



Estudo do impacto do teor de umidade do bagaço de cana-de-açúcar em sistemas de cogeração

Impact study of sugar cane bagasse moisture content in cogeneration systems

Ramires Nogueira da Silva¹, Francisco Espedito de Lima¹

¹ Companhia Alcoolquímica Nacional - Usina JB, Pernambuco, Brasil

Contato: ramiresnogueira@hotmail.com

Palavras-Chave

bagaço de cana-de-açúcar
matriz energética
poder calorífico
análise energética
análise computacional

RESUMO

A preocupação com a matriz energética brasileira em meio a crises relacionadas à disponibilidade de recursos naturais existentes para geração de energia elétrica, fez com que o bagaço de cana-de-açúcar passasse a ser valorizado como fonte alternativa prioritária para a geração de energia, considerando a sua grande oferta e o seu potencial energético. Este artigo apresenta um estudo da relação do teor de umidade retirado do bagaço por secagem com gases de exaustão, seu poder calorífico, seu consumo em massa, bem como o ganho de eficiência energética em uma caldeira tipo aquatubular, com capacidade de produção de 150 toneladas/hora de vapor a 485°C, pressão de 63 Kgf / cm², considerando experimentos realizados em bancada com o uso de sopradores térmicos e simulações de fluxo de gases utilizados no software Ansys® 18. O trabalho foi desenvolvido com o objetivo de analisar o potencial energético dessa biomassa, através da geração de gráficos comparativos de PCS e PCI em funções de medição, bem como seu ponto ótimo para produção de vapor e posterior geração de energia. Procurou-se demonstrar que o processo de secagem total, com umidade próxima de zero, se torna pouco econômico quando leva em consideração o custo de aquisição de secadores, consumo de energia para secagem e manutenção. No entanto, verificou-se que é possível reduzir a umidade do bagaço para até 47% utilizando-se os gases de exaustão da caldeira, com um ganho significativo médio de 8% de eficiência.

Key-word

sugarcane bagasse
energy matrix
heat power
energy analysis
computational analysis

ABSTRACT

The concern with the Brazilian energy matrix in the midst of crises related to the availability of existing natural resources for the generation of electricity, made the sugarcane bagasse to be valued as a priority alternative source for energy generation, considering its great offer and its energetic potential. This article presents a study of the relationship between the moisture content taken from the bagasse by drying with exhaust gases, its calorific power, its mass consumption, as well as the energy efficiency gain in an aquatubular type boiler, with a production capacity of 150 tons/hour of steam at 485 °C, pressure of 63 Kgf / cm², considering bench experiments using thermal blowers and gas flow simulations used in the Ansys® 18 software. The work was developed with the objective of analyzing the energy potential of this biomass, through the generation of comparative graphs of PCS and PCI in measurement functions, as well as its optimum point for steam production and subsequent energy generation. I seeks to demonstrate that the total drying process, humidity close to zero, becomes uneconomical when it takes into account the cost of purchasing dryers, energy consumption for drying and maintenance. However, it was found that it is possible to reduce bagasse moisture to up to 47% using the boiler exhaust gases, with an average significant gain of 8% efficiency.

Informações do artigo

Recebido: 16 de dezembro, 2019

Aceito: 11 de julho, 2020

Publicado: 29 de agosto, 2020

Introdução

De acordo com o Boletim “A Bioeletricidade em Números” (UNICA, 2018), o setor sucroenergético corresponde a 77% da fonte de biomassa gerada no Brasil, sendo a 4ª fonte mais importante na matriz energética brasileira em termos de capacidade instalada. As usinas de açúcar são pioneiras na produção de bioenergia como estratégia de valorização do bagaço de cana-de-açúcar (MARTINEZ-HERNANDEZ, 2018).

O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2019) relata que no país existem 376 usinas sucroalcooleiras cadastradas no Departamento da Cana-de-Açúcar e Agroenergia, que tornam o setor autossuficiente na produção de energia elétrica por meio de biomassa, além de comercializar o excedente para o Sistema Integrado Nacional (SIN), tornando-se uma valiosa fonte de renda para essa indústria. A geração de eletricidade é, economicamente, a rota ideal para utilizar todo o bagaço disponível para uma usina de açúcar com caldeiras com capacidade maior ou igual a 150 toneladas de vapor por hora (VARSHNEY, 2019).

Outro destaque é o compromisso assumido pelo Brasil na COP21, de reduzir em 43% as emissões de Gases Geradores de Efeito Estufa (GEE) até 2030, além da utilização de 45% de energias renováveis na matriz energética brasileira (INDC, 2015). O setor sucroenergético brasileiro deve produzir 76 TWh até o ano de 2030, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética – (EPE, 2016b), com emissões de gases estufa bem menores que os provindos da queima de combustíveis fósseis. O potencial de oferta de exportação de energia elétrica, considerando somente o bagaço de cana será de 13 GW médios para a safra de 2020/21 (UNICA, 2010).

