



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

Ana Carolina de Mello Santos e Silva

**Estudo da influência da umidade do bagaço da cana de açúcar na
produção de energia em plantas de cogeração**

Recife

2018

Ana Carolina de Mello Santos e Silva

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA UMIDADE DO BAGAÇO DA CANA DE
AÇÚCAR NA PRODUÇÃO DE ENERGIA EM PLANTAS DE
COGERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Mecânica, pela
Universidade Federal de Pernambuco.

Orientador: Profº. Dr. Francisco Espedito de
Lima

Recife

2018

Catalogação na fonte

Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

S586e Silva, Ana Carolina de Mello Santos e.

Estudo da influência da umidade do bagaço da cana de açúcar na produção de energia em plantas de cogeração / Ana Carolina de Mello Santos e Silva - 2018.

59 folhas, il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Espedito de Lima.

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

Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Cana-de-açúcar. 3. Produção de energia. 4. Co-geração. 5. Modelagem. 6. Secador de cana de açúcar. 7. CFD. I. Lima, Francisco Espedito de (Orientador). II. Título.

ANA CAROLINA DE MELLO SANTOS E SILVA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

**Estudo da influência da umidade do bagaço da cana de açúcar na
produção de energia em plantas de cogeração**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como parte dos requisitos para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco.

Recife, DATA DA APROVAÇÃO: ____/____/____;

Francisco Espedito de Lima
Orientador

Adson Beserra da Silva

Juan Alberto Rojas Tueros

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo apoio incondicional e seu constante estímulo a dar o meu melhor, moldando dessa forma, o ser que sou; a minha irmã, meu marido e meu filho pelo apoio constante nessa jornada, aos meus amigos por me darem conselhos e tornarem a caminhada mais fácil e leve.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar a meus pais por terem me proporcionado durante toda a vida um ambiente fértil para criação de ideias, e por me ensinarem todos os princípios e valores necessários para que determinaram meu sucesso e realização de objetivos pessoais e profissionais. Agradeço a todos meus familiares pelo acompanhamento e apoio durante toda a vida, inclusive durante a elaboração deste trabalho

Aos meus amigos e colegas de graduação, agradeço pelas longas noites de estudo que proporcionaram um bom rendimento estudantil. Obrigada a todos pela inspiração e dedicação durante os anos de curso, pelos momentos de alegria e perseverança e também por compreenderem o tempo abdicado para o alcance dos meus objetivos.

A todos os professores que tive durante minha trajetória, pelo empenho e orientação na vida profissional e acadêmica. Ao meu estimado orientador Professor Francisco Espedito, pelo suporte, paciência e dedicação na condução deste trabalho. Por fim, agradeço ao Centro de Ciências e Tecnologia – CTG, por ter me proporcionado estudar nesse ambiente para minha instrução.

RESUMO

O Brasil é, atualmente, o maior produtor de cana de açúcar a nível mundial. A muito se fala da alta funcionalidade deste produto, esta que é uma biomassa que tem a capacidade de ser transformada quase totalmente em energia que pode ser aproveitada em processos industriais, que são em sua maioria dominados e conhecidos e apresentam alto índice de aproveitamento dos subprodutos e, relativo baixo impacto ambiental. Em 2003 instituiu-se o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), com a finalidade de permitir a diversificação da matriz energética brasileira com a utilização de fontes renováveis para produção de energia. Com isso, a energia passa a ter um papel na geração de renda além do etanol e do açúcar para a indústria sucroalcooleira, e dessa forma, torna-se necessária a maximização do aproveitamento da biomassa disponível através de equipamentos mais modernos ou pelo aumento do poder calorífico da biomassa através da redução da umidade. 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. Neste trabalho estudou-se, portanto, o efeito da implantação de um secador de cana-de-açúcar do tipo transportador de esteira perfurada de uma camada de bagaço de cana-de-açúcar, bem como o impacto da sua implementação na eficiência energética das caldeiras em plantas de cogeração de energia, na redução da umidade da cana-de-açúcar e também, seu efeito na redução da temperatura dos gases de escape da torre.

Palavras chave: *Cana-de-açúcar. Produção de energia. Co-geração. Modelagem. Secador de cana de açúcar. CFD.*

ABSTRACT

Nowadays Brazil is the biggest producer of sugarcane worldwide. Much is said about the high functionality of sugarcane, which is a biomass that has the capacity to transform itself almost entirely into energy that can be used in industrial processes, which are mostly dominated and known and also present high index of by-products and relative low environmental impact. In 2003, the Incentive Program for Alternative Energy Sources (PROINFA) was instituted to allow the diversification of the Brazilian energy matrix with the use of renewable sources for energy production. As a result, energy plays a role in the generation of income in addition to ethanol and sugar for the sugar and alcohol industry, and in this way, it is necessary to maximize the use of biomass available through more modern equipment or by increasing power biomass through the reduction of moisture. The first alternative, however, generates costs, usually with long repayment periods, for the patterns and characteristics of this type of seasonally and climate-dependent industry. In this work, the effect of the implantation of a perforated conveyor type sugar cane dryer on one layer was studied, as well as its impact on the energy efficiency of the boilers in energy cogeneration plants, the reduction of sugar cane moisture and also, its effect on reducing the tower exhaust temperature.

Keywords: Sugar cane. Production of energy. Cogeneration. Modelling. Sugar cane bagasse dryer. CFD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Conversão tecnológica da biomassa.....	19
Figura 2 - Representação esquemática do broto e perfilhamento da cana de açúcar. ..	20
Figura 3 - Detalhe da fibra do bagaço da cana de açúcar	22
Figura 5- Esquema de uma planta de co-geração.....	27
Figura 4- Esquema de planta com uso de BIG/STIG.....	27
Figura 6- Esquema geral de conversão de biomassa em combustível.....	28
Figura 7- Eficiência da caldeira a partir de diferentes valores de umidade do bagaço....	29
Figura 8- Esquema geral de um secador pneumático	31
Figura 9- Esquema de secador pneumático encontrado na usina de Barra Grande.....	32
Figura 10- Secador pneumático da usina de Nuñoco(México)	33
Figura 11 - Secador pneumático situado em Pernambuco	33
Figura 12- Esquema do secador pneumático encontrado na usina Santo Antônio	34
Figura 13- Esquema geral de balanço massa-energia	36
Figura 14- Esquema do balanço de massa e energia	39
Figura 15- Curva de secagem (umidade x tempo)	41
Figura 16- Curva de secagem (taxa de secagem x tempo)	41
Figura 17 - Fluxograma da caldeira da Usina JB com bagaço com 51% de umidade ...	44
Figura 18 - Resumo dados caldeira	45
Figura 19- Diagrama formato tradicional do secador.....	47
Figura 20- Placa do tipo Conidur.....	48
Figura 21 - Esquema do duto.....	50
Figura 22- Desenho esquemático do secador	51
Figura 23 - Detalhe do espectro de temperaturas no duto de secagem	52
Figura 24 - Variação da temperatura através da passagem dos gases de exaustão.....	53
Figura 25 - Modelo esquemático secador com dois colchões de biomassa	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Capacidade energética com base em fontes renováveis.....	16
Tabela 2- Propriedades gerais do bagaço da cana de açúcar.....	22
Tabela 3- Características do pó do bagaço da cana-de-açúcar.	23
Tabela 4- Poder calorífico do bagaço em função da umidade.....	24
Tabela 5 - Poder calorífico do bagaço de cana em função da umidade e da POL	25
Tabela 6- Consumo de bagaço dado pelo fabricante da caldeira.....	39
Tabela 7 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	40
Tabela 8-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.	40
Tabela 9- Valores para Hv.	43
Tabela 11- Valores médios de valor calorífico, taxa de extração, eficiência de caldeira e turbina e fator de utilização.	43
Tabela 11- Perda de umidade do bagaço [%] - 5° Terno de moenda (100 g).....	49
Tabela 12 - Parâmetros para simulação CFD	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1	EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO ENERGÉTICA BASEADA EM FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA	15
3.1.1	O papel da biomassa na geração energética	16
3.2	A CANA DE AÇÚCAR	20
3.3	O BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR	21
3.3.1	Poder calorífico do bagaço	24
3.3.2	Preparação do bagaço da cana de açúcar	25
3.4	PLANTAS DE CO-GERAÇÃO	26
3.5	SECAGEM DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR	28
3.4.1	Secadores rotativos	29
3.4.2	Secadores pneumáticos	30
4	METODOLOGIA	35
4.1	BALANÇO DE MASSA E ENERGIA	35
4.1.1	Balanço de massa	36
4.1.2	Balanço de energia	37
4.2	ANÁLISE EM TERMOS DE ENERGIA CINÉTICA	40
4.3	DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA CALDEIRA	41
4.4	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL PÓS SECAGEM	45
4.5	TIPO DE SECADOR UTILIZADO	46

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DO BAGAÇO	49
5.2	DIMENSIONAMENTO DO SECADOR DE BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR	49
5.3	SIMULAÇÃO COM O SECADOR DE BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR	51
5.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	54
6	CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
7	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui insolação elevada, alta produtividade agro florestal e uma base industrial que, em parte, depende do uso de biocombustíveis. Além disso, pode aproveitar mais os resíduos agroindustriais e biomassas com ciclos de crescimento curtos e de baixo custo, que complementam ou substituem a madeira como fonte de energia. Reúne, portanto, as condições necessárias para dar um novo impulso aos usos dessas fontes renováveis cujos custos tendem a decrescer, na contramão das expectativas quanto aos combustíveis fósseis que tendem a ficar mais escassos e caros.

Segundo o Banco Energético Nacional - BEN, as biomassas (Madeira e cana - de- açúcar), responderiam por 27% da energia primária do Brasil, a maior parte destinada a usos industriais. No entanto, a estatística oficial não contempla alguns usos e processos de modo que subestima a participação das biomassas. Na avaliação do INEE, ultrapassa um terço a energia primária do país. Essa dependência elevada dos biocombustíveis tem sido associada a subdesenvolvimento e as bioenergias nunca foram tratadas da mesma forma que as fontes mais "nobres", como a hidráulica, petróleo, gás natural, carvão mineral e nuclear, para as quais existem políticas específicas. Apenas o etanol e o biodiesel têm políticas específicas.

Com relação à cana-de-açúcar, desde a sua criação, o INEE trabalhou para aumentar a eficiência no uso da biomassa da cana através do melhor aproveitamento das biomassas secas (bagaço e palhas) com a produção de energia elétrica. O INEE desenvolveu um estudo sobre cogeração em uma Unidade de Exploração Florestal Sustentada na Amazônia para a Fundação das Nações Unidas, denominado Projeto Cogeração Amazônia.

Dessa forma, otimizar a produção de energia através da cana-de-açúcar é indispensável para a matriz energética brasileira, tão dependente desses combustíveis renováveis. Uma forma de otimizar a matriz é através de plantas de cogeração, que já são amplamente utilizadas, e que implementam secadores de bagaço de cana de açúcar como forma de reutilizar esse bagaço menos úmido na geração de energia da própria usina. Estudos mostram que a redução do bagaço maximiza a produção

energética. Neste trabalho avaliaremos como a redução da umidade pode auxiliar na produção de energia, bem como a avaliação da porcentagem de umidade que deve ser retirada do bagaço da cana-de-açúcar para que se tenha um aproveitamento ótimo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho visa a análise da otimização do processo de redução de umidade do bagaço de cana-de-açúcar através do efeito da passagem de correntes de ar – forçadas- a alta temperatura em uma camada de bagaço de cana-de-açúcar. Bagaço que ao entrar em combustão gera vapor que é utilizado na produção de energia na usina.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir valores ótimos de espessura de cama de bagaço de cana de açúcar, velocidade de passagem do bagaço e espessura do duto.
- Analisar o impacto da redução de umidade do bagaço da cana de açúcar na produção energética da usina de co-geração
- Definir um secador de cana-de-açúcar que não gere custos extras à usina, além dos custos de implementação

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1.EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO ENERGÉTICA BASEADA EM FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA

A geração de energia é inerente ao desenvolvimento das atividades humanas. A princípio toda energia era gerada a partir de combustíveis fósseis, deixando de lado a preocupação com a renovação deste tipo de combustível, bem como a preocupação com o efeito disto na manutenção da vida no planeta Terra. O desejo de expansão intrínseco do ser humano, bem como a globalização entremeada em todos os setores da sociedade fizeram com que a demanda por energia aumentasse cada vez mais. O aumento do consumo de energia associado a degradação ambiental tornaram propício o desenvolvimento de tecnologias ditas amigas da natureza, baseadas em fontes renováveis de energia.

O potencial de energia baseado em fontes renováveis é geograficamente diverso, uma vez que seu desenvolvimento depende em parte da topografia da área, do potencial de recursos energéticos da área, das necessidades e demandas de energia da área analisada, bem como da realidade socioeconômica do local. (Ross 2002) Tendo em vista que fontes renováveis são capazes de gerar energia de diversas formas, sejam elas na forma de calor, eletricidade ou como combustíveis.

O aspecto mais notável de gerar energia através de fontes renováveis é a diversidade de tecnologias e recursos existentes. Fica claro que a contribuição de energias renováveis é grande e este tipo de energia poderia ter participação substancial no suprimento da demanda energética em todo o mundo, podendo facilmente suprir a demanda por energia elétrica mundial, como afirma Robert Gross (2006) em seu estudo sobre o progresso das energias renováveis e como pode ser visto na tabela 1 abaixo.

Tabela 1- Capacidade energética com base em fontes renováveis

Installed capacities and output of 'new' renewables		
	Capacity (MW) ^a	Approx. annual output ^b (TW h/year)
Biomass (modern)	35,000	185
Wind	20,000	50
Geothermal	8200	44
Small hydro	3000	15
Solar PV	1200	1
Solar thermal	350	0.2
Total	68,550	356

	Capacity (GW)	Output (TW h/year)
Current world electricity	3,000,000	15,000

Fonte: Rein, 2007

Apesar de todo seu potencial, a contribuição de energia proveniente de fontes renováveis é modesta em relação a energia proveniente de fontes fósseis, e representam aproximadamente 17% da matriz energética primária no mundo (Gross, 2002), sendo a maior parte suprida por fontes hidroelétricas.

