.



ENEPEX

ENCONTRO DE ENSINO,
PESQUISA E EXTENSÃO

8° ENEPE UFGD • 5° EPEX UEMS

Para a determinação do teor de umidade, o processo é semelhante ao da secagem dos cadinhos. Coloca-se 1,0 g da amostra em cada cadinho, e estes são levados para a estufa para obter-se uma massa estável, seguindo o processo de secagem dos cadinhos.

Com os valores obtidos, e a partir da Eq. 1, pode-se determinar o teor de umidade.

$$TU = \frac{m_0 - m_1}{m_0} 100 \quad (1)$$

Sendo:

TU = teor de umidade [%]

m_0 = massa inicial da amostra [g]

m_1 = massa final da amostra [g]



Figura 1 – Estufa utilizada nos ensaios (Sppencer/Nova Ética 420 – 1D)



ENEPEX

ENCONTRO DE ENSINO,
PESQUISA E EXTENSÃO

8° ENEPE UFGD • 5° EPEX UEMS

2.1.2 TEOR DE MATÉRIAS VOLÁTEIS

Para determinar o teor de matérias voláteis, primeiramente deve-se colocar 1,0 g de amostra em cada cadinho, ambos isentos de umidade. Feito isso, deve-se colocar tampa nos cadinhos e coloca-los sobre a porta da mufla (Fig. 2) previamente aquecida a $(900 \pm 10) ^\circ\text{C}$ e deixá-los dessa maneira durante 3 minutos.

Depois, deve-se inserir os cadinhos dentro da mufla, com a porta fechada, durante 7 minutos. Finalmente deve-se retirar as amostras da mufla e deixá-las esfriar no dessecador (Fig. 3) e medir a massa final.

Com estes dados, pode-se calcular o teor de matérias voláteis com a Eq. 2.

$$MV = \frac{m_2 - m_3}{m} 100 \quad (2)$$

Sendo:

MV = teor de matérias voláteis [%]

m_2 = massa inicial do cadinho + amostra [g]

m_3 = massa final do cadinho + amostra [g]

m = massa da amostra [g]



Figura 2 – Mufla com controlador universal Novus 1100



ENEPEX

ENCONTRO DE ENSINO,
PESQUISA E EXTENSÃO

8° ENEPE UFGD • 5° EPEX UEMS



Figura 3 - Dessecador Dry Box Metálico Sp Spencer SP4960-55

2.1.3 TEOR DE CINZA

Para a determinação do teor de cinza, a amostra seca deve ser mantida em um cadinho também seco e sem tampa. Depois deve-se colocar os cadinhos com as amostras em uma mufla já aquecida a 700 ± 10 °C e mantê-los lá até que toda a amostra queime. Durante o ensaio foi estabelecido um tempo de 1 hora para que toda a amostra queimasse. Feito isso, deve-se deixar os cadinhos esfriarem em um dessecador e medir a massa final.

O teor de cinza pode ser determinado pela Eq. 3.



ENEPEX

ENCONTRO DE ENSINO,
PESQUISA E EXTENSÃO

8° ENEPE UFGD • 5° EPEX UEMS

$$CZ = \frac{m_1 - m_0}{m} 100 \quad (3)$$

Sendo:

CZ = teor de cinza [%]

m_1 = massa do cadinho + resíduos [g]

m_0 = massa do cadinho [g]

m = massa da amostra [g]

2.1.4 TEOR DE CARBONO FIXO E MATÉRIA ORGÂNICA

O teor de carbono fixo é o resíduo combustível que resta após a liberação da matéria volátil, é composto principalmente de carbono, mas pode conter outros elementos voláteis não liberados. (HENRÍQUEZ, [s.d.]) Já a matéria orgânica é toda a parte do combustível que é queimada, restando-se apenas as cinzas.

O teor de carbono fixo pode ser determinado indiretamente pela Eq. 4.

$$CF = 100 - (CZ + MV) \quad (4)$$

Sendo:

CF = teor de carbono fixo [%]

CZ = teor de cinza [%]

MV = teor de matérias voláteis [%]

A matéria orgânica também pode ser determinada indiretamente, pela Eq. 5.

$$MO = 100 - CZ \quad (5)$$

Sendo:

CZ = teor de cinza [%]

MO = matéria orgânica [%]

2.2 PODER CALORÍFICO INFERIOR

O cálculo do poder calorífico inferior é feito utilizando-se as equações empíricas encontradas em EROL; HAYKIRI-ACMA; KÜÇÜKBAYRAK (2010), sendo tais equações apresentadas na Fig.4 .