O sucesso de um esquema de cogeração depende da maximização da produção de energia e da minimização do consumo de energia nos processos de produção de açúcar (SINGH, 2019). Diante disso, o grande desafio deste setor é o aumento do potencial energético da biomassa. Este aumento pode ser obtido através de vários métodos, por exemplo, a otimização do projeto de caldeiras (FOUST, 1980), implementação de ciclo combinado de gaseificação integrada com o bagaço na usina (ARTEAGA-PÉREZ, 2014), adição da palha da cana-de-açúcar ao bagaço como combustível da caldeira (ALVES, 2015) e a redução do teor de umidade no bagaço (RAMOS, 2017).

No Brasil, o bagaço de cana in natura pode ser considerado a principal fonte de combustível de biomassa, pois o mesmo apresenta baixa densidade, 184 kg/m³, umidade de 50% e porosidade de empilhamento de até 96,2% quando não compactado (OLIVEIRA, 2002). É uma matéria composta por microtubos que contém o caldo, e possui característica porosa, sendo favorável à troca de calor do fluido contido em suas fibras se submetido à passagem de gases quentes (LIMA, 2014).

O procedimento de redução do teor de umidade de um material é denominado secagem, nele tem-se a evaporação de água com transferência simultânea de massa e calor entre as fases sólida e gasosa (CORRÊA, 2003).

No bagaço de cana, este processo apresenta muitas vantagens, por exemplo, o aumento do poder calorífico, a diminuição da relação bagaço/ar que reduz os gases de exaustão e assim aumentam a eficiência da caldeira (SOSA-ARNAO, 2004).

A escolha do secador de bagaço leva em consideração diversos fatores, tais como, propriedades físicas do produto a ser desidratado (forma, estrutura e dimensão), sua composição química, as características físicas do produto final desejado, o fator econômico e as condições operacionais (STRUMILLO, 1986). Os equipamentos de secagem podem ser classificados com base na forma de fornecimento de energia térmica, temperatura e pressão de operação e forma de alimentação do secador (MUJUMDAR, 1995).

Um dos processos de secagem bastante estudados é o que utiliza os gases de exaustão de caldeira. O primeiro estudo sobre secagem de bagaço de cana-de-açúcar utilizando gases de exaustão de caldeira foi publicado em 1910 pelo professor E. W. Kerr (BOULET, 1975), o secador consistia em uma caixa metálica com o fluxo de bagaço em contracorrente aos gases quentes, contando ainda com defletores para maximizar o contato dos gases com o bagaço. Com o uso desse tipo de secador conseguiu-se reduzir a umidade de 54,3% para 46,4% com significativo ganho no poder calorífico (ARRASCAETA, 1984).

O teor de umidade é um aspecto crítico para as caldeiras cuja eficiência é determinada pelo maior valor de aquecimento – HHV, por representar cerca de 14,79% das perdas totais de calor (SOSA-ARNAO, 2004). Tornando o teor de umidade um dado fundamental que impacta no volume/massa de bagaço que será consumido e na eficiência térmica da caldeira, uma vez que essas são projetadas para trabalhar com uma faixa de umidade limite.

Este trabalho apresenta um estudo da variação do teor de umidade removido do bagaço de cana por secagem, utilizando gases de exaustão de uma caldeira aquatubular, em fluxo ascendente e cruzado, observando o poder calorífico do material em função do teor de umidade resultante e viabilidade técnica e econômica.

Materiais e Métodos

Obtenção do bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço de cana-de-açúcar foi obtido e analisado na Usina JB, localizada no município de Vitória de Santo Antão em Pernambuco-Brasil. A usina possui grande porte, pois processa anualmente uma média de 1.100.000 toneladas de cana-de-açúcar e tem uma produção de bagaço in natura de cerca de 612.480 ton/safra com umidade de 50%. O sistema de vapor é composto por uma caldeira aquatubular HPB Tipo VS 500 (2005), com capacidade de queima de 69 toneladas de bagaço com 50% de umidade por hora, pressão de saída de vapor de 63 kgf/cm² e temperatura de saída de vapor a 485 °C.

Os gases de exaustão saem a 185 °C precipitando os particulados no lavador de gases, reduzindo a temperatura média para 125 °C (LIMA, 2014).

Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar

Para a caracterização da biomassa foram determinados alguns parâmetros essenciais: o teor de umidade, a percentagem de massa de sacarose aparente (POL) e o poder calorífico.

Teor de umidade

O bagaço foi coletado após o último terno de moenda, previamente misturado no local de coleta e acondicionado em recipientes plásticos. As amostras foram levadas para o laboratório para análise de porcentagem da umidade através do método de estufa Spencer (BARBOSA, 2018)

Inicialmente, considerou-se a massa da amostra total de bagaço com umidade média de 50%, ou seja, metade da massa total seria composta por água. Essas amostras foram submetidas a modos de secagem distintos determinados pelo autor, a 105 °C na estufa e a 120°C no soprador térmico, afim de analisar-se o comportamento de secagem da biomassa quanto ao tempo de exposição aos gases quentes.

Primeiramente, fracionou-se a amostra total do bagaço coletado em cinco partes para a realização de testes diários. Em cada um desses testes colocou-se 100g de bagaço úmido (M_{Bt}) na estufa, que utilizava gases quentes soprados na parte inferior a 105 °C um cesto com tela de mesh 200, durante 1 minuto e em seguida pesada (M_2). Repetiu-se o mesmo procedimento por 2 minutos (M_2') e por 3 minutos e (M_2'').