3.1.1 O papel da biomassa na geração energética

A obtenção de energia através de biomassa pode ocorrer via pirólise, gaseificação, hidrogenação, liquefação, digestão anaeróbia, fermentação alcoólica e transesterificação. Cada tecnologia tem suas particularidades e vantagens a depender do tipo de biomassa utilizado e a quantidade de energia necessária. (Chang Jet al., 2003) A energia elétrica é considerada a de maior viabilidade para exploração comercial, atualmente plantas baseadas em energia proveniente da biomassa já produzem mais de 12GW de energia em todo o mundo. (Omer ,2015)

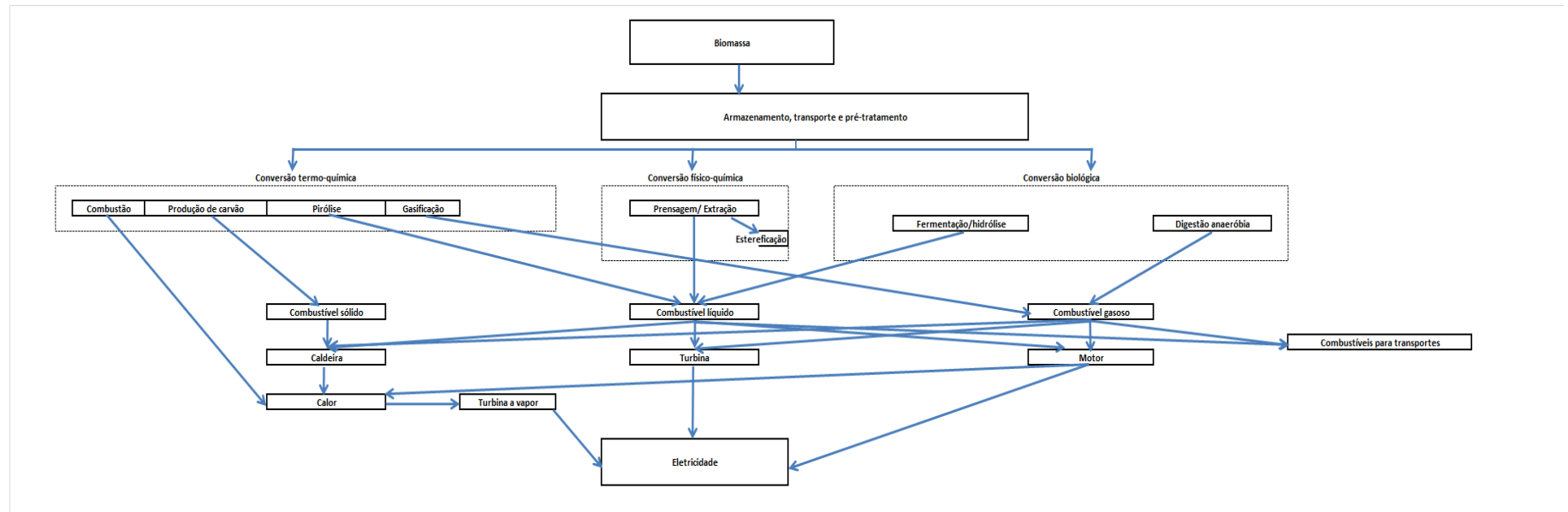
Plantas de cogeração baseadas no uso múltiplo e/ou sequencial da combustível para geração de energia já são utilizadas em processos industriais e em usinas sucroalcooleiras, de papel e arroz. O bagaço da cana-de-açúcar e a palha podem promover uma quantidade significativa de biomassa para produção elétrica e este

potencial é intensificado em plantas de cogeração com maior tecnologia embarcada. Países como Brasil, Índia, Tailândia, Paquistão e México, maiores produtores de cana de açúcar do mundo tem grandes oportunidades para uso de plantas de cogeração baseadas no bagaço de cana de açúcar, estes países produzem , juntos, 70% da produção global de cana de açúcar, e plantas de cogeração poderiam produzir aproximadamente 7% da demanda energética dos oito países. (Omer , 2005)

O uso da biomassa como fonte de energia é de aproximadamente 14% do total da matriz energética, sendo a fonte primária de energia para aproximadamente 50% da população mundial (e.g., Karekezi Kithyoma, 2006) sendo usado majoritariamente em países em desenvolvimento, tendo uma participação de aproximadamente 34%(Ross, 2003), em contrapartida aos 3% de representatividade para os países ditos industrializados.

De forma geral é possível produzir energia através da biomassa de diferentes maneiras e tal energia pode ser destinada as mais diversas aplicações desde uma utilização doméstica até utilizações industriais como em caldeiras, eletricidade e fluidos para utilização em meios de transporte, como pode ser visto na figura 1 abaixo.

Figura 1- Conversão tecnológica da biomassa.

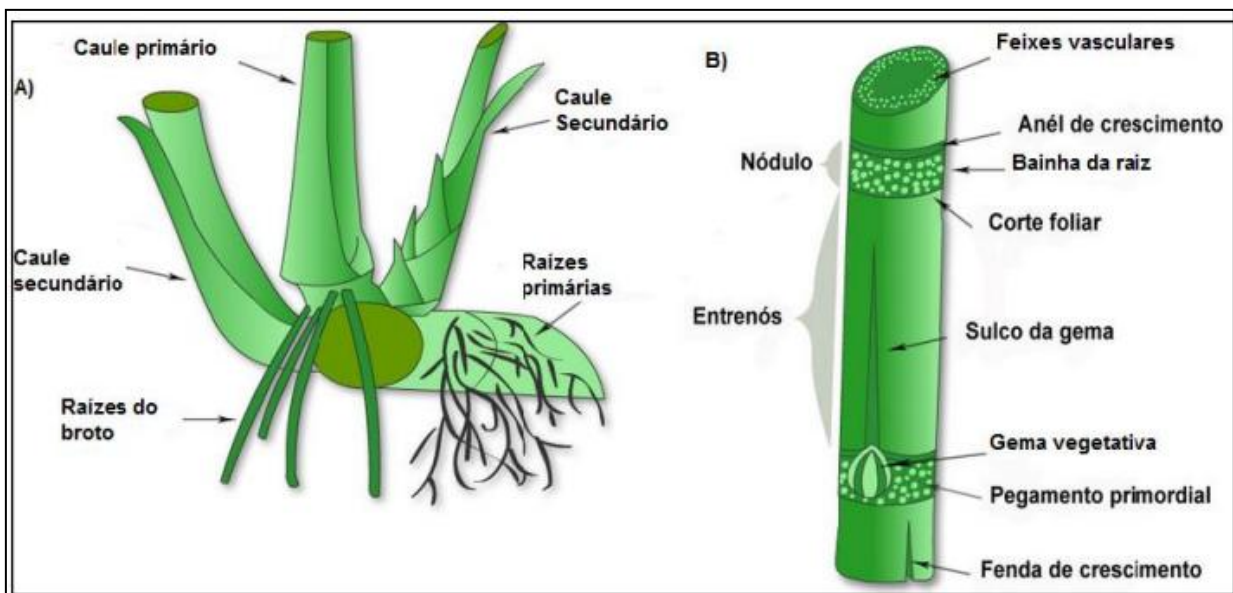


Fonte: Gross, 2003 (adaptado pelo autor)

3.2 A CANA DE AÇÚCAR

Existem pelo menos seis espécies de cana de açúcar, planta pertencente ao gênero *Saccharum L.* É uma planta da família Poaceae, mesma do milho, sorgo, arroz e outras gramíneas, apesar de ser uma monocotiledônea perene. Sua morfologia é dada por raiz, folhas, caule do tipo colmo e flores. Abaixo, na figura 2, pode-se observar um esquema da estrutura da cana de açúcar.

Figura 2 - Representação esquemática do broto e perfilhamento da cana de açúcar.



Fonte: NETAFIM, 2005

A cana de açúcar é uma planta de metabolismo do tipo C_4 o que significa que é uma planta extremamente eficiente na conversão da energia proveniente dos raios solares em energia química (na forma principalmente de sacarose - principal composto orgânico da fotossíntese). Plantas com esse tipo de metabolismo tem seu processo de fotossíntese afetado pelas condições ambientais que podem alterar a fixação do carbono pela planta e com isso alterar a produção da biomassa total, composta pelas raízes, colmo e folhas, e conseqüentemente alteram a produtividade.

3.3 O BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

O bagaço da cana de açúcar corresponde a parte resultante do processo de retirada do caldo da cana-de-açúcar, restando a parte mais fibrosa da cana, do qual boa parte do líquido já foi extraído. Se não manuseado corretamente, pode emperrar, quebrar e se empilhar, além de produzir pós e poeira com alta inflamabilidade. Sabe-se também que em média são produzidas 30 toneladas de bagaço a cada 100 toneladas de cana de açúcar , ou seja, a produção de bagaço tem cerca de 30% de aproveitamento..

Quando produzido, o bagaço de cana-de-açúcar contém valores de umidade que variam entre 47% a 55% (Rein, 2007). Toda essa umidade reduz o poder calorífico do bagaço além de ser a causa primária das perdas de energia nas caldeiras uma vez que parte da energia proveniente do combustível é utilizada como calor latente para evaporação de parte da umidade do bagaço.

A equação 1 abaixo mostra a o cálculo da entalpia para biomassa de forma geral:

$$H = 196,05(100 - W_w - W_x) - 31.148W_{rds} \quad (1)$$

De forma geral, temos que a redução de 1% de umidade do bagaço, reduz o uso de 196KJ/Kg de bagaço (Rein, 2007).

Estima-se que cada tonelada de cana tem o potencial de produção de 250 quilogramas de bagaço e 204 quilogramas de ponta ou palha, equivalentes a geração de aproximadamente 200 KW/hora para venda (Nascimento, 2007). Além disso, sabe-se que a redução da umidade é a principal fator para melhoramento da eficiência energética, além de ser diretamente proporcional a temperatura final dos gases de escape.

As propriedades do bagaço da cana-de-açúcar favorecem a secagem desse tipo de biomassa. Possui densidade baixa -184 kg/m³ -com um percentual de umidade em torno de 51% além de porosidade de empilhamento de até 96,2% quando não

compactado (OLIVEIRA et al, 2002). Sua porosidade persiste como elemento isolado, favorecendo a troca de calor do fluido contido em suas fibras com gases quentes passando entre e sobre elas.

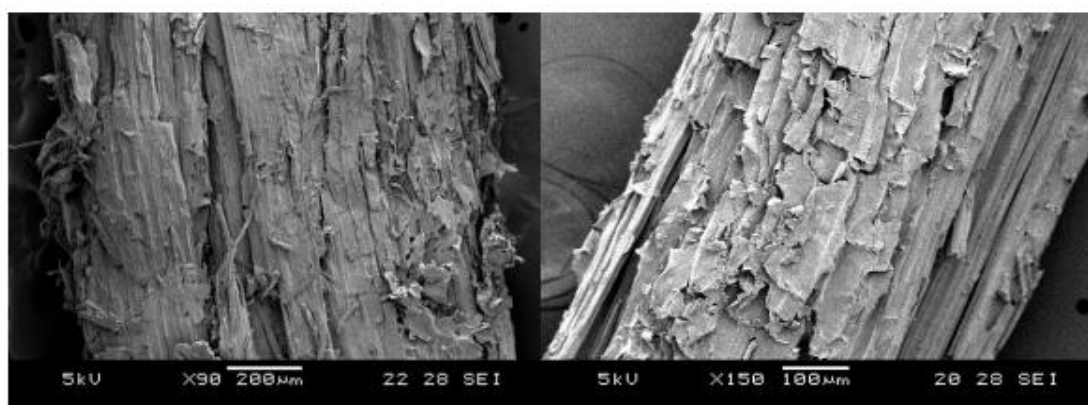
Características gerais do bagaço de cana de açúcar podem ser vistas na tabela 2 abaixo, bem como o detalhe da fibra do bagaço pode ser visto na figura 3:

Tabela 2- Propriedades gerais do bagaço da cana de açúcar.

	Seco sem pó %	Com pós em combustão %
Análise aproximada		
Umidade		52.00
Carbono fixo	12.94	5.95
Matéria volátil	87.06	40.05
Cinzas		2.00
Análise última		
Umidade		52.00
Carbono fixo	47.89	22.04
Hidrogênio	5.92	2.72
Nitrogênio	0.33	0.15
Total enxofre	0.05	0.02
Oxigênio	45.81	21.07
Cinzas		2

Fonte: modificado de Rein,2007

Figura 3 - Detalhe da fibra do bagaço da cana de açúcar



Fonte: Autora

Abaixo ,na tabela 3, pode-se observar características do pó de cana-de-açúcar como composição, e temperaturas de fusão.

Tabela 3- Características do pó do bagaço da cana-de-açúcar.

Constituinte	Low Brix in Bagasse typically 1.5-2.5%	Medium Brix in bagasse typically 2.5-4.5%	High Brix in Bagasse typically >4.0%
SiO ₂	92.8	75.2	54.4
Al ₂ O ₃	3	2.7	1.7
Fe ₂ O ₃	0.5	2.6	1.7
TiO ₂	0.01	0.01	0.01
P ₂ O ₄	0.27	1.46	5.02
CaO	0.4	6.9	9.1
MgO	0.7	1.7	4.4
Na ₂ O	0.01	0.6	0.01
K ₂ O	0.7	5.1	13.09
SO ₃	0.5	2.7	8
MgO ₂	0.02	0.02	0.04
Temperatura de fusão das cinzas - temperatura redutora °C			
Temperatura de deformação	>1600	1300	1190
Temperatura de amolecimento	>1600	1310	1200
Temperatura hemisférica	>1600	1330	1210
Temperatura de fluidização	>1600	1400	1220
Temperatura de fusão das cinzas - temperatura oxidante °C			
Temperatura de deformação	>1600	1320	1210
Temperatura de amolecimento	>1600	1330	1220
Temperatura hemisférica	>1600	1350	1230
Temperatura de fluidização	>1600	1400	1240
Pó em g/100g de bagaço seco	4.17	4.17	4.17
GVC em KJ/Kg-seco	18.658	18.658	18.658
JdeK Fouling Index	0.008	0.076	0.241
DOE Fouling Index	0.016	0.0127	0.293

Fonte: modificado de Rein, 2007

3.3.1 Poder calorífico do bagaço

Poder calorífico de um combustível nada mais é que a quantidade de energia interna contida no combustível, havendo o poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI). Para o PCS temos que este corresponde a quantidade de calor produzida por 1 kg de combustível, quando este entra em combustão, em excesso de ar, e os gases da descarga são resfriados de modo que o vapor de água neles seja condensado. Enquanto o PCI é a quantidade de calor que pode produzir 1kg de combustível, quando este entra em combustão com excesso de ar e gases de descarga são resfriados até o ponto de ebulição da água, evitando assim que a água contida na combustão seja condensada.

