



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RAMIRES NOGUEIRA DA SILVA

**REDUÇÃO DA UMIDADE DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA
OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE ENERGIA**

Recife

2018

Ramires Nogueira da Silva

**REDUÇÃO DA UMIDADE DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA
OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE ENERGIA**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Espedito de Lima.

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

S586r Silva, Ramires Nogueira da.

Redução da umidade do bagaço de cana-de-açúcar para otimização do processo de geração de energia / Ramires Nogueira da Silva - 2018. 58folhas, II.e Tabs.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Espedito de Lima.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Curso de Engenharia Mecânica, 2018.

Inclui Referências e Anexos.

1. Engenharia Mecânica. 2. Bagaço da cana-de-açúcar. 3. Cogeração. 4. Eficiência. 5. Secagem. 6. CFD. I. Lima, Francisco Espedito de (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-16

Ramires Nogueira da Silva

**REDUÇÃO DA UMIDADE DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA
OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE ENERGIA**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 14/12/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Espedito de Lima (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

MSc Juan Alberto Rojas Tueros (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Adson Beserra da Silva (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho à meus amados avós: Juarez Nogueira e Marlene Bezerra que zelam por mim junto ao Pai. À meus pais, irmã e amigos pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, que é o Senhor da minha vida.

À meus pais e irmã, que sempre acreditaram em mim.

Aos meus amigos e familiares, que me apoiaram em todos os momentos, em especial, à meus avós Juarez e Marlene que com certeza estão felizes e olhando por mim.

Aos meus amigos-irmãos da graduação, pela amizade, força e incentivos recíprocos.

Ao meu orientador Prof. Francisco Espedito, pelos ensinamentos teóricos e da vida durante a graduação. Obrigada pela confiança, amizade e carinho dedicados.

Ao Eng. Antônio Gonçalo, gerente da Usina Alcoolquímica do Grupo JB, pela oportunidade de aprender a cada dia e pelo incentivo à realização deste trabalho, permitindo a coleta de dados e realização de experimentos.

À todos que torcem por mim, pelo meu sucesso pessoal e profissional, meu muito obrigada. Honrarei vossa confiança.

RESUMO

A preocupação com a matriz energética brasileira em meio à crises relacionadas a disponibilidade de recursos naturais existentes, principalmente quanto à geração hidrelétrica, fez com que o bagaço da cana-de-açúcar passasse a ser valorizado como fonte de energia. Portanto, o setor sucroalcooleiro aproveitou essa oportunidade para diversificar ainda mais sua lista de subprodutos provenientes do esmagamento da matéria-prima. A importância da cogeração de energia elétrica a partir do bagaço tem se tornado uma alternativa que condiz com o cenário atual do nosso país e do mundo, uma vez que é uma fonte renovável que pode reduzir os impactos ambientais e disponibilizar energia elétrica a custos reduzidos. O aumento da eficiência operacional dos sistemas a vapor em que o bagaço é consumido, reflete diretamente na diminuição do consumo de combustível e no aumento da geração de excedentes de eletricidade. O presente trabalho foi realizado com o objetivo de estudar a influência da redução do teor de umidade inicial do bagaço para posterior geração de energia elétrica através do projeto de um equipamento de secagem. Com o intuito de otimizar a eficiência energética das caldeiras, reduzir a umidade da biomassa antes da queima e reduzir a temperatura dos gases de escape, desempenhou-se análises dos experimentos em escala de bancada e simulações em CFD.

Palavras-chave: Bagaço da cana-de-açúcar. Cogeração. Eficiência. Secagem. CFD.

ABSTRACT

Concern about the Brazilian energy matrix in the midst of crises related to the availability of existing natural resources, especially in the case of hydroelectric generation, resulted in the recovery of sugarcane bagasse as an energy source. Therefore, the sugar and alcohol industry took advantage of this opportunity to further diversify its list of by-products from the crushing of the raw material. The importance of electricity cogeneration from bagasse has become an alternative that matches the current scenario of our country and the world, since it is a renewable source that can reduce environmental impacts and make electricity available at costs reduced. Increasing the operational efficiency of the steam systems in which the bagasse is consumed directly reflects the reduction of fuel consumption and the increase in generation of surplus electricity. The present work was carried out with the objective of studying the influence on the reduction of the initial moisture content of the bagasse for subsequent generation of electric energy through the design of a drying equipment. In order to optimize the energy efficiency of the boilers, reduce the biomass moisture before burning and reduce the exhaust gas temperature, analyzes were carried out on bench scale experiments and CFD simulations.

Keywords: Sugarcane bagasse. Cogeneration. Efficiency. Drying. CFD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Fluxograma operacional da análise de cana-de-açúcar	16
Figura 2 –	Obtenção das amostras pela sonda	17
Figura 3 –	Inversão de sacarose e frutose	17
Figura 4 –	Estrutura da cana-de-açúcar	18
Figura 5 –	Estrutura molecular celulose, hemicelulose e lignina	20
Figura 6 –	Esquema das fibras em forma de bastonete e de partículas em forma arredondadas com diversas granulometrias	22
Figura 7 –	Esquema do aglomerado de bastonetes e medula com vários tamanhos	22
Figura 8 –	Detalhe da fibra do bagaço de cana-de-açúcar obtida pelo MEV, modelo JEOL JXA-840 A	23
Figura 9 –	Esquema geral do processo de cogeração na indústria açucareira	25
Figura 10 –	Secador pneumático de bagaço instalado na CAIG	30
Figura 11 –	Balço térmico e massa – condição atual	35
Figura 12 –	Esquema do balanço de massa e energia da caldeira e secador do bagaço em 46% umidade	35
Figura 13 –	Fluxograma atual da caldeira com bagaço com 51% de umidade	37
Figura 14 –	Bolo úmido	38
Figura 15 –	Prensa de extração do caldo	38
Figura 16 –	Mufla Marconi com cesto de tela mesh 200	39
Figura 17 –	Modelo esquemático do secador com dois colchões de bagaço	49
Figura 18 –	Linearização da temperatura entre a base do colchão inferior e o topo do colchão superior mostrando a diferença de temperatura	49
Figura 19 –	Linearização da velocidade entre a base do colchão inferior e o topo do colchão superior mostrando a diferença de velocidade	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Tipos de secadores e seus produtos	28
Tabela 2 –	Balanço de massa e energia com caldeira queimando bagaço com 51% de umidade e secando bagaço de entrada no secador com 51% de umidade – Secador com previsão de redução de umidade em 5 pontos percentuais	36
Tabela 3 –	Balanço de massa e energia com caldeira queimando bagaço com 46% de umidade e secando bagaço de entrada no secador com 51% de umidade – Secador com previsão de redução de umidade em 5 pontos percentuais	36
Tabela 4 –	Composição do bagaço seco	40
Tabela 5 –	Composição do ar	41
Tabela 6 –	Redução da umidade do bagaço de cana-de-açúcar por secagem por ar quente, vazão de 0,1368m ³ /min a 120°C	47
Tabela 7 –	Redução da umidade do bagaço de cana-de-açúcar por secagem por ar quente, numa estufa a 105°C	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Geral	13
1.2.2	Específicos	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	BIOMASSA: CANA-DE-AÇÚCAR	14
2.2	BAGAÇO	19
2.2.1	Morfologia da fibra do bagaço	21
2.2.2	Propriedades físicas e químicas do bagaço	23
2.3	ENERGIA RENOVÁVEL	23
2.4	PROCESSO DE SECAGEM	26
2.4.1	Secadores de bagaço de cana-de-açúcar – Tipos e características	27
2.4.2	Sistema experimental de secagem	30
2.4.3	Balanco de massa e energia	32
3	METODOLOGIA	33
3.1	SECAGEM DO BAGAÇO	33
3.2	BALANÇO DE MASSA E ENERGIA	34
3.3	TEOR DE UMIDADE	38
3.4	POL	38
3.5	PODER CALORÍFICO	39
3.5.1	Combustão do bagaço	40
3.6	IMPACTO NA REDUÇÃO DO PERCENTUAL DE ÁGUA ..	45
4	RESULTADOS E ANÁLISES	46
4.1	RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS E MEDIÇÕES	46
4.1.1	Em laboratório	46
4.2	EXPERIMENTOS DE SECAGEM	47
4.3	SIMULAÇÕES	48
5	CONCLUSÃO	52

REFERÊNCIAS	53
ANEXO A – PODER CALORÍFICO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR	57
Tabela 8. Poder calorífico do bagaço em função da umidade	57
Tabela 9. Poder calorífico do bagaço em função da umidade e percentual de hidrogênio	57
Tabela 10. Poder calorífico do bagaço em função da umidade e da pol	58

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, e responde por cerca de 45% da produção mundial de etanol, concentrando-se na região centro-sul, principalmente no Estado de São Paulo que é o maior produtor nacional. A produção e o processamento de cana-de-açúcar no país são gerenciados pelo setor privado, que obtém os menores custos de produção do mundo, tanto de açúcar, como de álcool, despontando como um segmento altamente competitivo no mercado internacional.

Como o primeiro objetivo da unidade industrial é ser rentável, isso está relacionado com uma produtividade mais elevada, que se consegue, por exemplo, com uma otimização do processo. Atualmente, as usinas possuem uma alta tecnologia e ampliaram sua área de atuação que agora além da produção de açúcar se dedica a produção de álcool, aguardente, gás carbônico e geração de energia.

A cana, ao ser colhida, passa por diversas etapas até que se obtenha o produto final desejado, como o açúcar e o álcool. Esse tipo de indústria, é tratada como Usina de Açúcar e/ou Álcool e é dividida por setores para melhor compreensão dos processos. Sabendo-se que o processo somente é otimizado quando se conhecem todas as operações unitárias, permitindo introduzir modificações corretivas eventuais efetivando um controle adequado.

Baseando-se nas necessidades energéticas, opta-se hoje em dia, por um sistema de cogeração através da queima do bagaço em caldeiras à vapor, devido à grande demanda de energia. Utiliza-se portanto, o consumo da biomassa residual gerada na produção de açúcar, álcool e seus derivados: neutro, hidratado e aguardente. O bagaço de cana é consumido por sistemas de geração de vapor, conhecidos por caldeiras, que operando com maior eficiência, propiciam redução no consumo de combustível e aumento da geração de excedentes de eletricidade, na busca pela autossuficiência energética da planta industrial, de forma que seja menos agressiva possível ao meio ambiente.

Em meio a esse cenário, tem-se que a quantidade de água contida na fibra do bagaço, ou seja, sua umidade, que hoje gira em torno de 54%, influencia diretamente no rendimento da caldeira na busca incessante pelo seu melhor desempenho na

queima desse material. Para isso pensa-se em um equipamento como um secador de bagaço, que visa diminuir a umidade em cerca de 3 à 4 %, projetado de tal forma que aproveite os gases da própria caldeira e o faça antes de sua entrada na fornalha.

Desse modo tem-se como pergunta de pesquisa “Como reduzir a umidade do bagaço de cana para otimizar o processo de geração de vapor com baixo custo de insumo.”

1.1 JUSTIFICATIVA

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), divulgou em meados de 2015 que o bagaço da cana-de-açúcar representa atualmente 6,9% da matriz energética brasileira e segundo o gerente de Bioeletricidade da Única (União da indústria de Cana-de-açúcar), Zilmar José de Souza, o setor tem potencial para quadruplicar a participação na geração de energia nacional.

A utilização do bagaço como matéria-prima para produção de energia é uma alternativa totalmente viável do ponto de vista econômico e ambiental. A Aneel pretende obter recursos por meio da iniciativa privada para investir nas usinas, dando a elas uma terceira fonte de renda bastante significativa e importante, além do açúcar e do álcool como produtos finais.

Uma possibilidade para o aumento do potencial energético do bagaço é através de uma pré-secagem, pois, esse resíduo agrícola caindo de 50% para 20% de umidade, por exemplo, possui um poder calorífico cerca de duas vezes maior, ao mesmo tempo, a redução da umidade provoca a redução do volume dos gases de saída da caldeira e a redução do vapor da água nos gases de combustão resulta em altas temperaturas de combustão, melhorando a eficiência da caldeira (SOSA-ARNAO,2008).