Realizou-se também experimentos com o uso de um soprador térmico com seletor para vazão de 0,1368m³/min e temperatura do ar a 120°C, sendo adotada a umidade do bagaço que foi determinada anteriormente na estufa.

Foram realizados cinco testes para cada amostra de 200g (M_{Bt}) e considerada a média dos resultados obtidos, que foram submetidos ao fluxo quente do soprador durante 1 minuto e pesado (M_2), mais 1 minuto e pesado (M_2'), e mais 1 minuto e pesado (M_2''), para determinação da massa de água perdida de cada um, para que pudessem ser comparados com os resultados de umidade com os do método anterior.

Em geral, considerou-se valores em massa total baseados num amostra de bagaço de 100 g ou 200 g (M_{Bt}) com 50 % de umidade, portanto, massa inicial de água de 50 g ou 100 g (M_{Ai}).

A determinação do percentual de umidade do bagaço (T_u) deve considerar os valores da massa de água perdida (M_{Ap}), segundo o tempo de exposição M_2 , M_2' e M_2'' , de acordo com a Equação 1.

$$T_u = \frac{M_{Ai} - M_{Ap}}{M_{Bt} - M_{Ap}} * 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

POL

Definida como a percentagem de massa de sacarose aparente (POL), em peso, existente em uma solução que contém açúcares (colmo, caldo, xarope, massa cozida, etc), determinada pela propriedade do açúcar de desviar a luz polarizada. Esse fator tem influência direta no poder calorífico do bagaço, já que o poder calorífico do açúcar pode ser considerado o mesmo da fibra, e a POL corresponde à cerca de 3 % da energia total disponível no bagaço que sai do último terno com 51% de umidade (PAYNE, 1989).

Esse parâmetro foi determinado pelo método do digestor a frio (CALDAS, 2012).

A leitura foi realizada em um sacarímetro Digital, Acatec, modelo: SDA2500, corrigida, automaticamente, em função da temperatura. O sacarímetro foi aferido, diariamente, com tubo padrão de quartzo para leituras, de preferência, entre 60 a 80°Z, convertendo as leituras, segundo o clarificante utilizado.

Todos os dados obtidos pelos testes e os fornecidos (U_b e Q) pela Usina JB foram compilados e substituídos na Equação 2.

$$POL \% = \frac{L_s * 26 * (1000 + \%U_b)}{10000 - (L_s * 26 * \frac{100}{Q})} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde: L_s é leitura sacarimétrica (°Z), U_b é a umidade do bagaço (%) e Q é a pureza do caldo residual (%)

Poder calorífico

As principais propriedades para se caracterizar as biomassas são: Poder Calorífico – PC (kJ/kg), densidade (kg/m³) e composição, onde o poder calorífico é classificado como Poder Calorífico Superior – PCS, Poder Calorífico Inferior – PCI, além do Poder Calorífico Útil – PCU (SILVA-MORAIS, 2008).

Quando se adota um valor comum do PCS de 4600 kcal/kg do bagaço seco não se comete um erro maior que 2% (HUGOT, 1977). E como o PC do açúcar e das impurezas são bem próximos um do outro, se utiliza valores médios para eles e também para a biomassa seca (HUGOT, 1977). Na busca de valores de PC que se assemelhasse ao comportamento real de combustão da biomassa (SUGAR SOFT, 2020) e da literatura estudada, escolheu-se simplificações dos cálculos do poder calorífico, dados pelas Equações 3 e 4.

$$PCS = 4.600 - 12s' - 46w \quad (\text{Eq. 3})$$

$$PCI = 4.250 - 12s' - 48,5w \quad (\text{Eq. 4})$$

s' : Teor residual de sacarose – POL

w : Umidade do bagaço

A POL, juntamente com a umidade, é determinante para o poder calorífico do bagaço. Tomando como referência a literatura de Hugot (1977), que relaciona o desempenho do poder calorífico com relação à variação do teor de umidade, do percentual de hidrogênio e da POL.

Para o presente estudo, será analisado também a relação do poder calorífico com a variação de consumo da quantidade de massa de bagaço.

Simulação matemática e análise de dados

Para validar os experimentos executados em bancada, realizou-se simulações com o software Ansys® 18, com um computador com Processador Intel® Core i7-7500 U, 16 GB de memória, placa de vídeo Nvidia GeForce® 940MX 4GB.

A impossibilidade da existência de uma câmara, que acumule os gases e os disperse de forma uniforme ao longo de toda a área do secador, pela baixa dispersão dos gases em função da alta porosidade, determina que a área de troca de calor no secador a ser projetado deve ser a mesma da seção do colchão de bagaço.

Os modelos foram construídos no design modeler, módulo de modelagem que faz parte do pacote Ansys®.

Para a simulação do secador tinham como região de secagem uma camada de bagaço com porosidade de 70%, com formato retangular com 8,00 m de comprimento e 1,00 m de largura (Figura 1), equivalente à área interna do duto de exaustão da caldeira, considerando um trecho livre com 1,50 m de comprimento antes e depois dos colchões de bagaço e entre duas camadas de 0,30 m de espessura, um espaço vazio de 0,80 m (Figura 2).

