



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA**

FRANCISCO ESPEDITO DE LIMA

**OTIMIZAÇÃO DO USO DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA
PRODUÇÃO DE ENERGIA**

Recife

2014

FRANCISCO ESPEDITO DE LIMA

**OTIMIZAÇÃO DO USO DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA
PRODUÇÃO DE ENERGIA**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Doutor, defendida em 23 de maio de 2014.

Área de concentração: Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos

Linha de Pesquisa: Processos Químicos Industriais

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Lucena

Recife

2014

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

L732o Lima, Francisco Espedito de.
Otimização do uso de bagaço de cana-de-açúcar para produção de energia / Francisco Espedito de Lima. – 2014.
111 folhas, figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Lucena.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2014.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Química. 2. Bagaço de cana-de-açúcar. 3. Secador. 4. Vapor. 5. Cogeração de energia. I. Lucena, Sérgio. (Orientador). II. Título.

UFPE

660.2 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-417

FRANCISCO ESPEDITO DE LIMA

**OTIMIZAÇÃO DO USO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA
PRODUÇÃO DE ENERGIA**

**Área de concentração: Engenharia de Processos Químicos e
Bioquímicos**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, defendida e aprovada em 23 de maio de 2014 pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Sérgio Lucena - UFPE
Orientador

Prof. Dr. Nelson Medeiros de Lima Filho - UFPE

Prof. Dr. José Claudino de Lira Júnior - UFPE

Profª Dra. Andréa Galindo Carneiro Rosal - UFRPE

Profª Dra. Solange Maria de Vasconcelos - UFPB

Àquele que se fez luz pelos

que habitavam nas sombras:

Monsenhor Ademar da Mota Valença.

AGRADECIMENTOS

A Deus, Ele é tudo em nossas vidas.

Àqueles que me proporcionaram a oportunidade de aqui estar e me orientaram nos caminhos da vida.

Ao professor Sérgio Lucena e todos os que fizeram parte do meu aprendizado.

Aos colegas de doutorado pela convivência sempre solidária. Grato a todos.

A Companhia Nacional Alcoolquímica Nacional pelo fundamental apoio a esses estudos e pesquisas, principalmente ao Dr. Antonio Gonçalo, lhe serei sempre grato.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFPE e à CAPES pela bolsa concedida.

Um agradecimento especial a Flávio Garret, secretário da Pós-Graduação do DEQ.

O cheiro do mel, o cheiro da terra molhada,
a chuva, o sol, os lagartos, as cheias do rio..

(REGO, 2012)

RESUMO

A crescente demanda mundial por energia proveniente de fontes renováveis em função das expectativas de redução das reservas dos combustíveis fósseis e a preocupação com a preservação do meio ambiente têm levado pesquisadores em todo mundo a buscar soluções economicamente viáveis através da utilização de fontes renováveis para produção de combustíveis e geração de energia elétrica, principalmente provenientes da biomassa vegetal. Com essa visão, muitas pesquisas foram e ainda são realizadas com centenas de trabalhos publicados com um número significativo de protótipos construídos e muitos destes fabricados em escala industrial. Cabe destacar as pesquisas realizadas para produção de etanol de segunda geração utilizando o bagaço e geração de energia em turbinas a vapor. O Brasil se destaca no aproveitamento da biomassa lignocelulósica e por ser o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. Devido a esse potencial energético, dezenas de trabalhos publicados têm como foco a redução da umidade do bagaço da cana-de-açúcar para aumentar seu poder calorífico. Esse trabalho tem como meta reduzir em cinco pontos percentuais a umidade do bagaço em quantidade suficiente para alimentar a caldeira e tem como diferencial manter as características originais da caldeira e aproveitando os gases de exaustão já destinados ao lavador de gases e saída pela chaminé, a não utilização de fonte extra de energia e sem a aquisição de novos equipamentos. Os ensaios experimentais e construção de protótipos, bem como aquisição de dados, foram realizados na Companhia Nacional Alcoolquímica Nacional em uma unidade produtora de açúcar e etanol localizada na zona rural de Vitória de Santo Antão - PE, com média de trituração anual de 1.100.000 toneladas de cana. A redução prevista de cinco pontos percentuais na umidade do bagaço de cana-de-açúcar a uma razão de 67ton/h proporcionará aumento da eficiência da caldeira, aumento da temperatura de combustão, estabilidade na pressão e melhoria da qualidade do vapor.

Palavras-chave: Bagaço de cana-de-açúcar. Secador. Vapor. Cogeração de energia.

ABSTRACT

The increasing at the world demand for energy produced by renewable sources due to the expectation of the reduction of fossil fuels reserves and the concern for environmental preservation has made researchers worldwide seek for economically viable solutions for fuel production and power generation, mainly from biomass. Due to this view, many researches has been done and will be done producing hundreds of published works showing several built prototypes with some of them build in industrial scale. The works involving generation ethanol using sugar cane bagasse and power generation by steam turbines must be highlighted. Brazil stands out at the use of biomass and for being the world greatest sugar cane producer. The current work has as goal the reduction of five percentage points at the humidity of bagasse and has the original feature the maintenance of the original characteristics of the boiler, while using the gas from the chimney and not demanding any other external energy resources or new equipment acquisition. The assays, the building of the prototypes and data acquisition were performed at Companhia Nacional Alcoolquímica Nacional at a sugar and alcohol production facility, with a milling capacity of 1,100,000 tons of sugar cane, located at the rural zone of Vitória de Santo Antão – PE. The estimated reduction of five percentage points at the humidity of the bagasse will have as result the increasing of boiler efficiency, growing of combustion temperature, pressure stability and a better quality of the vapor.

KeyWords: Sugarcane bagasse. Dryer. Vapor. Energy cogeneration.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - | Caldeira na configuração atual em elevação..... | 24 |
| Figura 2 - | Fluxograma dos gases da caldeira atual..... | 25 |
| Figura 3 - | Secador pneumático instalado em Pernambuco..... | 31 |
| Figura 4 - | Laboratório de sacarose - Prensa para extração do caldo..... | 35 |
| Figura 5 - | Laboratório de Sacarose – Pesagem do bolo úmido..... | 35 |
| Figura 6 - | Laboratório – Estufa Spencer..... | 36 |
| Figura 7 - | Silos para experimentos de secagem com 100g e 200g de bagaço de bagaço úmido..... | 38 |
| Figura 8 - | Silo para secagem com espessura do colchão de bagaço 100 e 200mm..... | 39 |
| Figura 9 - | Caixa para experimento com gases de exaustão..... | 39 |
| Figura 10 - | Exaustor para extração de gases da caldeira..... | 40 |
| Figura 11 - | Montagem do experimento da caixa de secagem..... | 42 |
| Figura 12 - | Detalhe da fibra do bagaço-de-cana de açúcar..... | 48 |
| Figura 13 - | Balanço térmico e de massa (esquemático) – Condição atual..... | 50 |
| Figura 14 - | Fluxograma atual da caldeira com bagaçocom 51% de umidade..... | 53 |
| Figura 15 - | Fluxograma atual da caldeira na condição calculada..... | 54 |
| Figura 16 - | Esquema do balanço de massa e energia..... | 55 |
| Figura 17 - | Fluxograma atual da caldeira com bagaço com 46% de umidade..... | 56 |
| Figura 18 - | Fluxograma da caldeira queimando bagaço com 46% de umidade e secando bagaço com 54% de umidade..... | 57 |
| Figura 19 - | Silo Ø200mm 100g de bagaço e 0,0684m ³ /min de ar a 120°C..... | 60 |
| Figura 20 - | Silo Ø200mm 100g de bagaço e 0,1368m ³ /min de ar a 120°C..... | 61 |
| Figura 21 - | Silo Ø200mm 100g de bagaço e 0,0684m ³ /min de ar a 120°C..... | 61 |
| Figura 22 - | Silo Ø200mm 200g de bagaço e 0,1368m ³ /min de ar a 120°C..... | 61 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 23 - Silo Ø255mm com camada de 100mm de bagaço e 0,0684m ³ /min de ar a 120°C..... | 62 |
| Figura 24 - Silo Ø255mm com camada de 100mm de bagaço e 0,1368m ³ /min de ar a 120°C..... | 62 |
| Figura 25 - Silo Ø255mm com camada de 200mm de bagaço e 0,0684m ³ /min de ar a 120°C..... | 62 |
| Figura 26 - Silo Ø255mm com camada de 200mm de bagaço e 0,1368m ³ /min de ar a 120°C..... | 63 |
| Figura 27 - Caixa metálica para simulações com ar extraído da caldeira a 185°C e colchão de bagaço de 620mm..... | 65 |
| Figura 28 - Representação da velocidade no plano central..... | 65 |
| Figura 29 - Representação das zonas de pressão no plano central..... | 65 |
| Figura 30 - Gradiente de temperatura no plano entre os dutos verticais..... | 66 |
| Figura 31 - Gradiente de temperatura no centro de um dos dutos verticais..... | 66 |
| Figura 32 - Modelo esquemático do secador com dois colchões de bagaço..... | 67 |
| Figura 33 - Linearização da temperatura entre a base do colchão inferior e o topo do colchão superior, mostrando a diferença de temperatura..... | 78 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Composição do bagaço-de-cana de açúcar seco..... | 43 |
| Tabela 2 - Composição média do ar..... | 43 |
| Tabela 3 - Consumo de bagaço dado pelo fabricante da caldeira..... | 50 |
| Tabela 4- 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..... | 51 |
| Tabela 5 - 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 de redução de umidade em 5 pontos percentuais..... | 51 |
| Tabela 6 - Balanço de massa e energia com caldeira queimando bagaço com 46% de umidade e secando bagaço de entrada no secador com 54% de umidade – Secador com previsão de de redução de umidade em 5 pontos percentuais..... | 52 |
| Tabela 7 - Redução da umidade do bagaço de cana-de-açúcar por secagem por ar quente, vazão de 0,1368m ³ /min a 120°C..... | 59 |
| Tabela 8 - Redução de umidade em função da camada de 100mm de bagaço de cana-de-açúcar, vazão de 0,0684m ³ /min a 120°C..... | 59 |
| Tabela 9 - Redução de umidade em função da camada de 100mm de bagaço de cana-de-açúcar, vazão de 0,1368m ³ /min a 120°C..... | 59 |
| Tabela 10 - Redução da umidade em função da camada de 200mm de bagaço, vazão de 0,1368 m ³ /min..... | 60 |
| Tabela 11 - Comparativo entre ganho de PCI e PCS e aumento de consumo de bagaço seco..... | 73 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| ANFAVEA | Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores |
| BNDES | Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social |
| CAIG | Companhia Agroindustrial Goiana |
| CNA | Confederação nacional da Agricultura |
| CONAB | Companhia Nacional de Abastecimento |
| $F_{\text{água_liquida_sai}}$ | Umidade de saída do bagaço |
| $F_{\text{bagaço_seco}}$ | Bagaço seco |
| $F_{\text{bagaço_seco_entra}}$ | Massa de bagaço seco que entra no secador |
| $F_{\text{bagaço_seco_sai}}$ | Massa de bagaço seco que sai do secador |
| $F_{\text{evaporado}}$ | Água evaporada no secador |
| $G_{\text{água_liquida_entra}}$ | Umidade do bagaço na entrada |
| $G_{\text{ar_seco}}$ | Massa de ar seco |
| $G_{\text{ar_seco_entra}}$ | Massa de ar seco que entra no secador |
| $G_{\text{ar_seco_sai}}$ | Massa de ar seco que sai do secador |
| $G_{\text{evaporado}}$ | massa de água evaporada |
| $G_{\text{vapor_água_entra}}$ | Vapor d'água que entra no secador |
| $G_{\text{vapor_água_sai}}$ | Vapor d'água que sai do secador |
| m | Relação entre o ar utilizado na combustão em relação ao teórico |
| Pa | Massa de ar por unidade de massa de bagaço |
| PCI | Poder calorífico inferior |
| PCS | Poder calorífico superior |
| Pg | Massa de gases de combustão |
| Pgs | Massa de gases considerados secos |

| | |
|--------------------------|---------------------------------------------------------|
| <i>PROINFA</i> | Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia |
| <i>UFPE</i> | Universidade Federal de Pernambuco |
| <i>V_a</i> | Volume de ar por unidade de massa do bagaço |
| <i>V_g</i> | Massa de ar por unidade de massa de bagaço |
| <i>V_{gs}</i> | Volume de gases considerados secos |
| <i>w</i> | Umidade absoluta do bagaço, kg água/kg bagaço |
| <i>W_{entra}</i> | Umidade específica de entrada no secador |
| <i>W_{sai}</i> | Umidade específica que sai do secador |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 20 |
| 2.1 | CANA-DE AÇÚCAR NO BRASIL..... | 20 |
| 2.2 | PRODUÇÃO DE VAPOR E UTILIZAÇÃO..... | 21 |
| 2.3 | A CALDEIRA E SEU FUNCIONAMENTO..... | 22 |
| 2.4 | SECADORES DE BAGAÇO..... | 26 |
| 2.4.1 | Secadores de bagaço de cana-de-açúcar - tipos e características | 28 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 34 |
| 3.1 | METODOLOGIA..... | 34 |
| 3.2 | LABORATÓRIO DE SACAROSE..... | 35 |
| 3.3 | LABORATÓRIO DE ANÁLISES E CONTROLE..... | 36 |
| 3.3.1 | Poder calorífico do bagaço | 37 |
| 3.4 | MATERIAIS PARA EXPERIMENTOS | 37 |
| 3.5 | PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL..... | 40 |
| 3.5.1 | Experimentos de secagem com silo Ø200x200mm | 41 |
| 3.5.2 | Experimentos de secagem com silo Ø260x250mm | 41 |
| 3.5.3 | Experimentos com caixa metálica e gases extraídos da caldeira.. | 41 |
| 3.6 | COMBUSTÃO DO BAGAÇO..... | 43 |
| 3.6.1 | Combustão do hidrogênio e carbono presentes no bagaço | 44 |
| 3.6.1.1 | <i>Combustão do hidrogênio</i> | 45 |
| 3.6.1.2 | <i>Combustão do hidrogênio contido no bagaço da caldeira -consumo nominal</i> | 45 |

| | | |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.6.1.3 | <i>Combustão do carbono.....</i> | 45 |
| 3.6.1.4 | <i>Combustão do carbono contido no bagaço da caldeira – consumo nominal.....</i> | 45 |
| 3.6.1.5 | <i>Combustão do bagaço úmido com excesso de ar.....</i> | 45 |
| 3.6.1.6 | <i>Bagaço queimando sob condições de fornalha.....</i> | 46 |
| 3.6.2 | Microscopia eletrônica de varredura – fibra do bagaço..... | 48 |
| 3.7 | BALANÇOS DE MASSA E ENERGIA..... | 49 |
| 3.8 | BALANÇO DE MASSA E ENERGIA-BAGAÇO COM 46% UMIDADE | 55 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 58 |
| 4.1 | RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS E MEDIÇÕES..... | 58 |
| 4.1.1 | Medições de laboratório..... | 58 |
| 4.2 | SILOS COM SOPRADOR TÉRMICO E CAIXA METÁLICA..... | 58 |
| 4.2.1 | Experimentos de secagem com silo de Ø200x200mm..... | 59 |
| 4.2.2 | Experimentos de secagem com silo de Ø260x250..... | 59 |
| 4.2.3 | Experimentos de secagem com caixa metálica com gases de exaustão..... | 60 |
| 4.2.4 | Simulações com silo de Ø200x200 com soprador térmico..... | 60 |
| 4.2.5 | Simulações com silo de Ø260x250 com soprador térmico..... | 62 |
| 4.2.6 | Silo Ø200x200mm com 100 e 200g de bagaço..... | 63 |
| 4.2.6.1 | <i>Silo com 100g de bagaço e vazão de ar quente de 0,0684 e 0,1368m³/min.....</i> | 63 |
| 4.2.6.2 | <i>Silo com 200g de bagaço e vazão de ar quente de 0,0684 e 0,1368m³/min.....</i> | 63 |
| 4.2.7 | Silo com camadas de 100 e 200mm de bagaço..... | 64 |

| | | |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2.7.1 | <i>Silo com camada de 100mm e vazão de ar quente de 0,0684 e 0,1368m³/min.....</i> | 64 |
| 4.2.7.2 | <i>Silo com camada de 200mm e vazão de ar quente de 0,0684 e 0,1368m³/min.....</i> | 64 |
| 4.2.8 | Simulações da caixa metálica com gases de exaustão da caldeira a 185°C..... | 64 |
| 4.2.8.1 | <i>Simulações com gases de exaustão – resultados.....</i> | 66 |
| 4.2.9 | Simulação com secador posicionado no duto de exaustão da caldeira – resultados..... | 67 |
| 4.2.9.1 | <i>Simulações com o secador posicionado no duto de exaustão.....</i> | 68 |
| 4.2.10 | Considerações sobre os experimentos e simulações..... | 68 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 71 |
| 5.1 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 75 |
| | REFERÊNCIAS..... | 76 |
| | APÊNDICE A – PODER CALORÍFICO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR..... | 79 |
| | APÊNDICE B – COMBUSTÃO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR..... | 81 |
| | APÊNDICE C – BALANÇO DE MASSA E ENERGIA DA CALDEIRA | 86 |
| | APÊNDICE D – PROJETO ESQUEMÁTICO DO SECADOR DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR..... | 108 |

1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo faz uma introdução geral sobre os temas abordados nesta Tese. Destaca a importância da biomassa no mundo e da cana-de-açúcar no Brasil e sua posição no cenário mundial, dando ênfase à produção de energia através da queima do bagaço de cana-de-açúcar. Por fim, são apresentados os objetivos deste trabalho.

A produção de bioenergia como calor, energia elétrica e combustíveis líquidos representa 14% do suprimento primário de energia no mundo, sendo 25% utilizado em países desenvolvidos e 75% em países em desenvolvimento. Da biomassa vegetal do mundo, 40% está na América do Sul, e no Brasil está a maior parte desse potencial energético. (PARIKKA, 2003).

A economia mundial atual é dependente de energia proveniente de combustíveis fósseis, gás natural, carvão e petróleo, que são utilizados para a produção de eletricidade, combustíveis e outros bens. Neste caso, destaca-se o setor de transportes, que em todo o mundo é quase totalmente dependente de combustíveis derivados do petróleo. Esses fatores vêm levando a grandes expectativas com relação à diminuição das reservas de petróleo, aliadas às crescentes preocupações com a preservação ambiental, o que exige soluções tecnológicas para atender às necessidades de consumo. Assim, tem se verificado um interesse crescente nas biomassas, como fontes de matérias-primas para a produção de energias alternativas, uma vez que suas composições apresentam um elevado potencial tecnológico (VASCONCELOS, 2012).

O Brasil ocupa posição de liderança na produção de combustível e energia através do aproveitamento da biomassa, por ser um dos maiores produtores de matérias-primas renováveis do planeta, com destaque para a cultura de cana-de-açúcar, o qual se apresenta como maior produtor mundial, alcançando uma produção de 588,9 milhões de toneladas na safra de 2012/2013 (CONAB, 2013).

A cana-de-açúcar é uma planta pertencente ao gênero *Saccharum*, da família das gramíneas. É composta pelos colmos, nos quais se concentram a sacarose, e

pelas pontas e folhas, que constituem a palha da cana. No entanto, apenas a sacarose, que corresponde a aproximadamente um terço da biomassa da cana-de-açúcar, é utilizada para a produção de açúcar e etanol. Os outros dois terços representam o bagaço, subproduto obtido após o processo de moagem dos colmos para a extração do caldo rico em sacarose, e a palha. A quantidade de bagaço obtida por tonelada de cana após o desponte e extração da palha, varia de 240 a 280Kg de bagaço seco, dependendo das características da cana triturada. No caso específico da unidade estudada essa variação no peso do bagaço foi de 489 a 571 Kg com umidade de 51%, na unidade produtora estudada, em amostras de cana de diversas localidades, prensadas e secas em estufa, foi determinada uma média de 27,82% de bagaço da massa da cana despontada e sem palha. Média de 278,2 Kg de bagaço seco por tonelada de cana, que após processo de extração do caldo resulta em 568Kg de bagaço com 51% de umidade com densidade média de 184kg/m³, não prensado. Esses dados foram obtidos

Com média anual de 1.100.000 toneladas de cana trituradas, temos 306.020 toneladas de bagaço seco equivalente a 624.530 toneladas de bagaço com umidade de 51% ao ano.

No Brasil a partir da primeira década do século XXI a indústria sucroalcooleira foi incentivada pelo Governo Federal a investir na geração de energia elétrica para exportação como forma de aumentar a disponibilidade para um país em crescimento. Assim, com o propósito de aumentar a eficiência no aproveitamento da biomassa da cana-de-açúcar, este trabalho teve como principal objetivo reduzir a umidade para aumentar o poder calorífico do bagaço de cana através de secagem pelos gases de exaustão da caldeira utilizada na unidade produtora de açúcar e etanol, bem como avaliar o rendimento efetivo desses processos de secagem estudando alguns dos inúmeros trabalhos publicados nessa área (MOOR, 2007; MORGENROTH, 2005; SOSA-ARNAO, 2004; ERLICH, 2004; BACCI, 2008), entre outros.

Os estudos foram realizados dentro da unidade produtora de açúcar, etanol, cachaça e CO₂, Companhia Nacional Alcoolquímica Nacional, localizada na zona rural de Vitória de Santo Antão – PE, através de vários experimentos com sua

matéria-prima desenvolvidos em laboratórios da própria unidade, a construção de protótipos e simulação computacional. Posteriormente os resultados analisados e comparados com publicações existentes e equipamentos comerciais, com a finalidade de adequar à realidade da empresa e viabilidade econômica em relação ao custo-benefício dos processos de secagem do bagaço disponível.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo 2 faz uma revisão do potencial energético da biomassa disponível no Brasil, perspectivas para o futuro e inclui alguns estudos de processos de secagem de bagaço de cana-de-açúcar, estudos de caso, e análises de métodos de secagem de bagaço para aumentar a eficiência de caldeiras a vapor com o aumento do poder calorífico. Descreve equipamentos testados, métodos utilizados e suas capacidades de redução da umidade.

2.1 CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL

A cadeia da cana-de-açúcar é um dos destaques do agronegócio brasileiro. O Brasil se destaca no aproveitamento da biomassa e por ser o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com produção de 588,92 milhões de toneladas na safra 2012/2013 (CONAB, 2013), com previsão de 652,00 milhões de toneladas para a safra 2013/2014 (CONAB, 2014). O aumento da demanda por energia limpa e sustentável melhorou a perspectiva econômica para o etanol, refletindo em investimentos e, conseqüentemente, em maior geração de emprego e renda no setor (CNA, 2012).

O maior produtor de etanol de cana-de-açúcar do mundo é o Brasil, sendo o único país a possuir uma ampla frota de veículos bicomustíveis, contribuindo para que seu consumo supere o da gasolina em veículos leves. Segundo a Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA, 2010), 86% dos veículos leves atualmente vendidos no Brasil têm motor flex fuel. O Brasil também se destaca por ser o maior produtor mundial de açúcar. Em 2007 foram colhidas 549 milhões de toneladas de cana-de-açúcar e com receita de R\$ 19 bilhões para os produtores. A safra de cana-de-açúcar em 2008/2009 foi convertida em 27,5 bilhões em de litros de etanol e 31 milhões de toneladas de açúcar. A safra 2012/2013 é prevista uma produção de 23,6 bilhões de litros de etanol e 37,6 milhões de toneladas de açúcar (CONAB, 2013). Na base dessa economia está o bagaço para

geração de energia elétrica para consumo próprio e exportação, e vapor utilizado nos processos de produção.

O Brasil, em situação bastante favorável quanto à produção de cana-de-açúcar, o maior produtor mundial, seguido pela Índia e China, respectivamente (FAO, 2012), esta produção vem aumentando ano após ano, o que possibilita ao Brasil ser o segundo maior produtor de etanol combustível no mundo.

A produção de etanol de primeira geração envolve as seguintes etapas: lavagem da cana-de-açúcar, trituração, adição de água e extração do caldo de cana em moendas, rico em sacarose, tratamento do caldo de cana, concentração e esterilização do caldo, fermentação, destilação e desidratação (DIAS *et al.*, 2009).