1.2 OBJETIVOS

A seguir serão apresentados os objetivos geral e específicos do presente trabalho.

1.2.1 Geral

Reduzir a umidade do bagaço de cana para otimizar o processo de produção de vapor para geração de energia.

1.2.2 Específicos

- Caracterizar as variáveis: umidade, tamanho das partículas e densidade para análise dos seus efeitos no processo de produção.
- Realizar análise energética e de perda de rendimento.
- Verificar o impacto da redução de cada porcentagem de água do bagaço na produção de vapor.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é realizada uma fundamentação teórica sobre o setor sucroalcooleiro, com o ponto de vista de vários dos principais autores sobre o tema da biomassa estudada. Apresenta-se o bagaço da cana-de-açúcar como insumo para cogeração de energia elétrica e de vapor de processo, como uma fonte de energia renovável. Além de seu comportamento quando submetido a um processo de secagem visando a projeção de um equipamento que aumentaria sua eficiência energética.

2.1 Biomassa: Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é a principal matéria-prima para a indústria sucroalcooleira brasileira. A composição química da cana de açúcar é muito variável em função das condições climáticas, das propriedades físicas, químicas e microbiológicas do solo, do tipo de cultivo, da variedade, da idade, do estágio de maturação, do estado sanitário, entre outros fatores. O caldo, definido como uma solução impura de sacarose, glicose e frutose, é constituído de água (=82%) e sólidos solúveis ou Brix (=18%), sendo estes agrupados em açúcares orgânicos, não açúcares e inorgânicos. Os açúcares são representados pela sacarose, glicose e frutose. A sacarose, como o componente mais importante, tem um valor médio de 14%, enquanto os demais, dependendo do estado de maturação, 0,2 e 0,4%, respectivamente para a frutose e glicose.

Estes carboidratos que constituem o açúcar total, quando expressos em glicose ou açúcar invertido, apresentam um teor de cerca de 15 –16%. Os açúcares redutores

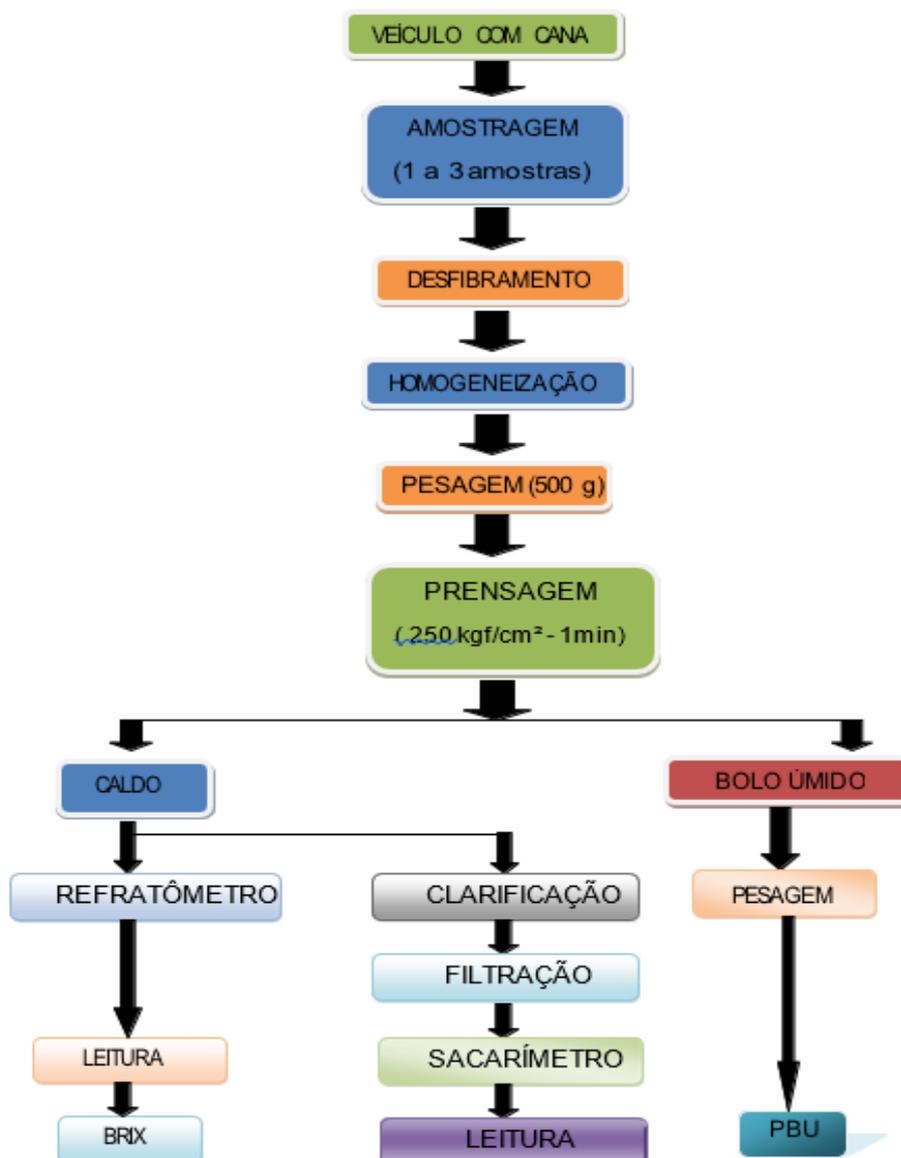
– glicose e frutose quando em teores elevados mostram um estágio pouco adiantado de maturação da cana, além da presença de outras substâncias indesejáveis ao processamento. A colheita da cana pode ser feita manual ou mecanicamente.

A cana é transportada à indústria através de caminhões adaptados para o serviço. Os caminhões são pesados antes e após o descarregamento para se obter o peso de cana recebida. O objetivo de se pesar a cana é permitir o controle agrícola, o controle da moagem e o cálculo de rendimento industrial. Os caminhões após a pesagem são encaminhados para amostragem (Figura 2) da cana fazendo com que a sonda de amostragem penetre na lateral em locais determinados, recolhendo uma quantidade de amostra de cana.

A amostra é encaminhada através de um duto que a leva até um desfibrador. De cada amostra é coletada uma alíquota do bagaço desfibrado e levado para análise para que se possam definir características como a POL (porcentagem de massa de sacarose aparente), ATR (açúcares redutores totais), AR(açúcares redutores–glicose e frutose), Brix (quantidade de sólidos solúveis), pureza, porcentagem de fibra da cana e tempo de queima e corte, a partir das quais o pagamento da cana é efetuado.

O ciclo da cana-de-açúcar dentro de uma usina se inicia, com a pesagem dos caminhões que as carregam. Um fator importante é se conhecer o teor de sacarose da cana-de-açúcar, assim como sua pureza, para isso é necessário um bom laboratório de sacarose, onde são realizadas análises segundo as normas da Consecana. E tem por base o fluxograma (Figura 1) descrito a seguir.

Figura 1. Fluxograma operacional da análise de cana-de-açúcar.



Fonte: A autora.

Primeiramente os caminhões param na balança, para aferir o seu peso bruto (peso do caminhão carregado), após isso o condutor recebe um boletim de análise, no qual ficarão registrados os dados do fornecedor, os pontos sorteados e os resultados analíticos. A seguir o caminhão segue para a área de coleta onde as amostras são retiradas pela sonda nos pontos sorteados. A sonda utilizada na alcoolquímica é do tipo horizontal, porém há também no mercado, a sonda oblíqua.

Figura 2. Obtenção das amostras pela sonda.



Fonte: A autora.

As amostras coletadas pela sonda têm um tempo de 6h até seguirem para o próximo passo, que é a trituração e homogeneização da cana. O tempo é uma questão fundamental no processo da cana-de-açúcar, pois “em aproximadamente 48h ocorre a inversão de sacarose, que contida na cana, por meio da ação de fungos e bactérias, transforma-se em glicose e frutose, havendo assim perdas consideráveis na produção.” (Caltarosso, 2008).

Figura 3. Inversão de sacarose e frutose.



Fonte: CALTAROSSO. 2008

De cada amostra é coletada uma alíquota do bagaço desfibrado e levado para análise para que se possam definir características como a POL (teor de sacarose aparente), ATR (açúcares redutores totais), AR (açúcares redutores – glicose e frutose), Brix (quantidade de sólidos solúveis), pureza, porcentagem de fibra da cana, a partir das quais o pagamento da cana é efetuado, através de fórmulas inter-relacionadas.

No que diz respeito a estrutura e morfologia da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), é uma monocotiledônea perene, que pertence à família das Gramíneas. A planta é composta por raiz, folhas, flores e caule, estrutura que contém as células de armazenamento da sacarose e maior parte da biomassa. O caule é do tipo colmo, com nós e entrenós definidos, sendo recoberto externamente pela epiderme, estrutura com camada única de células. Os nós, usualmente são menores que os entrenós e formam a ligação entre os entrenós abaixo e acima (COSTA, 2011). Um esquema da estrutura da cana pode ser observado na Figura 4.

Figura 4. Estrutura da cana-de-açúcar.



Fonte: NETAFIM. 2012

As monocotiledôneas possuem uma estrutura com vários feixes vasculares espalhados em um tecido de células parenquimáticas de armazenamento. Os feixes vasculares transportam e dão suporte mecânico. E o parênquima contém células com

grandes vacúolos com a função de estocar sacarose, além de ser o tecido mais abundante do caule da cana.

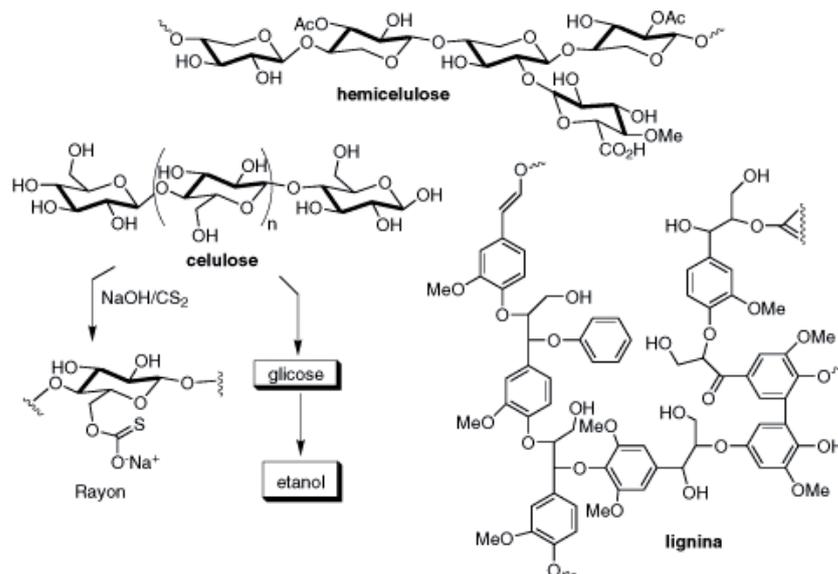
2.2 Bagaço

A eficácia da agroindústria brasileira tem como fator fundamental o rendimento das usinas e o setor sucroalcooleiro obteve grande êxito nos últimos anos tanto na produção de combustível limpo como na produção de energia limpa. Condições favoráveis de clima e solo, fizeram do nosso país o maior produtor de cana-de-açúcar mundial, superando países como Índia e China.

No processo produtivo das usinas, há três subprodutos: a vinhaça, a levedura e o bagaço. Atualmente o bagaço possui diversas finalidades, entre elas o uso como fertilizante, ração animal, matéria-prima para a indústria química e principalmente para a cogeração de energia. Estima-se que cada tonelada de cana produz “250 quilos de bagaço e 204 quilos de palha/ponta, capazes de gerar 199,9 quilowatts/hora para venda” (NASCIMENTO, 2007).