ENEPEX

ENCONTRO DE ENSINO,
PESQUISA E EXTENSÃO

8° ENEPE UFGD • 5° EPEX UEMS

Empirical equations		Regression coefficient	Standard deviation	Average absolute error (%)
$NHV = 15.2 + 0.192[FC]$	(1)	0.8290	0.4931	2.2843
$NHV = 14.2 + 0.38[FC] - 0.00721[FC]^2$	(2)	0.8660	0.4488	1.8518
$NHV = 14.4 + 0.382[FC] - 0.00758[FC]^2 + 0.0417[Ash]$	(3)	0.8710	0.4500	1.8249
$NHV = 13.0 + 0.392[FC] - 0.00735[FC]^2 - 0.0231[Ash] + 0.0149[VM]$	(4)	0.8710	0.4680	1.8081
$NHV = 13.8 + 0.402[FC] - 0.00833[FC]^2 + 0.742[Ash]^{-1} + 0.0003[VM \times Ash]$	(5)	0.8790	0.4547	1.7954
$NHV = -5.9 + 0.836[FC] - 0.0116[FC]^2 + 0.00209[VM]^2 + 0.0325[Ash]^2$	(6)	0.8850	0.4419	1.8055
$NHV = 46.4 - 1.19[VM + Ash] + 0.00409[VM]^2 + 0.0179[Ash]^2 - 0.0118[FC]^2 + 4634[OM]^{-1} + 0.23[Ash]^{-1}$	(7)	0.8910	0.4623	1.9418
$NHV = -116 - 1.33[Ash] - 0.005[VM] + 1.92[VM + Ash] - 0.0227[VM \times Ash] - 0.0122[VM]^2 + 0.0299[Ash]^2 + 6133[OM]^{-1} - 0.82[Ash]^{-1}$	(8)	0.8980	0.4876	1.7097
$NHV = 11.6 + 0.226[FC] + 0.0371[VM] + 0.0206[Ash]^2$	(9)	0.8350	0.5129	3.5339
$NHV = 7.1 + 0.23[FC] + 0.04[VM] + 0.043[OM] + 0.0072[Ash]^2$	(10)	0.8360	0.5280	2.3369
$NHV = 356 - 3.2[FC] - 3.41[VM + Ash]$	(11)	0.8590	0.4601	1.9291
$NHV = 34.4 - 0.226[VM + Ash] + 0.0356[VM] + 0.00019[VM \times Ash]$	(12)	0.8390	0.5075	2.2054
$NHV = 18.2 + 0.137[FC] - 0.00031[VM]^2 - 0.0071[Ash]^2$	(13)	0.8300	0.5203	2.2807

NHV = *Net Heating Value* = Poder calorífico inferior; FC = *Fixed Carbon* = Teor de carbono fixo; Ash = Teor de Cinzas; VM = *Volatile Matter* = Teor de matérias voláteis; OM = *Organic Matter* = Matéria orgânica

Figura 4 – Equações empíricas para determinar o poder calorífico inferior (EROL; HAYKIRI-ACMA; KÜÇÜKBAYRAK, 2010)



ENEPEX

ENCONTRO DE ENSINO,
PESQUISA E EXTENSÃO

8° ENEPE UFGD • 5° EPEX UEMS

3. RESULTADOS E DISCUSÕES

Os valores médios das análises imediatas realizadas para o bagaço de cana, casca de crambe e de bocaiuva encontram-se na Tab.1, bem como o poder calorífico inferior (PCI) médio, calculado utilizando as 13 equações da Fig.4.

Para fins de comparação, na Tab. 2, encontram-se os valores de análise imediata do bagaço de cana encontrados em VIEIRA (2012). O poder calorífico inferior do bagaço de cana de 15,058 MJ/kg foi encontrado em CENTER FOR TRANSPORTATION ANALYSIS (2011).

Observando os valores das Tab. 1 e 2 notam-se valores relativamente próximos, com variações esperadas para análises imediatas de amostras diferentes. Comparando os valores de PCI calculado (18,31MJ/kg) e o da literatura (15,058 MJ/kg) vemos uma diferença significativa, que pode ter origem nas características de cada amostra e também devido ao fato de que o PCI deste artigo foi calculado utilizando equações empíricas, que apresentam certas variações e erros. Não foi possível realizar nenhuma comparação para validar os resultados das cascas de crambe e bocaiuva, pois não foi encontrado, até o presente momento, nenhum resultado na literatura.