Para o bagaço da cana de açúcar podemos calcular o poder calorífico como mostrado nas equações 2 e 3 a seguir:

$$PCS = 4600 - 12s - 46w \quad (2)$$

$$PCI = 4250 - 12s - 48,5 w \quad (3)$$

Onde w representa a umidade do bagaço (%) e s o teor residual de sacarose (%)

A seguir tem-se tabelas 4 e 5 para o poder calorífico do bagaço

Tabela 4- 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	2.574	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: Compilado de Émile Hugor, 1977

Tabela 5 - Poder calorífico do bagaço de cana em função da umidade e da POL

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: Autora

3.3.2 Preparação do bagaço da cana de açúcar

Numa planta de cogeração, utiliza-se o bagaço da cana na etapa determinante de geração de energia - a caldeira. O bagaço da cana serve como combustível para a queima e, sendo assim, é de fundamental importância compreender sua composição.

Faz-se portanto necessário a existência de laboratórios nas usinas de açúcar para que haja controle da qualidade do bagaço a ser utilizado, uma vez que a cana pode ser originada de terceiros. Dessa forma certifica-se a qualidade da cana com parâmetros como o de umidade, de grande valia para o processo.

O bagaço que chega à usina é pesado, leva-se uma amostra para o laboratório onde são feitas as análises para uma amostra de 250 g. Após a pesagem, prensa-se o bagaço, procedimento este que retira boa parte do caldo restando apenas o que se chama de bolo úmido. Este bolo é então pesado e a partir deste peso calcula-se a o percentual de umidade da amostra a ser descarregada.

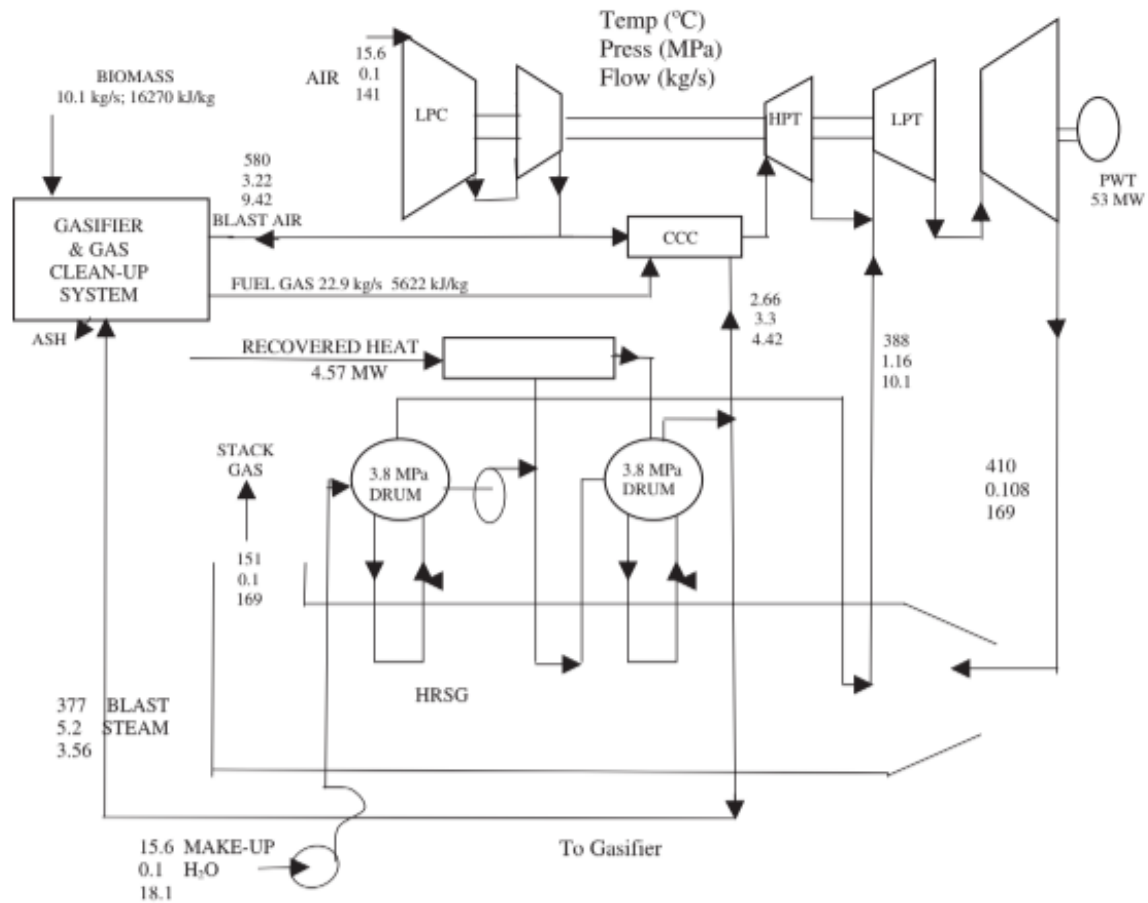
O bolo úmido é deixado para descansar por 24 horas e é então posto num forno e aquecido até a temperatura de trabalho da caldeira. Pretende-se dessa forma prever o comportamento da cana de açúcar quando posta como combustível na caldeira.

3.4. PLANTAS DE CO-GERAÇÃO

Tecnologias para turbinas a gás para ciclos integrados de gasificação e turbinas a gás, também chamados de BIG/STIG e também de sistemas integrados de gaseificação de biomassa com turbinas a gás com regulação de temperatura por vapor chamados de BIG/ISTIG tem seu uso principalmente industrial, nas usinas de cana de açúcar e podem ter como fonte de combustível o bagaço principalmente durante a época de moagem da usina. O foco no uso da biomassa baseia-se na redução da emissão de compostos de carbono para a atmosfera. Abaixo, na figura 4 pode-se ver um esquema de uma planta com uso de BIG/STIG.

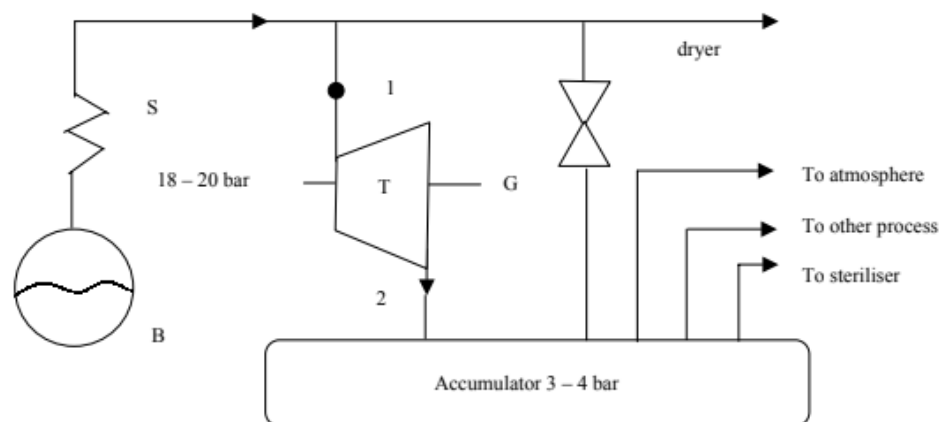
Existem plantas de co-geração não apenas em usinas de cana de açúcar, o esquema abaixo mostra o sistema de co-geração utilizado em uma usina de óleo de palma. As primeiras plantas de co-geração eram de óleo de palma, inclusive. No esquema é possível observar a existência de uma caldeira (B) de alta pressão e temperatura, seguido de um super aquecedor (S). O vapor se expande numa turbina a gás (T) e sofre exaustão no acumulador. O vapor é então distribuído para vários processos e a energia elétrica é convertida através de energia mecânica no gerador.(G) Na figura 5 a seguir, observa-se o esquema de uma planta de co-geração. E na figura 6 observa-se o esquema geral de geração de energia através de biomassa, que pode acontecer numa usina de co-geração.

Figura 5- Esquema de planta com uso de BIG/STIG.



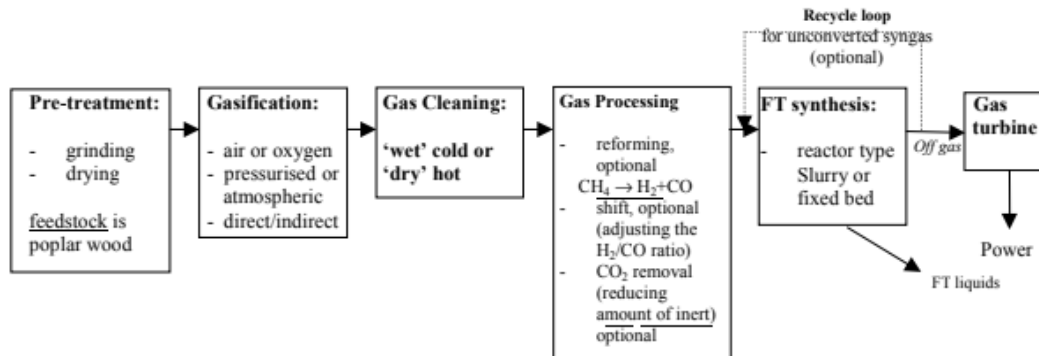
Fonte: Maranhão,1996

Figura 4- Esquema de uma planta de co-geração



Fonte: Adaptado pela autora

Figura 6- Esquema geral de conversão de biomassa em combustível



Fonte: Rein 2007

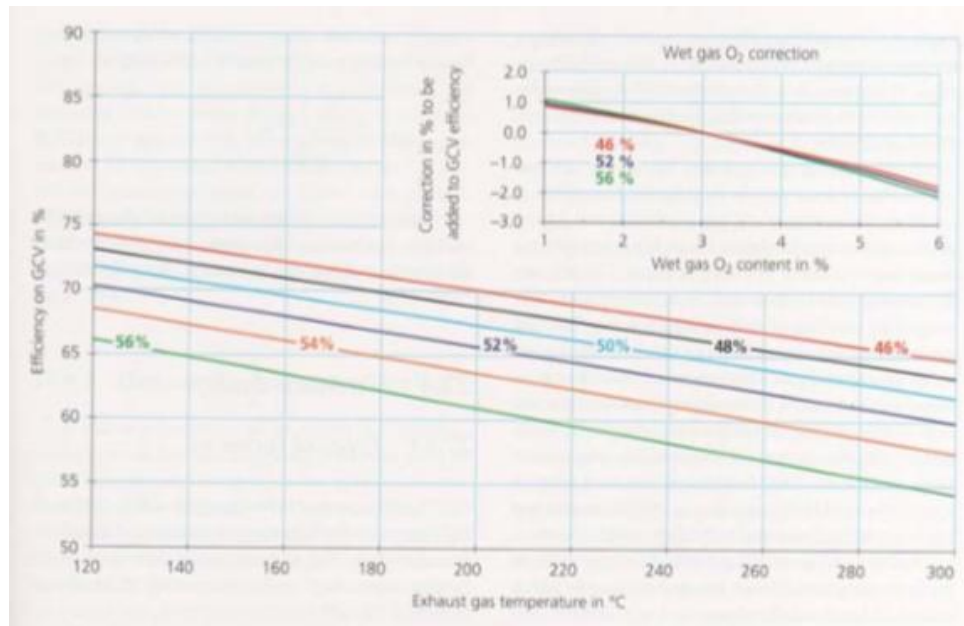
3.5. SECAGEM DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

A crise energética de 1972 fez com que muito estudiosos se voltassem para o estudo de fontes mais viáveis e baratas de energia do que os combustíveis fósseis. Um dos estudos, desenvolvidos pelo pesquisador Bailliet Boulet, 1927, concluiu que a queima da cana de açúcar podia reduzir o impacto na poluição atmosférica. Bailliet constatou que a secagem melhorava o potencial calorífico da cana de açúcar, principalmente em amostras com umidade acima de 50%.

Reduzir a umidade do bagaço é benéfico à caldeira por diversas razões, uma delas é exemplificada na figura 7, abaixo, entre elas:

1. Quanto menor a taxa de umidade, menor será o volume de ar em excesso necessário para queima, considerando o bagaço com até 40% de umidade (Magasiner, 2002)
2. É possível atingir uma maior temperatura de chama adiabática
3. Uma menor quantidade de gases passa através da chaminé.

Figura 7- Eficiência da caldeira a partir de diferentes valores de umidade do bagaço.



Fonte: Rein,2007

De forma geral, a secagem da cana de açúcar compõe um sistema integrado no qual ocorre a secagem do bagaço através dos gases de escape de caldeira a altas temperaturas. Além de reduzir a temperatura dos gases de escape para patamares de 100°C , ainda aumenta a eficiência do processo, saindo de percentuais de 54% para 69%. Análises de energia e exergia mostraram que os sistemas elevaram a eficiência energética de 71,44% para 85%, com elevação de 3% dos índices de exergia.

No início eram utilizados principalmente secadores rotativos, porém estes não possuíam resultados satisfatórios e não tinham desempenho sustentável. Posteriormente outros tipos de secadores foram desenvolvidos, uma vez que na época se estabeleceu que secagens ultrarrápidas, da ordem de segundos, poderiam ser alcançadas a partir de uma boa preparação da cana-de-açúcar.

3.4.1 Secadores rotativos

Esse tipo de secador foi largamente utilizado. Consiste de um mecanismo cilíndrico rotativo que possui internamente defletores e geradores de fluxo de

contracorrente de bagaço e gases a alta temperatura. São utilizados sistemas de forma a impedir a saída do ar quente e entrada de ar no mecanismo, pois o mesmo poderia provocar incêndios. A secagem é realizada pela passagem de gases quentes no sentido axial do tambor. Não se mostra adequado para sólidos leves como palha, bagaço ou sólidos de baixa densidade e dimensões reduzidas, sem que seja utilizado um separador do bagaço do ar quente, geralmente um separador ciclônico.