Analisando a fibra do bagaço da cana, os principais componentes são celulose, hemicelulose e lignina. A celulose e a hemicelulose são substâncias bastante abundantes na natureza, e segundo Albuquerque (2009), diferem entre si porque a hemicelulose é composta de unidades de pentosas no lugar da glicose e são pouco polimerizadas. Ambas representam cerca de 70% do peso seco de todos os resíduos agrícolas, como aqueles provenientes da industrialização do milho, arroz, soja, trigo, cana-de-açúcar, entre outros.

Figura 5. Estrutura molecular celulose, hemicelulose e lignina.



Fonte: FERREIRA. 2009

Das complexas substâncias orgânicas de peso molecular elevado nas moendas de cana, o bagaço é parte principal delas. Tido como o resíduo da moagem da cana, é uma fibra lenhosa que sai das moendas junto com o caldo e umidade proveniente da água da própria matéria-prima e da embebição. É constituído de aproximadamente 50% de fibra e 50% de água e sólidos solúveis. A variabilidade existente entre estes últimos depende do desempenho da moenda e variedade do insumo moído.

O bagaço é utilizado num dos principais estágios do processo produtivo da usina, que são as caldeiras. O material é introduzido diretamente na fornalha, onde é o combustível para a queima. Diante da especificação das condições de queima das diversas e mais tecnológicas caldeiras, é muito importante se conhecer a composição do bagaço.

A importância do laboratório está no controle de qualidade do bagaço de cana de açúcar que está entrando na usina (bagaço comprado de terceiros), uma vez que a umidade do bagaço é muito importante para a continuidade do processo e deve ter sua qualidade garantida antes de ser utilizado no equipamento de geração de vapor. Quando um carregamento de bagaço de cana-de-açúcar entra na usina, o caminhão passa pela pesagem (assim como o carregamento de cana), e após o

descarregamento uma amostra é coletada para se fazer a análise da umidade (é importante que se faça a coleta da amostra após o descarregamento, pois o bagaço que está mais acima fica mais seco, devido a ação do sol. O interessante é saber se o bagaço que se encontra no fundo da carreta está bom para uso), essa amostra é levada para o laboratório de sacarose e é pesada no valor de 250g, como indicado pelo manual CONSECANA-PE. Após a pesagem o bagaço é prensado e se obtém o bolo úmido (retirada do caldo), porém, aqui nesse processo, o caldo não é aproveitado. O bolo úmido é pesado e a partir do seu peso pode-se fazer um cálculo para saber o teor de água do bagaço descarregado pelo caminhão.

Como a finalidade do bagaço é ser combustível na caldeira, é importante conhecer o seu comportamento na queima, então a mesma amostra que é retirada para se fazer o cálculo de umidade é estocada por 24h e após esse tempo é colocada num forno e aquecida na mesma temperatura de trabalho da caldeira, com a intenção de saber o comportamento de cada amostra que chega à usina. Quantidades de 5g, de cada amostra, são pesadas cuidadosamente e colocadas em cadinhos individuais que seguem para o forno.

A coleta das amostras deve ser feita corretamente, e para isso as condições da sonda mecânica devem ser boas e confiáveis para realização das coletas.

Um cuidado importante que se deve ter é a rastreabilidade das amostras, tanto nas de cana-de-açúcar quanto nas de bagaço de cana afim, de se saber a origem da matéria prima e poder tomar decisões quando as amostras não forem satisfatórias.

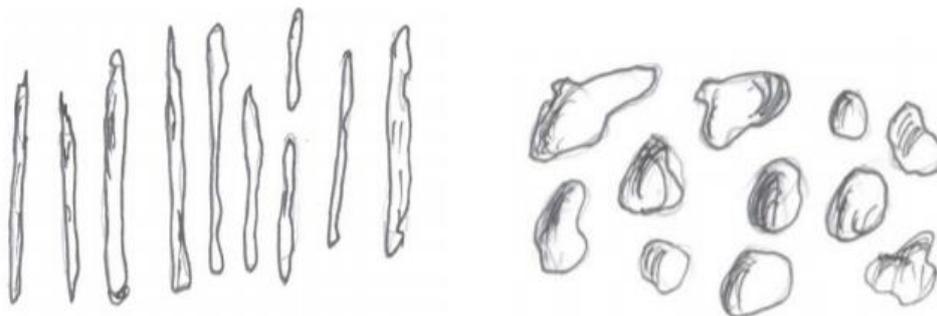
2.2.1 Morfologia da fibra do bagaço

Em sua composição, o bagaço da cana-de-açúcar possui uma grande quantidade de partículas de diversas formas, tamanhos e geometria, além de aglomerados dessas partículas, fisicamente diferentes. Esses “aglomerados” com formatos irregulares e de diferentes dimensões são determinados pela variabilidade de forma, pelas características de compactação e pela umidade presentes no bagaço.

Em suma ele é formado por fibras, em formato de bastonetes, e medula, de forma mais arredondada, onde contêm o caldo, conforme mostrado nas figuras 8, 9 e 10. Ambas são muito porosas, higroscópicas e com diversas granulometrias. Portanto, essa biomassa tem características que favorecem o processo de secagem, com baixa densidade 184 kg/m^3 , com umidade de 51%, porosidade de empilhamento de até

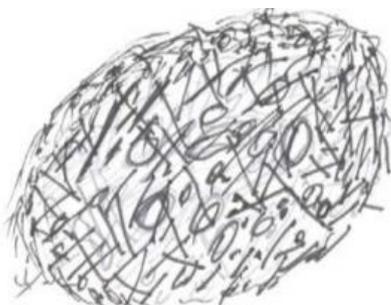
96,2% quando não compactado (OLIVEIRA, *et all*, 2002). É poroso também quando elemento isolado, o que o torna favorável à troca de calor do fluido contido em suas fibras com gases quentes passando entre e sobre elas.

Figura 6. Esquema das fibras em forma de bastonete e de partículas em forma arredondadas com diversas granulometrias.



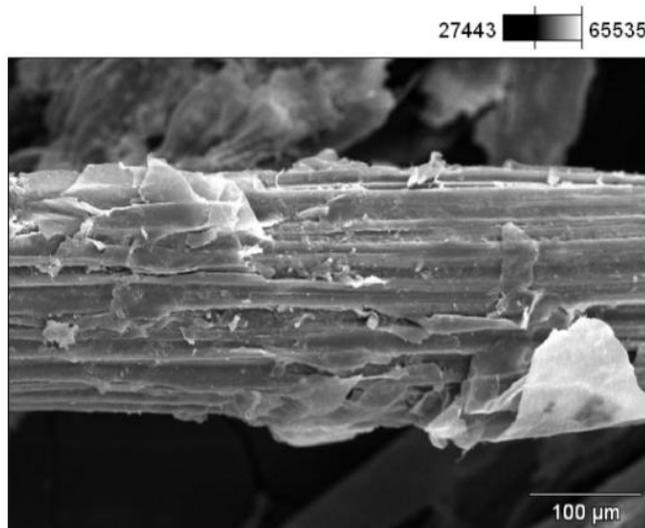
Fonte: LENÇO.2010

Figura 7. Esquema do aglomerado de bastonetes e medula com vários tamanhos.



Fonte: LENÇO. 2010

Figura 8. Detalhe da fibra do bagaço de cana-de-açúcar obtida pelo MEV, modelo JEOL JXA-840 A.



Fonte: LENÇO. 2010

2.2.2 Propriedades físicas e químicas do bagaço

No que se refere às propriedades físicas da matéria-prima, parâmetros como a fonte de onde ela se origina, o método para alimentação do suposto secador, o tamanho de grão da fibra e a abrasividade dos subprodutos devem ser considerados. Dentre esses fatores sabe-se que o bagaço é abrasivo e pode desgastar o material que compõe o secador, devido ao fluxo do material no processo de secagem. Quanto ao tamanho, quanto maior a superfície de contato, maior a extração de água. Já o método de alimentação, deve ser inicialmente manual, por operar em pequena escala para análise.

As propriedades químicas analisadas são a toxicidade do material, adversidades de odor, possibilidade de explosão, limites de temperatura e tempo de exposição, corrosividade, e os materiais mais apropriados para a construção do secador. A biomassa no entanto, não é um material tóxico, nem possui problemas com odor. Quanto aos limites de temperatura, devem ser baixos para que o material não se degrade e o tempo de exposição não deve ultrapassar o tempo em que o material sofra com conformação. Não possui caráter corrosivo e mesmo assim, o material mais apropriado para a construção do secador seria o aço inoxidável, por suas propriedades resistentes à corrosão e oxidação.

2.3 Energia renovável

A necessidade de sistemas de energia renováveis, sustentáveis, eficientes, econômicos e seguros estão cada vez mais atuantes no presente e estarão no futuro da economia mundial. A busca pela integralização e pelo uso dos recursos renováveis naturais que nosso país possui, podem contribuir significativamente para nossa independência, aumento da diversidade na matriz energética e redução das emissões de carbono, atrelando o investimento em tecnologia ao desenvolvimento da agroindústria e conseqüentemente ao setor comercial.

Os impactos negativos causados pelos combustíveis fósseis são notórios e diante disso, o Brasil vem buscando ao longo dos anos ampliar sua matriz energética, investindo em fontes renováveis de energia, que são obtidas a partir de recursos naturais que podem se regenerar. De acordo com o Ministério de Minas e Energia, em 2016 a participação dessas fontes na matriz brasileira foi de 43,5 %, considerando apenas a geração de energia elétrica.

Sabe-se que no setor elétrico brasileiro, a principal fonte usada é a hidráulica, que corresponde a cerca de 68% da nossa matriz. No entanto, as energias eólica, solar e a biomassa tem ganhado força e a última conta com uma participação importante, colaborando com 8,2% na oferta de energia elétrica.

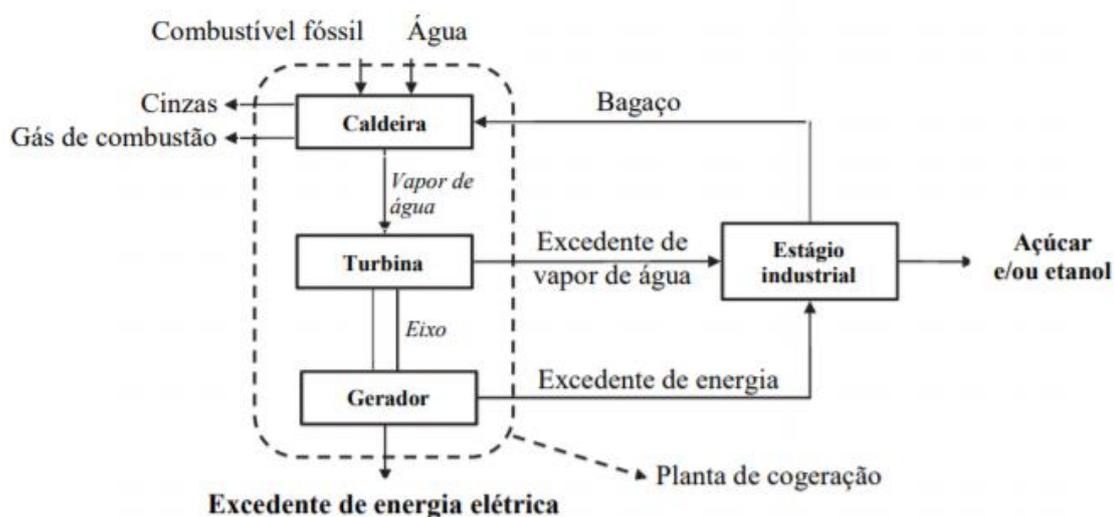
A biomassa é fonte de uma grande variedade de produtos químicos e materiais, e de eletricidade e combustíveis, tornando-se assim um fator importante e que ganha mais espaço a cada ano que passa, no cenário mundial. Processos como fabricação de papel e produtos florestais utilizam cerca de 60% da energia proveniente da combustão de biomassa. Isso mostra que a melhoria desses poderia acarretar na autossuficiência energética dessas indústrias sem muitas delongas. A biomassa lignocelulósica como por exemplo, o bagaço da cana, é a fonte mais representativa dentre os tipos existentes, e é utilizada para a produção de etanol e eletricidade.