No Brasil, a produção de etanol ocorre em destilarias anexas às usinas de açúcar e em destilarias autônomas, as quais produzem apenas etanol. As melhores destilarias produzem aproximadamente 85 litros de etanol anidro por tonelada de cana. As usinas têm produção em torno de 71 kg de açúcar e 43 litros de etanol para cada tonelada de cana processada (CGEE, 2008).

A queima do bagaço em caldeiras para a geração de vapor e eletricidade com umidade de 51% gera 2,21 toneladas de vapor por tonelada de bagaço queimado. A caldeira tomada para os estudos tem capacidade de produção de 150 toneladas de vapor por hora, pressão de 6,2 MPa e temperatura do vapor de 485°C.

2.2 PRODUÇÃO DE VAPOR E UTILIZAÇÃO

O vapor é produzido em caldeiras através da queima de bagaço que aquece os tubos nas paredes d'água, geralmente quatro, numa relação de 2,21 toneladas de vapor por tonelada de bagaço queimado com umidade de 51%. Sendo as caldeiras mais comuns, na região, com produção de 100 ou 150 toneladas por hora de vapor superaquecido a 485°C e pressão de 6,2 MPa. O vapor produzido, geralmente, alimenta, duas turbinas para geração de energia, uma de condensação (ciclo de Rankine) que gera 1 MW a cada 4 toneladas de vapor, sendo esta destinada à geração de energia para exportação, tem como vantagem, além de menor consumo de vapor, reutilizar a água desmineralizada, e uma de

contrapressão (ciclo de Carnot) que gera 1 MW a cada 6 toneladas de vapor, esta destinada à geração de energia para consumo interno e exportação. A turbina de contrapressão apesar do maior consumo de vapor por MW gerado é necessária, pois o vapor de escape com temperatura de 125°C e pressão de 0,174 MPa é utilizado para a evaporação do caldo em evaporadores de quádruplo efeito, para produção do mel e posterior secagem do açúcar. O vapor residual misturado ao condensado é submetido a vácuo, que reduz a temperatura de evaporação, produzindo vapor entre 70°C e 90°C e pressão de 0,074MPa, também chamado de vapor vegetal, que é enviado à destilaria para produção de etanol.

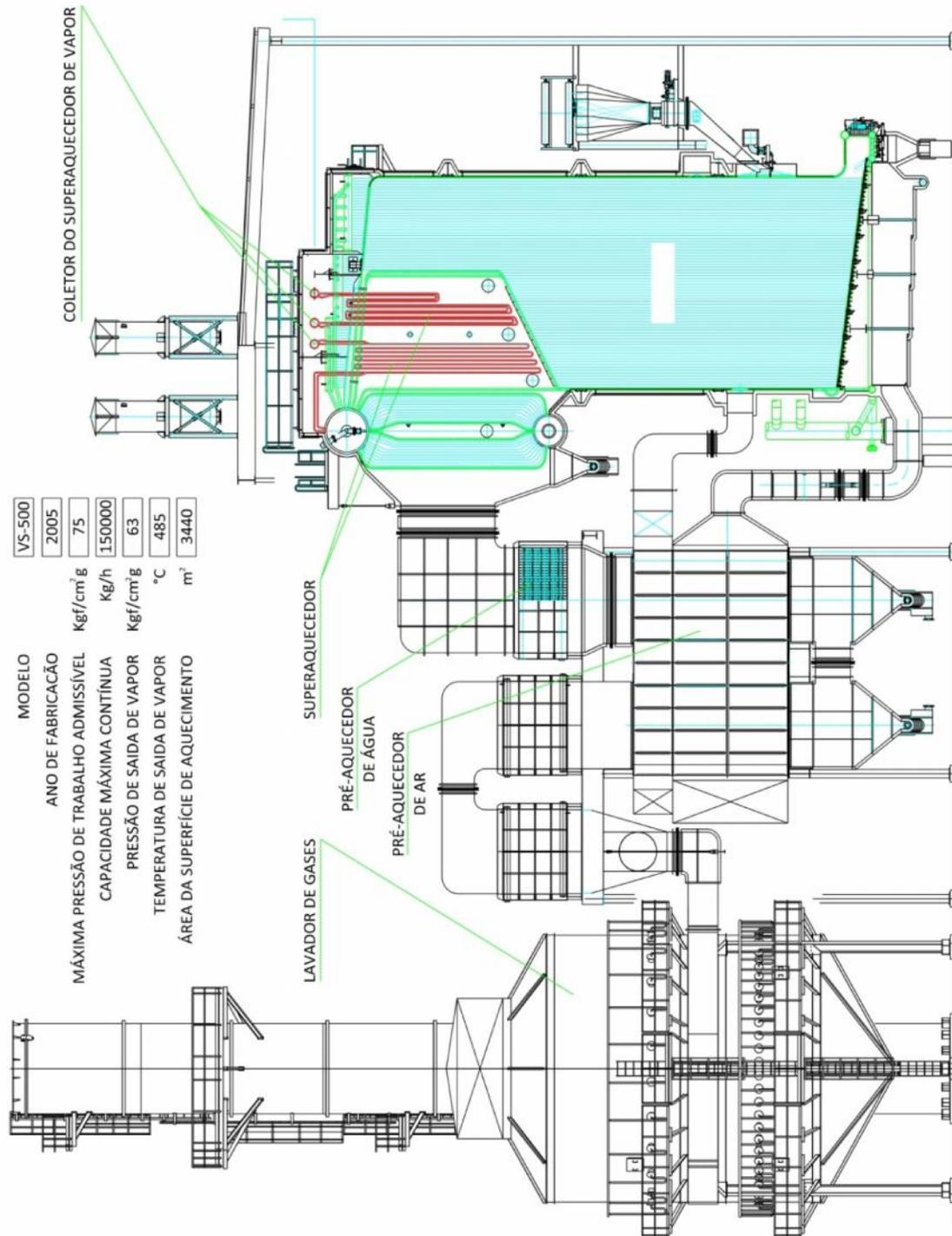
2.3 A CALDEIRA E SEU FUNCIONAMENTO

A caldeira aqui descrita é a que está sendo utilizada na JB Açúcar e Álcool da Nacional Alcoolquímica Nacional, unidade onde os estudos foram realizados. Tem uma capacidade de produção de 150 toneladas de vapor por hora, pressão de 6,2MPa e temperatura do vapor de 485°C, consome 67.905kg de bagaço com 51% de umidade por hora, PCI (poder calorífico inferior) do bagaço de 1.728 kcal/kg e PCS (poder calorífico superior) de 2.206 kcal/kg, para essa umidade a relação é de 2,21 toneladas de vapor por tonelada de bagaço, a caldeira é alimentada por esteiras transportadoras que levam o bagaço até os alimentadores que são controlados por programas especializados e operadores. Utiliza como parâmetros a pressão interna, a temperatura dos gases e a alimentação de água que é controlada pelo nível dos tubulões. O fluxo e temperatura dos gases de exaustão estão descritos abaixo e o fluxograma está apresentado na Figura 2.

- i) Os gases da combustão saem da câmara de combustão da caldeira com temperatura média de 398°C, com vazão de 334.866kg/h equivalente a 701.572 m³/h a esta temperatura somada à água evaporada do bagaço mais a água resultante da combustão do Hidrogênio.
- ii) Os gases da combustão passam pelo economizador, trocador de calor ar-água, pré aquece a água desmineralizada a 111°C que alimenta a caldeira, gerando economia na energia gasta para o aquecimento e posterior vaporização da água e saem a 334°C;

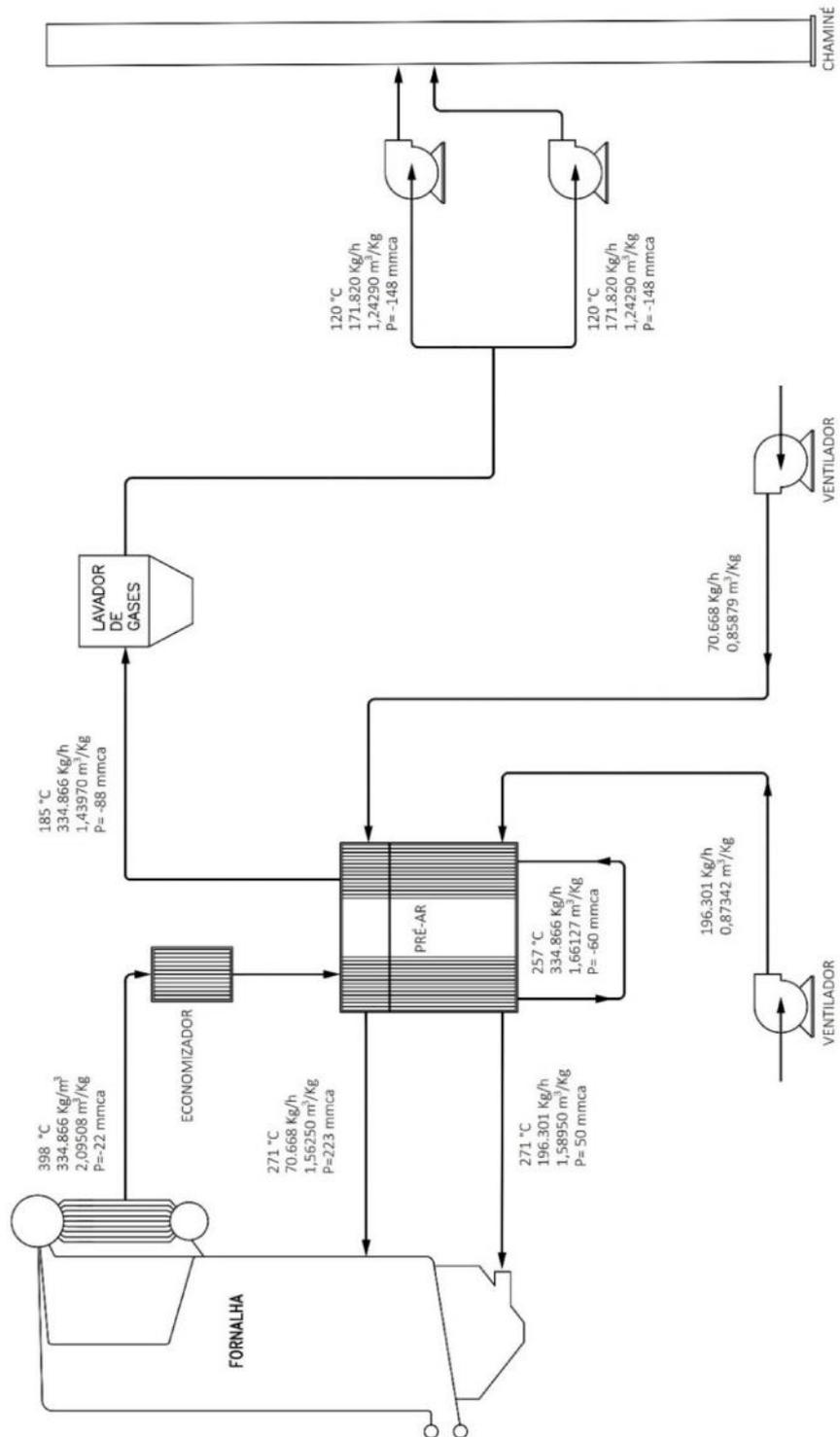
- iii) Os gases provenientes do primeiro economizador passam pelo pré aquecedor de ar e eleva sua temperatura a 257°C, que é injetado na fornalha sob a grelha que forma um leito suspenso para melhor combustão do bagaço e saem a 185°C, com vazão de 334.866 Kg/h equivalente a 482.114 m³/h. Essa temperatura de 185°C é definida como parâmetro para o sistema de controle da caldeira, pode ser alterada em função da demanda e condição da umidade do bagaço.
- iv) Após passar pelo pré-aquecedor de ar, os gases passam pelo lavador de gases com vazão de 343.640 kg/h equivalente a 427.144 m³/h e temperatura de 120°C e são descartados através da chaminé.

Figura 1 - Caldeira na configuração atual



Fonte: Adaptação do autor

Figura 2 - Fluxograma dos gases da caldeira atual



Fonte: Dados do fabricante da caldeira

Nas atuais condições de funcionamento a caldeira consome 67.905 kg/h de bagaço com média de 51% de umidade. Seus gases de exaustão chegam ao lavador de gases com temperatura de 185°C e consomem para a precipitação dos sólidos e redução da temperatura de escape para a chaminé, 8.774 kg/h de água. O objetivo dos estudos é projetar e inserir um secador de bagaço entre a saída dos gases de exaustão e o lavador de gases para aproveitamento desse calor, reduzindo a umidade e resultando no aumento do poder calorífico da biomassa com consequente aumento da eficiência da caldeira e na redução da temperatura de entrada dos gases de exaustão no lavador.

2.4 SECADORES DE BAGAÇO

A comercialização do excedente energético das indústrias vem se constituindo em fonte de receita real e economicamente atraente, ocupando espaço cada vez maior na matriz energética do país e agregando valor à industrialização da cana-de-açúcar. O vapor é o item essencial na produção de açúcar, etanol, cachaça e álcool neutro, este último sendo responsável pelo maior consumo de vapor devido à necessidade de consecutivas destilações e lavagem com água até obter o produto final em condições de consumo. Portanto, a produção estável e em volume adequado depende diretamente da eficiência das caldeiras que por sua vez demandam bagaço com umidade baixa e constante. Segundo dados do Balanço Energético Nacional em 2003, 41% da matriz energética brasileira era proveniente de fontes renováveis enquanto a média mundial era de 14%, chegando a apenas 6% nos países desenvolvidos, no rol de oferta interna de energia, a biomassa é responsável por 27,2%. A grande fonte desse tipo de energia é proveniente da queima do bagaço de cana-de-açúcar em caldeiras a vapor, para fornecimento de energia co-geração em turbinas a vapor (CNA, 2004).

Segundo a ANEEL apenas a geração de 2.500 a 3.000 MWh seria suficiente para abastecer uma cidade de três milhões de habitantes. Estudos da Clean Energy Associates & Partners, na safra 1999/2000 com 300 milhões de toneladas de cana colhidas, um potencial de 16,3 milhões de MWh ano, equivalente a 5% do potencial

energético brasileiro (CNA, 2004). Na safra 2012/2013 essa produção será de 588,9 milhões de toneladas (CONAB, 2013).

Em 2003 foi instituído pela Lei 10.438, de 26 de abril de 2002 e revista pela Lei 10.762, de 11 de novembro de 2003, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA). O programa foi criado para permitir a diversificação da matriz energética brasileira com a utilização de fontes renováveis para produção de energia. 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 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.

Após os primeiros estudos para redução da umidade do bagaço, através dos gases de exaustão das caldeiras, realizados em 1910 pelo professor Kerr (BOULET, 1975) houve um período de baixíssima quantidade de pesquisas e de publicações sobre secagem de biomassa, devido ao baixo custo e grande disponibilidade de combustíveis fósseis o que tornava essa alternativa pouco atrativa economicamente falando, tanto que havia caldeiras que funcionavam com combustível fóssil, passando a mista, queimando combustível fóssil e biomassa até que os preços do petróleo tornaram essa prática economicamente inviável. No início dos anos de 1970, com a crise do petróleo e consequente elevação dos preços a comunidade científica voltou a pesquisar formas mais eficientes de geração de energia com o uso da biomassa e utilização mais eficiente dos combustíveis fósseis. No Brasil o foco foi o bagaço de cana-de-açúcar devido a seu baixo custo e grande disponibilidade. Vários modelos foram propostos para a melhoria da eficiência energéticas, principalmente a redução da umidade com a consequente elevação do poder

calorífico, utilizando de fontes externas de calor, como queima de madeira e até do próprio bagaço, até a mais comum que utiliza os gases de exaustão das caldeiras que na grande maioria dos trabalhos publicados utiliza os gases retirados antes de passarem pelos economizadores, que têm maior temperatura. Devemos também observar as variações dos gases de exaustão citados nos trabalhos publicados e suas variações em função da evolução das tecnologias e otimizações atuais na geometria interna das caldeiras e materiais. É notável, também, o aumento da temperatura de trabalho e pressão do vapor nas caldeiras que já ultrapassa os 500°C e pressão de 10 MPa, aumentando sua eficiência energética.

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

Com o objetivo de baixar a umidade de 67.905 kg/h de bagaço, massa suficiente para atender ao consumo nominal da caldeira, 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 alteração do fluxo dos gases originalmente projetados pelo fabricante da caldeira, ou seja, 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 ou a possibilidade de uma solução híbrida.

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 descendente e gases quentes ascendentes, 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).

Após esse trabalho, até os anos de 1970 poucos estudos e trabalhos foram realizados, até a crise energética dos anos seguintes, quando voltou a despertar o

interesse por fontes alternativas de energia, especialmente provenientes de biomassa.

Furines (1972, 1973) trabalhou com três secadores do tipo rotativo para secagem com gases de exaustão a 218°C. Com estes tipos de secadores, a umidade passou de 54% para 46%, e houve redução no consumo de óleo combustível utilizado na caldeira de 1,62 para 1,01 galão por tonelada de cana processada (FURINES, 1976).

Outras pesquisas foram realizadas com a mesma finalidade. Kinoshita (1991) publicou quatro trabalhos dos quais três foram aplicados a secadores rotativos 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 16% na geração de vapor através da redução da umidade do bagaço de 52% para 40%.

Massarani e Valença (1981, 1983), estudaram intensivamente a secagem de bagaço em esteira transportadora com resultados satisfatórios. Nebra e Macedo (1989) escreveram sobre um secador industrial, o qual foi desenhado e fabricado de acordo com o projeto desenvolvido pelo Centro de Tecnologia Copersucar. O secador usa ar quente soprado para secagem, podendo trabalhar com 25ton/h de bagaço de cana-de-açúcar.

Augustinsky (1984, 2004) relata a instalação de dois secadores pneumáticos em usinas de açúcar no Brasil, estando um na Usina Itajubara - GIJS, Maranhão - Brasil com capacidade para 7,5 ton/h de bagaço de cana-de-açúcar, e o segundo na

Companhia Agroindustrial Goiana - CAIG - Açúcar e Álcool - GIJS - Pernambuco - Brasil, (SOSA-ARNAO *et al*, 2004).

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).

O peletizador e a enfardadeira, apesar de não se enquadrarem exatamente nessa proposta, cada vez mais vem sendo utilizados em usinas de açúcar e etanol para armazenar bagaço seco para a partida das caldeiras em início de safra. Exige a secagem prévia do bagaço até a umidade de 20% e tem alto consumo de energia pelos motores para prensagem por parafuso ou pistões hidráulicos. Seu uso mais comum e economicamente viável é para produção de pelets que são comercializados como lenha.

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

Secadores rotativos, consistem de um tambor rotativo e inclinado no sentido da saída do produto. 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.

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. Esse modelo seria viável não fosse a necessidade de energia para alimentar sopradores e as grandes dimensões do conjunto e do ciclone para separação em função do volume de secagem pretendido.

O mais pesquisado dos secadores certamente é o pneumático (Figura 3), construído e em funcionamento em várias usinas de açúcar e etanol. 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, podendo reduzir a umidade do bagaço para até 32%, está representado na Figura 3.

Figura 3 - Secador pneumático de bagaço instalado em Pernambuco



Fonte: Autor

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. Três pontos de medição são mais importantes para retirada dos gases e que também 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 variam de 400°C a 260°C entre a saída da fornalha e a passagem pelo primeiro pré-aquecedor de ar.

Alguns secadores de bagaço que utilizam gás de combustão instalados e em escala piloto são citados abaixo:

- Tipo contra-corrente com capacidade para 1,4ton/h, em 1910. Instalado em Palo Alto Sugar Factory Donaldsonville, Louisiana em escala piloto (BOULET,1975)
- Secador rotativo com capacidade para 50ton/h, gases a 315°C, instalado em 1976 em St. Mary Sugar Company, Louisiana (ARRASCAETA, FRIEDMAN, 1987).
- Secador pneumático com capacidade para 7,5ton/h funciona com gases de exaustão a 330°C. Instalado em 1984 na Usina Itajubara -GIJS, Maranhão - Brazil (AUGUSTINSKY,2004).
- Secador pneumático com capacidade para 28ton/h, instalado em 2003 na Companhia Agroindustrial Goiana- GIJS, Pernambuco - Brazil (AUGUSTINSKY,2004).

A redução da umidade do bagaço, principalmente com a utilização de gases de exaustão desviados de economizadores, mostra-se inicialmente vantajoso em termos de ganho de poder calorífico quando comparado com o que se perde nos economizadores, no entanto, se faz necessário uma análise criteriosa para determinar o real ganho inclusive computando o custo de equipamentos, seu tempo de amortização, manutenção e vida útil, (SOSA-ARNAO *et al*, 2004).

Os secadores de bagaço de cana-de-açúcar trazem muitas vantagens, sendo os secadores pneumáticos que mostram-se como alternativas vantajosas em relação aos pré-aquecedores das caldeiras em temperaturas em torno dos 180°C. Para usinas que não conseguem obter bagaço de cana-de-açúcar, de forma sustentada, com umidade de 50% ou menor e produzem quantidades substanciais de bagaço, a secagem é definitivamente recomendável (SOUZA *et al*, 1998).

Muitos são os trabalhos publicados, plantas piloto, secadores já fabricados e em operação em indústrias. Especificamente, as indústrias sucroalcooleiras, atestam a viabilidade e os ganhos 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 fabricada para trabalhar com bagaço a 50% de umidade. Estudos realizados em uma caldeira a vapor alimentada com bagaço de cana-de-açúcar a 50% de umidade, com capacidade para 70ton/h de

vapor a 2.600 kPa com temperatura de 350°C, de propriedade da Lonrho Sugar Corporation Limited's, Britannia Mills em Mauritius, usada como base para estudos dos efeitos das alterações resultantes da redução da umidade do bagaço. Algumas conclusões desses estudos, uma vez que realizados com fins de obter uma visão global do funcionamento da caldeira com a queima de bagaço com umidade inferior a 50%, mostram 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.

Abaixo de 47% de umidade outros fatores que não a umidade começam a dominar as características do desempenho da caldeira. A combustão do bagaço seco, abaixo dos 47%, eleva a temperatura dos gases de exaustão, condição não prevista pelos fabricantes de caldeiras, e isso pode resultar no aumento da formação de escória e incrustações nas superfícies quentes das paredes dos tubos da caldeira. Os gases de exaustão começam a ser parâmetros críticos. Neste estudo, o desempenho de uma caldeira típica para combustão de bagaço de cana-de-açúcar é analisado com maior ênfase que a umidade em si. As limitações de desempenho são definidas e preteridas e podem ser incorporadas especificamente para plantas com essas novas características de operação.

Em experimentos na unidade ficou demonstrado que quando a temperatura excede os 1050°C a ocorrência de escória e incrustações começa a ser um problema para a fornalha e para os economizadores. Deve ser evitado passar os gases pelos pré-aquecedores quando a umidade do bagaço ficar abaixo dos 34%.

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,1987). 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.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, encontram-se descritos os materiais e instrumentos utilizados nos experimentos para redução da umidade do bagaço. Os trabalhos foram direcionados para aplicação na Companhia Nacional Alcoolquímica Nacional, localizada na zona rural de Vitória de Santo Antão - PE. Foi estabelecida uma meta de redução de 5% da umidade em quantidade suficiente para alimentar a caldeira, apenas com a utilização dos gases de exaustão da caldeira após os economizadores, que significa a não alteração das características originais da caldeira, bem como a não substituição de materiais empregados em sua construção. A usina forneceu todos os materiais necessários aos experimentos, acesso aos laboratórios e construiu os protótipos.