Tabela 1 – Valores médios dos dados coletados

	Bagaço de cana	Casca de Crambe	Casca de Bocaiuva
Teor de umidade [%]	8,04	8,33	8,00
Matérias voláteis [%]	79,12	75,06	73,58
Teor de cinza [%]	5,25	7,69	3,58
Carbono fixo [%]	15,56	17,25	22,83
Matéria orgânica [%]	94,75	92,31	96,42
PCI [MJ/kg]	18,31	18,66	19,26



ENEPEX

ENCONTRO DE ENSINO,
PESQUISA E EXTENSÃO

8° ENEPE UFGD • 5° EPEX UEMS

Tabela 2 – Análise imediata de bagaço de cana (VIEIRA, 2012)

Propriedades	Teores
Teor de Umidade [%]	8,20
Matérias voláteis [%]	83,10
Teor de cinza [%]	4,20
Carbono fixo [%]	12,70

Analisando-se os valores de Carbono fixo presente nas amostras, pode-se observar que os teores da bocaiuva e do crambe são, respectivamente, 46,7% e 10,86% maiores que o do bagaço de cana. Ainda em relação aos valores comparativos, o teor de carbono fixo da bocaiuva é 32,3% maior que o do crambe.

4. CONCLUSÃO

A geração de energia elétrica através da cogeração em unidades sucroalcooleiras já apresenta bons resultados e possui um grande potencial a ser ainda explorado. Se a eletricidade gerada puder ser vendida em grande escala, pode se tornar interessante a utilização de outros combustíveis além do bagaço de cana, já que o mesmo pode não ser o suficiente para suprir uma demanda grande.

Os combustíveis estudados apresentaram resultados semelhantes entre si, e o bagaço de cana já é utilizado na geração de energia, sendo assim não deve-se encontrar grandes problemas para a utilização das cascas de crambe e de bocaiuva, que são resíduos abundantes e não utilizados em outras atividades, para a geração de energia. Em um cenário como este, a queima conjunta de outros combustíveis com o bagaço pode se tornar uma alternativa interessante para aumentar a geração elétrica.

A bocaiuva apresenta um bom resultado em relação ao teor de carbono, o que pode ser positivo, por exemplo, transformando a casca de bocaiuva em carvão vegetal, na forma pulverizada, para uso em filtros de água.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa fornecida, e aos técnicos José Carlos Venturin e David Correia da Silva pelo apoio durante a utilização do laboratório.



ENEPEX

ENCONTRO DE ENSINO,
PESQUISA E EXTENSÃO

8° ENEPE UFGD • 5° EPEX UEMS

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 8112. Carvão Vegetal - Análise Imediata. . out. 1986.

CENTER FOR TRANSPORTATION ANALYSIS. Lower and Higher Heating Values of Gas, Liquid and Solid Fuels. p. 1, 2011. Disponível em <http://cta.ornl.gov/bedb/appendix_a/Lower_and_Higher_Heating_Values_of_Gas_Liquid_and_Solid_Fuels.pdf>. Acesso em: 06/08/2014

ENSINAS, A. V. et al. Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane. **Energy Conversion and Management**, v. 48, n. 11, p. 2978–2987, nov. 2007.

EROL, M.; HAYKIRI-ACMA, H.; KÜÇÜKBAYRAK, S. Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data. **Renewable Energy**, v. 35, n. 1, p. 170–173, jan. 2010.

GALVANI, F. et al. Potencial da bocaiúva (*Acrocomia aculeata*) como fonte de óleo para a produção de biodiesel. **II Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel**, 2005.

HENRÍQUEZ, J. **Combustíveis - Máquinas Térmicas**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAHD8AE/combustiveis>>. Acesso em: 18 ago. 2014.

HOFSETZ, K.; SILVA, M. A. Brazilian sugarcane bagasse: Energy and non-energy consumption. **Biomass and Bioenergy**, v. 46, p. 564–573, nov. 2012.

MATHIAS, J. **Crambe**. Disponível em: <<http://revistagloborural.globo.com/GloboRural/0,6993,EEC1706214-4529,00.html>>. Acesso em: 12 ago. 2014.



ENEPEX

ENCONTRO DE ENSINO,
PESQUISA E EXTENSÃO

8° ENEPE UFGD • 5° EPEX UEMS

PELLEGRINI, L. F.; DE OLIVEIRA JUNIOR, S. Combined production of sugar, ethanol and electricity: Thermoeconomic and environmental analysis and optimization. **Energy**, v. 36, n. 6, p. 3704–3715, jun. 2011.

TURDERA, M. V. Energy balance, forecasting of bioelectricity generation and greenhouse gas emission balance in the ethanol production at sugarcane mills in the state of Mato Grosso do Sul. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 582–588, mar. 2013.

VIEIRA, A. Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE. Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas. 2012. Disponível em <http://projetos.unioeste.br/pos/media/File/energia_agricultura/pdf/Dissertacao_Ana_C_Vieira.pdf>. Acesso em 01/08/2014.