Segundo Moraes e Shikida (2002), a geração de eletricidade é o principal aproveitamento do bagaço da cana-de-açúcar, que utiliza o resíduo como combustível, principalmente em pequenas termoelétricas montadas nas unidades sucroalcooleiras. O setor já possui certo domínio acerca da tecnologia de cogeração, devido às preocupações com a preservação ambiental e diminuição da emissão de gases-estufa.

Diante desse cenário tem-se que a cogeração - geração combinada de vapor e eletricidade - é um meio eficiente e econômico de gerar energia e reduzir a poluição. Pode resultar em economia de combustível primária de 35% para um sistema típico como resultado do aumento da eficiência de um sistema combinado, que pode chegar a 85%, em comparação à geração separada de vapor e energia. Apesar das vantagens óbvias da cogeração, continua a ser um potencial inexplorado na maioria dos países, incluindo a Índia que se impõe de forma muito forte no setor sucroalcooleiro. Um exemplo disso, é que a cogeração representa apenas 6% da produção total de eletricidade na União Européia.

O processo de cogeração de energia segue o ciclo de Rankine, em que os gases a alta temperatura de combustão acionam as turbinas produzindo eletricidade. Na figura 6, segue o resumo de como ocorre a cogeração nesse tipo de indústria, através de um layout geral. Segundo Silva (2014), para obter elevados níveis de potência líquida a partir do bagaço necessita-se de alta pressão e temperatura.

Figura 9. Esquema geral do processo de cogeração na indústria açucareira.



Fonte: ADAPTADO DE LOPES E SILVA ET AL. 2014.

O apontamento da indústria açucareira como um dos principais candidatos a fornecer energia não convencional de baixo custo por meio da cogeração é realidade, uma vez que suas vantagens incluem requisitos de custo de capital relativamente baixos e o uso de um resíduo renovável como combustível.

Com intuito de aumentar a oferta de energia elétrica através da combustão do bagaço, o setor açucareiro tem aumentado os investimentos, apesar de enfrentar

muitos obstáculos como o elevado investimento para conexão, transmissão e distribuição. O mais interessante é o fato de que a cogeração abre espaço para a comercialização de créditos de carbono, onde o Protocolo de Kyoto permite que empresas de países desenvolvidos troquem carbono, que foram produzidos em seus países, por investimentos em projetos que promovam a captura de gás carbônico em outros países, gerando assim uma nova fonte de receita para o país.

No Brasil, de forma prática para solução das dificuldades encontradas pelo setor, em 2003 foi instituído pela Lei 10.438, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA). O programa tem o suporte do BNDES para financiamento das instalações e compra de equipamentos e ainda a garantia de compra por parte da ELETROBRAS por um prazo de vinte anos. Com a garantia de venda e financiamento a custo mais acessível, muitas unidades produtoras de açúcar e etanol investiram no setor trazendo muitos benefícios para a indústria e para o país. A energia passou a ser mais um produto gerador de renda além do etanol e do açúcar para a indústria sucroalcooleira tornando-se necessária a maximização do aproveitamento da biomassa disponível através de equipamentos mais modernos. A primeira alternativa, porém, gera custos, geralmente com períodos longos de amortização, para os padrões e características desse tipo de indústria sujeito a sazonalidades e dependente do clima.

De acordo com dados divulgados pelo PDE 2023, há a previsão de contratação de cerca de 1,6 GW médios pelas usinas sucroalcooleiras até o final de 2018, podendo esse valor ser maior com a realização de futuros leilões de energia. O aumento da utilização do bagaço de cana-de-açúcar e a implementação de caldeiras de alta eficiência e produtividade, sugerem que este tipo de geração irá crescer ainda mais, juntamente com a necessidade de otimização de seus processos.

2.4 Processo de secagem

Entende-se por secagem a operação destinada à eliminação do líquido contido num sólido através de vaporização térmica para reduzir umidade. Esta vaporização ocorre em uma temperatura igual ou superior àquela de ebulição do líquido na pressão do sistema. Em qualquer situação tem-se o produto final como um sólido com alguma umidade.

O que distingue o processo de secagem dos processos de filtração e centrifugação, por exemplo, é o mecanismo de vaporização térmica para a remoção da umidade. Por isso a fase gasosa deve ser insaturada para que possa recebê-la como vapor. O sistema geralmente encontrado é de um sólido úmido exposto ao ar em uma dada umidade e temperatura, onde a umidade mais comum é o teor de água.

O estudo acerca da secagem e do cálculo das dimensões do equipamento para realizá-la leva em consideração problemáticas relacionadas à mecânica dos fluidos, à química das superfícies e à estrutura dos sólidos, além de problemas na velocidade de transferência. No que diz respeito à secagem de materiais como o bagaço da cana, retira-se uma parte do líquido do interior das fibras, onde a difusão através das fibras da parede fazem com que esta umidade migre para o ar seco.

Quanto à umidade de um sólido deve-se verificar se refere à base seca ou úmida. A negligência deste fato pode levar a se receber um produto ou matéria prima com mais água do que se supõe. A experiência mostra que mantendo-se constantes as condições do ar, o sistema evolui ao longo do tempo para uma condição de equilíbrio térmico com o sólido apresentando a denominada Umidade de Equilíbrio.

Portanto é evidente a importância de se definir no processo de secagem quais são os limites de umidade em que o material seca. Para saber se usará menos tempo do que outra que embora venha retirar a mesma quantidade de água ou que é mais viável.

Para o caso da matéria-prima estudada, tem-se inicialmente que o reuso dos gases quentes provenientes da combustão na fornalha e posterior recuperação deles no economizador das caldeiras, uma boa alternativa para redução do teor de água no processo requerido. Realiza-se a secagem à alta temperatura, já que o ar está aquecido a uma temperatura superior a 100°C. Para melhor obtenção de resultados pensou-se na efetuação do procedimento com equipamentos secadores em altas temperaturas, por ser mais rápida e independente das condições climáticas.

2.4.1 Secadores de bagaço de cana-de-açúcar - Tipos e características

Os principais componentes de um sistema de secagem são: a fonte de calor; o sistema de aquecimento; os dispositivos para movimentação do ar; a câmara de secagem e os dispositivos para controle da operação de secagem. Existem vários tipos de secadores, cuja escolha é determinada pela natureza do produto que vai ser

desidratado, pela forma que se deseja dar ao produto processado, pelo fator econômico e pelas condições de operações (STRUMILLO E KUDRA, 1986).

MUJUMDAR e MENOM (1995) citam três principais fatores para a classificação desse tipo de equipamento: Forma de fornecimento de energia térmica, Temperatura e pressão de operação e forma de alimentação do secador. Os principais tipos de secadores e seus respectivos produtos serão explicitados na tabela a seguir.

Tabela 1. Tipos de secadores e seus produtos.

Secadores	Produtos
Secador de tambor	Leite, suco vegetal e bananas (purê)
Secador contínuo a vácuo	Frutas e vegetais
Secador contínuo de correia (atmosférico)	Vegetais e grãos
Secadores de leito-fluidizado	Vegetais e grãos
Secadores estáticos	Grãos
Secadores tipo spray	Ovos, sangue albumina e leite
Secadores rotativos	Subprodutos da indústria de citrus
Secadores tipo cabine ou compartimentos	Frutas e vegetais
Secadores tipo túnel	Frutas e vegetais

Fonte: SANTOS.1997.

Com o objetivo de baixar a umidade do bagaço em cinco pontos percentuais, e paralelamente reduzir o consumo de água no lavador de gases, que atualmente cumpre a função de precipitar os resíduos sólidos e baixar a temperatura dos gases emitidos para a atmosfera, sem a utilização de fontes externas de calor, que não os gases de exaustão, e sem eliminar nenhum dos economizadores, foram feitas pesquisas sobre os diversos tipos de secadores já estudados e ou fabricados visando algum que se enquadrasse nessa proposta.

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, o secador consistia em uma caixa metálica medindo 1,2 x 1,8 x 6,0m de altura 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).

Kinoshita (1991) publicou trabalhos aplicados à secadores rotativos, que consistem de um tambor rotativo e inclinado no sentido da saída do produto utilizando gases de exaustão de caldeiras, sendo desenvolvidos no Havaí, e utilizou um secador com soprador de ar quente tipo flash complementado por um ciclone para separação do bagaço. Comparou o aumento na geração de energia com a utilização dos secadores de bagaço de cana-de-açúcar com a energia consumida na secagem e determinou relações de 2,7 a 3,7 para secadores rotativos contra 1,5 para secadores tipo flash, demonstrando ser mais interessante economicamente os secadores rotativos (ARNAO, 2007).

Correia (1983) descreve um secador pneumático que transporta os gases quentes juntamente com o bagaço e faz a separação em ciclones, esse trabalho foi realizado na Usina Santo Antonio em Alagoas - Brasil, onde foi reportado um aumento de % na geração de vapor através da redução da umidade do bagaço de 52% para 40%.

A redução da umidade através da secagem do bagaço apresenta muitas vantagens, como o aumento do poder calorífico, a diminuição da mistura bagaço/ar, reduzindo dessa forma os gases de exaustão. O calor específico do vapor de água é duas vezes o dos outros gases, e a redução do vapor de água nos gases de combustão resultam em maior temperatura de combustão e aumenta a eficiência das caldeiras (SOSA-ARNAO *et al*, 2004).

Secadores a vácuo, existentes em várias configurações, geralmente em bateladas, demandam longo tempo para secagem e necessitam de energia elétrica para acionamento da bomba.

Nos secadores de esteira perfurada, os gases quentes são soprados pela parte inferior da esteira, num processo contínuo e as partículas leves arrastadas pelos gases são separadas em um ciclone.

O tipo de secador construído em várias usinas de açúcar e etanol atualmente é o pneumático. Tem como vantagem o maior volume de material processado e grande capacidade de secagem, mas não se enquadra na presente proposta pelo seu consumo de energia para alimentar os sopradores, pela necessidade de muito espaço para sua instalação, custo do equipamento, custo inicial elevado e interrupção do fluxo dos gases nas passagens pelos economizadores para obter temperaturas mais

elevadas. Um destes secadores com capacidade para 28ton/h, pode reduzir a umidade do bagaço para até 32%, está representado na Figura 7.

Figura 10. Secador pneumático de bagaço instalado na CAIG.



Fonte: A autora.

2.4.2 Sistema experimental de secagem

Atualmente nas indústrias sucroalcooleiras, o fluxo comum durante o esmagamento e processamento da cana-de-açúcar é que o bagaço extraído passa pela embebição em água no último terno e segue diretamente para as caldeiras, proporcionando, através de sistemas de cogeração, energia elétrica, mecânica e térmica que são usadas posteriormente para obtenção dos produtos finais da indústria. De acordo com Kilicaslan (1999), cada tonelada de cana-de-açúcar esmagada produz cerca de 255 Kg de bagaço com uma umidade relativa de 50%.

Devido ao fato de que a matéria-prima estudada possui baixa densidade de resíduo a ser queimado e alta umidade, o processo de combustão direta nas fornalhas é bastante ineficiente. Analisando apenas a alta umidade desse subproduto, vê-se que ela pode tornar a ignição pobre e reduzir a temperatura de combustão, implicando numa reação incompleta e de pouca qualidade. Para solucionar esses problemas é necessário o investimento em tecnologias e pesquisas que visem a melhoria do processo de queima para geração de excedentes.

Uma opção para o aumento do potencial energético do bagaço é a realização de uma pré-secagem, uma vez que diminuindo sua porcentagem de água retida, apresenta um alto poder calorífico, reduz o volume dos gases de saída das caldeiras

e reduz o vapor de água nos gases de combustão, aumentando a temperatura de queima e conseqüentemente, a eficiência das caldeiras. Para efeito de comparação, segundo Paiva et al (1998), há um aumento de 27,7% de eficiência energética ao se alimentar a caldeira com bagaço a 20% de umidade, em relação ao uso dele a 50%.