3.1 METODOLOGIA

Com o objetivo de construir um secador de bagaço de baixo custo de fabricação, manutenção e consumo de energia que pudesse ser instalado na Companhia Nacional Alcoolquímica Nacional, unidade situada no município de Vitória de Santo Antão - PE, que atendesse necessidades específicas da usina, foram desenvolvidos, e construídos na própria unidade, protótipos de silos de secagem para utilização de sopradores térmicos em bancada e uma caixa de secagem para aplicação em experimentos utilizando os gases de exaustão extraídos diretamente da caldeira. Foi realizado um balanço térmico e de massa com os dados de projeto obtidos nos manuais do fabricante da caldeira, com fluxo de gases e distribuição de calor com valores nominais e bagaço de alimentação nas condições ideais utilizado como referencial para os experimentos e simulações. Para definição do melhor posicionamento na caldeira foram feitas simulações computacionais através do uso de programas de dinâmica dos fluidos computacional (CFD), em escoamento através do bagaço de cana-de-açúcar (meio poroso).

3.2 LABORATÓRIO DE SACAROSE

O laboratório de sacarose, após a balança na entrada da usina, é o ponto inicial do processamento da cana-de-açúcar, onde são realizados os procedimentos de identificação das propriedades da cana e análise do bagaço.

- Inicialmente, do caminhão que entra na usina, é retirada uma amostra de cana, que é triturada, separada em porções de 500g, e pesada em balança com precisão de 0,001 kg.
- A porção de 500g é então colocada em uma prensa hidráulica a uma pressão de 25MPa (Figura 4), durante 60 segundos para extração do caldo.
- O caldo é então analisado, quanto ao teor de sacarose e cinzas. A cana adquirida de terceiros é avaliada em função do teor de sacarose e não pelo peso bruto.
- O bagaço, bolo úmido (Figura 5) após a extração do caldo na prensa tem seu peso anotado, em seguida é desfibrado e colocado numa estufa de circulação forçada com ar a 105°C, após a secagem é pesado e anotado o peso do bolo seco.

Figura 4 - Prensa de extração do caldo



Fonte: foto do autor

Figura 5 - Bolo úmido



Fonte: foto do autor

- A POL média das amostras de bagaço provenientes da saída das moendas, após trituração, lavagem e prensagem foi de 2,3. A POL é a porcentagem de massa de sacarose aparente, contida em uma solução açucarada de peso normal, determinada pelo desvio provocado pela solução açucarada.

Os procedimentos descritos acima são de fundamental importância para o desenvolvimento do trabalho, uma vez que fornece o percentual de bagaço por unidade de massa da cana sem palha e despontada e a POL, (sacarose residual) após trituração, lavagem e prensagem nas moendas. Esses fatores são essenciais para a determinação do poder calorífico e disponibilidade do combustível para produção de vapor e geração de energia.

3.3 LABORATÓRIO DE ANÁLISES E CONTROLE

No laboratório de análises e controle é realizado o controle de qualidade dos produtos finais da unidade, açúcar, álcool anidro, hidratado, neutro e cachaça, as análises da água desmineralizada utilizada nas caldeiras e são também verificadas as condições do bagaço. Aqui foram coletados dados aferidos referentes ao teor de sacarose da cana e percentual de bagaço da cana in-natura, despontada e sem folhas. A determinação da umidade do bagaço após a lavagem e extração do caldo nas moendas é realizada na estufa Spencer (Figura 6), antes e depois dos experimentos de secagem, nos silos e na caixa protótipo.

Figura 6 - Laboratório - Estufa Spencer



Fonte: fotos do autor

Nesse 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^oC 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 que são próprias de cada unidade de produção de açúcar e etanol, portanto, esses valores são os mais indicadas para o presente trabalho. As equações 3.1 e 3.2 representam a redução do poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI), respectivamente.

3.3.1 Poder Calorífico do bagaço

$$PCS = 4.600 - 12s - 46w \text{ [kcal/kg]} \quad (3.1)$$

$$PCI = 4.250 - 12s - 48,5w \text{ [kcal/kg]} \quad (3.2)$$

s → teor residual de sacarose [%]

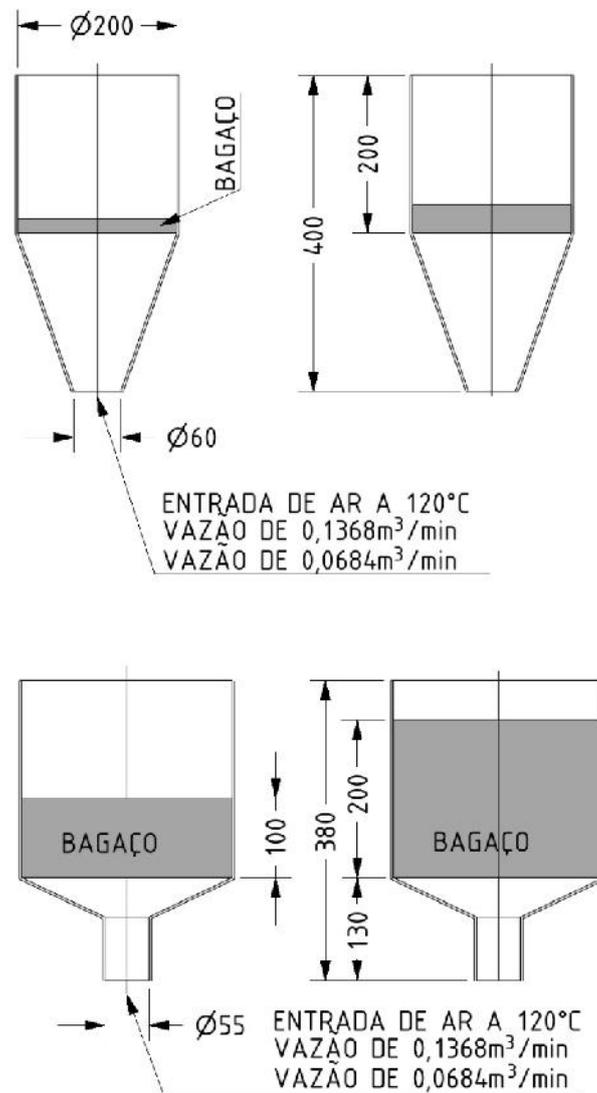
w → umidade do bagaço [%]

3.4 MATERIAIS PARA EXPERIMENTOS

Para os experimentos foram construídos dois silos em aço inoxidável, um com base cônica e um com base cilíndrica (Figuras 7), com tela na base para armazenamento e tela na parte superior com mesh 200 (0,074mm) para evitar a saída do bagacilho durante a secagem por ar quente.

Para secagem foi utilizado um soprador térmico com potência de 2.000W com vazão de 0,0684 m³/min e 0,1368 m³/min e temperatura de saída dos gases do secador de 120^oC, acoplado na abertura inferior do silo

Figura 7 - Silo para experimentos de secagem com 100g e 200g de bagaço úmido



Fonte: Desenhos do autor

Para experimentos utilizando os gases da exaustão da caldeira foi construída na própria usina, uma caixa metálica com fundo e teto de tela perfurada com entrada dos gases pela parte inferior e saída pelo teto, (Figura 8), para simulara passagem dos gases no duto. Os gases eram aspirados do duto de saída da caldeira por um exaustor (Figura 9), acionado por um motor de 55 kW, com vazão de 138,4m³/min. O experimento foi montado ao lado da caldeira, (Figura 10).

Figura 8 - Caixa para experimento com gases de exaustão



Fonte: Foto autor

Figura 9 - Exaustor para extração de gases da caldeira



Fonte: Foto autor

Figura 10 - Montagem do experimento da caixa de secagem



Fonte: Foto autor

3.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para os experimentos nos silos com a utilização de um soprador térmico, o bagaço foi coletado após o último terno de moenda, previamente misturado no próprio local antes da coleta, acondicionado em baldes plásticos. Uma parte levada para o laboratório para verificação da umidade numa estufa Spencer (Figura 6) e outra parte utilizada para os experimentos de secagem, já determinado o percentual de umidade do bagaço.

Para os experimentos com soprador térmico foi construído um silo $\varnothing 200\text{mm} \times 200\text{mm}$ provido de tela mesh 200 no fundo com percentual de abertura de 45% para acondicionamento do bagaço (Figura 7), e um silo $\varnothing 260\text{mm} \times 250\text{mm}$ de altura, ambos em aço inoxidável. Foi utilizado um soprador térmico com vazão de $0,0684 \text{ m}^3/\text{min}$ e $0,1368 \text{ m}^3/\text{min}$ e temperatura do ar de saída de 120°C .

3.5.1 Experimentos de secagem com silo Ø200x200mm

O silo foi carregado com 200g de bagaço com 51% de umidade, (aferido no laboratório), não adensado, e com temperatura de 30°C. O soprador de ar quente, temperatura de 120°C, foi conectado à abertura inferior do silo e acionado por tempos pré estabelecidos para os experimentos. Foram feitas cinco medições para cada vazão de ar quente. A primeira com vazão de 0,1368 m³/min e a segunda com vazão de 0,0684 m³/min. As amostras foram submetidas ao fluxo de ar quente por períodos de 1, 2, 3 e 4min, e esse procedimento repetido por cinco vezes a cada experimento. Os resultados médios de redução de peso estão descritos na Tabelas 7 e 8.

3.5.2 Experimentos de secagem com silo Ø260x250mm

No primeiro experimento o silo foi carregado com uma camada de bagaço de 100mm de espessura, não adensado. No segundo experimento o silo foi carregado com uma camada de 200 mm de bagaço não adensado, em ambos experimentos o bagaço estava a uma temperatura de 30°C e umidade de 51%, as amostras foram submetidas ao fluxo de ar por períodos de 2, 3, e 4min, e o procedimento repetido por cinco vezes para cada experimento. Para esse experimento foi utilizado o soprador térmico com vazão de 0,1368 m³/min e temperatura do ar de entrada nos silos de 120°C. Tabelas 9 e 10.

3.5.3 Experimentos com caixa metálica e gases extraídos da caldeira

Para os experimentos com a caixa de secagem, foi construído um exaustor (Figura 9) acionado por um motor de 55 kW com vazão de 138,4 m³/min para extrair os gases de exaustão através de uma abertura no duto da caldeira e uma caixa metálica (Figura 8) com abertura de fundo de 2,50m x 3,40m provido de tela para contenção de bagaço interligada ao exaustor por um tubo de aço de Ø350mm.

O bagaço utilizado nos experimentos com caixa metálica que simulava, em parte, as condições do secador idealizado, foi coletado no pátio de armazenamento de bagaço, com a utilização de pás carregadeiras, misturado e retiradas amostras

para aferição da umidade antes dos experimentos de secagem utilizando os gases de exaustão da caldeira.

O experimento de secagem com a caixa metálica (Figura 11) com duas aberturas para entrada dos gases, medindo $8,5 \text{ m}^2$ com área real utilizada para passagem de gases de $3,4 \text{ m}^2$ devido à tela perfurada com área livre de 60% colocada para depósito do bagaço com camadas de 100mm, 120mm e 150mm. Uma tubulação de aço carbono, com diâmetro de 350mm ligando a caixa ao duto de exaustão da caldeira, aspirando $138,4 \text{ m}^3/\text{min}$ dos gases de exaustão da caldeira com temperatura de 185°C . A velocidade de passagem dos gases pelo colchão de bagaço de $0,68 \text{ m/s}$. Para ajuste com os experimentos com os silos, o tempo de secagem foi de 2 minutos para todas as espessuras do colchão de bagaço. Para cada camada de bagaço o experimento foi repetido por cinco vezes. O bagaço coletado no pátio de armazenamento apresentava umidade de 53,13%, aferido na estufa Spencer do laboratório.

Figura 11 - Montagem do experimento com extração de gases do duto de exaustão



Fonte: Fotos do autor

3.6 COMBUSTÃO DO BAGAÇO

Para os cálculos da combustão do bagaço utilizaremos os dados da Tabela 1, composição do bagaço seco e Tabela 2, composição média do ar e a POL média da usina igual a 2,3.

Tabela 1 - 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

Tabela 2 - 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

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 3.1 e 3.2 consideram o teor de sacarose e a umidade do bagaço, As Equações 3.3 e 3.4 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 3.5 considera além da água resultante da combustão do hidrogênio a água contida no bagaço úmido.

$$PCS = 4.600 - 12s - 46w \text{ [kcal/kg]} \quad (3.1)$$

$$PCI = 4.250 - 12s - 48,5w \text{ [kcal/kg]} \quad (3.2)$$

s → teor residual de sacarose [%]

w → umidade do bagaço [%]

Resultados na Tabela 12

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

$$PCS = 19.260(1 - w) \text{ [kJ/kg]}; \text{ poder calorífico superior do bagaço úmido} \quad (3.3)$$

Resultados na Tabela 13

$$PCI = PCS - 2.512 \cdot E \text{ [kJ/kg]} \quad (3.4)$$

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

$$PCI = 19.260(1 - w) - 2.512 \cdot 9H(1 - w) \quad (3.5)$$

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

Resultados na Tabela 14

3.6.1 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.

3.6.1.1 Combustão do hidrogênio



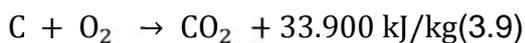
$$E = 9 * H \quad (3.7)$$

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

3.6.1.2 Combustão do hidrogênio contido no consumo nominal de bagaço na caldeira

$$C_H = 67.905 * \left[1 - \left(\frac{51}{100}\right)\right] * 0,065 * 141.800 = 306.681.388 \text{ kJ} = 306,7 \text{ MJ} \quad (3.8)$$

3.6.1.3 Combustão do carbono



3.6.1.4 Combustão do carbono contido no consumo nominal de bagaço na caldeira

$$C_c = 67.905 * \left[1 - \left(\frac{51}{100}\right)\right] * 0,47 * 33.900 = 530.145.879 \text{ kJ} = 530,1 \text{ MJ} \quad (3.10)$$

3.6.1.5 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.

3.6.1.6 Bagaço queimando sob condições de fornalha:

Condição 1: Bagaço úmido.

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

$$P_a = 5,75(1 - w)m \quad (3.11)$$

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

$$P_g = [5,75(1 - w)m] + 1 \quad (3.12)$$

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.

$$P_{gs} = P_g - 9H(1 - w) + w = 5,75(1 - w)m + 1 - 9 * 0,065(1 - w) + w \quad (3.13)$$

$$P_{gs} = (1 - w)(5,75m + 0,415), \quad (3.14)$$

do mesmo modo:

$$V_a = 4,46(1 - w)m \quad (3.15)$$

$$Vg = 4,46(1 - w)m + 0,572w + 0,672 \quad (3.16)$$

$$Vgs = 4,46(1 - w)m - 0,056(1 - w). \quad (3.17)$$

Para obter volume a t°C:

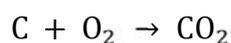
$$VT = Vo \left[273 + \left(\frac{t}{273} \right) \right], \quad \text{volume a t°C e } Vo \text{ o volume a } 0^\circ\text{C} \quad (3.18)$$

- Composição dos gases da chaminé

A massa dos gases da chaminé é dada por:

$$Pg = 5,75 \cdot (1 - w)m + 1 \quad (3.19)$$

- Cálculo da quantidade individual dos gases:



A massa de CO₂

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

a massa de CO₂ para o bagaço seco é de $0,6149 * 33.273 \text{ kg/h} = 20.460 \text{ kg/h}$

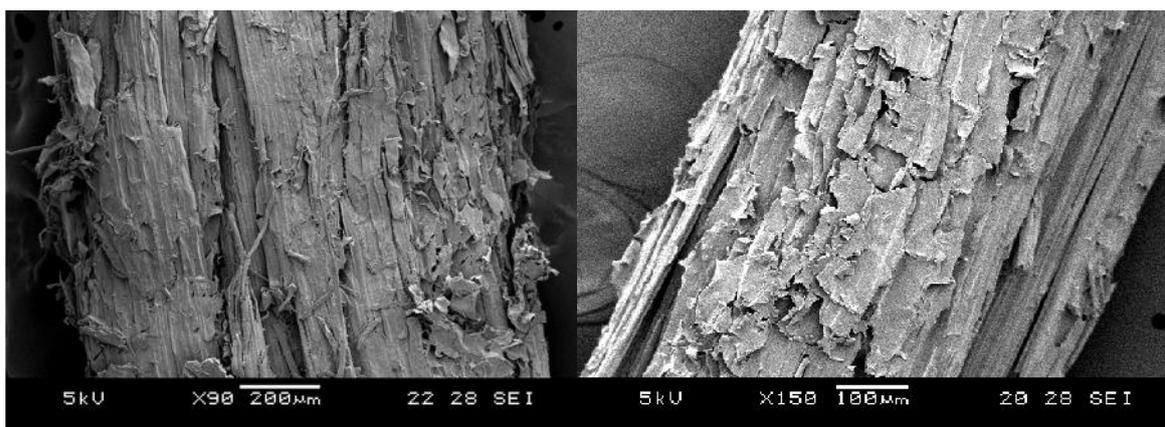
A temperatura da fornalha é influenciada pela umidade do bagaço, quantidade de excesso de ar, quanto maior o excesso menor a temperatura da fornalha, tipo de fornalha, sistema de alimentação de bagaço e sistema de exaustão, varia de

aproximadamente 900^oC a 1.200^oC com excesso de ar de 30% a 100% e a umidade do bagaço variando de 40% a 56% (MAGASINER, 1987).

3.6.2 Microscopia Eletrônica de Varredura– fibra do bagaço

Análises morfológicas de bagaço de cana-de-açúcar foram realizados empregando-se a técnica de microscopia eletrônica de varredura, Figura 3.10. As micrografias foram obtidas em um Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV, modelo JEOL JSM-5900VL, máximo de 30kV na Universidade Federal de Pernambuco - UFPE.

Figura 12 – Detalhe da fibra do bagaço de cana-de-açúcar



O bagaço de cana-de-açúcar, tem características que favorecem o processo de secagem. Tem baixa densidade, 184 kg/m³ 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. O bagaço, como se pode visualizar nas micrografias (Figuras 13), é um elemento poroso composto por microtubos onde é contido o caldo.

3.7 BALANÇOS DE MASSA E ENERGIA

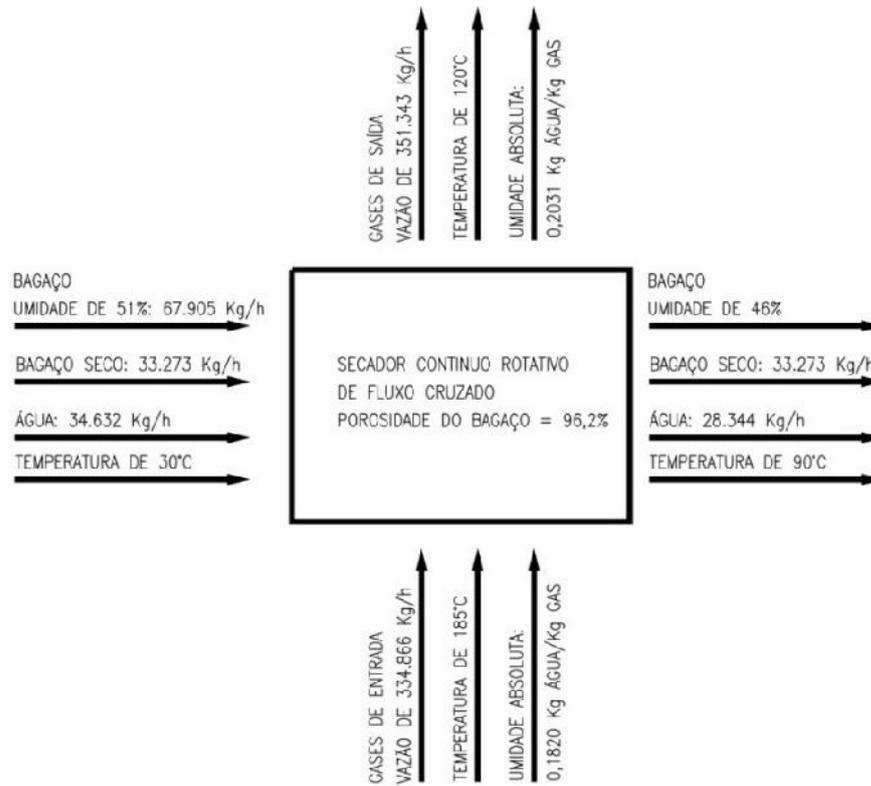
Os balanços de massa têm como finalidade determinar, em primeira análise, a umidade relativa e absoluta do ar da exaustão, bem como a massa de ar resultante da combustão e ar de alimentação e temperatura na saída do secador a ser projetado. Numa segunda análise, na condição prevista com alimentação com bagaço com a umidade reduzida de 51 para 46%.

Os balanços de energia avaliam 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, (Figura 14). 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 15).

Os gases do duto de exaustão saem da caldeira a 185°C precipitando os particulados no lavador de gases reduzindo a temperatura para, em média, 120°C.

Figura 13 - Balanço térmico e massa – condição atual



Fonte: O autor

- Cálculos do balanço térmico e de massa no APÊNDICE C

Tabela 3 - 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 dos dados do fabricante da caldeira

Tabela 4 - 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: O autor

Tabela 5 - 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 |

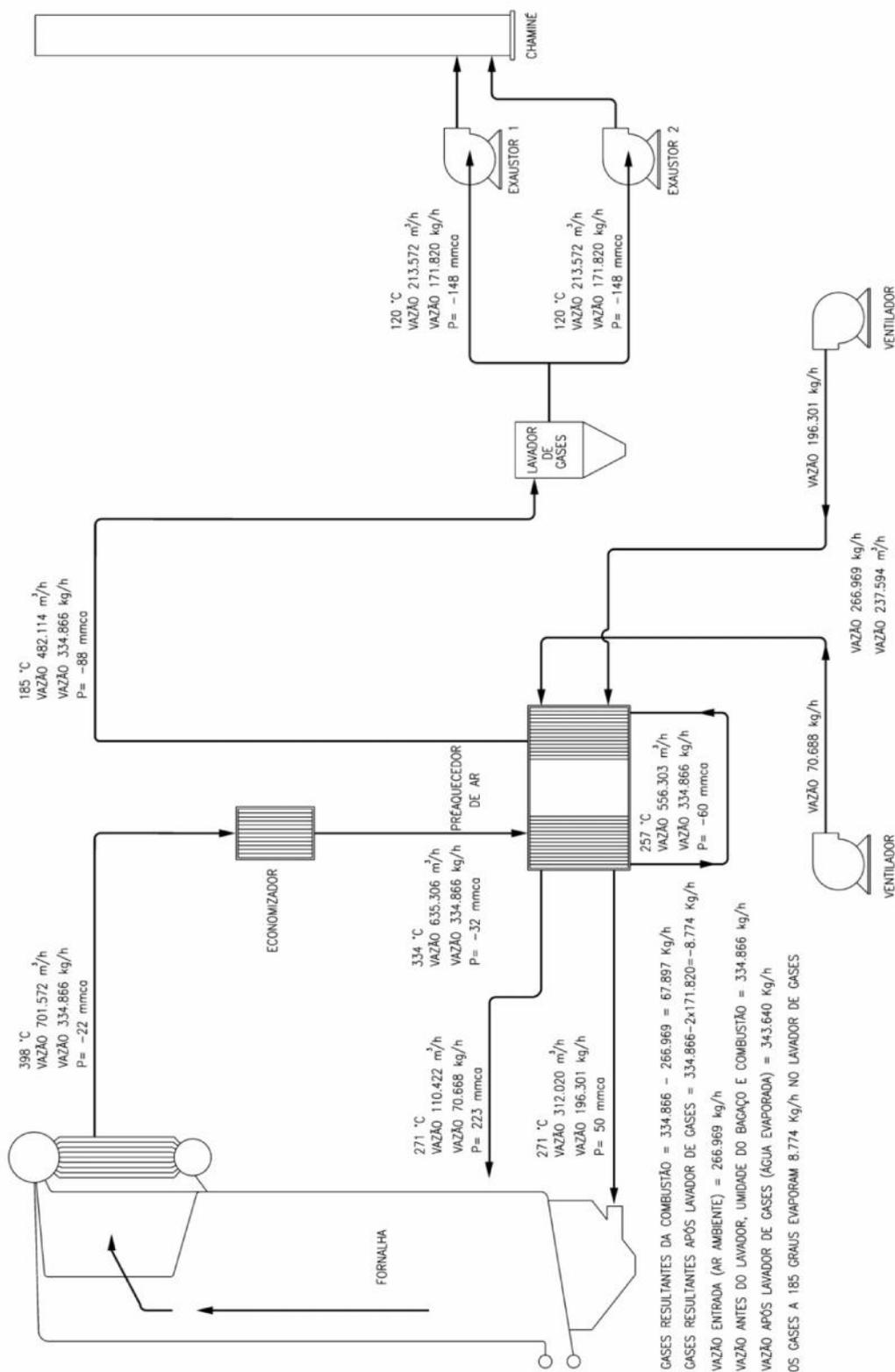
Fonte: O autor

Tabela 6 - Balanço de massa e energia com caldeira queimando bagaço com 46% de umidade e secando bagaço de entrada no secador com 54% 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 | 0,2349 | 330.527 | 104 |