Devido aos riscos de incêndio e variados problemas mecânicos gerados por este tipo de secador, boa parte das unidades que foram instaladas foram depois substituídas por outros tipos de secadores.

Estudos mostraram que para esses secadores era possível reduzir a umidade do bagaço da cana em até 40% com redução de até 80% da temperatura dos gases de escape. Instalações na usina de Zaio no Marrocos mostraram um aumento de 72 a 80% na eficiência da caldeira da usina e uma elevação de 1.6 para 2.7 kg de vapor/kg de bagaço. (van der Poel, 1998)

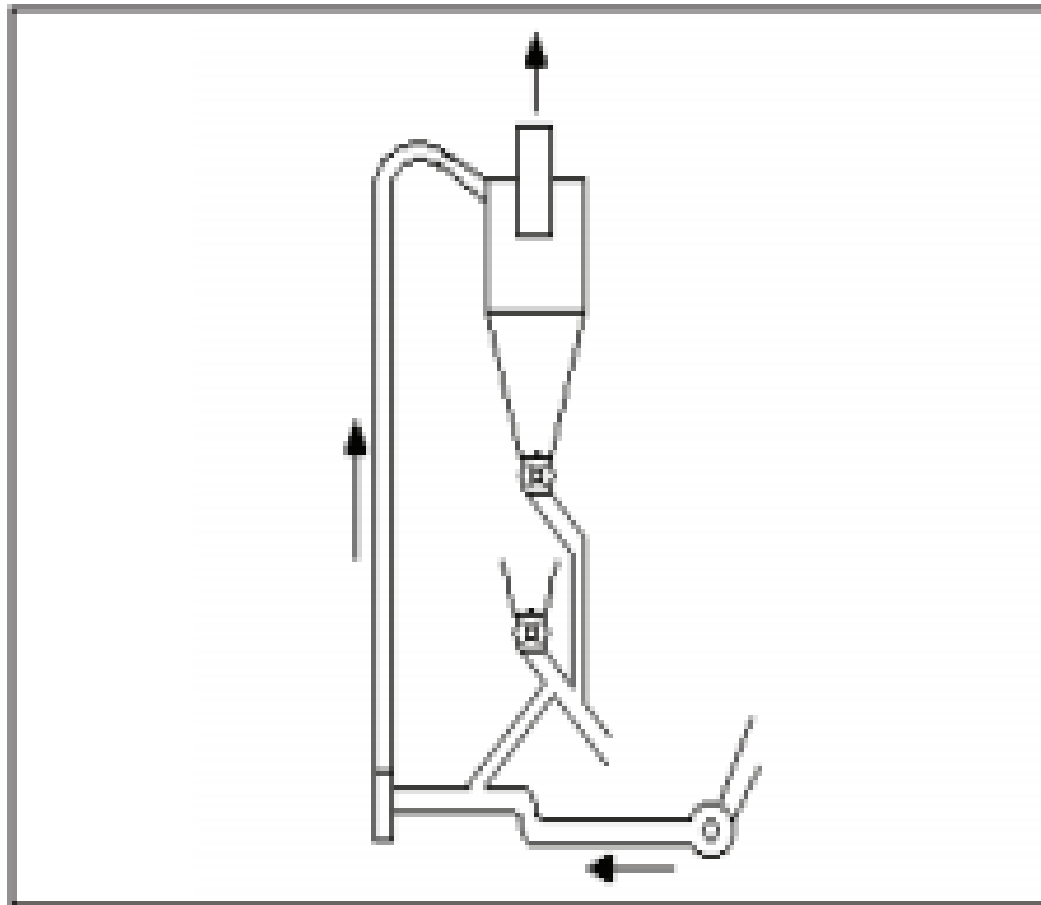
3.4.2 Secadores pneumáticos

Secadores do tipo pneumático são o tipo mais pesquisado e estão presentes em diversas usinas de açúcar e etanol. Nesses tipos de secadores existe contato direto entre o fluxo de ar quente e o bagaço, o que gera altas taxas de transferência de calor. Vários tipos de estruturas podem ser montadas, como pode-se observar nas imagens abaixo, mas, em geral, utilizasse um injetor de fluido na seção de entrada do bagaço, que atua simultaneamente como uma proteção para entrada de ar externo. O bagaço é transportado através dos gases a elevadas temperaturas em longas tubulações onde ocorrem as trocas de calor. Posteriormente o bagaço é separado dos gases através de um separador ciclônico. Os gases com altas concentrações de umidade são dirigidos para a chaminé e são descarregados na atmosfera, enquanto o bagaço é enviado para as câmaras de combustão.

Tem como vantagem o maior volume de material processado e grande capacidade de secagem, contudo seu consumo de energia para alimentar os

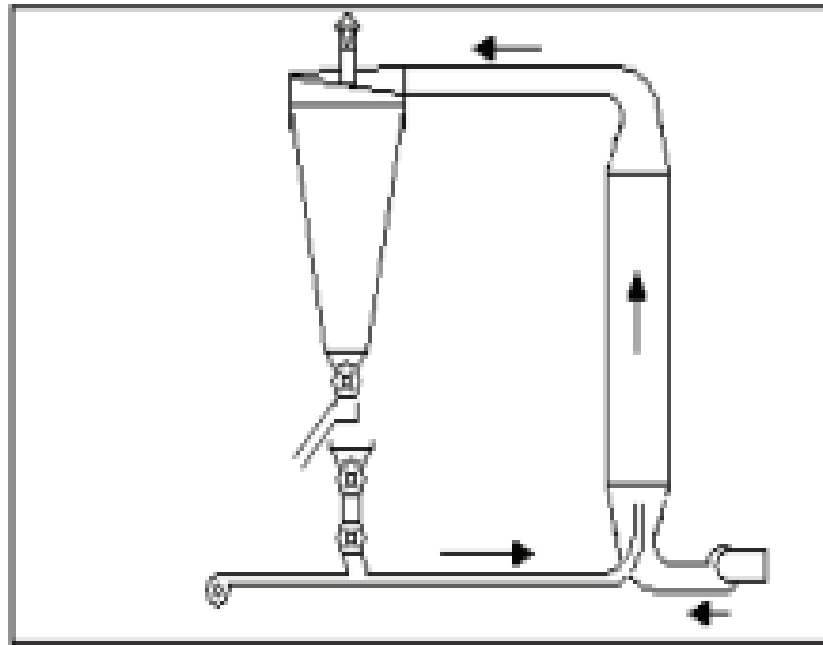
sopradores é alto e possuem alta necessidade de espaço para instalação, alto custo do equipamento, custo inicial elevado e interrupção do fluxo dos gases nas passagens pelos economizadores para obter temperaturas mais elevadas. Um destes secadores com capacidade para 28ton/h, pode reduzir a umidade do bagaço de cana de açúcar para valores de 32%. Nas figuras 8 e 9 abaixo, pode-se ver o esquema geral de um secador pneumático.

Figura 8- Esquema geral de um secador pneumático



Fonte: Rein 2007

Figura 9- Esquema de secador pneumático encontrado na usina de Barra Grande



Fonte: Rein 2007

Os secadores pneumáticos se utilizam dos gases de exaustão das caldeiras com temperaturas que dependem do tipo e capacidade. Existem variações de fluxo de gases e temperaturas em cada estágio característicos do projeto adotado por cada fabricante. Contudo, é importante atentar-se a três pontos de medição para retirada dos gases e que dependem do projeto do secador, da sua capacidade e umidade final pretendida. A temperatura dos gases na saída da fornalha, após o primeiro economizador -que é o pré-aquecedor de água- e após os pré-aquecedores de ar fornecido para a combustão, em média varia de 400°C a 260°C entre a saída da fornalha e a passagem pelo primeiro pré-aquecedor de ar. A necessidade de atentar-se para a temperatura dos gases de escape deriva do desejo de evitar a combustão dos gases que, em contato com o metal componente da instalação pode levar a sua corrosão.

As maiores preocupações com os secadores derivam dos custos e dificuldades de manutenção, a confiabilidade e a possibilidade de bloqueios do sistema. É necessário que o design desses elementos seja feito de forma cautelosa com a finalidade de minimizar tais problemas. Para tal o design deve considerar que as

partículas do bagaço colidam nas paredes do secador com pequenos ângulos para minimizar a erosão. Deve-se também possuir diversas válvulas rotativas, pois constatou-se que sua vida útil é de quatro safras de cana de açúcar. Nas figuras 10, 11 e 12 abaixo podem ser vistos exemplos reais de secadores do tipo pneumático.

Figura 10- Secador pneumático da usina de Nuñoco(México)



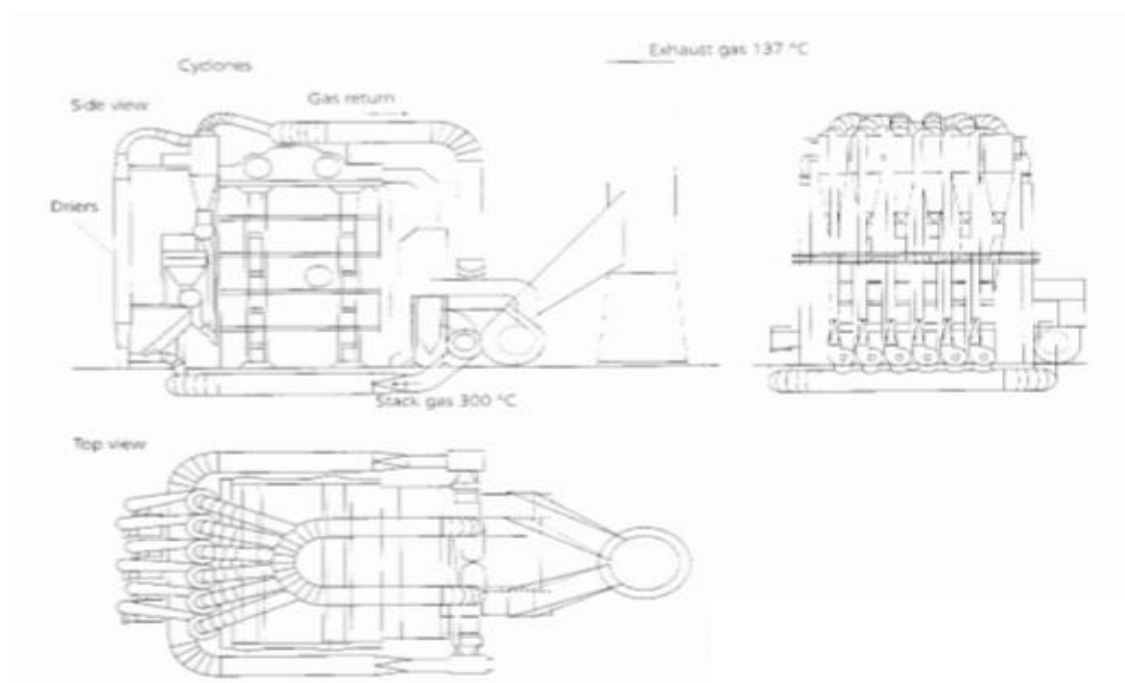
Fonte: Ross 2008

Figura 11 - Secador pneumático situado em Pernambuco



Fonte: Foto retirada pela autora

Figura 12- Esquema do secador pneumático encontrado na usina Santo Antônio



Fonte: Maranhão, 1986

4 METODOLOGIA

O primeiro pesquisador a iniciar pesquisas na área de secagem a níveis industriais de cana de açúcar foi o Professor Kerr, em 1910. O primeiro secador estudado utilizava um mecanismo de contracorrente. Esse mecanismo utilizava um gás a alta temperatura que era injetado na base do secador e que percorria todo o percurso em movimentos de zigue-zague até alcançar o topo, de onde era retirado com o auxílio de um ventilador. O bagaço entrava através do topo e realizava o percurso contrário passando por prateleiras pivotadas. O secador tinha dimensões de 1.2 m por 1.8 m, e 6m de altura, confeccionado em aço. Com esse primeiro experimento foi possível reduzir a umidade do bagaço de cana de 54,3% para 46.4%. Além disso, foi possível uma redução da temperatura do gás de saída de 245°C para 104 °C.

A secagem do bagaço através da utilização do vapor proveniente da caldeira utiliza a energia residual do sistema de forma a secar o bagaço. Dessa forma, parte da entalpia do gás retorna a caldeira e reduz as perdas de energia. Secadores, de maior parte rotativos foram instalados no Brasil, nas Filipinas, Austrália, China, Cuba e Índia mas até então não tinham sido feitos estudos para avaliação do grau de sucesso de tais experimentos.