No processo de secagem o calor pode ser cedido à fase sólida por uma fonte externa, um exaustor, por exemplo, ou por mecanismos de convecção, condução, radiação, ou ainda por uma combinação deles. A busca pelo melhor e maior desempenho termodinâmico nos sistemas de geração de vapor, passam pelo seu trabalho conjunto com um equipamento secador de bagaço.

Segundo Sosa-Arno (2004), o ganho de poder calorífico com a redução da umidade do bagaço por meio do uso de gases de exaustão provenientes de economizadores, mostra-se inicialmente vantajoso, se comparado a perda de gases que há nesses equipamentos periféricos. No entanto, se faz necessário uma análise criteriosa para determinar o real ganho, incluindo o custo de equipamentos, seu tempo de amortização, manutenção e vida útil.

Dentre as muitas vantagens trazidas pelos secadores de bagaço, os do tipo pneumático são os mais viáveis no que diz respeito aos pré-aquecedores das caldeiras que possuem temperatura em torno dos 180°C. De acordo com Souza (1998), a secagem é extremamente recomendável para usinas que não conseguem obter bagaço após extração no último terno, de forma sustentada, com umidade de 50% ou menor, apesar de serem produtoras de quantidades significativas dessa biomassa.

Contudo, atrelado a melhor escolha do tipo de secador de bagaço, tem-se de levar em consideração e analisar problemas como: dificuldade de previsão da curva de velocidade de secagem, a variação das condições de secagem ao longo do secador, a diferença entre a área da transferência térmica e a da transferência de massa, a configuração do escoamento do gás, o efeito das variáveis de operação e da escolha do equipamento relativamente às condições do produto seco. Além do fator econômico, questão de viabilidade dos custos de processamento.

Diante do que foi explicitado acima, se iniciou um estudo aprofundado acerca de um equipamento secador de bagaço composto por um transportador de correntes com chapas de arrasto montadas intercaladas, onde ele aproveitaria os gases quentes

provenientes da fornalha que seguiria para o economizador. Para atingir os objetivos desejados, foi necessário portanto do uso de ferramentas computacionais de simulação bem como a realização de experimentos em bancada.

2.4.3 Balanço de massa e energia

A obtenção dos balanços de massa e de energia do subproduto da cana-de-açúcar, necessita de uma visão ampla e geral sobre todos os componentes e processos do setor de geração de energia de uma usina, que vai desde sua combustão na fornalha até a saída dos gases oriundos dessa queima. Lembrando-se que ainda há as perdas térmicas e as relacionadas ao combustível que não são consideradas.

Nas usinas em geral, cerca de 85% da massa de bagaço inserida na fornalha tem dimensão inferior a 31,5 mm e injeta-se ar logo abaixo da injeção do bagaço, para que ele seja queimado também em suspensão. Identifica-se, portanto, a força de arrasto e a força da gravidade atuando sobre as partículas. A primeira calcula-se considerando a distribuição do tamanho das partículas de uma amostra, as quais são consideradas esféricas para simplificação. O coeficiente de arrasto então é calculado em função do número de Reynolds e da velocidade de escoamento do ar.

Para determinação da força gravitacional calcula-se a massa das esferas a partir da massa específica para as partículas de bagaço da cana. Na câmara de combustão realizou-se uma estimativa de tempo de permanência para cada faixa de tamanho de partícula, a partir da força resultante atuante sobre elas. Na combustão, existem partículas carregadas pelos gases e que caem no compartimento das cinzas antes da queima. Ambas são estabelecidas como perda de combustível.

Por fim, os cálculos da combustão basearam-se na composição básica do bagaço e no coeficiente de excesso de ar (λ). Os parâmetros de entrada para os balanços são a temperatura dos gases de combustão, que é definida pelo cálculo da temperatura adiabática de chama, a temperatura das cinzas na saída da fornalha e a temperatura dos gases do duto de exaustão, os quais saem da caldeira a 185°C precipitando os particulados no lavador de gases reduzindo a temperatura para, em média, 120°C.

Os objetivos principais dos balanços de massa são determinar inicialmente, a umidade relativa e absoluta do ar da exaustão, bem como a massa de ar resultante

da combustão e ar de alimentação e temperatura na saída do secador a ser projetado. Já os balanços de energia consideram as temperaturas dos gases de exaustão nas duas condições anteriores com a exaustão da caldeira direcionada para um secador de bagaço que será projetado para reduzir a umidade em uma média de cinco pontos percentuais.

3 METODOLOGIA

A fim de cumprir os objetivos deste trabalho, foi feita a caracterização do comportamento da matéria-prima em secagem e balanços de massa e energia em condições diferentes. Realizou-se também experimentos em escala de laboratório para obtenção dos principais parâmetros influenciadores na redução do percentual de água das amostras.

3.1 Secagem do bagaço

Ao considerar uma substância sólida úmida, sujeita a um gás, a uma temperatura e a uma umidade fixas, há a manifestação de um determinado tipo de comportamento. A amostra e o meio entram em contato, e a tendência é que a temperatura da biomassa se ajuste até atingir um regime constante, podendo variar para mais ou para menos, fatores como a temperatura e a velocidade de secagem.

Em virtude da falta de conformidade e sintonia entre os movimentos de calor e de massa, a concordância entre as temperaturas no interior do material sólido e do bulbo úmido do gás que tendem a se igualar, se tornam falhos. Apesar disso, existem momentos em que essas temperaturas são iguais, permanecendo estáveis e com taxa de secagem constante. Ao período determinado com essas características chama-se período a taxa constante, tendo seu término quando o sólido alcança o teor de umidade crítico.

Segundo Foust (1980), com base no comportamento durante a secagem, é possível dividir os materiais em duas classes principais: uma constituída por sólidos granulados ou cristalinos que retêm a umidade nos interstícios entre as partículas, ou em poros superficiais, rasos e abertos.

O bagaço da cana-de-açúcar inclui-se na segunda classe desses materiais, sendo composto por fibras, que retêm a umidade no interior delas e dos seus poros internos. O movimento da umidade se faz pela difusão do líquido através do sólido e se dá de forma relativamente lenta.

Analisando as curvas de secagem dos compostos estudados, vê-se períodos de taxa constante curtos, terminando em altos valores do teor crítico de umidade. Assim segue também o primeiro período de taxa de decrescimento reduzido, com predominância da maior parte da secagem durante o segundo período de decrescimento. Para o equilíbrio, altos teores de umidade encontrados, indicam que há uma grande quantidade de água intrínseca na estrutura do sólido e nos seus poros finos, reduzindo assim sua pressão de vapor.

Visto que a tendência das camadas superficiais é secar primeiro que o interior, a elevação da taxa de secagem nos possibilita estabelecer diferenças significativas no teor de umidade no interior da amostra. Por isso, deve-se escolher e determinar as condições de secagem levando em consideração principalmente a qualidade do produto.

3.2 Balanço de massa e energia

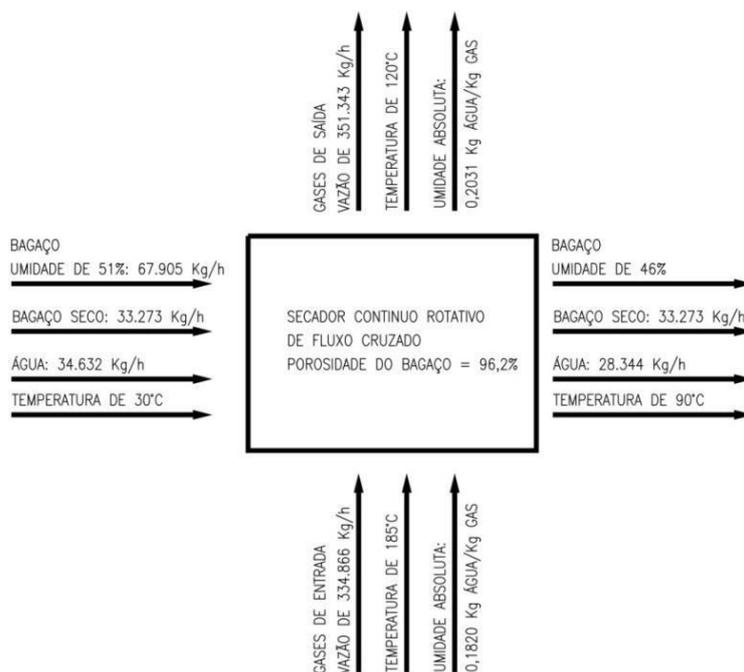
Os valores e dados de temperatura e pressão da água no ciclo de vapor de uma usina devem ser obtidos por meio de pesquisa de campo e estimados de acordo com a eficiência do processo estudado, de forma que o balanço termodinâmico alcançado seja coerente com os da literatura. Posteriormente, tendo em mãos todos os dados apresentados, calcula-se as perdas e eficiências do processo.

Em posterior análise, nas figuras 11 e 12, obteve-se o balanço de massa e energia explicitando o comportamento na condição prevista com alimentação de bagaço com a umidade reduzida de 51 para 46% através do uso do secador, tendo por base as condições atuais de funcionamento da caldeira estudada.

Esses dados serão comparados com os experimentos de bancada e simulações computacionais através de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) com os gases passando através de um meio poroso (bagaço de cana-de- açúcar).

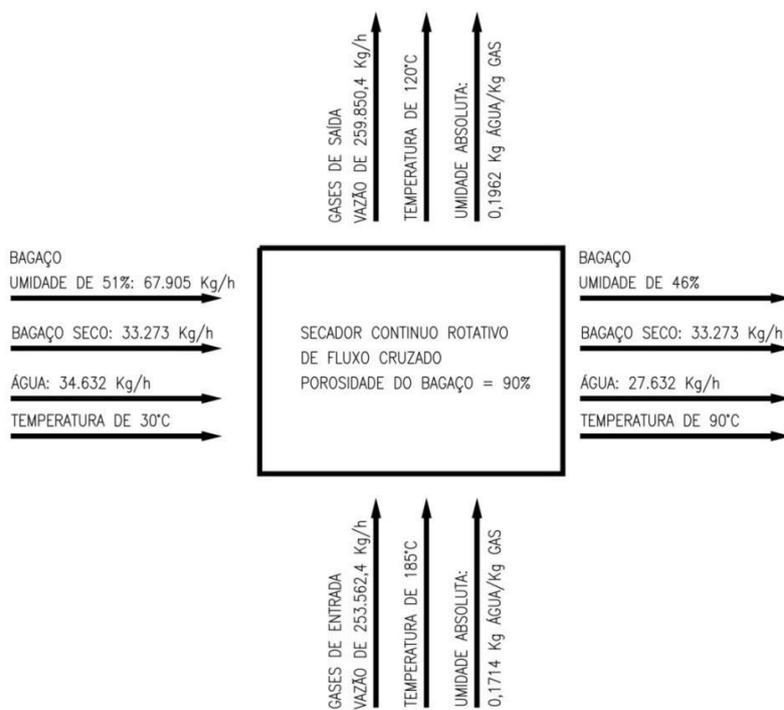
A condição atual de funcionamento, da caldeira, como descrita pelo fabricante, representado no fluxograma (Figura 13).

Figura 11. Balanço térmico e massa – condição atual.



Fonte: A autora.

Figura 12. Esquema do balanço de massa e energia da caldeira e secador do bagaço em 46% umidade.



Fonte: A autora.

Tabela 2. Balanço de massa e energia com caldeira queimando bagaço com 51% de umidade e secando bagaço de entrada no secador com 51% de umidade – Secador com previsão de redução de umidade em 5 pontos percentuais.