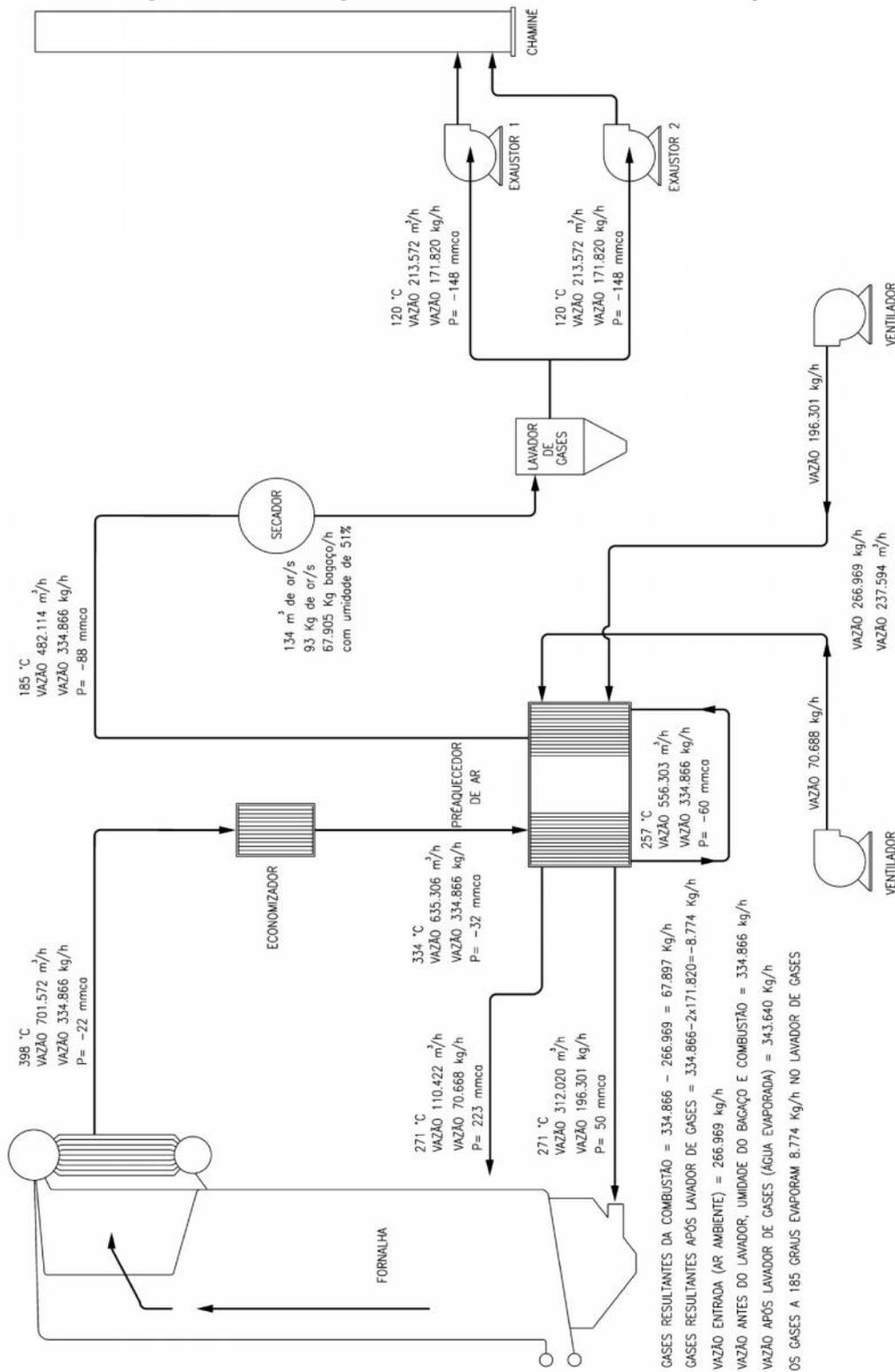
Fonte: O autor

Figura 14 - Fluxograma atual da caldeira com bagaço com 51% de umidade



Fonte: Manual do fabricante

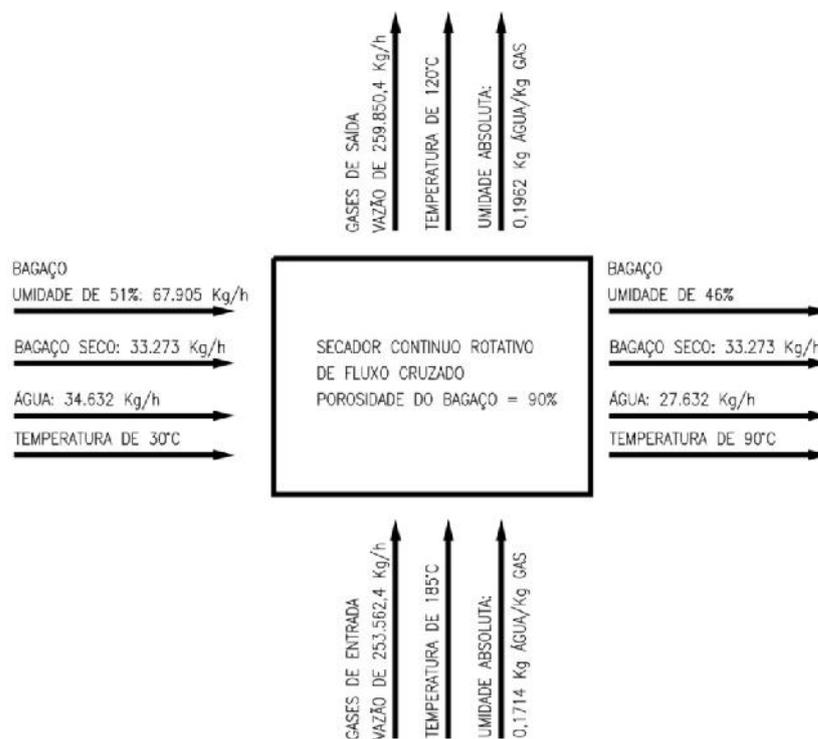
Figura 15 - Fluxograma atual da caldeira na condição calculada



Fonte: Manual do fabricante

3.8 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA DA CALDEIRA E SECADOR COM UMIDADE DO BAGAÇO COM 46%. DE UMIDADE

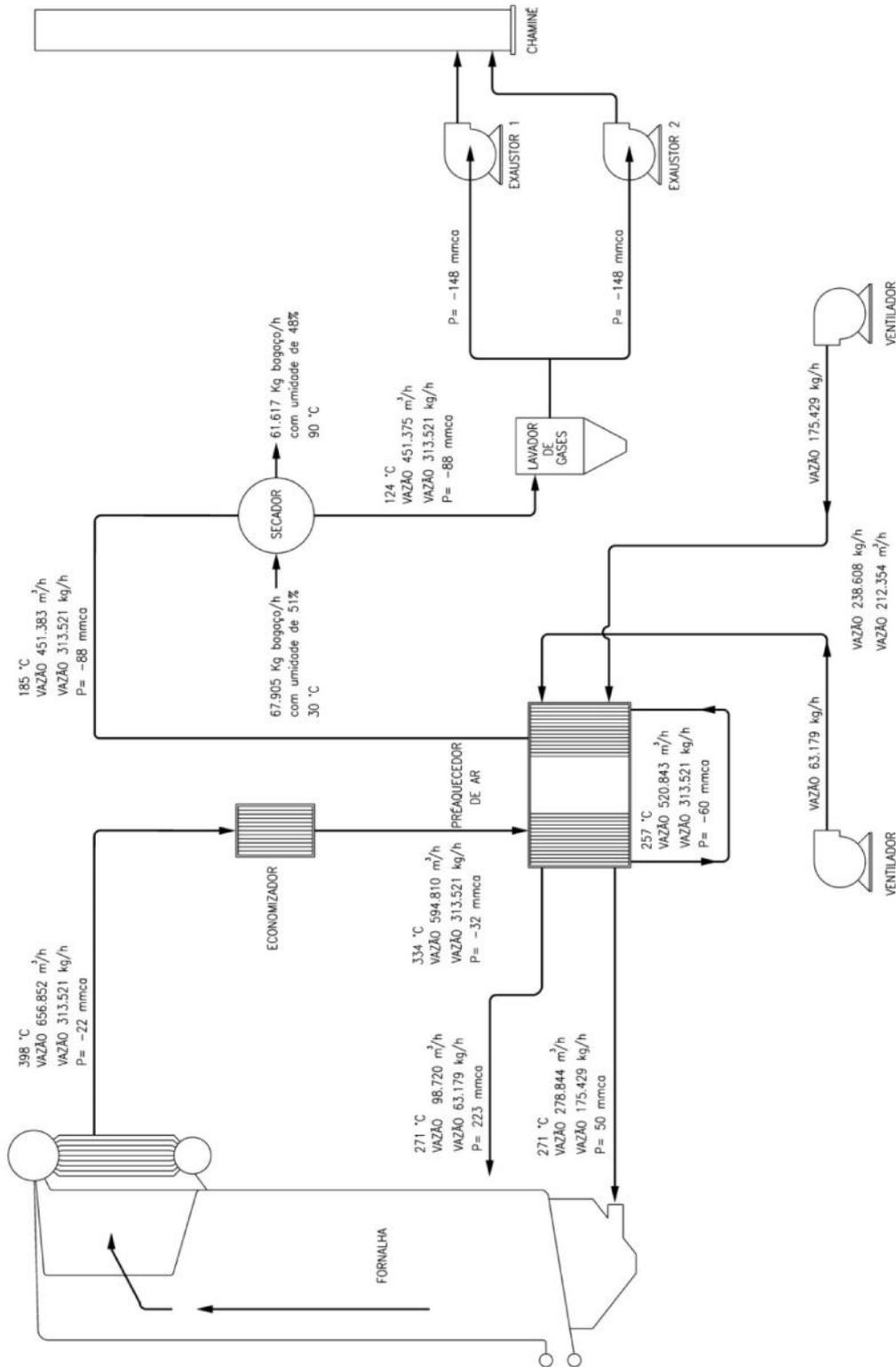
Figura 16 - Esquema do balanço de massa e energia



Fonte: O autor

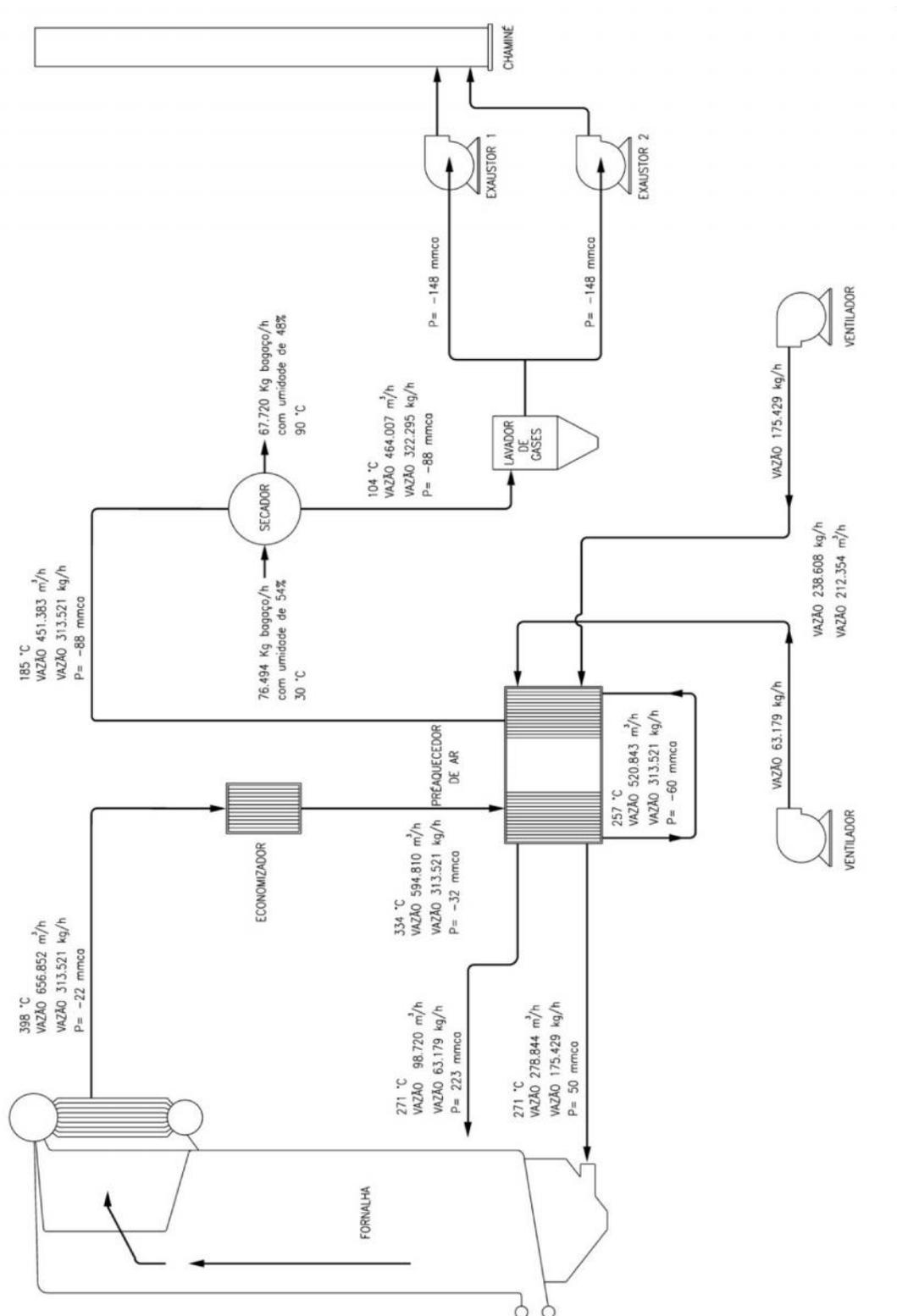
- Cálculos no APÊNDICE C

Figura 17 - Fluxograma da caldeira com bagaço com 46% de umidade



Fonte: Adaptação do autor

Figura 18 - Fluxograma da caldeira queimando bagaço com 46% de umidade e secando bagaço com 54%



Fonte: Adaptação do autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS E MEDIÇÕES

- Resultados dos experimentos realizados em bancada e simulações em CFD.

4.1.1 Medições de laboratório

- O percentual de bagaço seco por unidade de cana despontada e sem folhas, aferido no Laboratório de Sacarose, item 3.2 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.
- 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 SILOS COM SOPRADOR TÉRMICO E CAIXA METÁLICA

Os resultados dos experimentos são essenciais na definição e desenvolvimento do secador a ser projetado, visando o melhor aproveitamento do gases de exaustão. Através das análises desses modelos podemos avaliar o fluxo do ar, gradiente de temperatura, pressão, essenciais para tomadas de decisão ou obter indicativos das melhores soluções a adotar. Para os experimentos dos silos foi utilizado um soprador térmico com seletor para vazões de 0,0684m³/min e 0,1368m³/min ambos com a temperatura do ar de 120°C variando as espessuras das camadas de bagaço e adotando a porosidade de 80%.

4.2.1 Experimentos de secagem com silo de Ø200x200mm

Tabela 7 - 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 |
| 4 | 124 | 76 | 20,96 |

Tabela 8 - Redução da umidade do bagaço de cana-de-açúcar por secagem por ar quente, vazão de 0,0684m³/min a 120°C.

| TEMPO [min] | PESO APÓS SECAGEM [g] | REDUÇÃO DO PESO [g] | UMIDADE FINAL BAGAÇO [%] |
|-------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|
| 1 | 186 | 14 | 47,31 |
| 2 | 172 | 28 | 43,02 |
| 3 | 160 | 40 | 38,75 |
| 4 | 148 | 52 | 33,78 |

4.2.2 Experimentos de secagem com silo de Ø260x250mm

Tabela 9 - Redução de umidade em função da camada de 100 mm de bagaço, vazão de 0,1368m³/min a 120°C

| TEMPO [min] | BAGAÇO PESO [g] | REDUÇÃO DO PESO [g] | REDUÇÃO PESO [%] | UMIDADE FINAL BAGAÇO [%] |
|-------------|-----------------|---------------------|------------------|--------------------------|
| 2 | 830 | 45 | 5,42 | 48,19 |
| 3 | 755 | 75 | 9,93 | 45,59 |
| 4 | 960 | 100 | 10,42 | 45,30 |

Tabela 10 - Redução da umidade em função da camada de 200 mm de bagaço, vazão de 0,1368 m³/min a 120°C

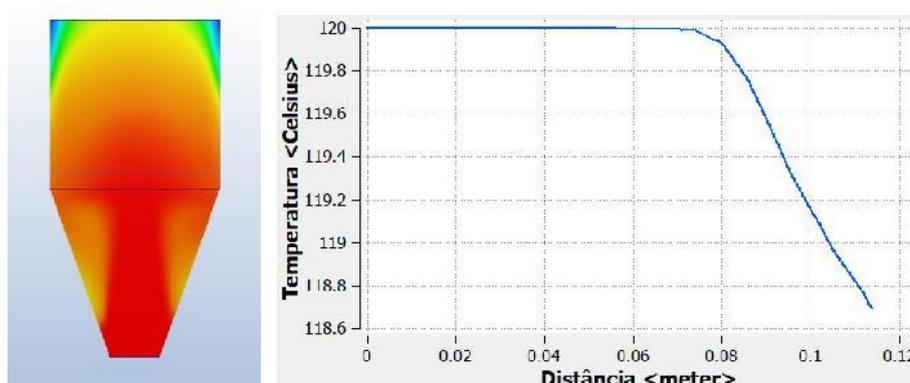
| TEMPO [min] | BAGAÇO PESO [g] | REDUÇÃO DO PESO [g] | REDUÇÃO DO PESO [%] | UMIDADE FINAL BAGAÇO [%] |
|-------------|-----------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 2 | 1705 | 40 | 2,35 | 49,82 |
| 3 | 1620 | 65 | 4,01 | 48,95 |
| 4 | 1620 | 100 | 6,17 | 45,30 |

4.2.3 Experimentos de secagem com caixa metálica com gases de exaustão

Durante os experimentos com a caixa metálica os gases de exaustão variaram entre 169 a 185°C, os gases que entravam na caixa pelos dois dutos inferiores com vazão de 138,4m³/min, (Figura 27), não se dispersavam ficando restritos à região formada por um cone na saída de cada duto, isto é, as regiões de secagem ficaram restritas às saídas, (Figuras 28 e 29). A umidade resultante do bagaço nessas regiões oscilavam entre 41 e 47%. Ficou claro a impossibilidade da existência de uma câmara que possibilitasse o acúmulo de gases para uma dispersão uniforme em toda a área do secador, e que a área de troca de calor em secador a ser projetado deveria ter a mesma seção do colchão de bagaço devido a baixa dispersão dos gases.

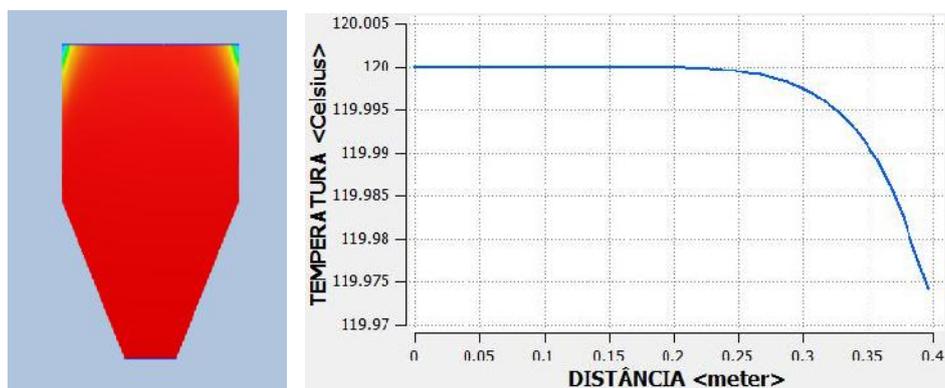
4.2.4 Simulações com silo de Ø200x200mm com soprador térmico

Figura 19 - Silo Ø200mm 100g de bagaço e 0,0684 m³/min de ar a 120°C



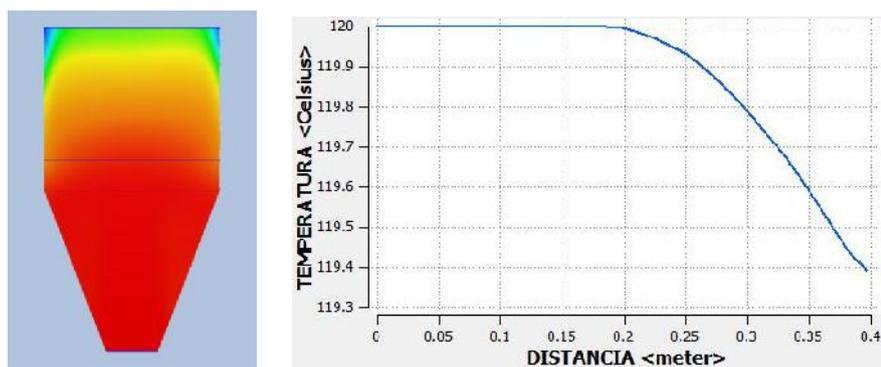
Fonte: O autor

Figura 20 - Silo Ø200mm 100g de bagaço e 0,1368m³/min de ar a 120°C



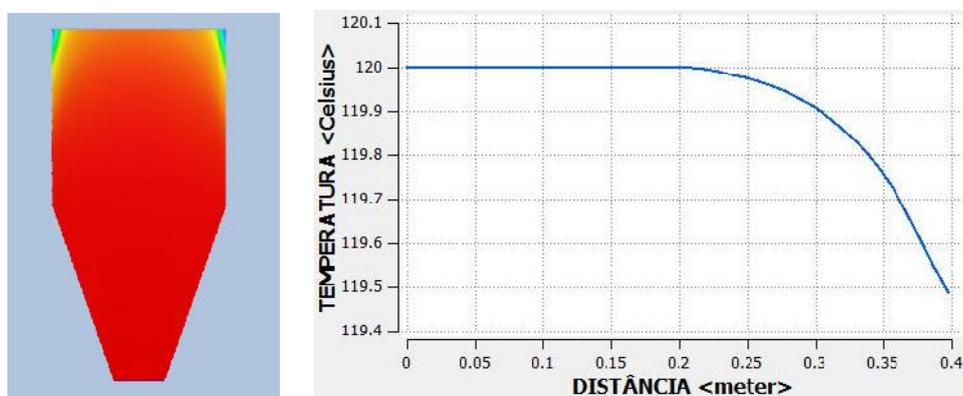
Fonte: O autor

Figura 21 - Silo Ø200mm 200g de bagaço e 0,0684m³/min de ar a 120°C



Fonte: O autor

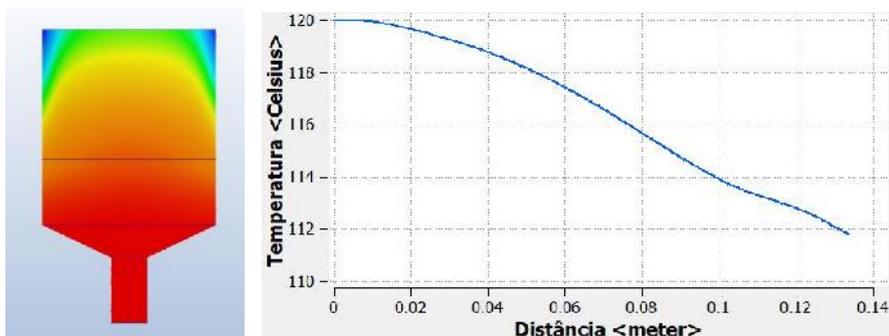
Figura 22 - Silo Ø200mm 200g de bagaço 0,1368m³/min de ar a 120°C