As faixas de biomassa possuindo volume de 4,80 m³, equivalente à massa de bagaço com umidade de 50% e 883kg, situado no alinhamento do duto de entrada do lavador de gases.

Esse valor foi definido para que a vazão do secador fosse de 67.905 kg/h correspondente ao consumo atual da caldeira. A vazão adotada para os gases de exaustão foi de 480.000 m³/h, com temperatura variando entre 169°C e 185°C.

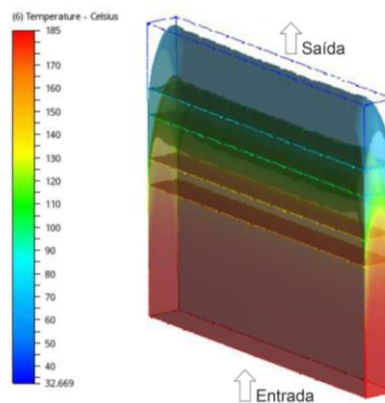
Para as condições de contorno da simulação, usou-se velocidade de entrada dos gases na passagem pelo secador de 17,50 m/s, temperatura de entrada do bagaço de 30°C e pressão 0 atm na saída do duto (Figuras 1 e 2).

Buscou-se uma configuração ideal de simulação através do método de elementos finitos, onde a malha foi refinada para 7,5 mm de tamanho de elemento, 0,004 s de time step, 0,4 s de tempo de parada e número de 10 interações para cada time step, para que se aproximasse ao comportamento esperado numa passagem completa dos gases ao longo do duto.

Durante o percurso, o bagaço foi submetido ao fluxo de ar quente ascendente e cruzado por um período que pode ser variável em função da umidade final desejada.

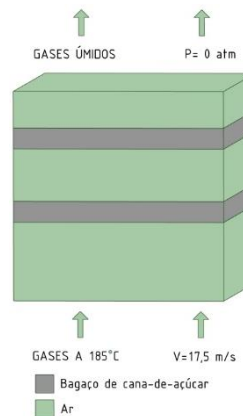
Escolheu-se entre um e dois minutos de exposição do bagaço aos gases quentes.

Figura 1. Gráfico resultante da análise do secador com dois colchões de bagaço e fluxo de calor da entrada para saída do duto



Fonte: Autor (2018)

Figura 2. Modelo esquemático do secador: disposição de bagaço e ar. (condições de contorno para a simulação: Temperatura inicial de 30°C e entrada de gases de exaustão a 185°C com velocidade de 17,50 m/s, na entrada do duto e pressão de 0 atm na saída do duto)



Fonte: Autor (2018)

Resultados e Discussões

A utilização de bagaço de cana-de-açúcar como combustível para sistemas de cogeração é largamente estudada por pesquisadores em diversos países como Brasil (HOFSTETZ, 2012), Tailândia (PRASERTSAN, 2006) e Índia (SHARMA, 1999) e é taxada como um bom investimento para usinas que produzem grandes quantidades da biomassa acima de 50% de umidade, explicitando muitos benefícios e vantagens de se investir neste tipo de geração de energia.

A redução do teor de água influencia significativamente a contração volumétrica, devido a menor presença de espaços vazios e acomodação do produto na massa (CORRÊA, 2006).

Portanto, a secagem da biomassa antes da combustão nas unidades geradoras de vapor, para Boulet (1975) é uma forma de poder reduzir a poluição do ar e a demanda de ar no forno.

Já para Baillet (1976), a grande vantagem é o aumento substancial da “capacidade de combustão” do bagaço. Segundo Markesi e Nebra (2003), pode economizar mais energia que o pré-aquecedor de ar.

Para autores como Gonçalves (2010), e Silva e Moraes (2008), com estudos acerca da influência da umidade no PCS, há um acréscimo do mesmo com a diminuição da umidade, e identificação de maior viabilidade para o aproveitamento energético na faixa de 20% de umidade.

Considerando um sistema integrado, tem-se que um bagaço mais seco possibilita que os gases de saída das caldeiras saiam com uma temperatura mais baixa, aumentando assim a eficiência energética e exérgica do sistema de geração de vapor.

No entanto, até a umidade de 47% existe a possibilidade de formação de escória e incrustações além do normal, mas, abaixo dessa umidade é provável e de forma severa (MAGASINER, 1987).

Além da parte técnica que constou as consequências severas atreladas à secagem para as caldeiras, tem-se um importante fator econômico que é a relação de massa de bagaço consumido e quantidade de vapor gerado a partir da sua combustão, que está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Consumo de bagaço.

UMIDADE (%)	kg (vapor) / kg (bagaço)
60	1,53
50	2,16
40	2,78
30	3,41
20	4,03
10	4,66
0	5,28

Fonte: Manual da Caldeira HPB Tipo VS 500 (2005)

Sabendo-se que em média 5 ton de vapor gera 1 MW de energia e que o preço médio de uma tonelada de bagaço e do MW de energia, no ano de 2019 custaram R\$150/MW e R\$260/MW, respectivamente, baseados em valores de mercado em meados de março (ANEEL, 2019).