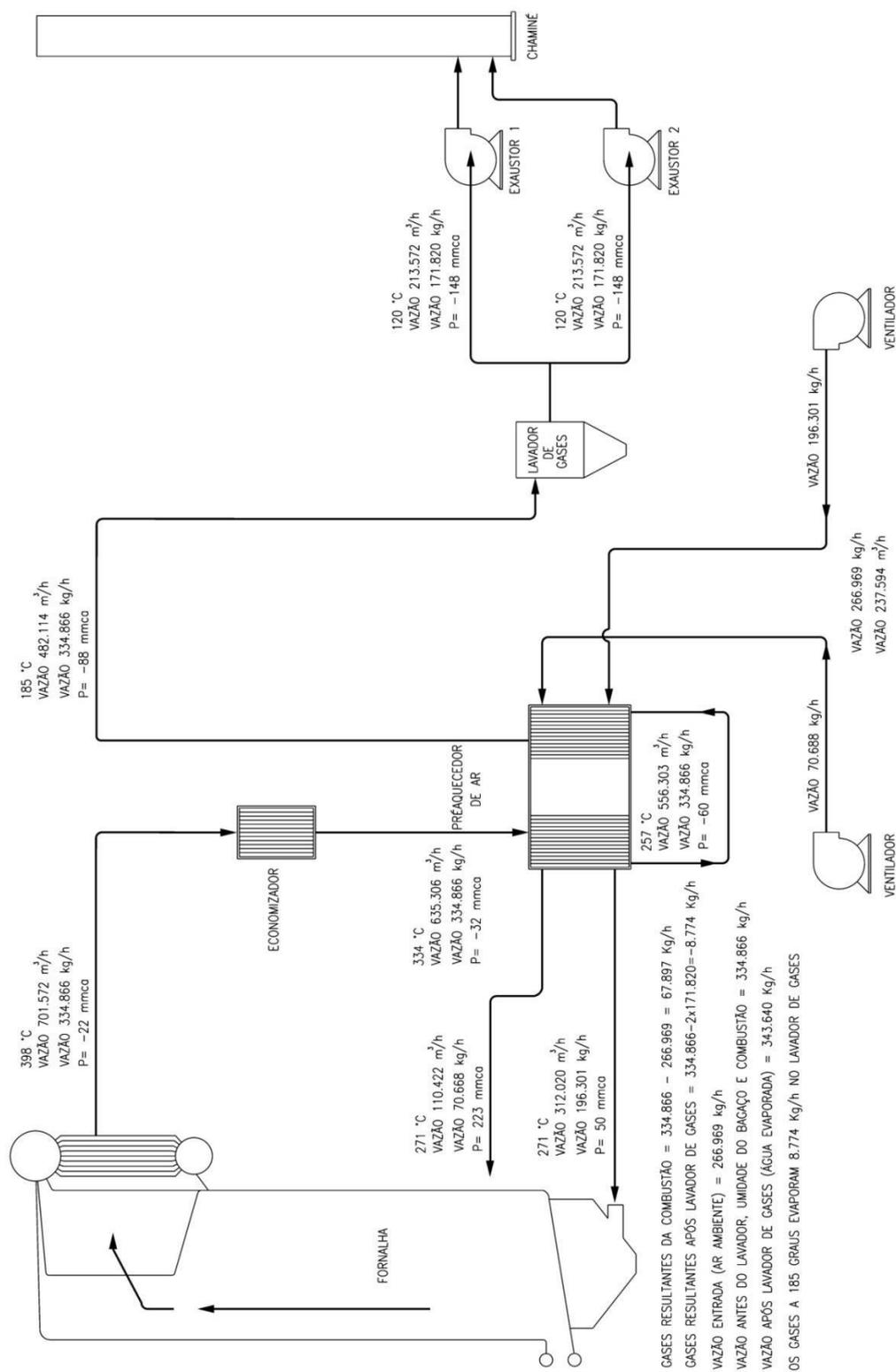
EXAUSTÃO DA CALDEIRA						GASES APÓS O SECADOR DE BAGAÇO		
UMIDADE DO BAGAÇO [%]	ENTRADA DE AR DE COMBUSTÃO [kg/h]	UMIDADE RELATIVA DO AR [%]	SAÍDA DOS GASES DE COMBUSTÃO kg/h	UMIDADE ABSOLUTA DO GAS kg/kg AR	TEMPERATURA DOS GASES DE EXAUSTÃO °C	UMIDADE ABSOLUTA DO AR Kg/kg	SAÍDA DOS GASES DE COMBUSTÃO kg/h	TEMPERATURA DOS GASES DE EXAUSTÃO °C
51	266.969	85	291.545	0,2051	185°C	0,2529	351.343	129°C

Tabela 3. Balanço de massa e energia com caldeira queimando bagaço com 46% de umidade e secando bagaço de entrada no secador com 51% de umidade – Secador com previsão de redução de umidade em 5 pontos percentuais.

EXAUSTÃO DA CALDEIRA						GASES APÓS O SECADOR DE BAGAÇO		
UMIDADE DO BAGAÇO [%]	ENTRADA DE AR DE COMBUSTÃO [kg/h]	UMIDADE RELATIVA DO AR [%]	SAÍDA DOS GASES DE COMBUSTÃO [kg/h]	UMIDADE ABSOLUTA DO AR [kg/kg ar]	TEMPERATURA DOS GASES DE EXAUSTÃO [°C]	UMIDADE ABSOLUTA DO AR [kg/kg ar]	SAÍDA DOS GASES DE COMBUSTÃO [kg/h]	TEMPERATURA DOS GASES DE EXAUSTÃO [°C]
46	238.608	85	267.655	0,1714	185	0,1949	319.820	124

Fonte: A autora.

Figura 13. Fluxograma atual da caldeira com bagaço com 51% de umidade.



Fonte: Manual do fabricante.

3.3 Teor de umidade

Determinar o teor de umidade do bagaço está intrínseco a toda análise e estudo realizado para a implantação de um secador de bagaço. Para determinação desse teor, deve-se realizar um ensaio que tem como objetivo determinar a porcentagem de água presente na amostra do bagaço. A umidade corresponde ao peso da água na amostra e é notada através da perda de peso quando a biomassa é exposta a uma temperatura em que a água se evapora. A equação abaixo expressa como pode-se obter o valor do teor de umidade (Tu):

$$Tu_i = \frac{M_1 - M_2}{M_1} * 100 \quad (1)$$

Onde, M1 é a massa do bagaço úmido (g) e M2 é massa do bagaço seco (g).

3.4 Pol

Definida como a porcentagem de massa de sacarose aparente (POL), contida em uma solução açucarada de peso normal, determinada pela propriedade do açúcar de desviar a luz polarizada, a POL têm influência direta na perda de energia do bagaço, já que esse fator corresponde a cerca de 3% da energia total disponível. Determinou-se portanto, tal parâmetro, através de testes e experimentos realizados no laboratório de Sacarose da Usina JB.

Figura 15. Prensa de extração do caldo.



Fonte: A autora.

Figura 14. Bolo úmido.



Fonte: A autora.

- A POL média das amostras de bagaço provenientes da saída das moendas, após trituração, lavagem e prensagem foi de 2,3.

O percentual de bagaço por unidade de massa da cana sem palha e a POL, após trituração, lavagem e prensagem nas moendas, são fatores essenciais para a determinação do poder calorífico e disponibilidade do combustível para produção de vapor e posterior geração de energia. Por isso os procedimentos descritos abaixo são de importância fundamental para o progresso do presente trabalho.

Figura 16. Mufla Marconi com cesto de tela mesh 200.



Fonte: A autora.

No laboratório, são determinados a POL e a umidade do bagaço após a extração da sacarose nas moendas. Para determinação da umidade, são colocadas amostras de 100g de bagaço úmido na estufa, que funciona com gases quentes soprados na parte inferior a 105°C passando pelo cesto de tela mesh 200, que contem o bagaço, por trinta minutos, pesada e mais uma vez colocada na estufa por mais cinco minutos, pesada mais uma vez e repetido até que não ocorra variação significativa de peso. A umidade é dada pela diferença de peso entre o bagaço úmido e após secagem.

A POL juntamente com a umidade é determinante para o poder calorífico do bagaço. As equações descritas a seguir consideram a redução do poder calorífico em função da umidade e da POL, portanto, esses valores são os mais indicadas para o presente trabalho. As equações 2 e 3 representam a redução do poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI), respectivamente.

3.5 Poder calorífico

Segundo Silva e Morais (2008), 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, que é em base seca, não levando em consideração o calor associado à condensação da água formada na reação com o hidrogênio, e Poder Calorífico Inferior – PCI, que é calculado subtraindo o PCS do calor associado com a condensação do vapor de água formado pela reação do hidrogênio, além do Poder Calorífico Útil – PCU. Em relação ao último, é o que mais se aproxima da realidade, por levar em conta um dado teor de umidade e principalmente, porque na maioria dos sistemas de geração de energia com biomassa, não se consegue secar o material abaixo de 10% de umidade.

A norma brasileira NBR 8633/1984 nos possibilita medir o valor do poder calorífico superior através da prescrição do método para a determinação do valor calorífico de carvão em volume constante, como parâmetro. A fim de determinar esta propriedade, geralmente, pega-se uma amostra de grânulos esmagados e em seguida secados num forno a 100 ° C. Depois de arrefecida, o valor calorífico (MJ/kg) pode ser medido utilizando um calorímetro.

3.5.1 Combustão do bagaço

Para os cálculos da combustão do bagaço utilizaremos os dados da Tabela 4, composição do bagaço seco e Tabela 5, composição média do ar e a POL média da usina igual a 2,3.

Tabela 4. Composição do bagaço seco.

Componente	percentual (%)	Valor adotado (%)
Carbono	39,7 - 49,0	47,0
Hidrogênio	5,5 - 7,4	6,5
Oxigênio	40,0 - 46,0	44,0
Cinzas	2,5	2,5

Fonte: SugarSoft – Sugar Technology. 2008.

Tabela 5. Composição do ar.

Componente	Quantidade percentual (%)
Nitrogênio	78,00
Oxigênio	21,00
Argônio	0,93
Dióxido de carbono	0,03
Outros elementos	0,07

Fonte: SugarSoft – Sugar Technology. 2008.

Os valores do poder calorífico do bagaço são determinados em função da umidade e podem também ser determinados em função da umidade mais o açúcar residual presente no bagaço após a prensagem nas moendas (POL) e pela umidade resultante da combustão do hidrogênio presente no bagaço.

As Equações 2 e 3 consideram o teor de sacarose e a umidade do bagaço, As Equações 4 e 5 utilizam o PCS do bagaço seco obtido no calorímetro como base para os cálculos do PCS e PCI mais a água resultante da combustão do hidrogênio presente na massa de bagaço seco, a Equação 6 considera além da água resultante da combustão do hidrogênio a água contida no bagaço úmido.

$$PCS = 4.600 - 12s - 46w \left[\frac{kcal}{kg} \right] \quad (2)$$

$$PCI = 4.250 - 12s - 48,5w \left[\frac{kcal}{kg} \right] \quad (3)$$

$s \rightarrow$ teor residual de Sacarose [%]

$w \rightarrow$ umidade do bagaço [%]

Resultados na Tabela 8 do anexo A.

$PCS = 19.260 \text{ kJ/kg}$. ; poder calorífico superior do bagaço seco

$$PCS = 19.260(1 - w) \left[\frac{kJ}{kg} \right]; \text{ poder calorífico superior do bagaço úmido} \quad (4)$$

Resultados na Tabela 9 do anexo A.

$$PCI = PCS - 2.512E \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (5)$$

$$E = 9H(1 - w) + w ,$$

$$PCI = 19.260(1 - w) - 2.512 * 9H(1 - w) \quad (6)$$

H → percentual de hidrogênio presente na massa seca do bagaço.

Resultados na Tabela 10 do anexo A.

Combustão do hidrogênio e carbono presentes no bagaço

A determinação da combustão dos principais elementos que compõem o bagaço tem por finalidade quantificar os gases de exaustão para aplicação no projeto do secador. Os dados de composição e os valores adotados para os cálculos encontram-se na Tabela 1.