Fonte: O autor

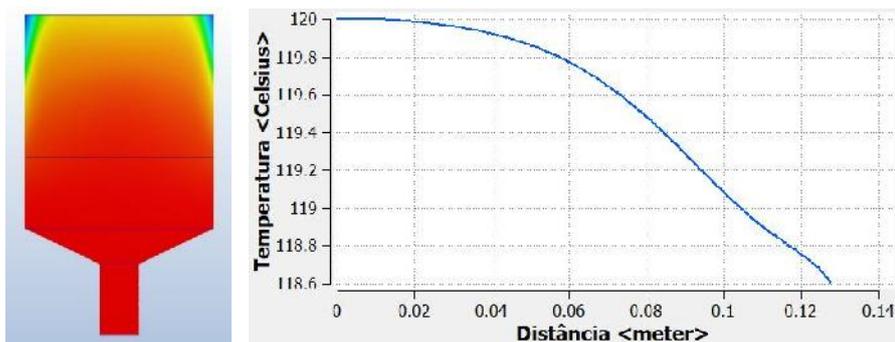
4.2.5 Simulações com silo de Ø260x250mm com soprador térmico

Figura 23 - Silo Ø255mm com camada de 100mm de bagaço 0,0684m³/min a 120°C



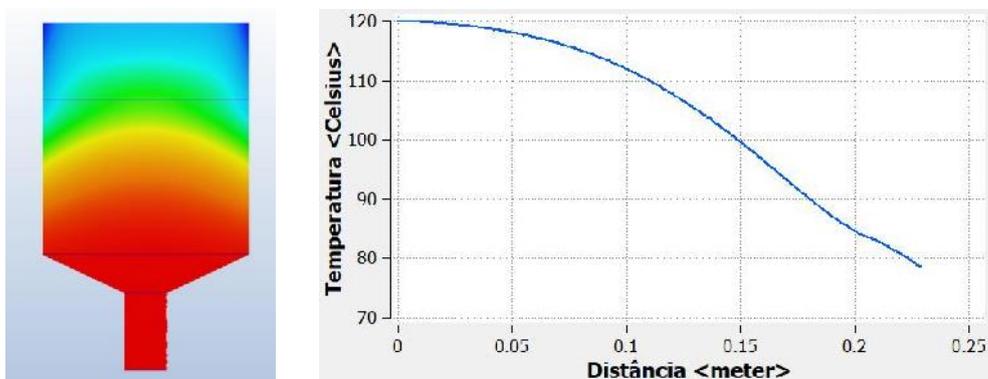
Fonte: O autor

Figura 24 - Silo Ø255mm com camada de 100mm de bagaço 0,1368m³/min a 120°C



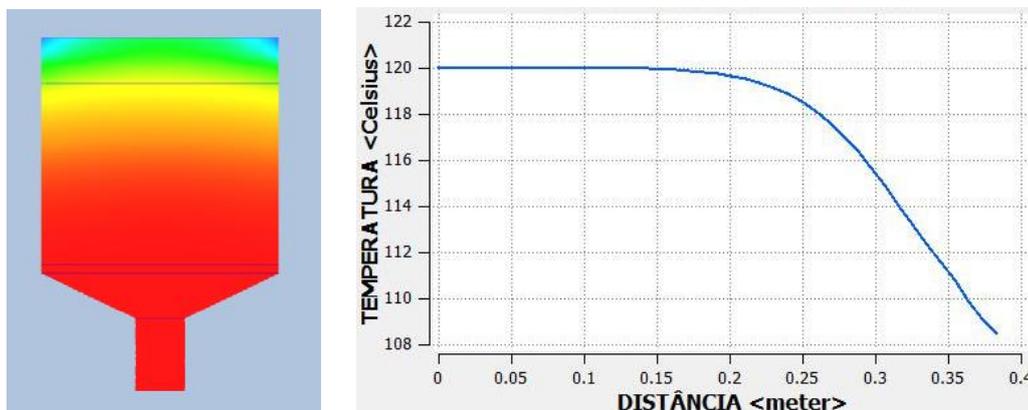
Fonte: O autor

Figura 25 - Silo Ø255mm com camada de 200mm de bagaço 0,0684m³/min a 120°C



Fonte: O autor

Figura 26 - Silo Ø255mm com camada de 200mm de bagaço 0,1368m³/min a 120°C



Fonte: O autor

4.2.6 Simulações com silo de Ø200x200mm com 100 e 200g de bagaço

Simulações realizadas com utilização de programa de CFD

4.2.6.1 Silo com 100g de bagaço e vazão do ar quente de 0,0684m³/min e 0,1368m³/min

O colchão de bagaço formado por 100g é de aproximadamente 17mm e redução de temperatura após a passagem pelo bagaço é de apenas 1,5°C, uma vazão de 0,1368m³/min a redução é de aproximadamente 0,03°C.

4.2.6.2 Silo com 200g de bagaço e vazão do ar quente de 0,0684m³/min e 0,1368m³/min

O colchão de bagaço formado por 200g é de aproximadamente 35mm e redução de temperatura após a passagem pelo bagaço é de apenas 0,6°C, para uma vazão de 0,1368m³/min a redução é de aproximadamente 0,4°C.

4.2.7 Simulações com silo de Ø260x250mm com camadas de 100 e 200mm de bagaço

4.2.7.1 Silo com camada de 100mm de bagaço e vazão do ar quente de 0,0684m³/min e 0,1368m³/min

Para uma vazão de 0,0684m³/min a redução de temperatura foi de 8°C e para uma vazão de 0,1368m³/min de 1,5°C.

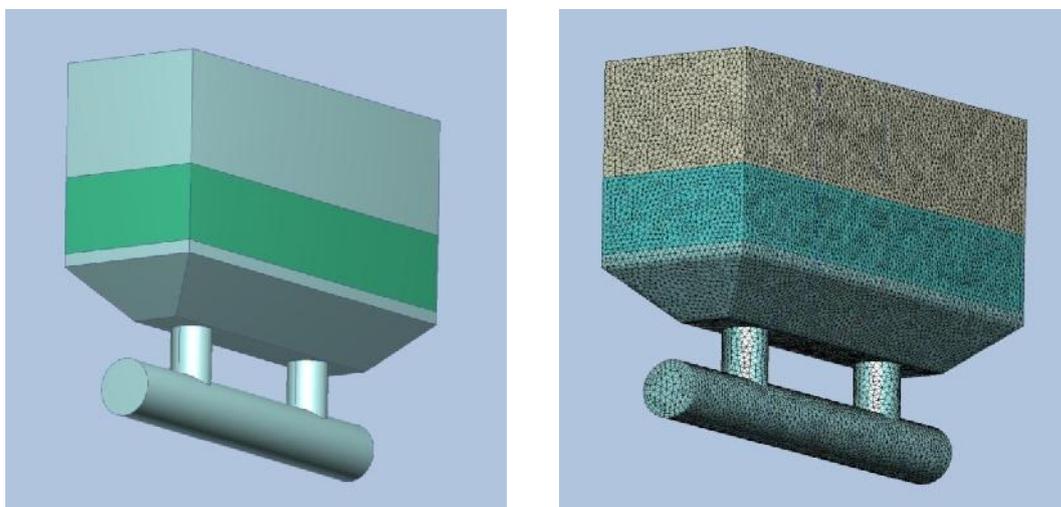
4.2.7.2 Silo com camada de 200mm de bagaço e vazão do ar quente de 0,0684m³/min e 0,1368m³/min

Para uma vazão de 0,0684m³/min a redução de temperatura foi de 38°C e para uma vazão de 0,1368m³/min de 12°C.

4.2.8 Simulações da caixa metálica com gases de exaustão da caldeira

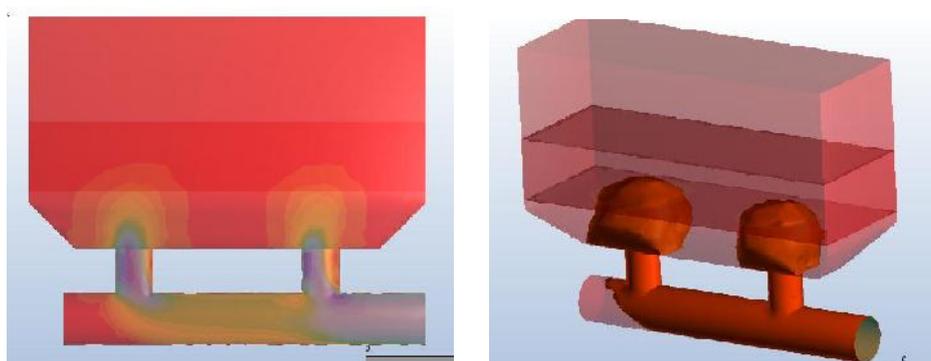
Para simulações do secador com gases de exaustão foi adotada vazão de 138,4m³/min com gases na temperatura de 185°C. Para as análises de fluxo e gradiente de temperatura foi adotada uma camada de bagaço com espessura de 0,60m. Os objetivos dessas simulações foram a verificação de fluxo dos gases, velocidade em regiões específicas e localização de pressões para posicionamento de purgadores do condensado. As simulações com o secador projetado tiveram o objetivo de determinar as linhas de fluxo dos gases e diferenças de pressão, especialmente nas moegas de alimentação e descarga de bagaço para avaliar a entrada de ar frio no sistema através dessas aberturas.

Figura 27 - Caixa metálica para simulações com o ar extraído da caldeira a 185°C e colchão de bagaço de 620mm.



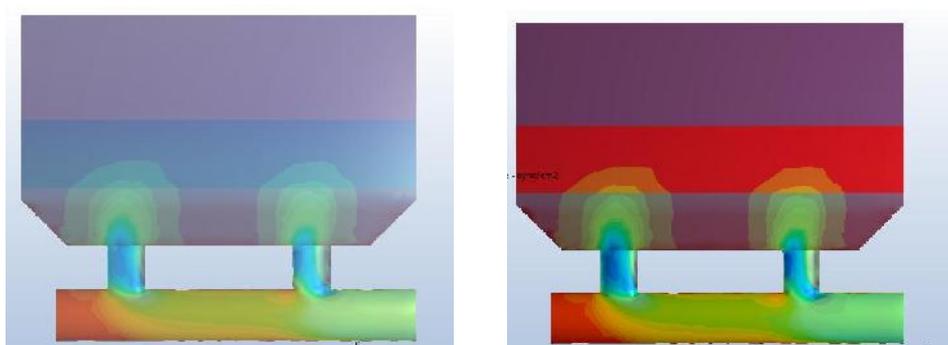
Fonte: O autor

Figura 28 - Representação da velocidade no plano central



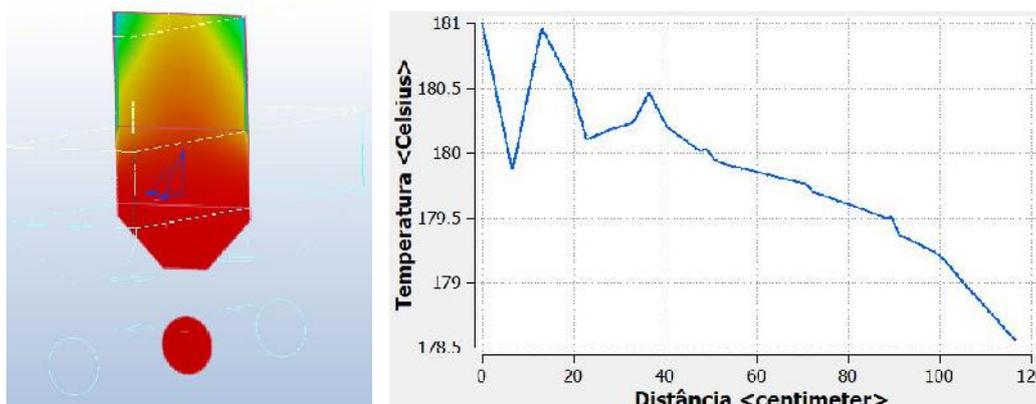
Fonte: O autor

Figura 29 - Representação da zonas de pressão no plano central



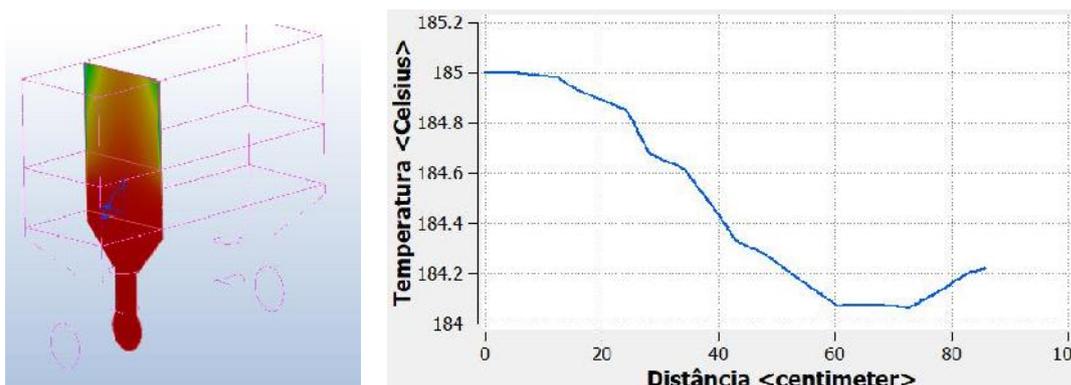
Fonte: O autor

Figura 30 - Variação da temperatura no plano entre os dutos verticais



Fonte: O autor

Figura 31 - Variação da temperatura no plano no centro de um dos dutos verticais



Fonte: O autor

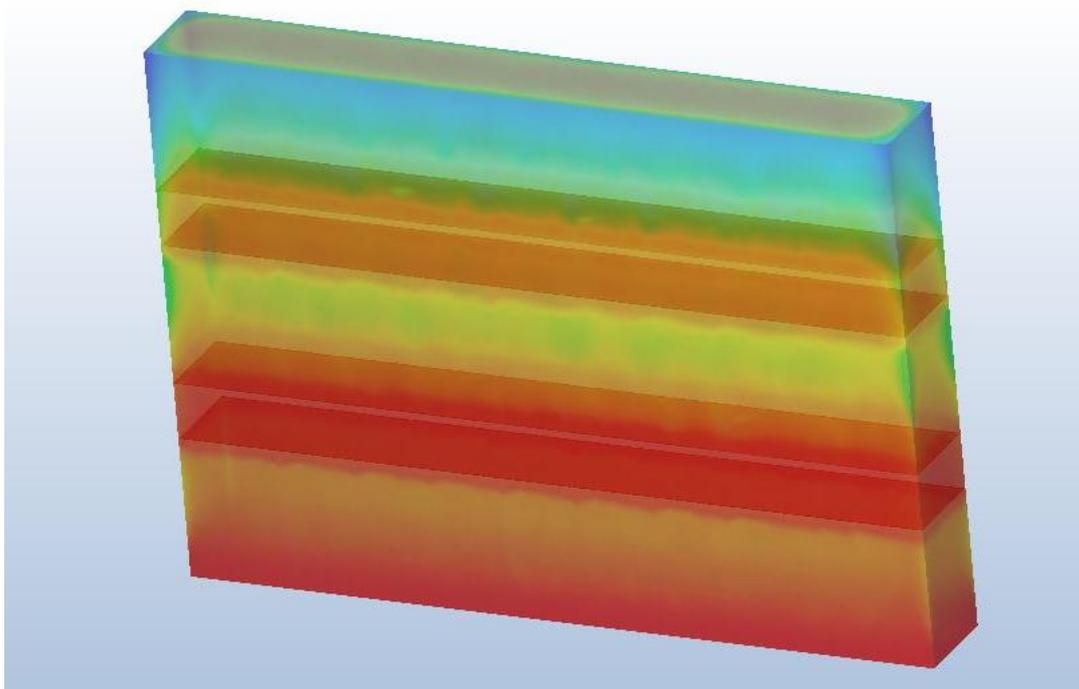
4.2.8.1 Simulações da caixa metálica com gases de exaustão da caldeira

As simulações com a caixa confirma o comportamento dos gases, como visto nos experimentos, os gases que saem dos dutos seguem praticamente sem dispersão devido à porosidade do bagaço, o que impede que a câmara inferior da caixa tenha pressão suficiente para um fluxo uniforme em toda a área do colchão de bagaço, na Figura 29, podemos visualizar zonas distintas de temperatura, (Figura 30) e pressão. Entres os dutos de alimentação, a temperatura oscila entre 181 e 178°C, no alinhamento vertical dos dutos (Figura 31) a redução de temperatura é de apenas 1°C.

4.2.9 Simulações com o secador posicionado no duto de exaustão

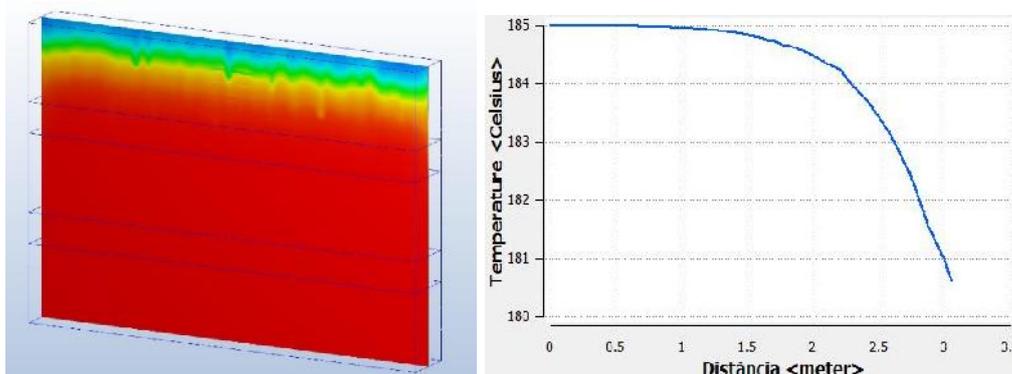
Para simulação do secador posicionado no duto de exaustão da caldeira, foi considerado um trecho livre com 1,50m de comprimento antes e depois dos colchões de bagaço e entre os dois colchões de 0,30m, um espaço vazio de 0,80m. O secador tem a mesma seção do duto da caldeira, 1,00x8,00m. A vazão adotada para os gases de exaustão foi de $505.836\text{m}^3/\text{h}$ ($8.430,6\text{m}^3/\text{min}$), temperatura variando entre 169 e 185°C , velocidade dos gases na passagem pelo secador de $17,50\text{m/s}$, essa velocidade é controlada exclusivamente pelos reguladores de pressão da caldeira, que devem ser mantida em 200Pa abaixo da pressão atmosférica. (Figuras 32 e 33)

Figura 32 - Modelo esquemático do secador com dois colchões de bagaço



Fonte: O autor

Figura 33 - Linearização da temperatura entre a base do colchão inferior e o topo do colchão superior mostrando a diferença de temperatura



Fonte: O autor

4.2.9.1 Simulações com o secador posicionado no duto de exaustão

Essa simulação leva em consideração os resultados obtidos nos experimentos e simulações e representa a forma esquemática do projeto do secador a ser proposto. A redução de temperatura, após a passagem dos gases quentes por dois colchões de bagaço com espessura de 0,30m, é de 4°C. Baixa perda de calor, devido ao grande volume de ar que sai da caldeira, área de passagem dos gases igual à área dos colchões de bagaço.

4.2.10 Considerações sobre os experimentos e simulações

Para os experimentos dos silos com 200g de bagaço as diferenças de temperatura entre o primeiro contato com o colchão de bagaço e a saída variou em menos de 1°C, tanto para a vazão de 0,0684m³/min quanto para a vazão de 0,1368m³/min para temperatura do ar de entrada de 120°C, (Tabelas 7 e 8), a redução da massa de água é proporcional à quantidade de ar fornecida, demonstrando a pequena influência que tem a camada de bagaço devido a sua alta porosidade.

Podemos observar que fornecendo a mesma quantidade de ar para o silo com camada de 100mm e para o silo com camada de 200mm de bagaço, a quantidade de água retirada so sistema é praticamente a mesma, com variações muito pequenas, (Tabela 9 e 10), em média 12% para o tempo de secagem de 2 e 3min e sem variação para o tempo de secagem de 4min.

Para os resultados das secagens em bancada as taxas de redução de umidade para uma mesma massa de ar quente e mesma velocidade de passagem pelo bagaço são maiores onde a umidade é maior, decrescendo com o tempo, isto é, a medida que a umidade cai decresce também a velocidade de secagem. Independente da massa úmida a quantidade de água reduzida em valores absolutos são próximos para uma mesma massa de ar na mesma temperatura. O aumento da eficiência de retirada de água do bagaço em função de sua umidade também foi observado nos secadores ciclônicos, (CORREA, 2003). Diferentemente do secador ciclônico, ou pneumático, onde os gases quentes são soprados juntamente com o bagaço evaporando a água e sendo separado pelo ciclone ao final do secador, a concepção é de passagem de um gás através de um meio poroso.

A água fica dispersa nas fibras, que tem baixa condutividade térmica, e quanto maior a umidade menor essa dispersão o que facilita a troca de calor. Quando a umidade é reduzida ocorre um aumento dessa dispersão, em conformidade com as simulações os gases seguem uma trajetória uniforme com pouca ou nenhuma dispersão o que reduz a troca de calor. Especificamente para as simulações realizadas, onde a finalidade era verificar a dispersão dos gases no bagaço e a distribuição de calor no meio, foi verificado que devido à porosidade do bagaço que fica em até 96,2%(OLIVEIRA,VALTER R. *et al* 2002) e baixa condutividade térmica que varia de 0,103 a 0,113 W/m.K, principalmente quando comparado a água que é de 0,58 W/m.K (SILVIA, Thais Martins Carvalho, 2012), que dificulta a condução do calor para regiões distantes do fluxo de ar, a passagem dos gases é praticamente sem desvios, o que implica que a área de troca fica restrita a esse fluxo.

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 1°C e 7°C. Nas Figuras 28 e 29 é visível a concentração dos gases nas saídas dos dutos inferiores, não há dispersão, isso devido à baixa porosidade do bagaço. Nas Figuras 30 e 31 que representam o gradiente de temperatura ao longo de uma linha vertical entre os dois dutos inferiores e em uma linha vertical no centro de um dos dutos inferiores. Mostra que entre os dois dutos já parte de uma temperatura inferior à nominal, 181°C e final de 178,5°C, no centro de um dos dutos a temperatura dos gases, após atravessar o colchão de bagaço diminui de apenas 1°C, a razão disso é a porosidade alta que oferece pouca resistência à passagem dos gases.

Os modelos construídos para a simulação do duto tinham como região de secagem um 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. O posicionamento do colchão de bagaço, futuramente o secador de esteira, tem a finalidade de facilitar o arraste da umidade presente no bagaço que evaporar e ter esse colchão como filtro para captação do bagacilho e a parte inferior do duto como reservatório para o condensado.

5 CONCLUSÕES

As diferenças de perda de água não são significativas, quando comparadas as espessuras do colchões de bagaço, evidenciando a influência apenas da massa de ar quente injetada no bagaço e a pequena influência da camada de bagaço devido a sua alta porosidade que chega a 96,2% (OLIVEIRA, VALTER R. *et al* 2002) e baixa condutividade térmica que varia de 0,103 a 0,113 W/m.K, principalmente quando comparado a água que é de 0,58 W/m.K (SILVIA, Thais Martins Carvalho, 2012), que dificulta a condução do calor para regiões distantes do fluxo de ar.