Pode-se calcular de forma simples e direta que operar com bagaço a 0% de umidade, implica em um abrupto consumo de massa de bagaço seco. Em meio a esse cenário, deve-se considerar também que a quantidade de bagaço produzido ou comprado é finita, se tornando um fator limitante, uma vez que com a secagem, aumenta-se o poder calorífico do material poroso, bem como do seu consumo em massa, permitindo que se analise até que ponto esse procedimento torna-se economicamente viável.

Resultados dos experimentos e medições

Os dados da caracterização do bagaço de cana-de-açúcar utilizados para as simulações matemáticas são apresentados nas Tabelas 2 e 3 e Figuras 3, 4, 5, 6, 7 e 8.

Teor de umidade

O teor de umidade obtido nos testes realizados na estufa e com o uso do soprador térmico apresentado pelas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2. Redução da umidade do bagaço de cana-de-açúcar por secagem por ar quente, numa estufa a 105°C.

TEMPO (min)	TESTES – UMIDADE FINAL (%)				
	T1	T2	T3	T4	T5
1	49,84	49,66	49,95	50,17	49,55
2	48,79	48,73	48,60	48,56	48,25
3	46,24	46,94	46,81	47,29	47,17
UMIDADE INICIAL (%)	52,06	51,87	51,88	52,24	51,38

Fonte: Autora (2018)

Tabela 3. Redução da umidade do bagaço de cana-de-açúcar por secagem por ar quente, vazão de 0,1368m³/min a 120°C.

TEMPO (min)	MASSA APÓS SECAGEM (g)	REDUÇÃO D. MASSA (g)	UMIDADE FINAL BAGAÇO (%)
1	174	26	43,67
2	154	46	36,36
3	138	62	28,98

Fonte: Autora (2018)

Verificando os dados obtidos nas Tabelas 2 e 3, tem-se que o comportamento de secagem do bagaço submetido à 105°C e 120°C, tende a ser mais efetivo e ter uma maior perda de umidade com o aumento da temperatura.

Mesmo com a condutividade térmica do bagaço e do ar baixas, o que nos limita ao tempo de troca térmica não ser muito rápido, conseguiu-se com esses experimentos, uma redução significativa e palpável na umidade final, comprovando assim que o esperado, para situações reais usando gases quentes de exaustão a 185°C, seja viável e coerente com o embasamento teórico deste projeto para desidratação de bagaço.

POL

A POL média das amostras de bagaço provenientes da saída das moendas foi obtida após dados provenientes de análises e fornecidos pela Usina para aplicação da Equação 2 referente à este parâmetro, resultando em uma POL média de 1,9 %.

Poder calorífico

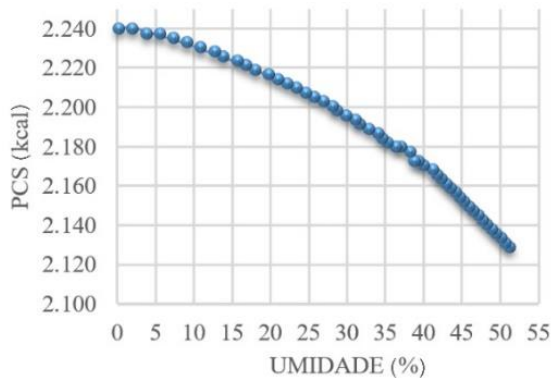
De acordo com cálculos realizados através das Equações 3 e 4, gerou-se uma tabela e dela obteve-se gráficos para melhor visualização do comparativo entre o ganho de poder calorífico superior e inferior e o aumento do consumo de bagaço seco. Tendo como parâmetro constante a POL de 1,9% determinada experimentalmente, tem-se a biomassa diretamente extraída da moenda sem passar pelo processo de secagem, em base úmida.

Inicialmente o PCS e o PCI são tratados como unidade de energia (kcal) em função da porcentagem de umidade, sem ser relacionado a massa.

Posteriormente far-se-á analogia com os valores anteriores, mas também em função da massa com valores obtidos na unidade de kcal/kg. Por último verificou-se o comportamento somente da massa de bagaço consumida, em função do poder calorífico superior e da umidade.

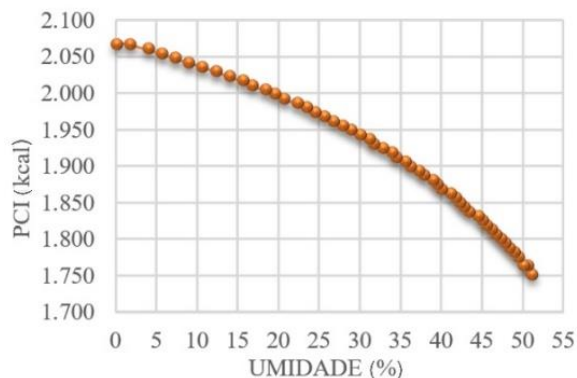
Nas Figuras 3 e 4, relacionou-se o PCS e o PCI, em função do teor de umidade, notando-se um aumento sensível de ambos, com a diminuição da quantidade de água contida no bagaço.