Combustão do hidrogênio



$$E = 9 * H \quad (8)$$

A água formada na combustão do bagaço seco é nove vezes a massa de hidrogênio presente no bagaço.

Combustão do hidrogênio contido no consumo nominal de bagaço na caldeira

$$C_H = 67.905 * \left[1 - \left(\frac{51}{100} \right) \right] * 0,065 * 141.800 = 306,7 \text{ MJ} \quad (9)$$

Combustão do carbono



Combustão do carbono contido no consumo nominal de bagaço na caldeira

$$C_c = 67.905 * \left[1 - \left(\frac{51}{100}\right)\right] * 0,47 * 33.900 = 530,1 \text{ MJ} \quad (11)$$

Combustão de bagaço úmido com excesso de ar

Não é possível queimar o bagaço com alta umidade em condições industriais somente com a quantidade de ar calculado. Para minimizar a quantidade de carbono não queimado, usamos excesso de ar.

Bagaço queimando sob condições de fornalha

Condição 1: Bagaço úmido.

Condição 2: Com excesso de ar

w → umidade absoluta do bagaço, $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{bagaço}}$;

m → relação ar utilizado em relação ao ar teoricamente necessário;

P_a → massa de ar por unidade de massa do bagaço;

V_a → Volume de ar por unidade de massa do bagaço;

P_g → massa de gases de combustão

V_g → volume de gases de combustão;

P_{gs} → massa de gases considerados secos;

V_{gs} → volume de gases considerados secos;

Consideramos todos os volumes a 0°C e pressão atmosférica.

$$P_a = 5,75(1 - w)m \quad (12)$$

Os produtos de combustão consistem de uma mistura de bagaço e o ar de combustão.

$$P_g = [5,75(1 - w)m] + 1 \quad (13)$$

A quantidade de gás seco pode ser encontrada reduzindo de P_g a água formada pela combustão do hidrogênio e a água presente no bagaço.

$$P_{gs} = P_g - 9H(1 - w) + w = 5,75(1 - w)m + 1 - 9 * 0,065(1 - w) + w \quad (14)$$

$$P_{gs} = (1 - w)(5,75m + 0,415), \quad (15)$$

do mesmo modo:

$$V_a = 4,46(1 - w)m \quad (16)$$

$$V_g = 4,46(1 - w)m + 0,572w + 0,672 \quad (17)$$

$$V_{gs} = 4,46(1 - w)m - 0,056 \quad (18)$$

Para obter volume a $t^\circ\text{C}$:

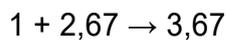
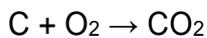
$$VT = V_o \left[273 + \left(\frac{t}{273} \right) \right], \quad \text{volume a } t^\circ\text{C e } V_o \text{ o volume a } 0^\circ\text{C} \quad (19)$$

- Composição dos gases da chaminé

A massa dos gases da chaminé é dada por:

$$P_g = 5,75(1 - w)m + 1 \quad (20)$$

- Cálculo da quantidade individual dos gases:



A massa de CO_2

$$0,47 * 2,67 * \left[1 - \left(\frac{51}{100} \right) \right] = 1,2549 * \left[1 - \left(\frac{51}{100} \right) \right] \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}_{\text{bagaço}}} \right] = 0,6149 \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}_{\text{bagaço}}} \right] \quad (21)$$

a massa de CO_2 para o bagaço seco é de $0,6149 * 33.273 \text{ kg/h} = 20.460 \text{ kg/h}$

A temperatura da fornalha é influenciada pela umidade do bagaço, quantidade de excesso de ar, quanto maior o excesso menor a temperatura da fornalha, tipo de fornalha, sistema de alimentação de bagaço e sistema de exaustão, varia de aproximadamente 900°C a 1.200°C com excesso de ar de 30% a 100% e a umidade do bagaço variando de 40% a 56% (MAGASINER, 1987).

3.6 Impacto na redução do percentual de água

Assim como todo tipo de indústria, a sucroalcooleira, comprova os ganhos e a viabilidade de qualquer investimento em termos de eficiência resultantes. No entanto, são poucos os estudos realizados para avaliar os efeitos da redução da umidade com consequente aumento do poder calorífico do bagaço de cana-de-açúcar e aumento da temperatura da fornalha, originalmente projetada para trabalhar com bagaço a 50% de umidade.

A base para estudo desses efeitos das alterações causadas pela redução de umidade do bagaço foi a caldeira a vapor de propriedade da Lonrho Sugar Corporation Limited's, Britannia Mills em Mauritius, inicialmente projetada para ser alimentada com bagaço a 50% de umidade. O intuito desses estudos foi obter uma visão geral do funcionamento da caldeira com a queima de bagaço com umidade inferior a de projeto e concluiu-se posteriormente que a secagem ocorre com maior velocidade em bagaço com umidade de 56% do que com 47%, que é a menor umidade obtida após prensagem nas moendas, e 56% a maior. (MAGASINER, 1987)

Resultados dos estudos realizados por Sosa-Arno e Nebra (2014) sobre o dimensionamento de sistemas ótimos de geração de energia, as condições mais eficientes da caldeira e dispositivos periféricos (aquecedores de ar, economizadores e secador) envolvem a temperatura de entrada de ar no secador a 215°C e redução de umidade de 50 para 34,5% (b.u.).

A utilização de gases quentes na caldeira tendem a elevar a eficiência da mesma, porém deve-se atentar para as características que estão dominando o desempenho desse equipamento. Um dos parâmetros críticos para os fabricantes é o comportamento dos gases de exaustão, que com a combustão do bagaço seco, abaixo dos 47% de umidade, eleva a temperatura dos mesmos podendo ocasionar na formação de escória e incrustações nas superfícies quentes das paredes d'água da caldeira.

Até a umidade de 45% existe a possibilidade de formação de escória e incrustações além do normal, mas, abaixo dessa umidade é provável e de forma severa (MAGASINER,1984). Em paralelo a essas consequências, deve-se considerar que esse aumento de temperatura em função da redução da umidade, não só a caldeira ficará trabalhando fora de suas especificações com redução de sua vida útil e riscos de acidentes, como também deverá haver um controle rigoroso da temperatura do vapor gerado por extrapolar as especificações da temperatura máxima do vapor para operação das turbinas.

Diante de tudo que foi citado anteriormente, esses dados finais obtidos em sucessivos estudos apresentados e de todo conhecimento adquirido ao longo desta monografia, tem-se que secadores de bagaço são opções funcionais e economicamente viáveis que permitem melhorar de forma efetiva a eficiência das caldeiras.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo obteve-se a caracterização e o comportamento em experimentos, além de suas posteriores análises.

4.1 Resultados dos experimentos e medições

Através de experimentos realizados em bancada e simulações em CFD, obteve-se os resultados a seguir.

4.1.1 Em laboratório

- O percentual de bagaço seco por unidade de cana, aferido no Laboratório de Sacarose, é em média 27,82%, após prensado e seco em estufa.
- A densidade média do bagaço com 51% de umidade é de 184 kg/m³.
- A POL média resultante de 2,3.
- De acordo com as simulações com a caixa metálica demonstraram que o espaço vazio deixado para preenchimento de gás formando um ambiente com temperatura e pressão uniforme para fluir em toda a superfície do colchão é inviável devido à alta porosidade do bagaço que permite a passagem dos gases com baixíssima dispersão do fluxo de gases, também devido à dispersão do fluido líquido, a rápida evaporação pela concentração do fluxo de ar em uma região limitada e a baixa condutividade

térmica do bagaço a diferença de temperatura entre as faces da camada de bagaço varia entre apenas 6°C e 10°C.

4.2 Experimentos de secagem

Com o objetivo principal de aproveitar da melhor forma possível os gases de exaustão, os resultados dos experimentos realizados são fundamentais na definição e desenvolvimento do secador a ser projetado. Através das análises desses modelos podemos avaliar parâmetros como o fluxo do ar, gradiente de temperatura e pressão, importantíssimos para tomadas de decisão ou obter indicativos das melhores soluções a adotar. Para os experimentos em bancada, foi utilizado um soprador térmico com seletor para vazão de 0,1368m³/min e com a temperatura do ar de 120°C adotando a umidade inicial da biomassa como 50%. Como também foram utilizadas amostras de 100 g de bagaço com umidades iniciais encontradas no dia-a-dia da moagem, numa estufa, que funciona com gases quentes soprados a 105°C, para determinação da umidade final e posterior comparação.

Tabela 6. Redução da umidade do bagaço de cana-de-açúcar por secagem por ar quente, vazão de 0,1368m³/min a 120°C.

TEMPO [min]	PESO APÓS SECAGEM [g]	REDUÇÃO DO PESO [g]	UMIDADE FINAL BAGAÇO [%]
1	174	26	43,67
2	154	46	36,36
3	138	62	28,98

Fonte: A autora.

Tabela 7. 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	48,6	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: A autora.

Verificando os dados obtidos nas tabelas acima, 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.

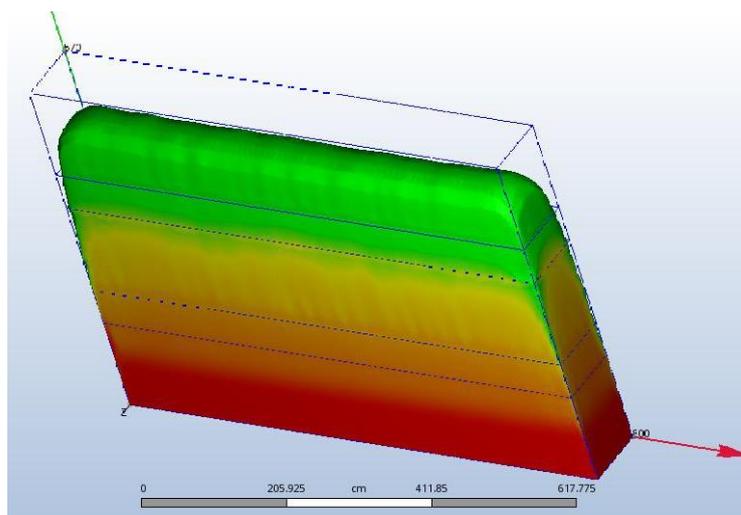
4.3 Simulações

Simulações realizadas com utilização de programa de CFD

A baixa dispersão dos gases determina que a área de troca de calor no secador a ser projetado deve ser a mesma seção do colchão de bagaço, devido a impossibilidade da existência de uma câmara que acumulasse os gases e os dispersasse de forma uniforme em toda a área do secador.

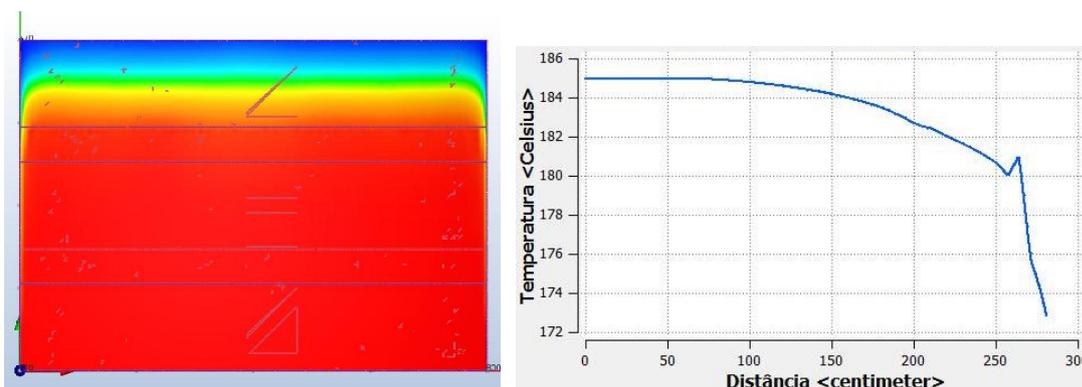
Simulou-se portanto, um secador posicionado no duto de exaustão da caldeira, considerando um trecho livre com 1,50m de comprimento antes e depois dos colchões de bagaço e entre os dois colchões de 0,30m, um espaço vazio de 0,80m. O secador tem a mesma seção do duto da caldeira, 1,00x8,00m. A vazão adotada para os gases de exaustão foi de 480.000 m³/h, temperatura variando entre 169 e 185°C, velocidade dos gases na passagem pelo secador de 17,50m/s, temperatura de entrada de 30°C e pressão 0 bar no topo do duto. (Figuras 17, 18 e 19)

Figura 17. Modelo esquemático do secador com dois colchões de bagaço.