O ponto de relevância deste trabalho, e que foi crucial para a viabilidade de um secador nas condições previstas, a verificação que na maioria dos trabalhos analisados e citados na revisão bibliográfica, avaliam o rendimento através do ganho em poder calorífico com a redução da umidade em processos de secagem, comparando com o poder calorífico do bagaço na saída das moendas. O processo de secagem não resulta num ganho linear, é incontestável o ganho de poder calorífico, temperatura, redução dos gases para combustão e aumento da eficiência das caldeiras, mas é necessário uma análise criteriosa para que esses ganhos não se tornem virtuais. Quanto menor a umidade a ser alcançada, maiores os gastos de energia para esse fim, a interrupção do fluxo dos gases que passam pelos economizadores, alterando os projetos iniciais das caldeiras, para se obter gases mais quentes, demanda também um custo adicional para seu bombeamento até o secador, devendo-se ainda adicionar o custo e manutenção do equipamento de secagem e espaço ocupado. Com a finalidade apenas de comparação, foi preparada uma tabela onde são indicados os percentuais de umidade do bagaço, (Tabela 11), o poder calorífico inferior e superior (PCI e PCS), a massa seca para cada umidade, o ganho percentual em PCI e PCS e o aumento percentual do consumo da massa seca de bagaço com base em 51% de umidade comparada com 48%, 46% e 32%, os dois primeiros percentuais são valores esperados para o secador projetado, enquanto 32% é a redução máxima alcançada no secador pneumático instalado na CAIG em Goiana - PE por Jili Augustinsky. Fica evidente que o aumento percentual do PCS é acompanhado na mesma proporção do consumo de bagaço seco.

A caldeira da unidade produtora onde foram efetuados os estudos, tem capacidade para 150ton/h de vapor a uma pressão de 5,2 MPa (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. 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), além de forçar a caldeira a trabalhar fora das especificações de projeto.

Tabela 11 - Comparativo entre ganho de PCI e PCS e aumento do consumo de bagaço seco

| UMIDADE DO BAGAÇO [%] | MASSA DE REFERÊNCIA [g] | PCI kcal/kg | PCS kcal/kg | MASSA SECA [g] | AUMENTO DO PCI [%] | AUMENTO DO PCS [%] | AUMENTO DO CONSUMO BAGAÇO [%] |
|-----------------------|-------------------------|-------------|-------------|----------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|
| 51 | 1000 | 1748,9 | 2226,4 | 490 | 0 | 0 | 0 |
| 48 | 1000 | 1894,4 | 2364,4 | 520 | 8,44 | 6,25 | 6,12 |
| 46 | 1000 | 1991,4 | 2456,4 | 540 | 14,06 | 10,42 | 10,2 |
| 32 | 1000 | 2670,4 | 3100,4 | 680 | 52,69 | 39,25 | 38,77 |

Fonte: O autor

Outros fatores de influência nas soluções adotadas foram a constatação que o volume de água contido no bagaço que se pretende retirar e a temperatura de saída dos gases do secador após a passagem pela camada de bagaço úmido confirmam os dados constantes no fluxograma original do fabricante da caldeira e verificados através de balanço de massa e térmico realizados, também importantes para a definição do tipo, geometria e localização do secador são a facilidade de instalação, manutenção e custo benefício. Positivo também é o acréscimo do consumo do bagaço devido à secagem com igual incremento percentual do PCS.

Os experimentos, simulações, condições e dados constantes sobre a caldeira fornecidos pelo fabricante, balanços de massa e energia feitos para as condições normais e adversas confirmam a viabilidade da instalação do secador na Companhia Nacional Alcoolquímica Nacional com a obtenção de resultados dentro do previsto, com baixo custo de instalação e manutenção, pela própria usina em suas instalações e equipe própria de manutenção. O secador deverá ser instalado para entrar em operação na safra 2014/2015 paralelo à solicitação de patente de melhoria de equipamento, uma vez que será parte integrante de caldeira fornecida por terceiros

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros sugerem-se:

- Os gases de combustão da caldeira saem da câmara de combustão com temperatura média de 398°C e é utilizado num trocador de calor ar-água para pré-aquecer a água de alimentação, reduzindo sua temperatura para uma média de 334°C, posteriormente utilizado para pré-aquecer o ar de alimentação da caldeira, saindo com temperatura média de 185°C. Utilizar os gases após o pré-aquecedor de água e comparar com os ganhos a 185°C.
- Realizar estudos comparativos entre o aumento do poder calorífico com a redução da umidade do bagaço com a utilização dos gases de exaustão a 398°C e 334°C, comparado com as perdas pela não utilização dos pré-aquecedores de água e ar e aumento do consumo do bagaço seco. (Tabela 11).

REFERÊNCIAS

ARRASCAETA, FRIEDMAN P. **Bagasse Drying: Past, present and Future.** International Sugar Journal, v. 86, (1021), pp.3.6, 1984.

Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores - ANFAVEA, 2010.

BALAT, M. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. Energy Conversion and Management, v. 52, p. 858-875, 2011.

BARBOSA R. D. Sugar cane bagasse drying in pneumatic system. Tese de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 1992.

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável/organização. Rio de Janeiro: BNDES, 2008.

BUILLIET, V. J. Bagasse drying versus air pre-heating, The Sugar Journal, pp. 53, 1976

CGEE. **Bioetanol combustível:** uma oportunidade para o Brasil – Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2009.

CONAB—Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em 30/04/2013.

CORREA, J. L. G, Discussão de parâmetros de projetos de secadores ciclônicos. Tese de doutorado, UNICAMP, 2003.

DEEPCHAND, KASSIAP; Sugar Cane Bagasse Energy Cogeneration – Lessons from Mauritius. Parliamentarian Forum on Energy Legislation. Cape Town, South Africa, 2005.

DEMIRBAS, AYHAN, Combustion of different biomass fuels. pp.219-230, 2003.

DIAS, M. O. S.; ENSINAS, A. V.; NEBRA, S. A.; MACIEL FILHO, R.; ROSSEL, C. E. V.; MACIEL, M. R. W. **Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: Integration to conventional bioethanol production process.** Chemical Engineering Research and Design, v. 87, p. 1206 – 1216, 2009.

ENSINAS V. ADRIANO, NEBRA A. SILVA, LOZANO MIGUEL A., LUIZ M. SERRA, Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane, Energy Conversion & Management. pp. 2978-2987, 2007.

FURINES, J. H. **Pre- drying bagasse using flue gases.** The Sugar Journal, v. 39, (3), p. 39-40, 1976.

HUGOT, E; Manual da Tecnologia Açucareira; Editora Mestre Jou – São Paulo – SP, 1977

HUSAIN Z., ZAINAL, Z. A., ABDULLAH, M. Z., Analysis of biomass-residue-based cogeneration system in palm oil mills. Biomass & Energy. pp. 117-124, 2002.

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, junho 1987.

McKENDRY, PETER, Energy production from biomass: overview of biomass, pp. 37-46, 2001.

OLIVEIRA, VALTER R.; FREIRE, FRANCISCO M.; VENTURIN, REGIS; CARRIJO, OMAR A.; MASCARENHAS, MARIA H. T.; **Physical characterization of growing media.**

PARIKKA, MATTI, Global biomass resources, Biomass & Bioenergy, pp. 613 - 620, 2003.

PELLEGRINI, LUIZ F., OLIVEIRA, SILVIO Jr. , Exergy analysis of sugarcane bagasse gasification. pp. 314-327, 2005.

PERRÉ, PATRICK, TURNER IAN W. A 3d transpore: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media, International Journal Heat and Mass Transfer. pp. 4501-4521, 1999.

REGO, J. L., **Fogo Morto**. José Olympio 73ª edição. Rio de Janeiro – RJ, 2012

SILVA, MARCELO BACCI, MORAIS, ANDERSON S., Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro -RJ, 2008.

SugarSoft – Sugar Technology; Valor calorífico do bagaço de Cana-de-çúcar , 2008

VASCONCELOS, S. M.; **Pré-Tratamentos Hidrotérmico e com Ácido Fosfórico Diluído de Bagaço de Cana-de-açúcar para Aplicação em Biorefinarias**, Tese de Doutorado. Recife, PE: Universidade Federal de Pernambuco, 2013.

ZENG, XIANYANG, Ma YITAI, Utilization of straw in biomass energy in China, Renewable & Sustainable Energy Review. pp. 976-987, 2005.

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

Tabela 12 - 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 13 - 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: O autor

Tabela 14 - 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: O autor

APÊNDICE B - COMBUSTÃO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

B.1 COMBUSTÃO DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS QUE COMPÕEM O 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.(SugarSoft)

B.1.1 Combustão do hidrogênio



$$\text{H} = 2$$

$$\text{O} = 16$$

$$4 + 32 \rightarrow 36 \text{ dividindo por 4, teremos } 9$$

- A água formada na combustão do bagaço seco é nove vezes a massa de hidrogênio presente.

$$\text{E} = 9 * \text{H} \quad (\text{B.2})$$

- A energia resultante da combustão do hidrogênio, contido em 67.905kg de bagaço com 51% de umidade, é dado por:

$$C_H = 67.905 * \left[1 - \left(\frac{51}{100}\right)\right] * 0,065 * 141.800 = 306.681.388 \text{ kJ} = 306,7 \text{ MJ} \quad (\text{B.3})$$

$$0,065 * 8 = 0,52 \text{ kg de oxigênio, } 0,52 * 0,70 = 0,364 \text{ m}^3/\text{kg}$$

- A quantidade total de oxigênio necessário para a combustão do hidrogênio mais o carbono presentes no bagaço é de 1,7749 kg de oxigênio/kg bagaço, equivalente

a 1,2424 m³/kg de bagaço. O oxigênio contido no bagaço é de 0,44 kg/kg, 0,308 m³/kg de bagaço. A quantidade de oxigênio a ser fornecida pelo ar é dada por:

$$1,2424 - 0,3080 = 0,9344 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

- A quantidade de ar necessária para a combustão será:

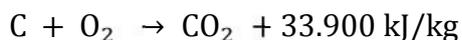
$$1,3349 * \left(\frac{100}{23,15}\right) = 5,75 \text{ kg} \quad 0,9344 * \left(\frac{100}{20,84}\right) = 4,47 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

- A quantidade de água formada durante a combustão de 1 kg de bagaço é de:

$$0,065 * 9 * 1 = 0,585 \text{ kg de água/kg de bagaço seco.}$$

Na massa seca do bagaço há 6,5% de hidrogênio, portanto, a massa de água formada na combustão de 1kg de bagaço será de $9 * 0,065 * 1 = 0,585\text{kg}$, ou seja, resultará uma massa de água equivalente a 58,5% da massa seca.

B.2 Combustão do carbono



(B.4)

$$12 + 32 \rightarrow 44, \text{ dividindo por } 12, \text{ teremos: } 1 + 2,67 \rightarrow 3,67$$

- Para a combustão de 1 kg de bagaço seco é necessário:

$0,47 * 2,67 = 1,2549 \text{ kg}$ de oxigênio, equivalente a $0,70 * 1,2549 = 0,873 \text{ m}^3$ de oxigênio.

- A energia resultante da massa de carbono, que tem poder calorífico de 33.900 kJ/kg, contido em 67.905kg de bagaço com 51% de umidade, é dado por:

$$C_c = 67.905 * \left[1 - \left(\frac{51}{100} \right) \right] * 0,47 * 33.900 = 530.145.879 \text{ kJ} = 530,1 \text{ MJ} \quad (\text{B.5})$$

B.3 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.

Se parte do carbono é queimado para CO ao invés de CO₂, uma grande parte do calor é perdida, vejamos:



B.4 Bagaço queimando sob condições de fornalha:

Condição 1: Bagaço úmido.

2: Excesso de ar.

w → umidade absoluta do bagaço, kg água/kg bagaço;

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

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

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

Pg → massa de gases de combustão

Vg → volume de gases de combustão;

Pgs → massa de gases considerados secos;

V_{gs} → volume de gases considerados secos;

Consideramos todos os volumes a 0°C e pressão atmosférica

$$P_a = 5,75(1 - w)m \quad (\text{B.7})$$

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

$$P_g = [5,75(1 - w)m] + 1 \quad (\text{B.8})$$

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

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

$$P_{gs} = (1 - w)(5,75m + 0,415), \quad (\text{B.10})$$

do mesmo modo:

$$V_a = 4,46(1 - w)m \quad (\text{B.11})$$

$$V_g = 4,46(1 - w)m + 0,572w + 0,672 \quad (\text{B.12})$$

$$V_{gs} = 4,46(1 - w)m - 0,056(1 - w). \quad (\text{B.13})$$

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

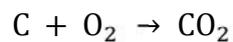
$$V_T = V_0 \left[273 + \left(\frac{t}{273} \right) \right], \quad \text{volume a } t^{\circ}\text{C e } V_0 \text{ o volume a } 0^{\circ}\text{C} \quad (\text{B.14})$$

Composição dos gases da chaminé:

- A massa dos gases da chaminé é dada por:

$$P_g = 5,75 \cdot (1 - w)m + 1 \quad (\text{B.15})$$

- Cálculo da quantidade individual dos gases:



A massa de CO₂

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

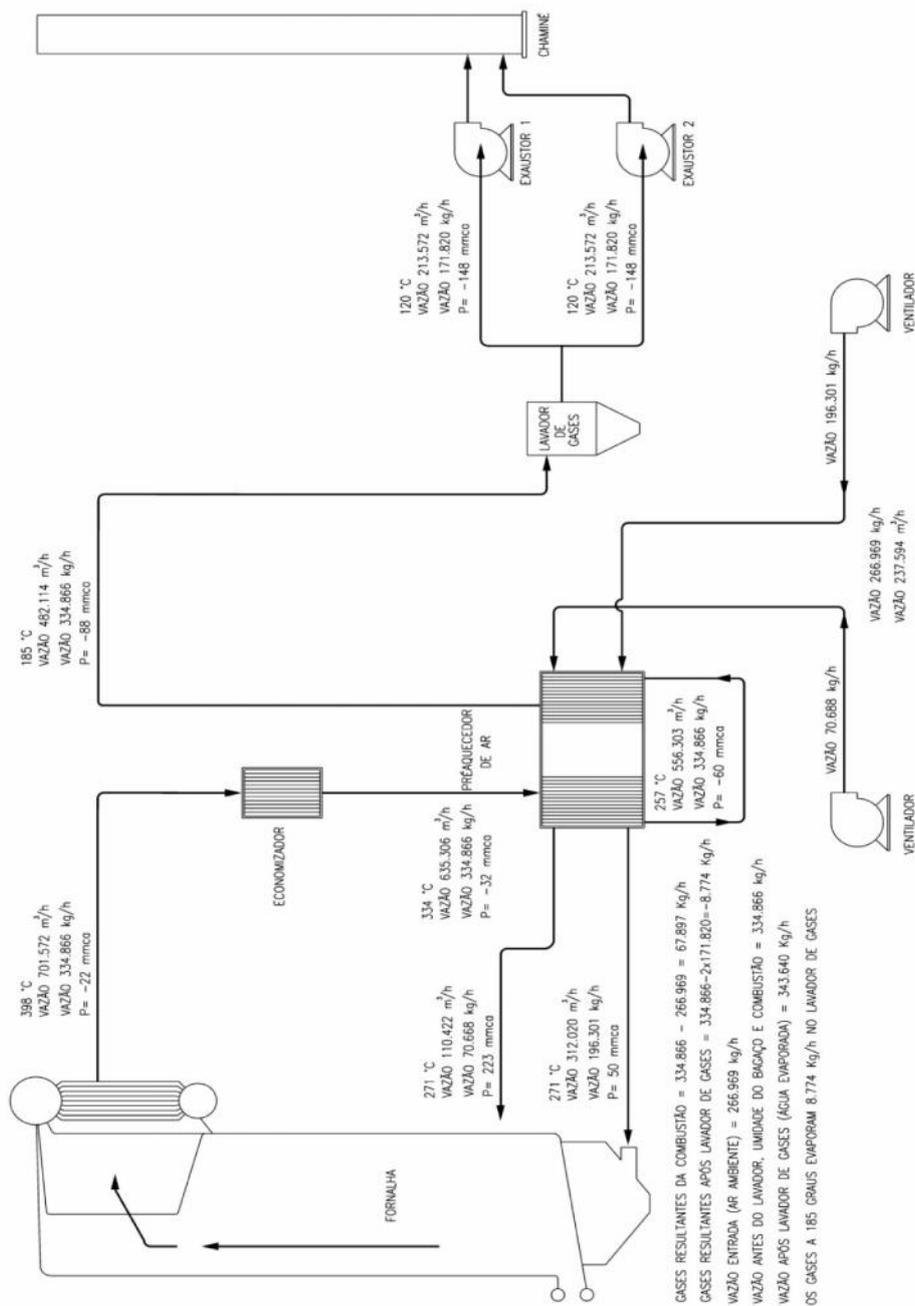
a massa de CO₂ para o bagaço seco é de $0,6149 * 33.273 \text{ kg/h} = 20.460 \text{ kg/h}$

A temperaturas 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 900⁰C a 1.200⁰C com excesso de ar de 30% a 100% e a umidade do bagaço variando de 40% a 54% (MAGASINER, 1987).

APÊNDICE C - BALANÇO DE MASSA E ENERGIA DA CALDEIRA

C.1 BALANÇOS DE MASSA E ENERGIA COM UMIDADE DE 51% E NA CONDIÇÃO PROPOSTA COM UMIDADE DE 46%.

Figura 34 - Fluxograma atual da caldeira



Fonte: Manual do fabricante da caldeira

C.2 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA COM BAGAÇO COM UMIDADE DE 51%.

C.2.1 Balanço de massa

$$F_{\text{bagaço_seco_entra}} = F_{\text{bagaço_seco_sai}} \quad (\text{C.1})$$

$$F_{\text{água_liquida_entra}} = F_{\text{água_liquida_sai}} + F_{\text{evaporação}} \quad (\text{C.2})$$

$$G_{\text{ar_seco_entra}} = G_{\text{ar_seco_sai}} \quad (\text{C.3})$$

$$G_{\text{vapor_d'água_entra}} + F_{\text{evaporado}} = G_{\text{vapor_d'água_sai}} \quad (\text{C.4})$$

- O conteúdo da mistura de base úmida do bagaço do secador que entra e sai é dado pela umidade específica:

$$W_{\text{entra}} = F_{\text{água_liquida_entra}} / (F_{\text{água_liquida_entra}} + F_{\text{bagaço_seco_entra}}) \quad (\text{C.5})$$

$$W_{\text{sai}} = F_{\text{água_liquida_sai}} / (F_{\text{água_liquida_sai}} + F_{\text{bagaço_seco_sai}}); \quad (\text{C.6})$$

- Massa de bagaço úmido = 67.905 kg/h com umidade de 51%.

$$\text{Massa seca} = \left(\frac{1-51}{100}\right) * 67.905 \text{ kg/h} = 33.273 \text{ kg/h}$$

$$\text{Massa de água} = \left(\frac{51}{100}\right) * 67.905 \text{ kg/h} = 34.632 \text{ kg/h}$$

Massa de ar de combustão: 266.969 kg/h a 28°C , com 30% de excesso de ar.

Volume de ar de combustão a 28°C = 237.594 m³/h

- Umidade dos gases da combustão

A água presente no ar de alimentação, em forma de vapor, com umidade relativa de 85% é de 24g/m³, a massa total de água presente em 266.969 kg/h de ar é de 5.702 kg/h, que corresponde a 0,02135kg água/kg ar.

- Água presente no bagaço, massa total de 67.905 kg/h com 51% de umidade é dada por:

$$67.905 * \left(\frac{51}{100}\right) = 34.632 \text{ kg/h água}$$

- Água resultante da combustão do hidrogênio é nove vezes a massa do hidrogênio presente na massa seca.

$$9 * 0,065 * \left[1 - \left(\frac{51}{100}\right)\right] * 67.905 = 19.464 \text{ kg/h}$$

- Água total resultante da combustão:

34.632 + 19.464 = 54.096 kg/h, mais a água contida no ar de entrada para combustão

5.702 kg/h de água presente no ar de entrada

Água total resultante da combustão = 34.632 + 19.464 + 5.702 = 59.798 kg/h

Total de ar seco de entrada = 266.969 – 5.702 = 261.267kg/h.

$$\text{Gás proveniente do carbono} = 0,47 * 67.905 * \left[1 - \left(\frac{51}{100}\right)\right] = 15.638\text{kg/h}$$

$$\text{Gás proveniente do Oxigênio} = 0,44 * 67.905 * \left[1 - \left(\frac{51}{100}\right)\right] = 14.640\text{kg/h}$$

$$\text{Total de gás após a combustão} = 261.267 + 15.638 + 14.640 = 291.545\text{kg/h}$$

$$\text{Massa total dos gases} = \text{vapor d'água} + \text{gases} = 59.798 + 291.545 = 351.343 \text{ kg/h}$$

- Valores de projeto na condição atual:

$$W_{entra} = 67.905 * \left(\frac{51}{100}\right) / \left[67.905 * \left(\frac{51}{100}\right) + 67.905 * \left(1 - \frac{51}{100}\right)\right]$$

$$W_{entra} = \frac{34.632}{34.632+33.273} = 0,51; \text{ umidade de } 51\%$$

$$W_{sai} = \left[\frac{(34.632 - 6.288)}{(67.905 - 6.288)}\right] = 0,46; \text{ umidade de } 46\%$$

A umidade absoluta de cada fluxo de ar é determinada pelas equações 3.33 e 3.34:

$$Y_{entra} = G_{\text{vapor_d'água_entra}}/G_{\text{ar_entra}} \quad (\text{C.7})$$

$$Y_{sai} = G_{\text{vapor_d'água_sai}}/G_{\text{ar_seco_sai}} \quad (\text{C.8})$$

Quantidade de água presente no ar antes da passagem pelo secador de bagaço

$$Y_{entra} = G_{\text{vapor_d'água_entra}}/G_{\text{ar_seco_entra}} = 59.798 / (261.267 + 15.638 + 14.640)$$

$$Y_{entra} = 59.798/291.545 = \mathbf{0,2051 \text{ kg água/kg gas}}$$

Após a passagem pelo secador de bagaço, com previsão de retirada de 6.288 kgde água:

$$Y_{\text{sai}} = G_{\text{vapor_d\acute{a}gua_sai}} / G_{\text{ar_seco_sai}} = \frac{59.798 + 6.288}{297.247} \text{ kg \acute{a}gua / kg}_{\text{ar}}$$

$$Y_{\text{sai}} = \frac{66.086}{291.545} = \mathbf{0,2529} \text{ kg \acute{a}gua / kg g\acute{a}s}$$

A relação entre o fluxo total de ar, o fluxo de ar seco, e a umidade absoluta  dada pela Equação 3.35

$$G_{\text{ar_seco}} = G_{\text{ar}} * \frac{1}{(1+Y)} \quad (\text{C.9})$$

$$G_{\text{ar_seco}} = \frac{(291.545)}{(1 + 0,2051)} = 277.398 \text{ kg/h}$$

O fluxo de massa do secador de bagaço e a água líquida que entra pode ser calculada pelo fluxo total do bagaço no secador e a umidade absoluta, pela Equação 3.36:

$$G_{\text{gua_liquida_entra}} = G_{\text{bagaço}} * w_{\text{entra}} \quad (\text{C.10})$$

$G_{\text{gua_liquida_entra}} = 67.905 * 0,51 + 0,2135 * 266.969 = 40.334 \text{ kg/h}$; água contida no bagaço mais a água contida no ar de entrada.

$$F_{\text{bagao_seco}} = F_{\text{bagaço}} * (1 - w_{\text{entra}}) = 67.905 * (1 - 0,51) = 33.273 \text{ kg/h; massa seca.}$$