Figura 3. Resultado do gráfico do PCS em função do teor de umidade



Fonte: Autor (2018)

Figura 4. Resultado do gráfico do PCI em função do teor de umidade



Fonte: Autor (2018)

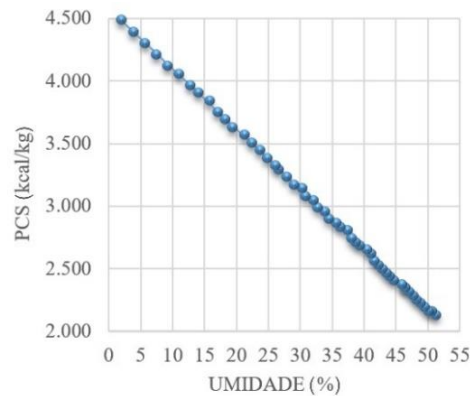
Posteriormente foi realizada a simulação incluindo a massa de bagaço consumida, obtendo a quantidade de calorias por unidade de massa (kcal/kg). Por último verificou-se o comportamento somente da massa de bagaço consumida, em função do poder calorífico superior e da umidade.

Nas Figuras 5 e 6, tomando os poderes caloríficos com relação à massa, tem-se um incremento energético em torno de 95%, destes, 60% são atingidos com a redução da umidade para 20%.

Na Figura 7 vemos que a massa inicial do bagaço úmido é reduzida à medida que a água é retirada.

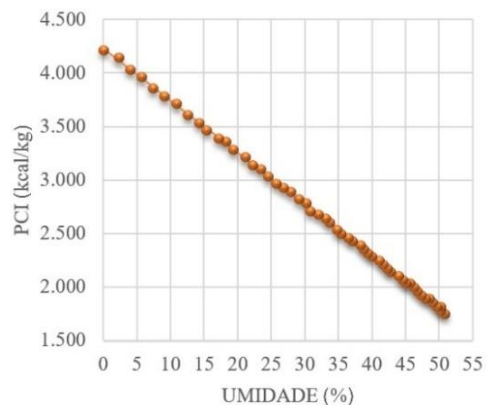
Com isso vemos na Figura 8 que o poder calorífico aumenta com a redução da massa de água, assim, para uma massa inicial de 1 kg de bagaço com 50% de umidade e PCI de 1.802 kcal/kg, obteve-se 1.802 kcal.

Figura 5. Resultado do gráfico do PCS com relação à massa e ao teor de umidade.



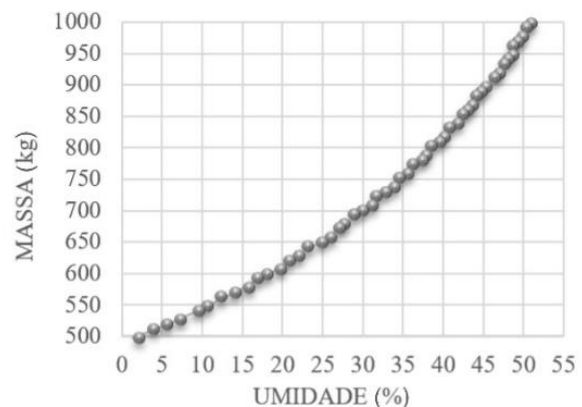
Fonte: Autor (2018)

Figura 6. Resultado do gráfico do PCI com relação à massa e ao teor de umidade.



Fonte: Autor (2018)

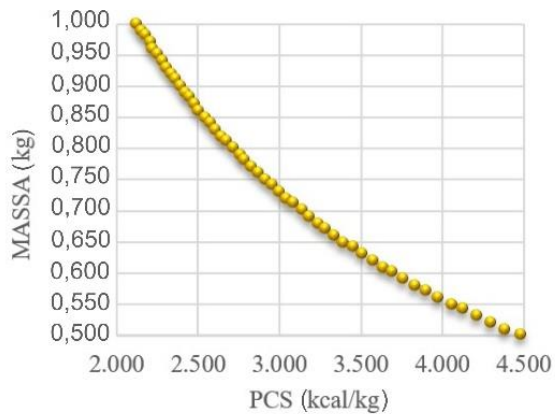
Figura 7. Resultado do gráfico de consumo de massa em função do teor de umidade.



Fonte: Autor (2018)

Para a mesma massa inicial, 1 kg, quando retirada 50% da umidade teremos bagaço seco com PCI de 4.228 kcal/kg, mas somente 50% da massa inicial e assim obtivemos 50% das calorias, isto é 2.114 kcal.

Figura 8. Resultados do gráfico de consumo de massa em função do poder calorífico.

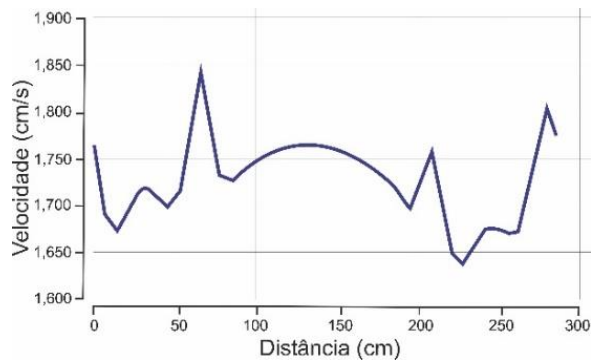


Fonte: Autor (2018)