Fonte: A autora.

Figura 18. Linearização da temperatura entre a base do colchão inferior e o topo do colchão superior mostrando a diferença de temperatura.

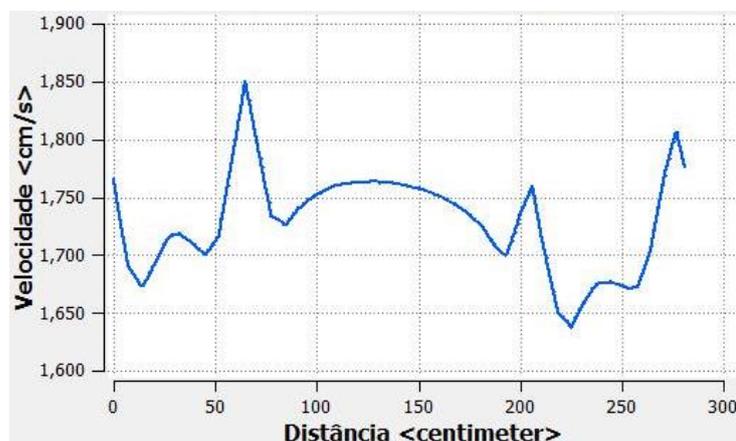


Fonte: A autora.

Buscou-se uma configuração ideal de simulação, onde a malha foi refinada para 7.5 de tamanho, 0.004s de tamanho do time step, 0.4 s de tempo de parada e número de iterações de 10, para que se aproximasse comportamento esperado numa passagem completa dos gases ao longo do duto. Durante o percurso, o bagaço é submetido ao fluxo de ar quente por um período, que pode ser variável, de dois minutos, no caso um minuto para cada passagem. Como 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. Para ambas travessias do colchão de bagaço viu-se que a velocidade apresentou picos de aumento, enquanto a temperatura após as passagens caiu para

181°C e depois subiu um pouco indicando a troca térmica com a temperatura ambiente presente no topo do duto.

Figura 19. Linearização da velocidade entre a base do colchão inferior e o topo do colchão superior mostrando a diferença de velocidade.



Fonte: A autora.

Os modelos construídos para a simulação do duto tinham como região de secagem uma camada de bagaço com porosidade de 70%, formato retangular, 8,00 x 1,00m, equivalente à área interna do duto e duas camadas de 0,30m de espessura com volume de 4,80m³ equivalente a massa de bagaço com umidade de 51% de 883kg, situado no alinhamento do duto de entrada do lavador de gases esse valor foi definido para que a vazão do secador fosse de 67.905kg/h correspondente ao consumo atual da caldeira.

A caldeira da unidade produtora onde foram efetuados os estudos, tem capacidade para 150ton/h de vapor a uma pressão de 63kgf/cm² e 485°C. A temperatura média da fornalha é de 910°C e são frequentes as intervenções do dessuper para reduzir a temperatura do vapor na saída do superaquecedor que ultrapassa a temperatura e pressão recomendadas pelos fabricantes das turbinas. O aumento do rendimento na produção de vapor e de sua qualidade para posterior geração de eletricidade na unidade termoelétrica está diretamente relacionado à redução do teor de umidade da biomassa.

Portanto, a análise da viabilidade econômica e energética da queima de bagaço da cana-de-açúcar em caldeiras de alta pressão, constata que ele não pode ter sua umidade inferior a 47%, para que não diminua muito a massa de bagaço em detrimento do aumento do poder calorífico, não acumule resíduos no grelhado, nas

superfícies de aquecimento, além de forçar a caldeira a operar fora das especificações de projeto.

5 CONCLUSÃO

Com o intuito de aumentar a eficiência energética, melhorar a qualidade do vapor e reduzir as emissões de CO₂, a secagem da biomassa para a diminuição do teor de umidade tornou-se um fator importantíssimo no desenvolvimento de sistemas de energia alternativa.

Considerando o bagaço de cana-de-açúcar como combustível para uma caldeira de alta pressão, tem-se que sua eficiência energética pode ser aumentada de forma significativa com o uso dele seco ao invés de úmido. Uma vez que o efeito da umidade da biomassa pode ser considerado como o mais importante dentre todas as variáveis que afetam o sistema de geração de vapor.

A instalação de secadores de bagaço utilizando gases de exaustão podem contornar o problema gerado pelos altos índices de água presentes no material. Assumindo que o resíduo da cana sairia do último terno de moenda com 51% de umidade, independente do volume anual de matéria-prima triturado pela usina, foi constatado no presente trabalho, após desidratação, que a eficiência de geração de energia, na condição de operar com o bagaço com 47%, aumenta em 8,8% em relação ao bagaço com 51%.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Fernando Medeiros. **Processo de fabricação do açúcar**. 2. ed. Recife: UFPE, 2009.

ARRASCAETA, A., FRIEDMAN, P. Bagasse drying: past, present and future. **International Sugar Journal**, v.86, n.1021, p.3-6, 1984

CALTAROSSO, Fábio. **Análise de tensões em equipamentos de moagem da cana-de-açúcar usando o método dos elementos finitos**. 204 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

CORREIA, L. E. M. **Bagasse drying**. Seminário de Avaliação do Bagaço – São Paulo Sopral – Sociedade de Produtores de Açúcar e Álcool, pp. 1-15, 1983

COSTA, T. H. F. **Avaliação da recalcitrância de diferentes regiões oriundas de entrenós de cana-de-açúcar em híbridos com teores variados de lignina**. Lorena, 2011.

ENSINAS, Adriano V.; Sosa ARNAO, Juan Harold; NEBRA, Silvia Azucena. **Increasing energetic efficiency in sugar, ethanol, and electricity producing plants**. 2014.

FERREIRA; ROCHA; SILVA. **Potencialidades e oportunidades na química da sacarose e outros açúcares**. 2009.

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.

GOMES, Elizabete Fernandes; PASQUALETTO Antônio. **O bagaço da cana-de-açúcar como fonte de créditos de carbono: o caso da usina Jalles S/A**. Goianésia, GO. 2005.

KILICASLAN, I. et al. Sugar cane as an alternative energy source for Turkey. **Energy conversion and management**, England, v. 40, n. 1, p. 1-11, Jan. 1999.

LENÇO, Paulo. **Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar para geração de energia**. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2010.

LOPES Silva, D. A.; DELAI, I.; DELGADO Montes, M. L.; OMETTO, A. R. Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil. **Renewable and sustainable energy reviews**, Amsterdam, v. 32, p. 532-547, 2014.

MAGASINER, N.; NAUDÉ D. P.; MCINTYRE, P. J. **Operating experience on single and three pass boilers in the cane sugar industry with particular reference to erosion and drum water level stability**. John Thompson Africa Limited, Bellville, Cape. 1984.

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.

MORAES, Márcia Azanha Ferraz Dias; SHIKIDA, Pery Francisco Assis (Org.). **Agroindústria canavieira no Brasil: evolução, desenvolvimento e desafios**. São Paulo, SP: Atlas, 2002.

MUJUMDAR, A. S. Drying fundamentals. In: BAKER, C.G.J. **Industrial drying of foods**, London, Blackie, 1997.p.7-30.

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

NASCIMENTO, Roberto do. **Cana pode gerar energia de uma Itaipu em 5 anos**. 19 nov. 2007. Disponível em: <<http://www.cl.terra.com/tecnologia/interna/0,,OI2085166-EI8938,00.html>> Acesso em: 04 maio, 2008.

NETAFIM – Disponível em:
http://www.sugarcane crops.com/p/growth_morphology/stalk/. Acesso em: 17 maio, 2012.

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.

PAIVA, S. M. E.; NEBRA, S. A.; GALLO, W. L. R. Análise energética comparativa de sistemas de recuperação de energia dos gases efluentes de caldeiras de bagaço de cana. In; Brazilian Congress of Engineering and Thermal Sciences, 7., 1998, Rio de Janeiro. **Anais** [...] Rio de Janeiro: ABCM, 1998. P. 347-352.

SANTOS, V. M. DA SILVA. **Simulação e otimização de secagem de frutas em secador tipo túnel concorrente**. 1997, 114p. Tese (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG.

SILVA e MORAIS. **Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação**. ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Rio de Janeiro. 2008.

SILVA, GARCIA E SILVA. O destino do bagaço da cana-de-açúcar: um estudo a partir das agroindústrias sucroalcooleiras do Paraná. **Revista em agronegócios e meio ambiente**, v.3, n.1, p. 59-76. 2010.

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.; NEBRA, S. A. Bagasse dryer role in the energy recovery of water tube boilers. **Drying Technology, Philadelphia**, v, 27, n. 4, p. 587-594, 2009.

Sosa-ARNAO, J. H. **Caldeiras aquatubulares de bagaço**: estudo do sistema de recuperação de energia. 2008. 232p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2008.

SugarSoft – Sugar Technology, empresa de consultoria para usinas de açúcar e álcool
– Disponível em: <http://www.sugarsoft.com.br/?id=5¬=505&op=todas>. 2008.

STRUMILLO, C.; Kudra, T. **Drying**: principles, applications and design. Switzerland:
Gordon and Breach Science Publishers, 1986. 448p.

ANEXOS

ANEXO A - PODER CALORÍFICO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇUCAR

Tabela 8. Poder calorífico do bagaço em função da umidade.

UMIDADE [%]	PCS [kcal/kg]	PCI [kcal/kg]	UMIDADE [%]	PCS [kcal/kg]	PCI [kcal/kg]
32	3.080	2.650	33	3.034	2.601
34	2.998	2.553	35	2.942	2.494
36	2.896	2.456	37	2.850	2.407
38	2.804	2.359	39	2.758	2.310
40	2.712	2.262	41	2.666	2.213
42	2.620	2.165	43	5.574	2.116
44	2.528	2.068	45	2.482	2.019
46	2.436	1.971	47	2.390	1.922
48	2.344	1.874	49	2.298	1.825
50	2.252	1.777	51	2.206	1.728

Fonte: Compilada do livro de Émile Hugor, 1977

Tabela 9. Poder calorífico em função da umidade e percentual de hidrogênio.

UMIDADE [%]	PCS [kJ/kg]	PCI [kJ/kg]	UMIDADE [%]	PCS [kJ/kg]	PCI [kJ/kg]
32	13.096	12.097	33	12.904	11.919
34	12.711	11.741	35	12.519	11.563
36	12.326	11.385	37	12.133	11.208
38	11.941	11.030	39	11.748	10.852
40	11.556	10.674	41	11.363	10.496
42	11.170	10.318	43	10.978	10.140
44	10.785	9.962	45	10.593	9.784
46	10.400	9.606	47	10.207	9.428
48	10.015	9.251	49	9.822	9.073
50	9.630	8.895	51	9.437	8.717

Fonte: A autora.

Tabela 10. Poder calorífico em função da umidade e da POL.

UMIDADE [%]	PCS [kcal/kg]	PCI [kcal/kg]	UMIDADE [%]	PCS [kcal/kg]	PCI [kcal/kg]
32	3.100	2.670	33	3.054	2.621
34	3.008	2.573	35	2.962	2.524
36	2.916	2.476	37	2.870	2.427
38	2.824	2.379	39	2.778	2.330
40	2.732	2.282	41	2.686	2.233
42	2.640	2.185	43	2.594	2.136
44	2.548	2.088	45	2.502	2.039
46	2.456	1.991	47	2.410	1.942
48	2.364	1.894	49	2.318	1.845
50	2.272	1.797	51	2.226	1.748

Fonte: A autora.