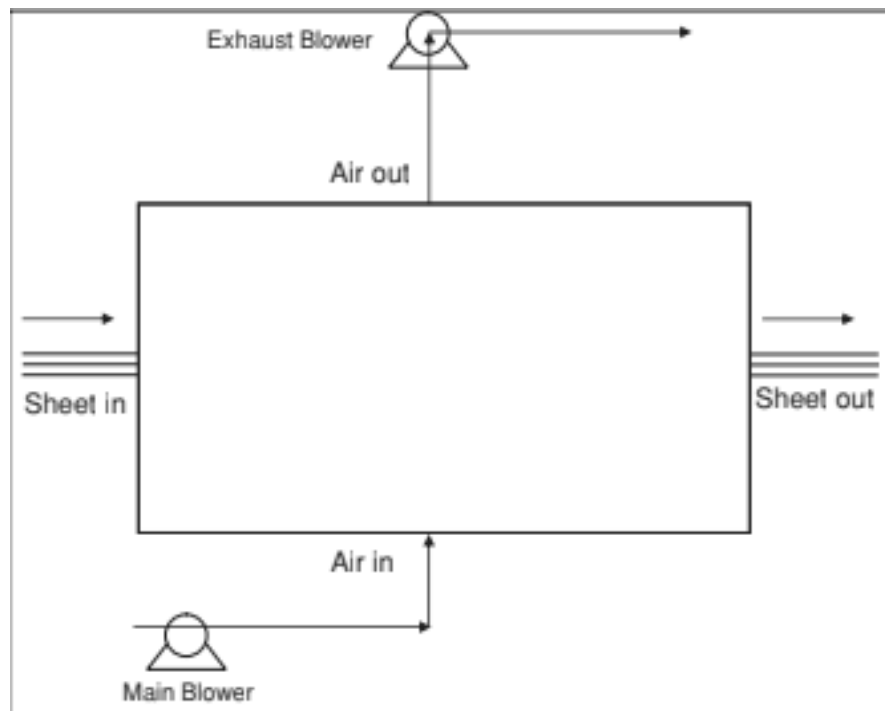
A secagem é um processo de transferência de massa e calor, geralmente de água, no qual o calor fornecido é utilizado para evaporar a água existente no material. Tal processo despende altas quantidades de energia, tendo em vista que o calor latente de vaporização da água é de 2500 J/g de água. Simultaneamente, o material a ser vaporizado deve deixar o material da secagem através de difusão e ou convecção

4.1 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA

O cálculo inicial para secadores deve considerar balanços de massa e energia. A partir do balanceamento de massa pode-se determinar a umidade relativa e absoluta do ar da exaustão, além da massa de ar resultante da combustão e ar de alimentação e temperatura na saída do secador a ser projetado. Os balanços de energia permitem a

avaliação das temperaturas dos gases de exaustão nas diferentes condições de umidade de bagaço (51% e 41%) com a exaustão da caldeira direcionada para um secador de bagaço que será projetado com o intuito de redução de umidade de bagaço. Um exemplo de esquema de balanço de massa e energia pode ser visto na figura 13 abaixo.

Figura 13- Esquema geral de balanço massa-energia



Fonte: Cárdenas et al.1994

Na figura acima, observa-se um esquema geral de um secador, no qual o ar quente entra no secador e depara-se com uma superfície úmida. A superfície sai do secador com menos úmida, enquanto o ar sai com um índice elevado de umidade.

4.1.1 Balanço de massa

O início dos cálculos para balanço de massa pode ser visto nas equações 4 a 7 abaixo:

$$\dot{m}_{superfície\ seca\ entrada} = \dot{m}_{superfície\ seca\ saída} \quad (4)$$

$$\dot{m}_{água\ líquida\ entrada} = \dot{m}_{água\ líquida\ saída} + \dot{m}_{água\ evaporada} \quad (5)$$

$$\dot{m}_{gás\ entrada} = \dot{m}_{gás\ saída} \quad (6)$$

$$\dot{m}_{vapor\ de\ água\ entrada\ 1} + \dot{m}_{água\ evaporada} = \dot{m}_{vapor\ de\ água\ saída} \quad (7)$$

Sendo assim, o conteúdo da mistura úmida (w) é dado pelas equações 8 e 9:

$$w_{entrada} = \frac{\dot{m}_{água\ líquida\ entrada}}{\dot{m}_{água\ líquida\ entrada} + \dot{m}_{superfície\ seca\ entrada}} \quad (8)$$

$$w_{saída} = \frac{\dot{m}_{água\ líquida\ saída}}{\dot{m}_{água\ líquida\ saída} + \dot{m}_{superfície\ seca\ saída}} \quad (9)$$

A relação entre o fluxo de ar e a umidade absoluta é dada pela equação 10:

$$\dot{m}_{gás\ seco} = \dot{m}_{gás} + \frac{1}{1 + Y} \quad (10)$$

4.1.2 Balanço de energia

Inicialmente faz-se o balanço das entalpias, como visto na equação 11,

$$\begin{aligned}
 H_{ar\ seco\ entrada} + H_{vapor\ agua\ entrada} + H_{superfície\ seca\ entrada} + H_{água\ líquida\ entrada} \\
 = H_{ar\ seco\ saída} + H_{vapor\ agua\ saída} + H_{superfície\ seca\ saída} \\
 + H_{água\ líquida\ saída} + perdas\ de\ calor\ para\ o\ ambiente
 \end{aligned} \quad (11)$$

No geral, para sistemas de grandes dimensões desconsidera-se as perdas para o ambiente e a equação 12 fica como a seguir:

$$\Delta H_{ar\ quente} + \Delta H_{vapor\ de\ água} + \Delta H_{evaporação} + \Delta H_{água\ líquida} + \Delta H_{superfície\ seca} = 0 \quad (12)$$

Em análises industriais o balanço de massa e energia pode ser executado segundo os seguintes passos:

1. Esquematizar o processo incluindo os fluxos de massa para dentro e fora do sistema, observando possíveis vazamentos de ar.
2. Decidir o que será desconsiderado do sistema, de forma a simplificá-lo
3. Decidir os locais de medição dos fluxos de ar e temperaturas. Geralmente secadores não estão equipados para estes tipos de medição
4. Realizar as medições necessárias e cálculos demonstrados acima.

Abaixo temos um esquema do balanço de massa e energia para um secador rotativo de fluxo cruzado, utilizando bagaço com umidade de 90%. O esquema da figura 14, a seguir, mostra a aplicação dos conceitos e cálculos exemplificados nas duas seções anteriores.

Posteriormente encontra-se a tabela 6 que demonstra a relação entre a umidade do bagaço e o consequente consumo de bagaço da caldeira. Tais dados serão de fundamental importância para futuros cálculos no âmbito de eficiência do secador implementado. Enquanto as tabelas 7 e 8 mostram diferentes balanços de massa e energia para dois tipos de secagem de bagaço.

Figura 14- Esquema do balanço de massa e energia



Fonte: Adaptado pela autora

Tabela 6- Consumo de bagaço dado pelo fabricante da caldeira

UMIDADE [%]	CONSUMO [kg/h]	kg vapor / kg bagaço
52	69.989	2,14
51	67.905	2,21
50	65.945	2,27
49	64.093	2,34
48	62.342	2,41
47	60.685	2,47
46	59.113	2,54
45	57.621	2,60
44	56.202	2,67
43	54.851	2,73

Fonte: Compilado de dados do fabricante da caldeira

Tabela 7 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

Fonte: A autora

Tabela 8-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

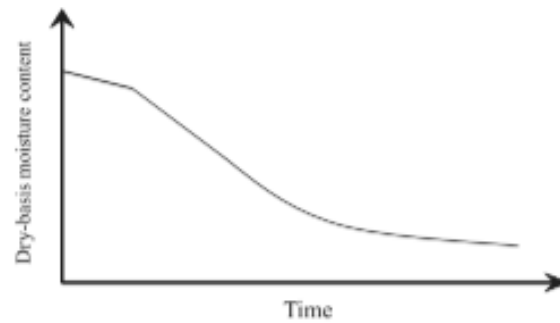
4.2 ANÁLISE EM TERMOS DE ENERGIA CINÉTICA

Para níveis industriais a análise em termos de energia cinética deve ser feita uma vez que determina as dimensões do secador, o que afeta diretamente os custos de aquisição e de operação, além de alterar a qualidade do produto que está sendo seco.

O elemento fundamental para uma análise cinética é uma curva de secagem, que descreve como varia a energia do material durante a secagem e como ela muda durante o processo. A curva é afetada pelo material e as condições de secagem.

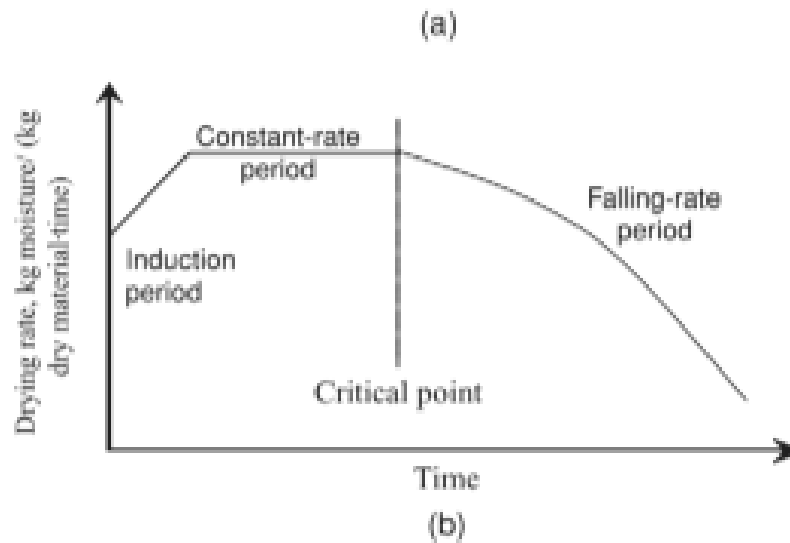
Abaixo as figuras 15 e 16 mostram dois exemplos de curvas de secagem.

Figura 15- Curva de secagem (umidade x tempo)



Fonte: : Cárdenas et al., 1994

Figura 16- Curva de secagem (taxa de secagem x tempo)



Fonte: : Cárdenas et al.,1994

4.3 DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA CALDEIRA

Como já visto, o uso do gás proveniente da caldeira para reduzir a umidade da cana de açúcar tem o potencial de reduzir as temperaturas dos gases de escape da chaminé das usinas e em termos de eficiência seria o equivalente a adicionar um

acumulador no sistema. Porém, apesar da elevação em eficiência energética, a instalação de um acumulador possui menor custo inicial, e requerer menos manutenções (Maranhão,1986) afirma que o custo de instalação de um secador de cana de açúcar representa 12% do custo de instalação de uma caldeira com temperaturas de escape entre 135 e 140°C, enquanto um acumulador representa 8% do custo para temperaturas de gases de escape de 150°C. Além do fato de um economizador custar em torno de 60% do preço de um secador de bagaço de cana de açúcar.

Um protótipo instalado na usina de Nunorco, Argentina, mostrou que o desvio de 50% dos gases de escape para o secador, promoveram uma eficiência de 84,9% da caldeira, contra a performance de 71.4% quando não existe o desvio. Boa parte do aumento da eficiência foi proveniente de redução das perdas na chaminé(Cárdenas et al.,1994).

A redução da umidade do bagaço tem efeito substancial no aumento da eficiência energética de usinas através do aumento da eficiência da caldeira para um limite de até 44% de umidade de bagaço. Nestes níveis é possível aumentar a capacidade da caldeira entre 5 e 8% (Rao, 2002).

De forma geral, a eficiência da caldeira pode ser avaliada através da equação 13:

$$\eta = mvp * \frac{\dot{h}_v - h_a}{mcomb * H} \quad (13)$$

Onde:

mvp= Massa de vapor produzido

mcomb= massa de combustível utilizado para queima

ha= entalpia padrão para água de resfriamento

hv=entalpia padrão para vapor produzido (ver tabela 9)

Tabela 9- Valores para Hv.

Moisture in air loss	0.13
Moisture in gas loss	22.90
Dry gas loss	4.82
CO loss	0.11
Unburned carbon loss	2.51
Radiation loss	0.47
Unaccounted losses	1.00
Total losses	31.94
Efficiency on GCV	68.06
Notes:	
1. Bagasse at 52 % moisture, 2 % ash.	
2. Exhaust gas temperature 160 °C.	
3. Load on coal 80 % of load on other fuels.	

Fonte: Rein, 2007

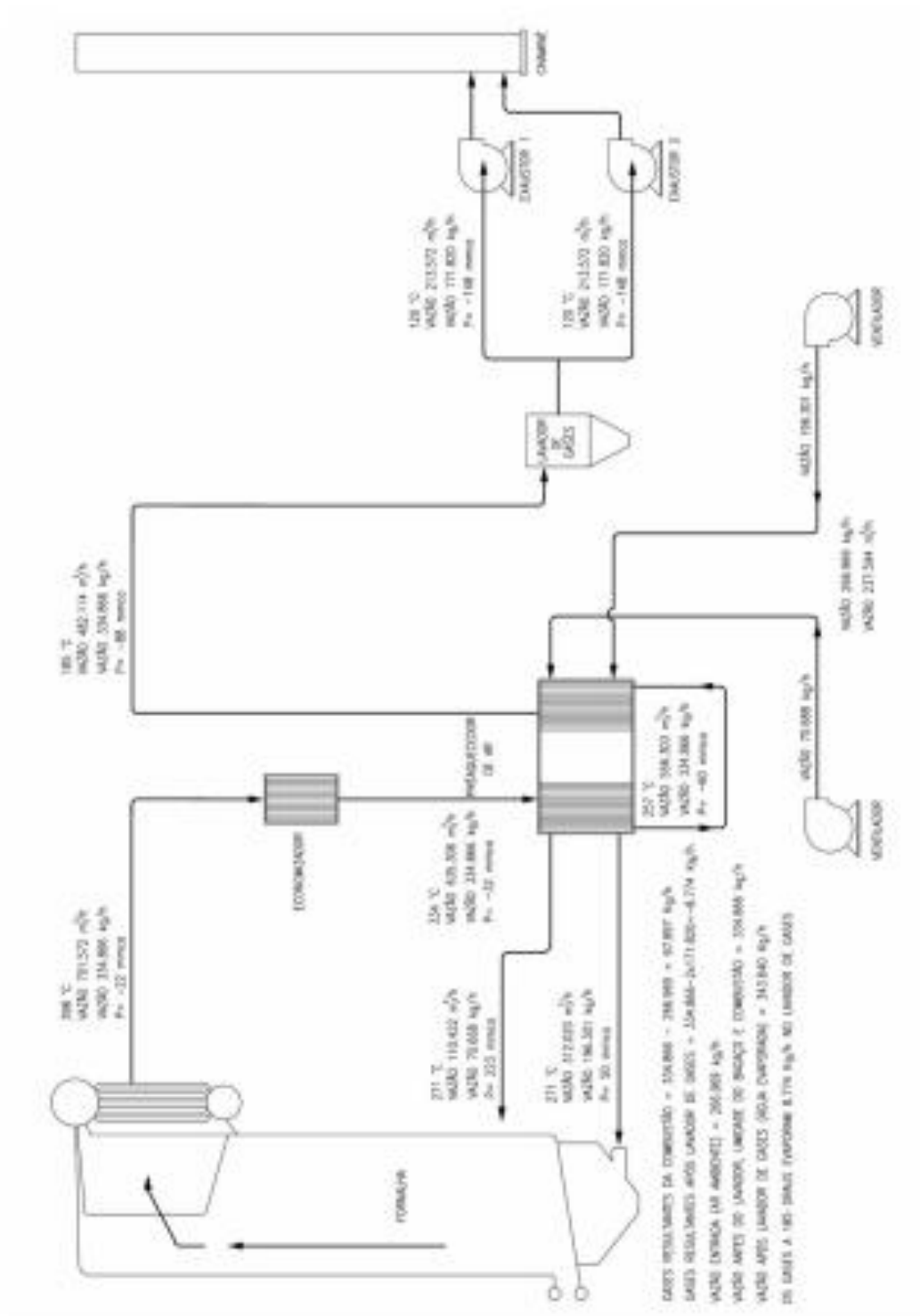
Tabela 10- Valores médios de valor calorífico, taxa de extração, eficiência de caldeira e turbina e fator de utilização.