Resultados das simulações matemáticas

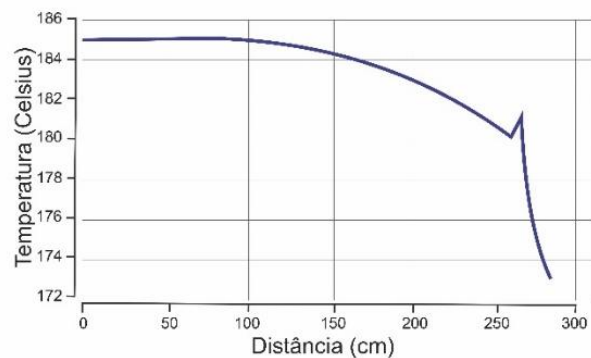
Afim de se obter uma coerência do comportamento físico dos gases quentes no processo de secagem para o bagaço de cana com porosidade de 70% junto a simulação matemática, optou-se pela linearização da velocidade e da temperatura que ocorreram ao longo do duto nas Figuras 9 e 10.

Figura 9. Perfil da velocidade entre a base do colchão inferior e o topo do colchão superior mostrando a diferença de velocidade.



Fonte: Autor (2018)

Figura 10. Perfil da temperatura entre a base do colchão inferior e o topo do colchão superior mostrando a diferença de temperatura.



Fonte: Autor (2018)

A velocidade dos gases está diretamente atrelada ao tempo de exposição, a espessura do colchão de bagaço e a variação da seção do duto, juntamente com a condutividade térmica que o material possui, influenciam na eficiência da redução da umidade. Viu-se que a velocidade teve em geral um constante decaimento pela perda de carga ao longo do processo, apresentando picos de aumento para ambas travessias do colchão de bagaço, devido a área reduzida de passagem. Enquanto a temperatura cai sensivelmente após as passagens pelo colchão de bagaço de 185 °C para 181 °C.

Os gases saem da caldeira a 400 °C, passam por um trocador de calor ar-água e pré-aquecem a água desmineralizada que abastece a caldeira. Em seguida passa por três trocadores de calor ar-ar e pré-aquecem o ar de combustão, chegando ao lavador de gases entre 169 e 185 °C.

Nos secadores de bagaço de grande rendimento, os gases de exaustão passam apenas pelo trocador de calor ar-água e são direcionados para uma tubulação onde é misturado ao bagaço e segue até um separador ciclônico (o percurso é variável), então os gases e a água evaporada são separados do bagaço. Esse sistema faz o by-pass para os economizadores, originalmente projetados pelos fabricantes de caldeiras.

Conclusão

Dados da caldeira mostram que se produz 2,16 toneladas de vapor por tonelada de bagaço a 50% de umidade, 5,28 toneladas de vapor por tonelada de bagaço com zero de umidade e 2,34 toneladas de vapor por tonelada de bagaço a 47% de umidade - menor umidade recomendada pelo fabricante da caldeira. Por isso, é questionável o investimento em equipamentos de alto custo para redução severa da umidade de bagaço de cana-de-açúcar para aumentar o poder calorífico.

Tomando por base 1 kg de bagaço com 50% de umidade e PCI de 1.802 kcal/kg, obtém-se com a queima 1.802 kcal. Quando retirada toda a água resulta num PCI de 4.228 kcal/kg, um aumento de 137,4% no PCI, mas a massa inicial foi reduzida para 0,5 kg de bagaço seco, o que resulta na obtenção de 2.114 kcal dando um ganho real em termos de kcal de 17,3%.

A proposta é demonstrar que é economicamente viável reduzir a umidade do bagaço para 47% com os gases de exaustão da caldeira nas condições de projeto, com perda de massa de 5,1% e ganho em termos de toneladas de vapor por tonelada de bagaço de 8,3%.

A Usina JB gera anualmente uma média de 123.200 MW de energia, a redução da umidade do bagaço para 47% resulta num ganho de eficiência na geração de energia que representa um acréscimo de 10.225 MW por ano, sem investimento em novos equipamentos, sem exceder os limites de umidade especificados pelo fabricante da caldeira e sem as instabilidades na operação da caldeira geradas pela variação da umidade do bagaço.