C.2.2 Secador de bagaço

O fluxo de massa do ar seco e o vapor d'água que entra é calculado do fluxo total de ar e a umidade absoluta

$$G_{\text{vapor_d\acute{a}gua_entra}} = G_{\text{ar_seco}} * Y_{\text{entra}}$$

$$G_{\text{vapor_d\acute{a}gua_entra}} = 291.545 * 0,2051 = 59.798 \text{ kg/h aqui}$$

$$F_{\text{\acute{a}gua_liquida_sai}} = F_{\text{baga\c{c}o_seco_sai}} * \left[\frac{w_{\text{sai}}}{1 - w_{\text{sai}}} \right]$$

$$F_{\text{\acute{a}gua_liquida_sai}} = 33.273 * \left(\frac{0,46}{1 - 0,46} \right)$$

$$F_{\text{\acute{a}gua_liquida_sai}} = 28.344 \text{ kg/h}$$

$$G_{\text{evaporado}} = F_{\text{\acute{a}gua_liquida_entra}} - F_{\text{\acute{a}gua_liquida_sai}}$$

$$G_{\text{evaporado}} = 34.632 - 28.344 = 6.288 \text{ Kg/h}$$

Cálculo da massa de total de água evaporada:

$$G_{\text{vapor_d\acute{a}gua_sai}} = G_{\text{vapor_d\acute{a}gua_entra}} + G_{\text{evaporado}}$$

$$G_{\text{vapor_d\acute{a}gua_sai}} = 59.798 + 6.288 = 66.086 \text{ Kg/h}$$

A umidade absoluta nos gases de saída é dada por:

$$Y_{\text{sai}} = G_{\text{vapor_d\acute{a}gua_sai}} / G_{\text{ar_seco_sai}}$$

$$Y_{\text{sai}} = 66.086 / 291.545 = 0,2267; \text{ umidade absoluta de saída}$$

$$w_{\text{sai}} = 66.086 / (66.086 + 291.545) = 0,1847; \text{ umidade relativa}$$

C.2.2.1 Balanço de energia – Verificação da temperatura de saída dos gases

$$H_{ar_entra} + H_{vapor_d\acute{a}gua_entra} + H_{baga\c{c}o_seco_entra} + H_{\acute{a}gua_liquida_entra}$$

$$= H_{ar_seco_sai} + H_{vapor_d\acute{a}gua_sai} + H_{baga\c{c}o_seco_sai} + H_{\acute{a}gua_liquida_sai} + H_{calor_perdido}$$

Para uma primeira aproximação o calor perdido pode ser desconsiderado.

$$H_{ar_seco} + \Delta H_{vapor_d\acute{a}gua} + \Delta H_{evaporado} + \Delta H_{\acute{a}gua_liquida} + H_{baga\c{c}o_seco} = 0$$

$$\Delta H_{ar_seco} = G_{ar_seco_entra} * C_{p_{ar}} * (T_{entra} - T_{sai})$$

$$\Delta H_{ar_seco} = 291.545 \text{ kg/h} * 1 * \text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} * (185^\circ\text{C} - T_{sai}) [\text{kJ/h}];$$

Valores tabelados:

$$H_{vapor_30^\circ\text{C}} = 125,8 \text{ kJ/Kg}; h_f = 125,8 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{vapor_185^\circ\text{C}} = 2.849 \text{ kJ/kg};$$

$$H_{evaporado} = - 6.288 \text{ kg/h} * (1995 - 125,8) = -11.753.530 \text{ kJ/h};$$

$$H_{\acute{a}gua_liquida} = (28.344 \text{ kg/h}) * (4,184 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot (30^0 - 90^0)$$

$$H_{\acute{a}gua_liquida} = -7.115.478 \text{ kJ/h};$$

$$H_{baga\c{c}o_seco} = (33.273 \text{ kg/h}) * (2,5 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot (30^0 - 90^0)$$

$$H_{baga\c{c}o_seco} = - 4.990.950 \text{ kJ/h}$$

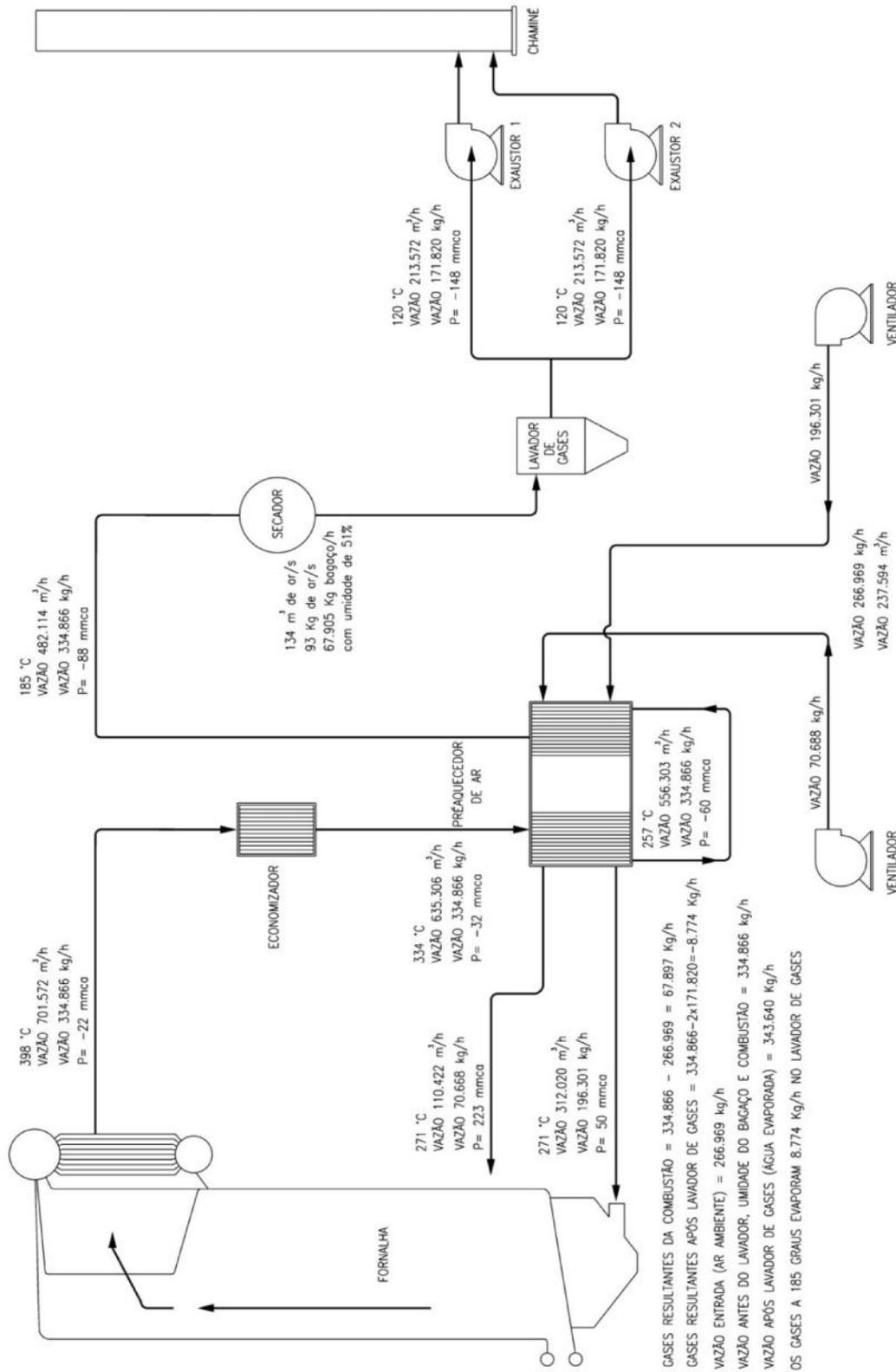
$$291.545 * 1 * (185^\circ\text{C} - T_{sai}) + (2 * 66.084 \text{ kg/h} \cdot ^\circ\text{C}) (185^\circ\text{C} - T_{sai}) - 11.753.530 - 7.115.478 - 4.990.950 = 0$$

$$(185^\circ\text{C} - T_{sai}) * (291.545 + 132.172 \text{ kJ/kg}) = 23.859.958$$

$$(185^\circ\text{C} - T_{sai}) = 23.859.958 / 418.015 = 56$$

$$T_{sai} = 185 - 56 = \mathbf{129^\circ\text{C}}$$

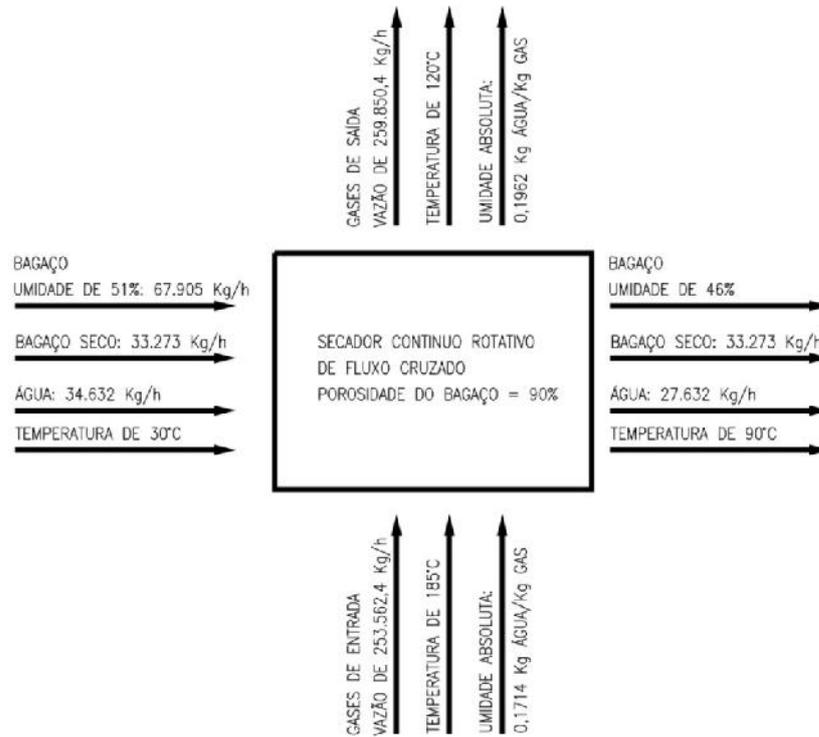
Figura 35 - Fluxograma atual da caldeira na condição calculada com o secador



Fonte: Compilação do autor

C.3 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA DA CALDEIRA E SECADOR COM UMIDADE DO BAGAÇO COM 46% DE UMIDADE

Figura 36 - Esquema do balanço de massa e energia



Fonte: O autor

- Condição com a combustão do bagaço com 46% de umidade:

Massa de bagaço = 59.113 kg/h com umidade de 46%.

Massa seca = $0,54 * 59.113 = 31.921$ kg/h

Massa de água = $0,46 * 59.113 = 27.191$ kg/h

Massa de ar de combustão: $(5,75 * 0,54 * 59.113) * 1,3 = 238.608$ kg/h, excesso ar 30%.

Volume de ar de combustão = $238.608 * 0,89 = 212.361$ m³/h

Temperatura do ar de entrada = 28⁰C

Umidade dos gases da combustão:

- Água presente no bagaço:

$$59.113 * 0,46 = 27.192 \text{ kg água/h}$$

Água resultante da combustão = $9 * H$; nove vezes o Hidrogênio presente na massa seca.

$$\text{Água combustão} = 9 * 0,065 * 31.921 = 18.674 \text{ kg/h}$$

$$\text{Água total da combustão} = 27.192 + 18.674 = 45.866 \text{ kg/h.}$$

$$\text{Total de ar de entrada} = 238.608 \text{ kg/h.}$$

$$\text{Gás proveniente do carbono} = 0,47 * 59.113 * 0,54 = 15.002 \text{ kg/h}$$

$$\text{Gás proveniente do Oxigênio} = 0,44 * 59.113 * 0,54 = 14.045 \text{ kg/h}$$

$$\text{Total de gás após a combustão} = 238.608 + 15.002 + 14.045 = 267.655 \text{ kg/h}$$

$$\text{Massa total dos gases} = \text{vapor d'água} + \text{gases} = 45.866 + 267.655 = 313.521 \text{ kg/h}$$

- O balanço de massa é dado pelas seguintes equações:

$$F_{\text{bagaço_seco_entra}} = F_{\text{bagaço_seco_sai}}$$

$$F_{\text{água_líquida_entra}} = F_{\text{água_líquida_sai}} + F_{\text{evaporação}}$$

$$G_{\text{ar_seco_entra}} = G_{\text{ar_seco_sai}}$$

$$G_{\text{vapor_d'água_entra}} + F_{\text{evaporado}} = G_{\text{vapor_d'água_sai}}$$

O conteúdo da mistura de base úmida do bagaço do secador que entra e sai é dado pela umidade específica:

$$W_{entra} = F_{\text{água_liquida_entra}} / (F_{\text{água_liquida_entra}} + F_{\text{bagaço_seco_entra}});$$

$$W_{sai} = F_{\text{água_liquida_sai}} / (F_{\text{água_liquida_sai}} + F_{\text{bagaço_seco_sai}});$$

- Valores de projeto na condição proposta:

$$W_{entra} = 67.905 * 0,51 / (67.905 * 0,51 + 67.905 * 0,49)$$

$$W_{entra} = 34.632 / (34.632 + 33.273) = 0,51; \text{ umidade de } 51\%$$

$$W_{sai} = (34.632 - 6.288) / (67.905 - 6.288) = 0,46; \text{ umidade de } 46\%$$

A umidade absoluta de cada fluxo de ar é dada por

$$Y_{entra} = G_{\text{vapor_d\`agua_entra}}/G_{\text{ar_entra}};$$

$$Y_{sai} = G_{\text{vapor_d\`agua_sai}}/G_{\text{ar_seco_sai}}$$

Antes da passagem pelo secador de bagaço:

$$Y_{entra} = G_{\text{vapor_d\`agua_entra}}/ G_{\text{ar_seco_entra}} = 45.866 / (238.608 + 15.002 +14.045)$$

$$Y_{entra} = 45.866 / 267.655 = \mathbf{0,1714} \text{ kg \u00e1gua/kg ar; umidade absoluta.}$$

Ap\u00f3s a passagem pelo secador de baga\u00e7o.

$$Y_{sai} = G_{\text{vapor_d\`agua_sai}}/ G_{\text{ar_seco_sai}} = (45.866 + 6.288) / 267.655 \text{ kg \u00e1gua/kg g\u00e1s ;}$$

$$Y_{sai} = 52.154 / 267.655 = \mathbf{0,1949} \text{ Kg \u00e1gua / Kg g\u00e1s; umidade absoluta}$$

A relação entre o fluxo total de ar, o fluxo de ar seco, e a umidade absoluta é dada por:

$$G_{\text{ar_seco}} = G_{\text{ar}} / (1 + Y)$$

$$G_{\text{ar_seco}} = (267.655 + 45.866) / (1 + 0,1714) = 313.521 / (1 + 0,1714) = 267.655 \text{ kg/h}$$

O fluxo de massa do secador de bagaço e a água líquida que entra pode ser calculada pelo fluxo total do bagaço no secador e a umidade absoluta:

$$G_{\text{água_líquida_entra}} = G_{\text{bagaço}} \cdot W_{\text{entra}}$$

$$G_{\text{água_líquida_entra}} = 67.905 \cdot 0,51 = 34.632 \text{ kg/h ; umidade total do bagaço.}$$

$$F_{\text{bagaço_seco}} = F_{\text{bagaço}} \cdot (1 - W_{\text{entra}}) = 67.905 \cdot (1 - 0,51) = 33.273 \text{ kg/h; massa seca.}$$

Secador

O fluxo de massa do ar seco e o vapor d'água que entra é calculado do fluxo total de ar e a umidade absoluta

$$G_{\text{vapor_d'água_entra}} = G_{\text{ar_seco}} \cdot Y_{\text{entra}}$$

$$G_{\text{vapor_d'água_entra}} = 267.655 \cdot 0,1714 = 45.866 \text{ kg/h}$$

$$G_{\text{vapor_d'água_entra}} = 54.096 \text{ kg/h}$$

$$F_{\text{água_líquida_sai}} = F_{\text{bagaço_seco_sai}} \cdot [W_{\text{sai}} / (1 - W_{\text{sai}})]$$

$$F_{\text{água_líquida_sai}} = 33.273 \cdot [0,46 / (1 - 0,46)]$$

$$F_{\text{água_líquida_sai}} = 28.344 \text{ kg/h}$$

$$G_{\text{evaporado}} = F_{\text{água_líquida_entra}} - F_{\text{água_líquida_sai}}$$

$$G_{\text{evaporado}} = 34.632 - 28.344$$

$$G_{\text{evaporado}} = 6.288 \text{ kg/h; água evaporada}$$

Cálculo da massa de água evaporada do transportador

$$G_{\text{vapor_d\acute{a}gua_sai}} = G_{\text{vapor_d\acute{a}gua_entra}} + G_{\text{evaporado}}$$

$$G_{\text{vapor_d\acute{a}gua_sai}} = 54.096 + 6.288$$

$$G_{\text{vapor_d\acute{a}gua_sai}} = 60.384 \text{ kg/h}$$

A umidade absoluta que sai nos gases é dada por

$$Y_{\text{sai}} = G_{\text{vapor_d\acute{a}gua_sai}} / G_{\text{ar_seco_sai}}$$

$$Y_{\text{sai}} = 60.384 / 267.655$$

$Y_{\text{sai}} = \mathbf{0,2256}$ kg/kg ar; umidade absoluta de saída.

- Balanço de energia – Verificação da temperatura de saída dos gases

$$H_{\text{ar_entra}} + H_{\text{vapor_d\acute{a}gua_entra}} + H_{\text{bagaço_seco_entra}} + H_{\text{\acute{a}gua_liquida_entra}} = H_{\text{ar_seco_sai}} + H_{\text{vapor_d\acute{a}gua_sai}} + H_{\text{bagaço_seco_sai}} + H_{\text{\acute{a}gua_liquida_sai}} + H_{\text{calor_perdido}}$$

Para uma primeira aproximação o calor perdido pode ser desconsiderado.

$$H_{\text{ar_seco}} + H_{\text{vapor_d\acute{a}gua}} + H_{\text{evaporado}} + H_{\text{\acute{a}gua_liquida}} + H_{\text{bagaço_seco}} = 0$$

$$H_{\text{ar_seco}} = G_{\text{ar_seco_entra}} \cdot C_{p_ar} \cdot (T_{\text{entra}} - T_{\text{sai}})$$

$$H_{\text{ar_seco}} = 267.655 \text{ Kg/h} \cdot 1 \text{ KJ/Kg} \cdot ^\circ\text{C} \cdot (185^\circ\text{C} - T_{\text{sai}}) \text{ [KJ/h]};$$

Valores tabelados:

$$H_{\text{vapor_30}^\circ\text{C}} = 125,8 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{\text{vapor_185}^\circ\text{C}} = 2.849 \text{ kJ/kg};$$

$$H_{\text{evaporado}} = - 6.288 \text{ kg/h} \cdot (1995 - 125,8) = -11.753.530 \text{ kJ/h};$$

$$H_{\text{\acute{a}gua_liquida}} = (28.344 \text{ kg/h}) \cdot (4,184 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot (30^0 - 90^0)$$

$$H_{\text{\acute{a}gua_liquida}} = -7.115.478 \text{ kJ/h};$$

$$H_{\text{bagaço_seco}} = (33.273 \text{ kg/h}) \cdot (2,5 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot (30^0 - 90^0)$$

$$H_{\text{bagaço_seco}} = - 4.990.950 \text{ kJ/h}$$

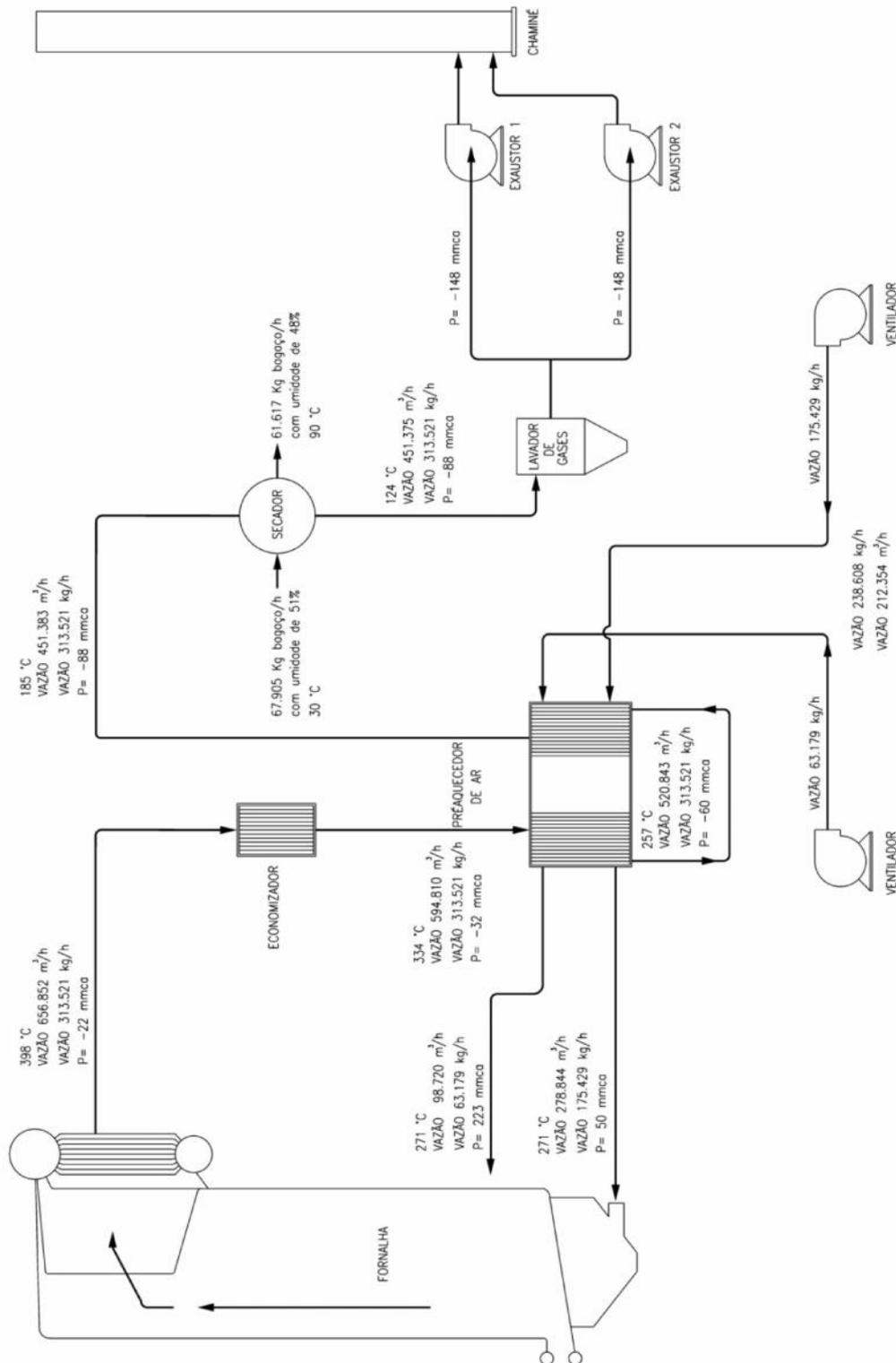
$$267.655 \cdot 1 \cdot (185^\circ\text{C} - T_{\text{sai}}) + (2 \cdot 60.384 \text{ kg/h}^\circ\text{C}) \cdot (185^\circ\text{C} - T_{\text{sai}}) = -11.753.530 - 7.115.478 - 4.990.950$$

$$(185^\circ\text{C} - T_{\text{sai}}) \cdot (267.655 + 120.768 \text{ kJ/kg}) = -23.859.958$$

$$(185^\circ\text{C} - T_{\text{sai}}) = -\frac{23.859.958}{359.376} = -61$$

$T_{\text{sai}} = 185^\circ - 61^\circ = 124^\circ\text{C}$, a temperatura de saída dos gases é de 124°C .

Figura 37 - Fluxograma da caldeira com bagaço com 46% de umidade



Fonte: Adaptação do autor

C.4 Caldeira trabalhando com bagaço com 46% de umidade e secando bagaço com 54%

A previsão de retirada de 5 pontos percentuais da umidade do bagaço destinado às caldeiras, através de um secador acoplado diretamente no duto de saída, representa economia, estabilidade no funcionamento e aumento da temperatura de combustão com repercussão na melhor eficiência das caldeiras, qualidade e estabilidade de temperatura e pressão e vapor em maior quantidade para processo.

Balanço de massa e energia na condição do bagaço com 54% de umidade, conforme dados verificados no experimento da caixa protótipo. Essa condição tem a finalidade de verificar a viabilidade do secador em dois passes em condições climáticas adversas.