Values	1	2	3	4	5	6	7	Average values
Calorific value (MJ kg ⁻¹)	14.31	13.79	14.07	13.84	13.79	14.95	14.95	14.26
Extraction rate	0.23	0.20	0.16	0.18	0.21	0.14	0.20	0.188
Boiler efficiency (%)	81	73.2	83.4	61.4	70.0	65.3	77.0	73
Turbine efficiency (%)	83.7	85.7	90	53.0	44.6	65.5	57.4	68.5
Utilization factor	72	65	71.7	55	77	54	65	65.6
Heat/power ratio	16.6	12.9	17.2	21	19.6	17.2	20.8	17.9
Rate of steam consumption kg (kWh ⁻¹)	28.5	22.2	30	28.6	23.3	37.5	27.5	28.2
Increase in power (condensing) (%)	65.9	60	67.7	61.1	51.6	60.4	59.2	60.8
Electrical energy/tonn of FFB	60	17.4	24.0	34.9	33.5	37.9	3.87	30.2

Fonte: Shapiro, 1987

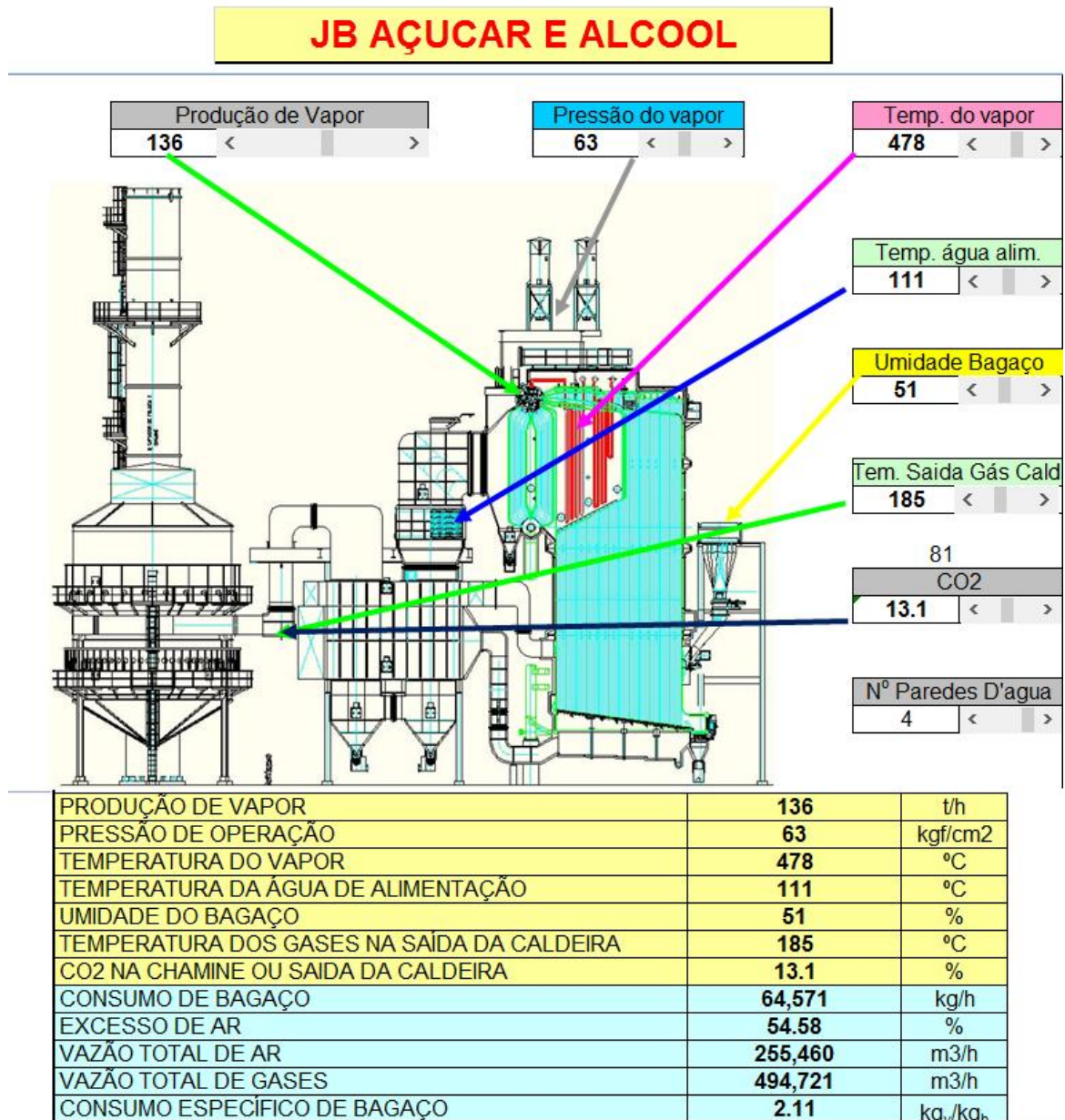
Para melhor entendimento e visualização do processo onde a caldeira se encontra observe o fluxograma a seguir (figura 17) que demonstra a caldeira da Usina do grupo JB.

Figura 17 - Fluxograma da caldeira da Usina JB com bagaço com 51% de umidade



Fonte: A autora

Figura 18 - Resumo dados caldeira



Fonte: A autora

Na figura 18, acima podem ser vistos os parâmetros da caldeira encontrada na Usina Alcoolquímica do Grupo JB, que serviu como base para este trabalho.

4.4 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL PÓS SECAGEM

A operação de secagem pode ter uma grande influência na qualidade e performance do produto final. Para fins desse estudo, é necessário que o bagaço da

cana - de -açúcar ainda seja funcional, uma vez que este será usado para a geração de energia. Caso os índices de umidade sejam reduzidos drasticamente a valores muito baixos, o bagaço resultante não retém muita funcionalidade para a geração de energia nas usinas. Outro ponto a considerar é o tamanho das partículas, pois uma melhor uniformidade de tamanhos é necessária, não devem se formar pós ou aglomerados.

A operação de secagem pode vir a alterar outras propriedades do material como densidade, flotabilidade, cor, solubilidade, absorção, tensão superficial, dentre outros. Contudo, estas alterações fogem do escopo deste trabalho pois não afetam a qualidade do bagaço de cana para a produção de energia.

4.5 TIPO DE SECADOR UTILIZADO

Dentre todos os secadores existentes, foi escolhido o do tipo transportador perfurado para a análise. Outros tipos podem ser utilizados para a secagem do bagaço de cana de açúcar, como o ciclônico e o pneumático.

Concebido originalmente como um reator químico para misturas heterogêneas, decidiu-se pelo uso deste secador devido as suas vantagens como a não existência de partes móveis, a troca de calor e massa entre os gases e o bagaço é feita de forma rápida e a altas taxas de transferência e ainda promove condições homogêneas da mistura levando a controle considerável do processo de secagem.

Um parâmetro importante neste tipo de secador é a velocidade do gás, referida como velocidade superficial do gás ou velocidade do fluido. Essa velocidade tem protagonismo no processo, uma vez que o campo do fluxo de ar será perturbado pela passagem do bagaço da cana o que gera flutuações e a criação de interface sólido-gás.

O secador do tipo transportador perfurado consiste numa camada de partículas suspensas por uma faixa perfurada ou uma tela por onde percorre o vapor. Se a velocidade do gás for baixa, o gás irá passar pela camada de partículas de bagaço que aparentarão estarem fixas. Para altas velocidades, as partículas começariam a se mover segundo forças aerodinâmicas e a partir do ponto que a pressão caísse a níveis equivalentes ao peso por metro quadrado, as partículas tenderiam a se mover em

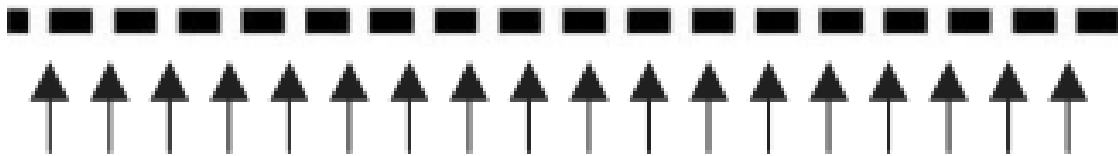
suspensão também conhecido como estado de fluido incipiente. Neste ponto a camada de bagaço se comporta como um líquido e seu volume expande consideravelmente. A velocidades ainda maiores a movimentação da camada de fluido seria ainda maior e o excesso de gás evidenciaria a formação de bolhas, além disso o bagaço seria submetido a intensos movimentos.

O design da camada do transportador é também importante por diversas razões. O prato é responsável pela distribuição do gás, o que requer uma distribuição homogênea dos orifícios do transportador e uma pressão suficiente sobre a camada de bagaço. De forma geral, temos a equação 14 abaixo:

$$\Delta P_{camada} = \frac{\Delta P_{bagaço}}{2} \quad (14)$$

Sendo o limite mínimo para ΔP_{camada} de 500 Pa e o máximo de 2500 Pa.

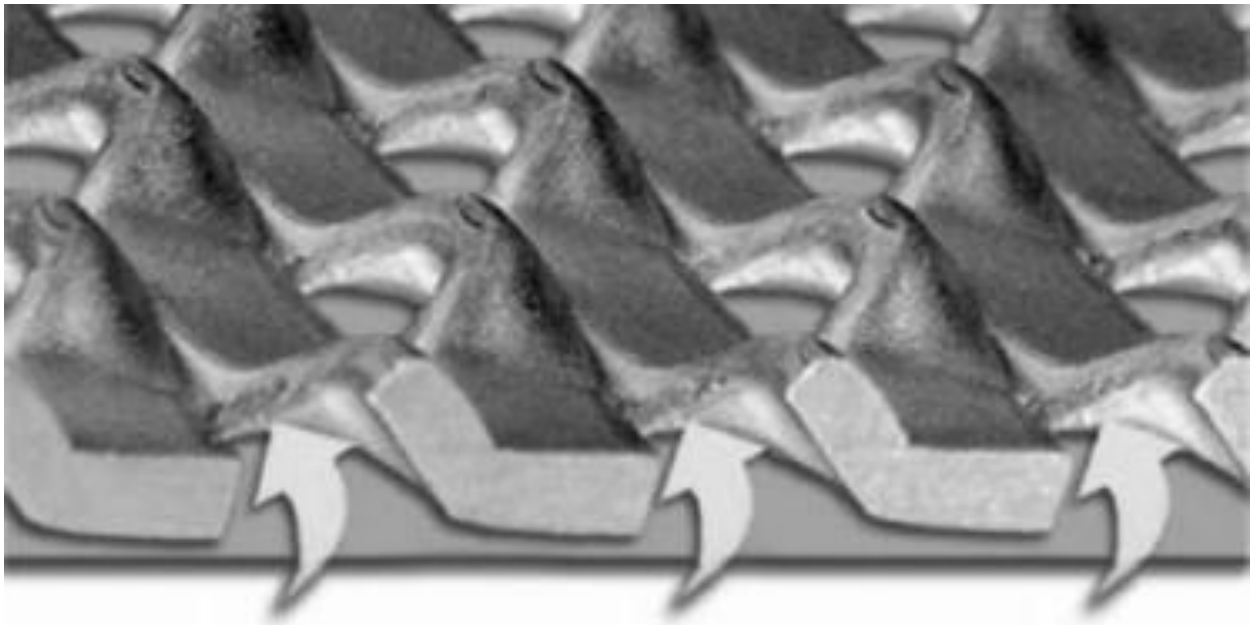
Figura 19- Diagrama formato tradicional do secador



Fonte: A autora

A figura 19 acima mostra o formato tradicional onde a camada por onde o bagaço fica acomodado é perfurada por orifícios cilíndricos perpendiculares ao plano da camada. Contudo, este tipo de diagramação tem sido substituído por outras como a mostrada na figura 20 abaixo.

Figura 20- Placa do tipo Conidur



Fonte: SOSA-ARNAO, J. H.; NEBRA, S. A., 2009

A placa do tipo mostrado acima(figura 20) tem um formato específico de orifício que cria uma fluxo de ar que auxilia na passagem do bagaço e influencia na manutenção do contato entre o ar e o bagaço. As perfurações tem aproximadamente 100 μ m em camadas de aproximadamente 0.7mm . Com orifícios tão pequenos é possível a obtenção em 1m² de aproximadamente milhares de minúsculos orifícios.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DO BAGAÇO

O primeiro ponto de análise é o de caracterização da porcentagem de umidade do bagaço da cana de açúcar. Para esta determinação de umidade foi executada a seguinte metodologia: amostras de 100g de bagaço úmido foram expostas a temperatura em torno de 105°C por 1 minuto, pesadas e mais uma vez expostas ao calor por dois minutos, pesadas novamente e expostas uma terceira vez aos vapores quentes e finalmente pesadas. Os dados obtidos podem ser vistos na tabela 11 abaixo:

Tabela 11- Perda de umidade do bagaço [%] - 5° Terno de moenda (100 g)

		Testes				
Amostras	Tempo	T1	T2	T3	T4	T5
Análise 1	1 min	49.84	49.66	49.95	50.17	49.55
Análise 2	2 min	48.79	48.73	48.6	48.56	48.25
Análise 3	3 min	46.24	46.94	46.81	47.29	47.17
Umidade inicial do bagaço [%]		52.06	51.87	51.88	52.24	51.38

Fonte: A autora

A observação dos dados da tabela 11, permite a inferência que a umidade média do bagaço de cana de açúcar da Usina Alcoolquímica do Grupo JB gira em torno de 51%, como já era esperado. Valores ótimos de umidade giram em torno de 48%, valores abaixo desse fazem com que fatores além da umidade passem a influenciar o desempenho excelente da caldeira. Sendo assim, pretende-se reduzir em até 4 pontos percentuais a taxa de umidade do bagaço de cana de açúcar através de sua passagem pelo secador.