Referências

- ALVES M., G.H.S.F. Ponce, M.A. Silva, A.V. Ensinas, Surplus electricity production in sugarcane mills using residual bagasse and straw as fuel, *Energy* 91 (2015) 751–757.
- ARRASCAETA, A., FRIEDMAN, P. Bagasse drying: past, present and future. *International Sugar Journal*, v.86, n.1021, p.3-6, 1984
- ARTEAGA-PÉREZ, L. E., Casas-Ledón, Y., Prins, W., Radovic, L. Thermodynamic predictions of performance of a bagasse integrated gasification combined cycle under quasi-equilibrium conditions, *Chem. Eng. J.* 258 (2014) 402–411.
- BAILLIET, V.J. Bagasse drying versus air pre-heating, *The Sugar Journal*, 38 (10) 52-53. 1976
- BARBOSA, B. H., SANTOS, C. S., OLIVEIRA, S. Revista Metropolitana de Sustentabilidade. São Paulo, v.8, nº 3, p. 106-121, 2018.
- BOULET, W.P. Waste fuel drying and the energy, *The Sugar Journal*, 10: 40-47. 1975
- CALDAS, C. **Novo manual para laboratórios sucroalcooleiros**. Piracicaba: STAB, 2012.
- CORRÊA, J. L. G. Discussão de parâmetros de projeto de secadores ciclônicos. 2003. 169 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2003.
- CORRÊA, P. C. et al. Contração volumétrica dos frutos de mamona durante a secagem. In: **Congresso Brasileiro de Mamona**, 2., Aracajú, 2006
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. 2016b. O compromisso do Brasil no combate às mudanças climáticas: produção e uso de energia. jun. 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/NT%20COP21%20iNDC.pdf>>
- FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das operações unitárias**. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1980
- GONÇALVES, J.E. **Avaliação energética e ambiental de bagaço de cana-de-açúcar produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis***. Tese (Doutorado em Agronomia) – UNESP. Botucatu, 2010.
- HOFSTEZ K, Silva MA. Brazilian sugarcane bagasse: Energy and non-energy consumption. *Biomass Bioenergy* 2012;46:564–73.
- HUGOT, E. **Manual da Engenharia açucareira**. 1. ed. Mestre Jou: São Paulo, 1977.
- INDC – Fundamentos para a INDC brasileira - <https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris/item/10710.html>
- LIMA, F. E. **Otimização do uso do bagaço da cana-de-açúcar para produção de energia**. Tese (Doutorado em Engenharia química) – UFPE. Recife, 2014.
- MAGASINER, Norman. **The effect of fuel moisture content on the performance of a typical bagasse fired watertube boiler**. Proceedings of South African Sugar Technologists's Association. 1987.
- MARKESI F.L., Nebra, S.A. **Energetic efficiency maximization of a steam system fueled by sugar cane bagasse**, in CD-ROM. 2003
- MARTINEZ-HERNANDEZ, E., Amezcua-Alleri, M.A., Sadhukhan, J., Aburto, J., 2018. Chapter 4 Sugarcane bagasse valorization strategies for bioethanol and energy production. In: de Oliveira, Alexandre Bosco (Ed.), *Sugarcane*. IntechOpen.
- MUJUMDAR, A.S.; MENON, A. S. Drying of Solids: Principles, Classification, and Selection of Dryers. In: MUJUMDAR, A.S. **Handbook of industrial drying**. New York Marcel, 1995
- OLIVEIRA, Valter R.; FREIRE, Francisco M.; VENTURIN, Regis; CARRIJO, Omar A.; MASCARENHAS, Maria H. T.; **Chemistry characterization of growing media**. REVISTA DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE HORTICULTURA. 2002.
- PAYNE, J. H. **Operações unitárias na produção de açúcar de cana**. Trad. F Zarpelon. São Paulo: Nobel, STAB, 1989.
- PRASERTSAN S, Sajjakulnukit B. Biomass and biogas energy in Thailand: potential, opportunity and barriers. *Renew Energy* 2006;31(5):599–610
- RAMOS R. C., NACHILUK K. Geração de Bioenergia de Biomassa da Cana-de-açúcar nas Usinas Signatárias ao Protocolo Agroambiental Paulista, Safra 2015/2016. v. 12, n. 4, abril 2017, Análises e indicadores do agronegócio ISSN 1980 0711
- SHARMA MP, Sharma JD. Bagasse based co-generation system for Indian sugar mills. *Renew Energy* 1999;16(1-4):1011–4.
- SILVA, M.B. E MORAIS, A.S. **Avaliação Energética do Bagaço de Cana em Diferentes Níveis de Umidade e Graus de Compactação**; XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção/ A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 13 a 16 de outubro de 2008, p.3.
- SINGH, O. K. **Exergy analysis of a grid-connected bagasse-based cogeneration plant of a sugar factory and exhaust heat utilization for running a cold storage**, *Renewable energy* 143 (2019) 149-163.
- SOSA-ARNAO, Juan Harold; CORRÊA, Jefferson L.G.; SILVA, Maria A.; NEBRA, Silvia A. sugar cane bagasse drying –A review. Drying 2004 – In: **Proceedings of the 14TH International Drying Symposium (IDS 2004)**. São Paulo, Brasil, 22 – 25 August 2004, v. B, p. 990 – 997
- SOSA-ARNAO, J. H, Oliveira FM, Corrêa JLG, Silva MA, Nebra AS. **Sugar cane bagasse drying—a review**. In: Proceedings of the 14th International Drying Symposium, São Paulo, Brazil, 2004.
- STRUMILLO, C.; Kudra, T. **Drying: principles, applications and design**. Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers, 1986. 448p.
- SUGAR SOFT – Consultoria para usina de álcool e açúcar. <http://www.sugarsoft.com.br/?id=12>. Acessado em março de 2020.

UNICA - **União da indústria de cana-de-açúcar** – Disponível em:

<http://www.unica.com.br/noticia/14883647920337887669/eletricidade-gerada-pela-cana-de-acucar-e-fundamental-para-brasil-atingir-meta-ambiental-definida-na-cop21/>

UNICA - União da indústria de cana-de-açúcar. Bioeletricidade: a energia verde e inteligente do Brasil. São Paulo, 2010. 15 p.

VARSHNEY D., P. Mandade and Y. Shastri. **Multi-objective optimization of sugar cane bagasse utilization in an Indian sugar mill Sustainable Production and Consumption** 96–114, Mumbai, Índia, 2019.