5.2 DIMENSIONAMENTO DO SECADOR DE BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR

A análise considerou a realidade da Usina Alcoolquímica do Grupo JB. Dessa forma, o secador foi implementado no duto de exaustão da caldeira com a existência de apenas 01 colchão de bagaço com espessura de 0.6m . A vazão adotada para os

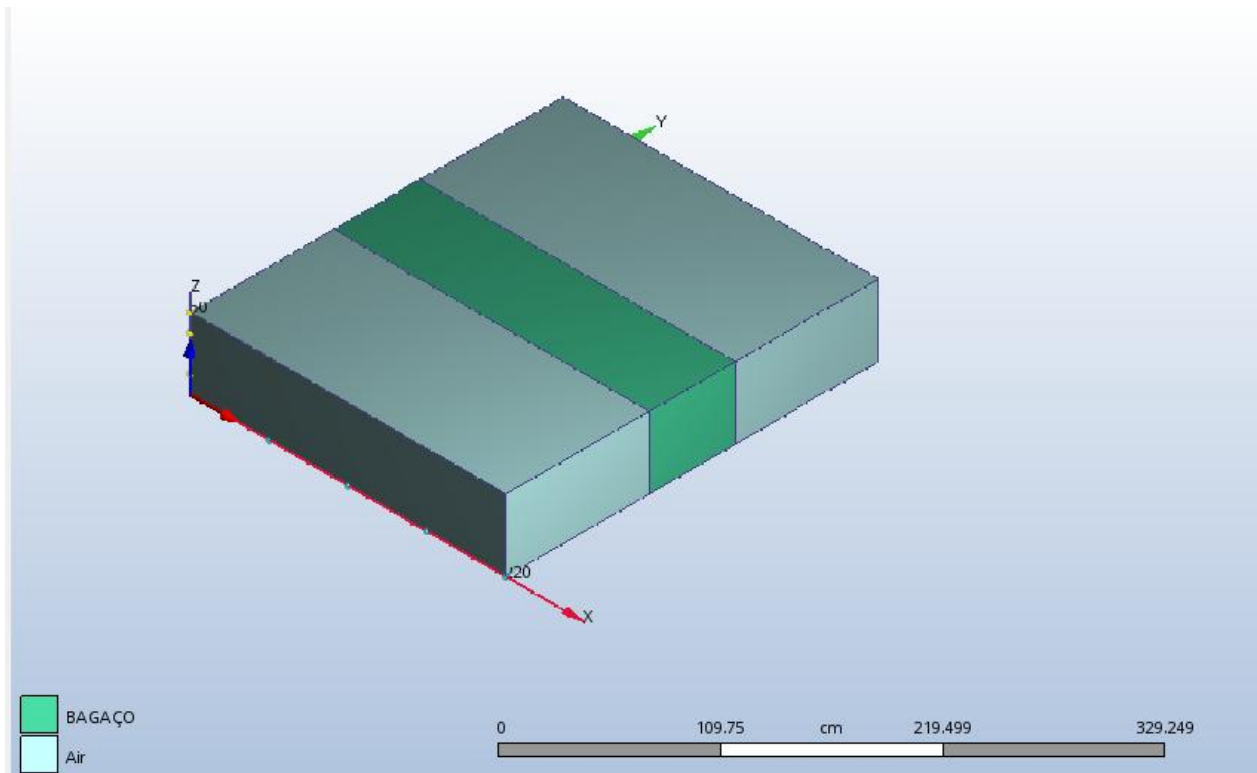
gases de exaustão foi de 40.000 m³/h (11,11 m³/ min) - determinada pelo exaustor a ser instalado na caldeira - com gases de escape a temperatura de 185°C cuja velocidade de passagem pelo secador é de 10 m/s, essa velocidade é controlada exclusivamente pelos reguladores de pressão da caldeira.

Sabendo que:

$$Q = \frac{V}{A} \quad (15)$$

E que possuímos uma vazão de 11,11 m³/s e uma velocidade de 10m/s. Pode-se inferir que o duto de exaustão dos gases, onde o secador do bagaço será instalado, deverá ter uma área de seção transversal de 1,1 m². Abaixo, pode-se ver uma visão esquemática do duto que possui 2,0 m de comprimento e 0,5 m de altura.

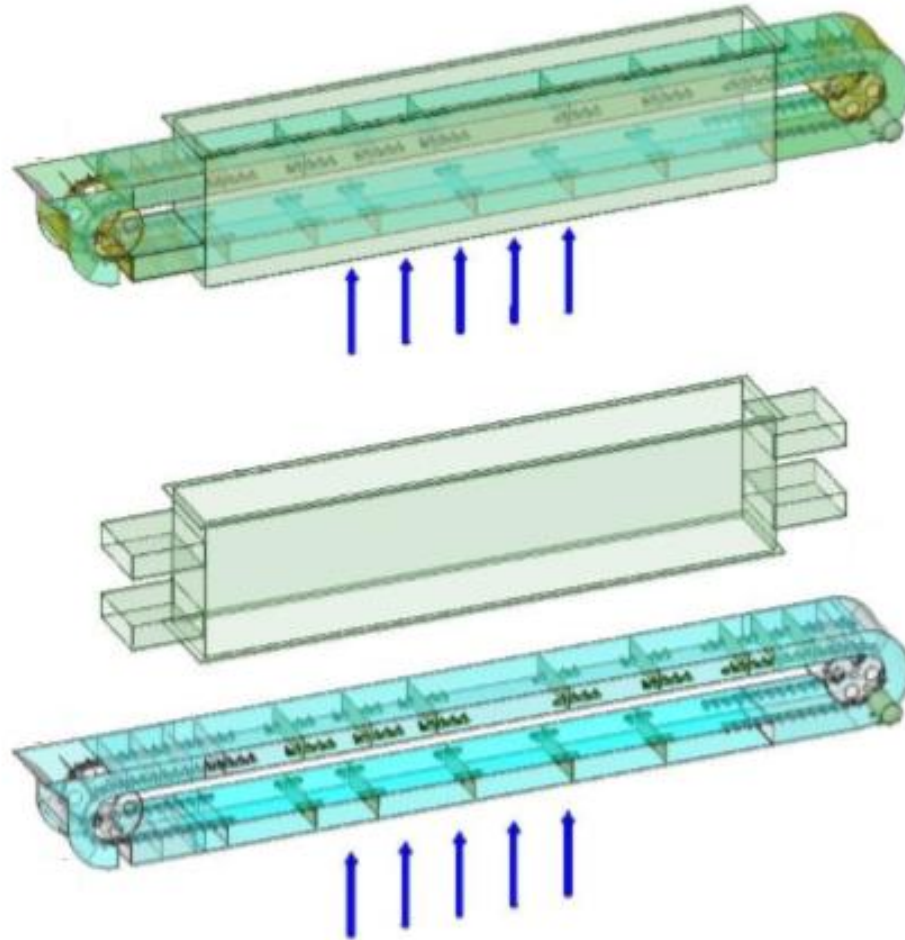
Figura 21 - Esquema do duto.



Fonte: A autora

Como explicitado na figura 21 acima , o duto é retangular, possui uma camada de 1,0 m de bagaço com porosidade de 70% O colchão de bagaço fica situado onde será futuramente implementada a esteira do secador pode ser observado conforme figura 22 abaixo.

Figura 22- Desenho esquemático do secador



Fonte: Ramires Nogueira, 2018

5.3 SIMULAÇÃO COM O SECADOR DE BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR

O modelo de secador foi simulado utilizando o software CFD com o objetivo de determinar o espectro de temperaturas atingidas pelo bagaço durante a passagem dos vapores a alta temperatura. Para tal utilizou-se os seguintes parâmetros como visto na tabela 12:

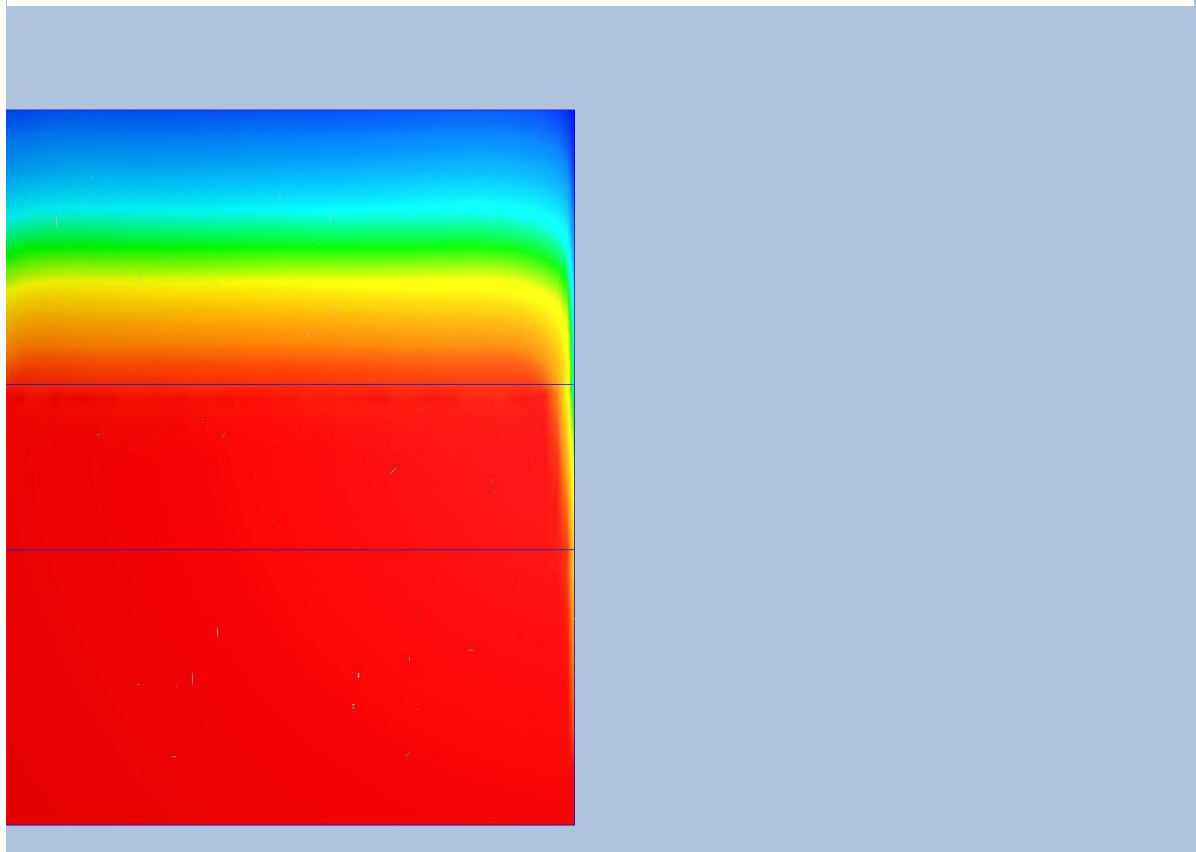
Tabela 12 - Parâmetros para simulação CFD

Parâmetros para simulação - secador de bagaço	
Tamanho elemento de malha (m)	0.0075
Tempo de execução (s)	0.25
Step time (s)	0.002
Temperatura inicial dos gases de escape (°C)	185
Umidade do bagaço de cana-de-açúcar (%)	51
Temperatura inicial do bagaço (°C)	27
Iterações	10

Fonte: A autora

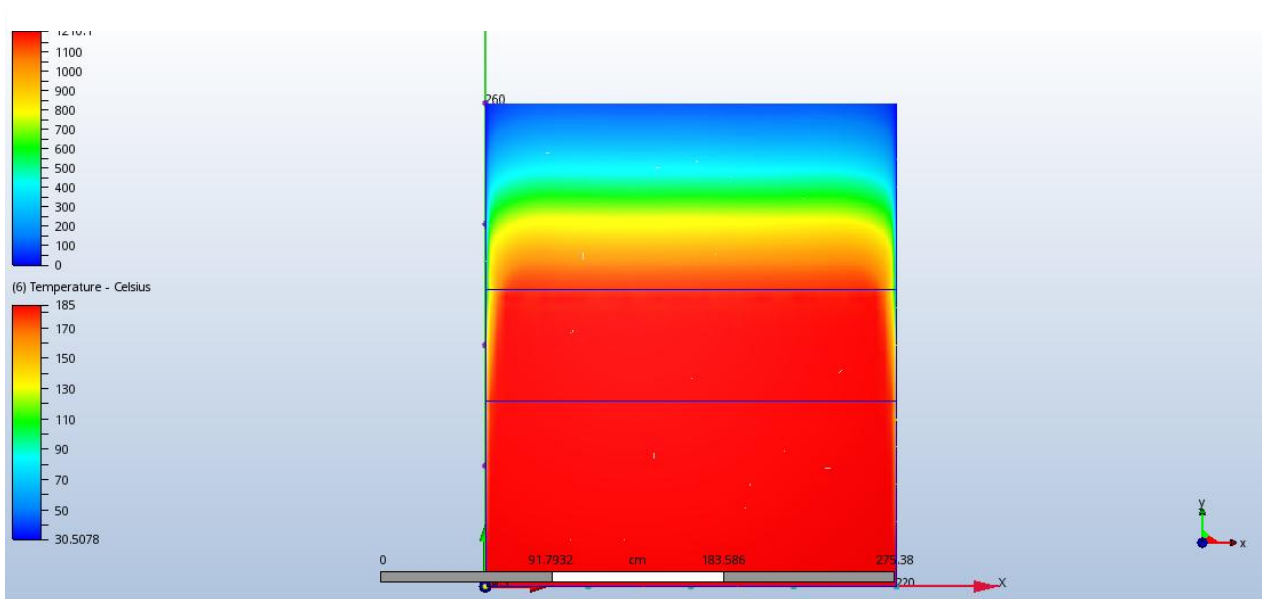
Os resultados da simulação com os parâmetros explicitados podem ser vistos nas figuras 23 e 24 abaixo, bem como no gráfico 1 a seguir:

Figura 23 - Detalhe do espectro de temperaturas no duto de secagem



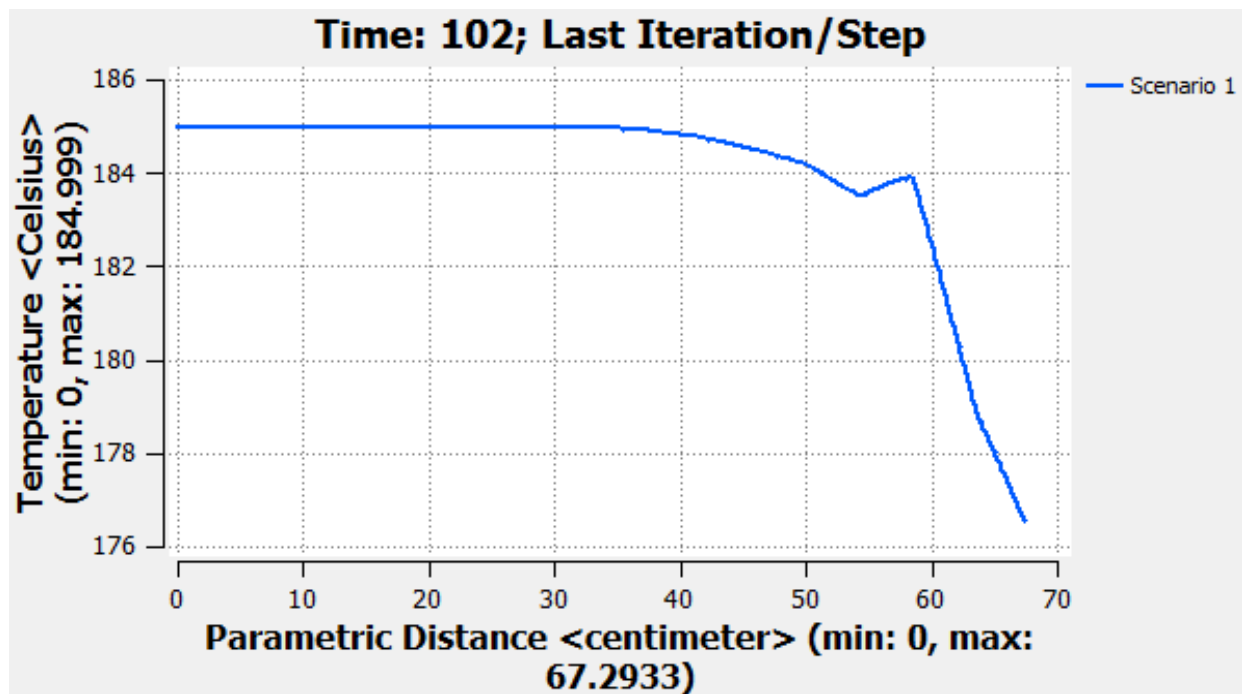
Fonte: A aautora

Figura 24 - Variação da temperatura através da passagem dos gases de exaustão



Fonte: A autora

Gráfico 1 Temperatura x Distância



Fonte: Elaborado pela autora

É interessante perceber que o pico de temperatura visto no gráfico 1 que ocorre no final da simulação ocorre devido a falta de uniformidade do bagaço, bem como a alta influencia que este sofre da temperatura externa, visto que o pico ocorre próximo a superfície da camada de bagaço que ainda não sofreu contato com os gases de exaustão da caldeira.

5.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise do gráfico 1, bem como da figura 20 leva a percepção de que é possível uma redução de temperatura de 3°C, no qual os gases de escape passantes por intermédio do bagaço de cana de açúcar passaram de patamares de 185°C de temperatura para patamares de 182° C ao final da passagem dos 60 cm de colchão de bagaço. Resultado consoante ao esperado mediante o tempo de exposição e velocidade dos gases de exaustão.

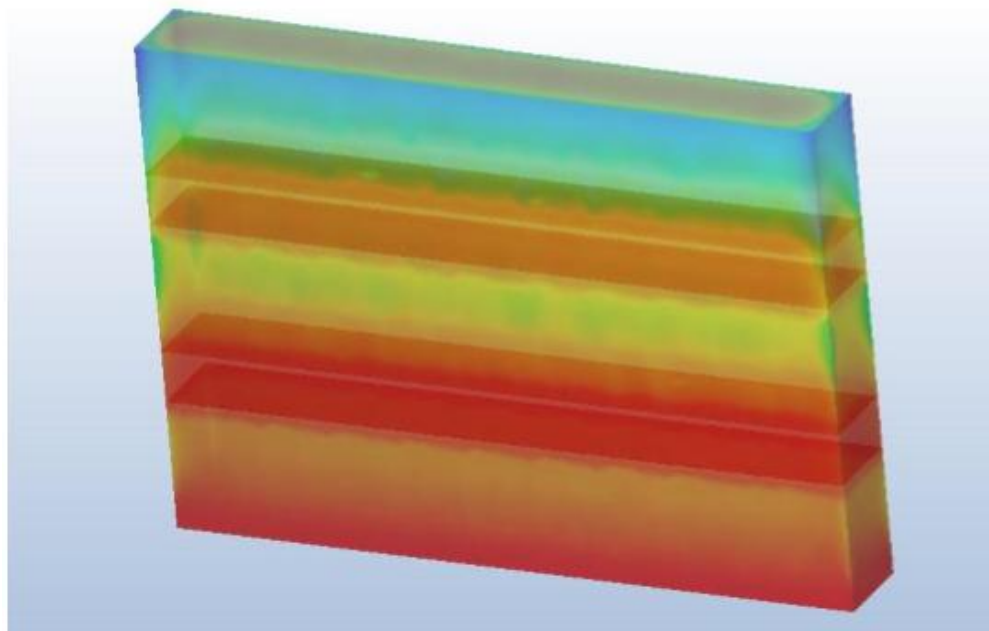
A passagem dos gases de escape a altas temperaturas pelo colchão de bagaço acarreta no aquecimento da água contida no bagaço de cana-de-açúcar que estava inicialmente à temperatura ambiente. Este aquecimento do bagaço da cana-de-açúcar por consequencia leva ao desprendimento de partículas de água que são arrastadas pelo fluxo de gás à alta temperatura. Pode-se assim dizer que houve redução da umidade do bagaço da cana de açúcar, em patamares de 3%, uma vez que a redução de umidade é diretamente proporcional a redução de temperatura dos gases de escape.

A caldeira da usina do Grupo JB ao qual o estudo foi aplicado possui uma capacidade de 150ton/h de vapor a uma pressão de 5,2 MPa (63kgf/cm²) e 485°C. Possui ainda temperatura média da fornalha de 910°C e são frequentes as intervenções para reduzir a temperatura do vapor na saída do superaquecedor que ultrapassa a temperatura e pressão recomendadas pelos fabricantes das turbinas. Dessa forma, a utilização do secador de bagaço atua como um auxílio à redução da temperatura de vapor na saída do superaquecedor.

Um ponto a se observar é o de que apesar da elevada eficiência do secador nos moldes projetados, não seria benéfico à Usina uma redução ainda maior das temperaturas dos gases, com consequente maior redução da umidade do bagaço. Em primeiro lugar, a utilização de bagaço com a umidade abaixo de 47% pode resultar num maior acúmulo de resíduos na grelha da caldeira e aumentar o acúmulo de detritos nas superfícies de aquecimento (MAGASINER, 1987). Um segundo ponto tange o fato de que a caldeira viria a trabalhar fora das especificações de projeto, com isso poderia-se ter danos materiais nas tubulações e na própria caldeira. Por fim, sabe-se que a redução da umidade do bagaço gera aumento do poder calorífico desta biomassa, contudo, aumenta-se de forma não linear o consumo de biomassa para geração de eletricidade, dessa forma uma redução ainda maior de umidade não seria benéfica ao grupo JB.

Existem outros estudos para a implementação na Usina do Grupo JB de um secador de bagaço de duplo colchão de bagaço. No entanto seus resultados e análises fogem ao escopo do presente trabalho. Abaixo pode-se observar uma simulação de tal secador.

Figura 25 - Simulação do secador com dois colchões de biomassa



Apesar do evidente ganho percentual de rendimento para a geração de energia da usina do Grupo JB, torna-se necessário mensurar em números os benefícios ganhos. Para isso, segue o seguinte raciocínio:

Sabe-se que a usina possui uma média anual de trituração de 1.000.000 toneladas de cana-de-açúcar. Desse montante um percentual em torno de 27,8% torna-se bagaço de cana seco, o que gera em torno de 278.400 toneladas de bagaço seco. Contudo, na realidade da usina não é possível alcançar bagaço seco e sim, bagaço de cana de açúcar com 51% de umidade, sendo assim tem-se 558.800 kg de bagaço úmido.

Tomando como referência os dados da Tabela 7 - *Consumo de bagaço dado pelo fabricante da caldeira* -, sabemos que para o bagaço de cana com umidade em patamares de 51% será necessário o consumo de em média 67.905 kg bagaço/hora e que cada quilograma de bagaço gera 2,21 kilogramas de vapor. Sendo assim, tem-se um potencial de geração de energia de 315.984 MW anuais.

Com os patamares de redução de umidade, pode-se chegar em torno 47% de umidade para o bagaço de cana de açúcar. Para esses valores de umidade geram-se 2,41 kg de vapor para cada quilograma de bagaço queimado e, assim, tem-se um potencial de 328.762 MW.

Conclui-se portanto que a implementação do secador de bagaço nos moldes definidos anteriormente tem o potencial de aumento de 4% na geração de energia em relação ao bagaço com umidade em 51%. Observa-se ainda um acréscimo anual de 12.788 MW anuais, um incremento considerável para a usina.

Um ponto a se recordar acerca da implementação do secador do tipo esteira perfurada é que este por se utilizar dos gases de escape da própria caldeira não gera gastos excedentes à usina, além dos gastos de implementação do mesmo. Sendo assim, o incremento de 12.788 MW anuais é gerado sem nenhum despendimento energético para a usina, o que é de grande valia.

6 CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugestiona-se:

- Avaliar de forma clara a interação entre PCI e PCS com a quantidade de bagaço utilizado na geração de energia.
- Avaliar a implementação de outros tipos de secadores na Usina.
- Explorar a possibilidade de implementação do secador de bagaço em outro local senão o duto de exaustão da caldeira.

7 CONCLUSÃO

Os resultados dos experimentos executados foram essenciais no processo de definição e desenvolvimento do secador projetado uma vez que pretendeu-se maximizar o aproveitamento do gases de exaustão. As análises dos modelos permitiram a avaliação do fluxo do ar, gradiente de temperatura, pressão, parâmetros essenciais para tomadas de decisão e obtenção dos indicativos das melhores soluções a adotar.

O objetivo de otimização do processo de secagem do bagaço de cana foi alcançado, bem como os objetivos de obtenção de parâmetros ótimos de espessura de cama de bagaço, tempo de exposição aos gases e dimensões do duto, além da possibilidade de quantificação numérica dos benefícios para a Usina Alcoolquímica do Grupo JB da redução da umidade do bagaço da cana de açúcar foram alcançados. Sendo assim considera-se um rendimento excelente do projeto

No âmbito acadêmico o presente trabalho se mostrou como de extrema importância para entendimento de conceitos corriqueiros do amplo universo da Engenharia Mecânica, além da extensa aplicação de softwares de dimensionamento de fluidos e como estes se inserem nas realidades das usinas e indústrias da região.

REFERÊNCIAS

Acosta J.C. (1995), The boiler efficiency fuelled by bagasse, International Sugar Journal, 97 (1158): 248-255

Arrascaeta, A., Friedman, P. (1987), Bagasse drying, International Sugar Journal, 89 (1060): 68-71.

Barbosa, R.D. (1992), Sugar cane bagasse drying in a pneumatic system. MSc .D. Diss., State University of Campinas

Bridgwater AV, Toft AJ, Brammer JG. A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion. Renew Sust Energy Rev 2002;6:181–246.

Cárdenas, G., Paz, D., Wittwer, E. (1994), Energy and Exergy analysis of a combined bagasse dryer-boiler system, International Sugar Journal, 96 (1146): 213-219.

Ghosh D, Shukla PR, Garg A, Venkata Ramana P. Renewable energy technologies for the Indian power sector: mitigation potential and operational strategies. Renew Sust Energy Rev 2002;6:481–512.

KILICASLAN, I. et al. Sugar cane as na alternative energy source for Turkey. Energy Conversion and Management, England, v. 40, n. 1,p. 1-11, Jan. 1999.

Massarani, G., Valença, G.C. (1981), Sugar cane bagasse drying, Proceedings of the 3rd National drying meeting, pp. 355

Meirelles, A.J.A. (1984), Cane bagasse drying in a fluidized bed. Msc .D. Diss., State University of Campinas

Morgenroth, B., Batstone, D. (2005), Development and prospects for drying bagasse by steam, International Sugar Journal, 107 (1279): 410 – 415.

Nebra, S.A. (1985), Pneumatic drying of cane bagasse, Ph.D. Thesis, State University of Campinas

NETAFIM – Disponível em:

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

Omer AM. Biomass energy potential and future prospect in Sudan. *Renew Sust Energy Rev* 2005;9:1–27.

Rein,P.. Cane Sugar Engineering. Berlim.: Bartens, 2007

R. Layi Fagbenle a,*, A.B.C. Oguaka b, O.T. Olakoyejo c A thermodynamic analysis of a biogas-fired integrated gasification steam injected gas turbine (BIG/STIG) plant, *Applied Thermal Engineering* 27 (2007) 2220–2225

Sánchez, P.M.G., Carril, T.P., Nebra, S.A. (2001), Analysis of exergetic cost of Steam Generation System of a Cruz Alta Sugar Mill, XVI Brazilian Congress of Mechanical Engineering, November 26-30, Uberlândia, MG, Brazil, pp 196-205.

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.

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

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

Z.Husain*,Z.A.Zainal,M.Z.Abdullah., Analysis of biomass-residue-based cogeneration system in palm oil mills.2002. School of Mechanical Engineering, Engineering Campus, University Science Malaysia,