A usina tem capacidade de trituração de 320ton/h, o que representa 89ton/h de bagaço seco ou 182ton/h de bagaço com 51% de umidade. Esse bagaço ou o excedente do que passará pelo secador, previsto em 67.905kg/h, irá para o pátio de estocagem, onde em condições climáticas adversas terá sua umidade alterada para 54% ou maior, para avaliar a viabilidade do secador com a quantidade e temperatura dos gases de exaustão é necessário a verificação através de novo balanço de massa e energia, que neste caso, devido à umidade do bagaço do pátio será considerada a quantidade máxima de água evaporada no lavador de gases, 8.774Kg/h que reduz a umidade inicial de 54% para 48%..

Nos balanços de massa e energia será considerado que o bagaço tem umidade de 54% por ser o máximo aceitável para o funcionamento da caldeira.

Massa de bagaço = 59.113 kg/h com umidade de 46%.

Massa seca = $0,54 * 59.113 = 31.921$ kg/h

Massa de água = $0,46 * 59.113 = 27.191$ kg/h

Massa de ar de combustão: $(5,75 * 0,54 * 59.113) * 1,3 = 238.608$ Kg/h, excesso de ar 30%.

Volume de ar de combustão = $238.608 * 0,89 = 212.361 \text{ m}^3/\text{h}$

Temperatura do ar de entrada = 27°C

Umidade dos gases da combustão e água presente no bagaço:

- Água presente no bagaço:

Massa do bagaço * umidade% = $59.113 * 0,46 = 27.192 \text{ kg água/h}$

Água resultante da combustão = $9 * H$; nove vezes o Hidrogênio presente na massa seca.

Água combustão = $9 * 0,065 * 31.921 = 18.674 \text{ kg/h}$

Água total da combustão = $27.192 + 18.674 = 45.866 \text{ kg/h}$.

Total de ar de entrada = 238.608 kg/h .

Gás proveniente do carbono = $0,47 * 59.113 * 0,54 = 15.002 \text{ kg/h}$

Gás proveniente do Oxigênio = $0,44 * 59.113 * 0,54 = 14.045 \text{ kg/h}$

Total de gás após a combustão = $238.608 + 15.002 + 14.045 = 267.655 \text{ kg/h}$

Massa total dos gases = vapor d'água + gases = $45.866 + 267.655 = 313.521 \text{ kg/h}$

- O balanço de massa é dado pelas seguintes equações:

$$F_{\text{bagaço_seco_entra}} = F_{\text{bagaço_seco_sai}}$$

$$F_{\text{água_liquida_entra}} = F_{\text{água_liquida_sai}} + F_{\text{evaporação}}$$

$$G_{\text{ar_seco_entra}} = G_{\text{ar_seco_sai}}$$

$$G_{\text{vapor_d'água_entra}} + F_{\text{evaporado}} = G_{\text{vapor_d'água_sai}}$$

O conteúdo da mistura de base úmida do bagaço do secador que entra e sai é dado pela umidade específica:

$$W_{entra} = F_{\text{água_liquida_entra}} / (F_{\text{água_liquida_entra}} + F_{\text{bagaço_seco_entra}});$$

$$W_{sai} = F_{\text{água_liquida_sai}} / (F_{\text{água_liquida_sai}} + F_{\text{bagaço_seco_sai}});$$

Valores de projeto na condição proposta:

$$W_{entra} = 76.494 \cdot 0,54 / (76.494 \cdot 0,54 + 76.494 \cdot 0,46)$$

$$W_{entra} = 41.307 / (41.307 + 35.187) = 0,54; \text{ umidade de } 54\%$$

$$W_{sai} = (41.307 - 8.774) / (76.494 - 8.774) = 0,48; \text{ umidade de } 48\%$$

onde 8.774 kg/h é a retirada nominal da água do lavador de gases

A umidade absoluta de cada fluxo de ar é dada por

$$Y_{entra} = G_{\text{vapor_d\`agua_entra}} / G_{\text{ar_entra}};$$

$$Y_{sai} = G_{\text{vapor_d\`agua_sai}} / G_{\text{ar_seco_sai}}$$

Antes da passagem pelo secador de bagaço:

$$Y_{entra} = G_{\text{vapor_d\`agua_entra}} / G_{\text{ar_seco_entra}} = 45.866 / (238.608 + 15.002 + 14.045)$$

$$Y_{entra} = 45.866 / 267.655 = \mathbf{0,1714} \text{ kg \u00e1gua/kg ar; umidade absoluta.}$$

Ap\u00f3s a passagem pelo secador de baga\u00e7o.

$$Y_{sai} = G_{\text{vapor_d\`agua_sai}} / G_{\text{ar_seco_sai}} = (45.866 + 8.744) / 267.655 \text{ kg \u00e1gua/kg g\u00e1s ;}$$

$$Y_{sai} = 54.640 / 267.655 = \mathbf{0,2041} \text{ kg \u00e1gua / kg g\u00e1s; umidade absoluta}$$

A rela\u00e7\u00e3o entre o fluxo total de ar, o fluxo de ar seco, e a umidade absoluta \u00e9 dada por:

$$G_{\text{ar_seco}} = G_{\text{ar}} \cdot 1 / (1 + Y)$$

$$G_{\text{ar_seco}} = (267.655 + 54.640) / (1 + 0,2041) = 322.295 / (1 + 0,2041) = 267.655 \text{ kg/h}$$

O fluxo de massa do secador de bagaço e a água líquida que entra pode ser calculada pelo fluxo total do bagaço no secador e a umidade absoluta:

$$G_{\text{água líquida entra}} = G_{\text{bagaço}} \cdot W_{\text{entra}}$$

$$G_{\text{água líquida entra}} = 76.494 \cdot 0,54 = 41.307 \text{ kg/h ; umidade total do bagaço.}$$

$$F_{\text{bagaço seco}} = F_{\text{bagaço}} \cdot (1 - W_{\text{entra}}) = 76.494 \cdot (1 - 0,54) = 35.187 \text{ kg/h; massa seca.}$$

Secador:

O fluxo de massa do ar seco e o vapor d'água que entra é calculado do fluxo total de ar e a umidade absoluta

$$G_{\text{vapor d'água entra}} = G_{\text{ar seco}} \cdot Y_{\text{entra}}$$

$$G_{\text{vapor d'água entra}} = 267.655 \cdot 0,1714 = 45.866 \text{ kg/h}$$

$$G_{\text{vapor d'água entra}} = 54.096 \text{ kg/h}$$

$$F_{\text{água líquida sai}} = F_{\text{bagaço seco sai}} \cdot [w_{\text{sai}} / (1 - w_{\text{sai}})]$$

$$F_{\text{água líquida sai}} = 35.187 \cdot [0,54 / (1 - 0,54)]$$

$$F_{\text{água líquida sai}} = 41.307 \text{ kg/h}$$

$$G_{\text{evaporado}} = F_{\text{água líquida entra}} - F_{\text{água líquida sai}}$$

$$G_{\text{evaporado}} = 41.307 - 32.563$$

$$G_{\text{evaporado}} = 8.774 \text{ kg/h; água evaporada}$$

Cálculo da massa de água evaporada do transportador

$$G_{\text{vapor d'água sai}} = G_{\text{vapor d'água entra}} + G_{\text{evaporado}}$$

$$G_{\text{vapor d'água sai}} = 54.096 + 8.774$$

$$G_{\text{vapor d'água sai}} = 62.870 \text{ kg/h}$$

A umidade absoluta que sai nos gases é dada por:

$$Y_{\text{sai}} = G_{\text{vapor_d\acute{a}gua_sai}} / G_{\text{ar_seco_sai}}$$

$$Y_{\text{sai}} = 62.870 / 267.655$$

$$Y_{\text{sai}} = \mathbf{0,2349 \text{ kg/kg ar;}} \text{ umidade absoluta de sa\acute{d}a.}$$

Bal\ncan\ncode de energia – Verifica\ncan\ncode da temperatura de sa\ncan\ncode dos gases ap\ncan\ncode o secador:

$$H_{\text{ar_entra}} + H_{\text{vapor_d\acute{a}gua_entra}} + H_{\text{baga\ncan\ncode_seco_entra}} + H_{\text{\acute{a}gua_liquida_entra}} = H_{\text{ar_seco_sai}} + H_{\text{vapor_d\acute{a}gua_sai}} + H_{\text{baga\ncan\ncode_seco_sai}} + H_{\text{\acute{a}gua_liquida_sai}} + H_{\text{calor_perdido}}$$

Para uma primeira aproxima\ncan\ncode o calor perdido pode ser desconsiderado.

$$\Delta H_{\text{ar_seco}} + \Delta H_{\text{vapor_d\acute{a}gua}} + \Delta H_{\text{evaporado}} + \Delta H_{\text{\acute{a}gua_liquida}} + \Delta H_{\text{baga\ncan\ncode_seco}} = 0$$

$$\Delta H_{\text{ar_seco}} = G_{\text{ar_seco_entra}} * C_{p_ar} * (T_{\text{entra}} - T_{\text{sai}})$$

$$\Delta H_{\text{ar_seco}} = 267.655 \text{ kg/h} * 1 * \text{kJ/kg} \cdot \text{^\circ C} * (185^\circ\text{C} - T_{\text{sai}}) [\text{kJ/h}];$$

Valores tabelados:

$$\Delta H_{\text{vapor_30^\circ C}} = 125,8 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta H_{\text{vapor_185^\circ C}} = 2.849 \text{ kJ/kg};$$

$$\Delta H_{\text{evaporado}} = - 8.774 \text{ kg/h} * (1995 - 125,8) = -16.400.360 \text{ kJ/h};$$

$$\Delta H_{\text{\acute{a}gua_liquida}} = (41.307 \text{ kg/h}) * (4,184 \text{ kJ/kg} \cdot \text{^\circ C}) * (30^0 - 90^0)$$

$$\Delta H_{\text{\acute{a}gua_liquida}} = -10.369.709 \text{ kJ/h};$$

$$\Delta H_{\text{baga\ncan\ncode_seco}} = (35.187 \text{ kg/h}) * (2,5 \text{ kJ/kg} \cdot \text{^\circ C}) \cdot (30^0 - 90^0)$$

$$\Delta H_{\text{bagaço_seco}} = - 5.278.050 \text{ kJ/h}$$

$$267655 \cdot 1 \cdot (185^\circ\text{C} - T_{\text{sai}}) + (2 \cdot 62870 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot (185^\circ\text{C} - T_{\text{sai}}) = -16.400.360 - 10.369.709 - 5.278.050$$

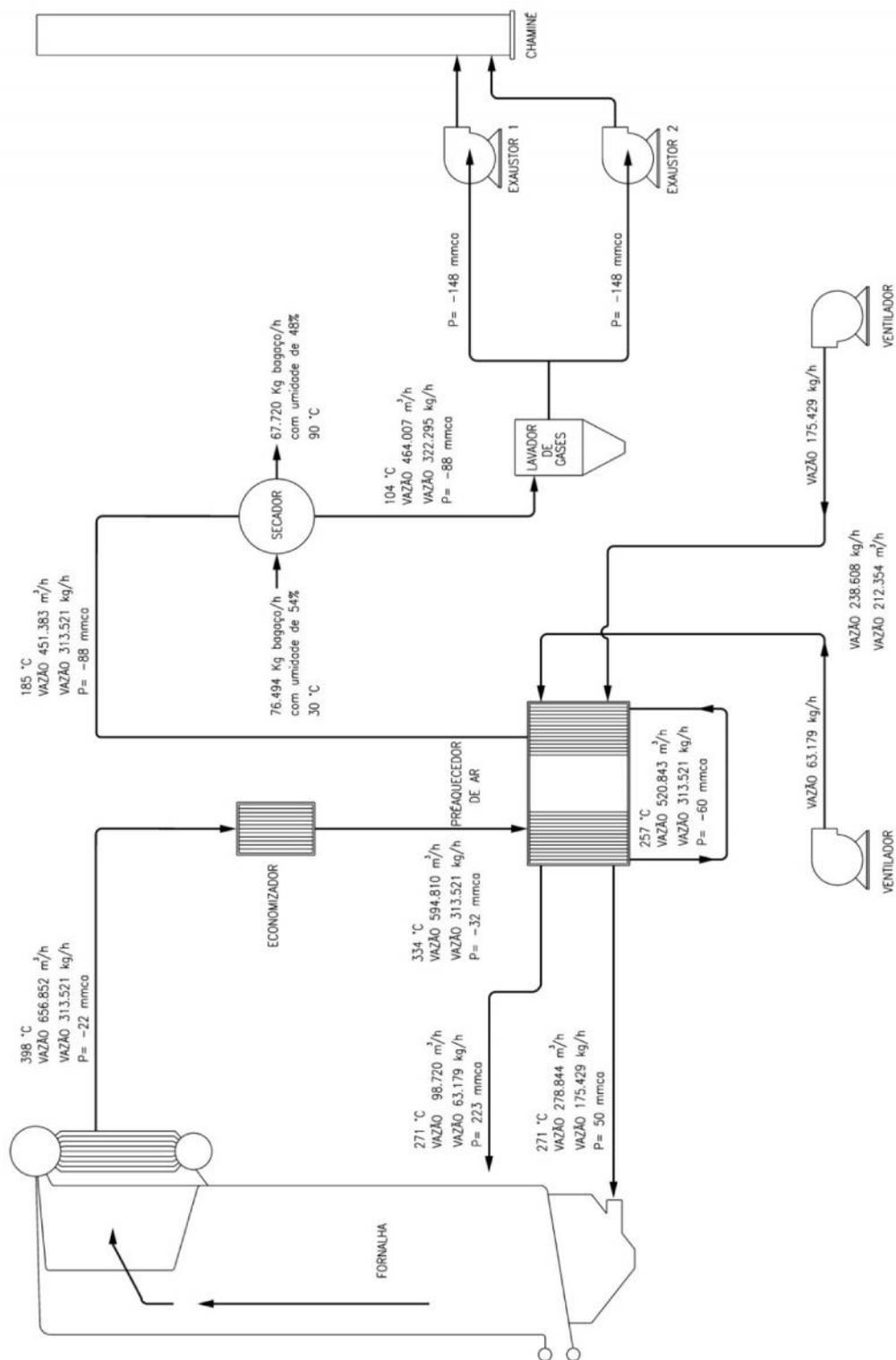
$$(185^\circ\text{C} - T_{\text{sai}}) \cdot (267.655 + 125.740 \text{ kJ/kg}) = - 32.048.119$$

$$(185^\circ\text{C} - T_{\text{sai}}) \cdot (393.396 \text{ kJ/kg}) = - 32.048.119$$

$$(185^\circ\text{C} - T_{\text{sai}}) = 81$$

$$T_{\text{sai}} = 185 - 81 = \mathbf{104^\circ\text{C}}$$

Figura 38 - Fluxograma da caldeira com bagaço com 46% de umidade e bagaço com 54%



Fonte: Adaptação do autor

APÊNDICE D - PROJETO ESQUEMÁTICO DO SECADOR DE BAGAÇO

Título: Secador de bagaço de cana-de-açúcar de baixo rendimento

Finalidade: Uniformizar umidade do bagaço a ser utilizado nas caldeiras.

Fonte de energia: Gases de exaustão da caldeira queimando bagaço de cana-de-açúcar.

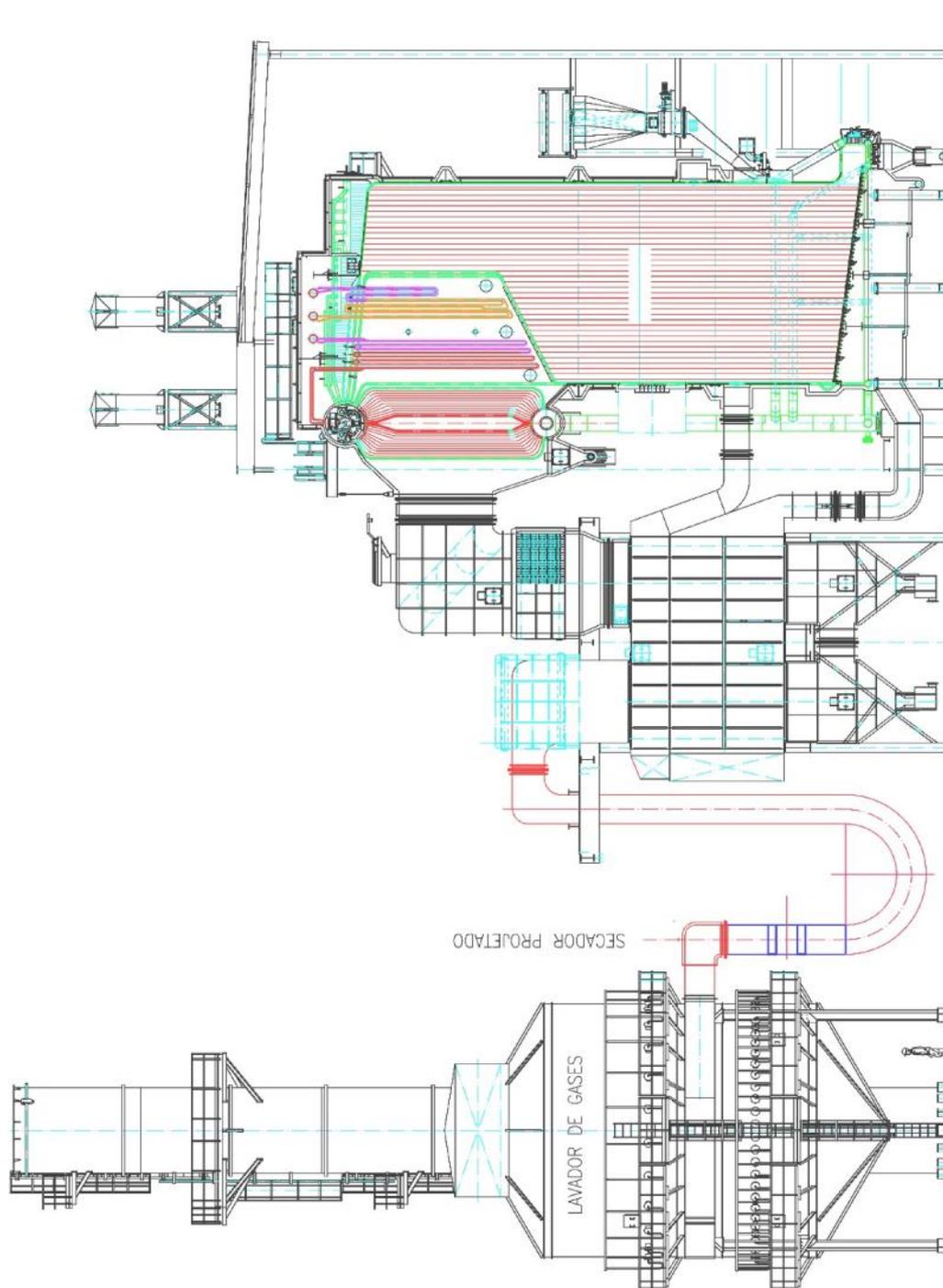
Posição de montagem: Inserido no duto de exaustão, desenho esquemático, (Figura 39)

Alimentação: Será alimentado com vazão de 95,46 kg/s de gás a 185°C com umidade absoluta de 0,2051.

Descritivo do Projeto:

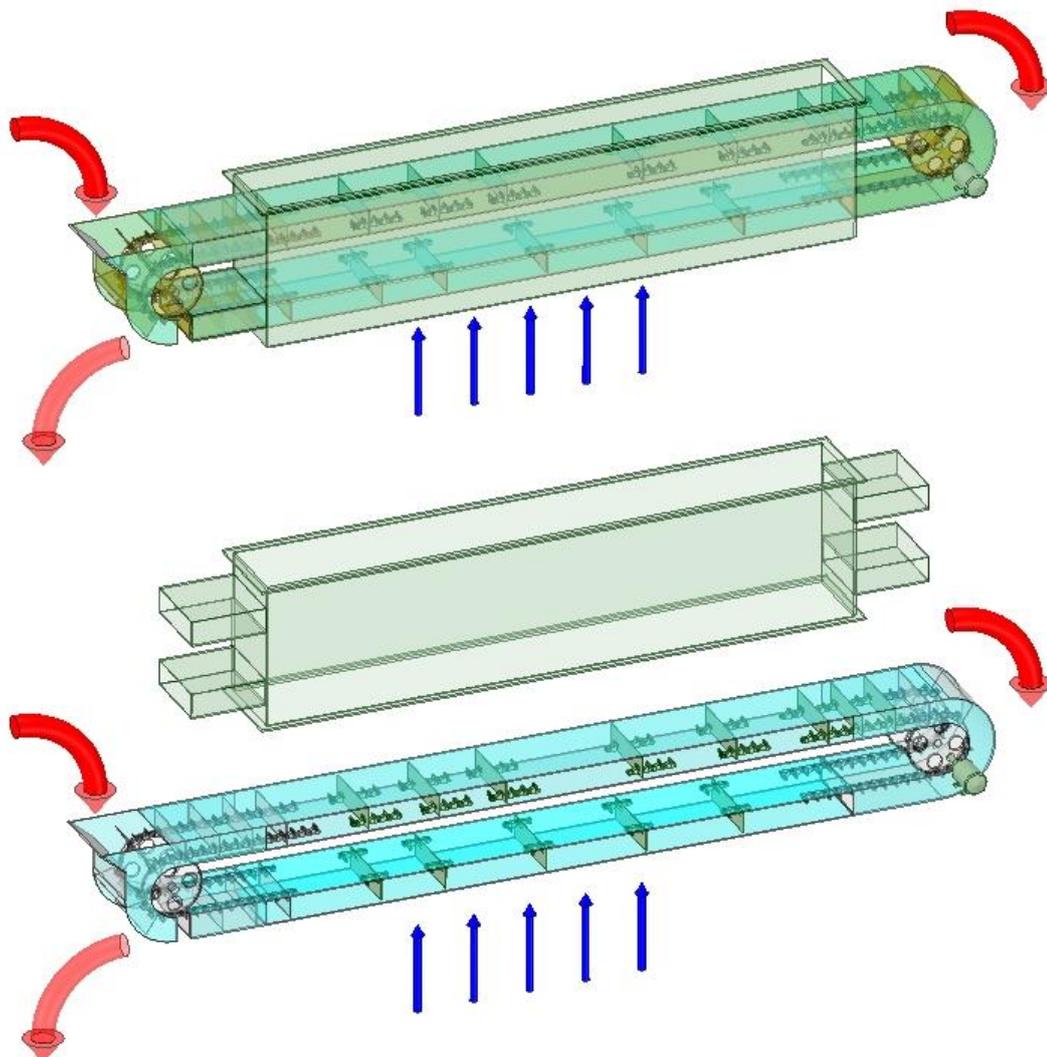
O secador é composto de um transportador de correntes com chapas de arrasto montadas intercaladas com passo 457,2mm. As chapas têm as dimensões do duto com folga de 2mm, montado sobre esteiras fixas fabricadas com chapas perfuradas com abertura de 70%. O transportador é acionado por um motoredutor e terá velocidade linear de 8m/min, podendo ter sua velocidade alterada para regular o percentual de umidade a ser retirada, em função da temperatura dos gases de exaustão. A esteira força o bagaço a passar duas vezes pelo fluxo de gás, a segunda passagem se dá na entrada do bagaço pré-aquece e retira parte da umidade, a primeira passagem encontra o bagaço aquecido, (Figura 40), o que maximiza o aproveitamento, assim, com a velocidade de 8m/min o bagaço é submetido a dois minutos de exposição ao ar quente.

Figura 39 - Caldeira vista em planta com localização do secador



Fonte: Adaptação do autor

Figura 40 - Desenho esquemático do secador de bagaço



Fonte: Desenho do autor

O secador é alimentado pela moega situada na parte superior esquerda, o bagaço percorre o duto superior, e continua até a parte inferior da moega, onde é descarregado. Durante o percurso o bagaço é submetido ao fluxo de ar quente por um período, que pode ser variável, de dois minutos.

O duto por onde passa o bagaço é fabricado em chapas de aço inoxidável perfurada com abertura de 70%. O motorreductor que aciona a esteira é variável e deve ter sua velocidade regulada para um tempo de exposição ao fluxo de ar quente que permita

que a secagem do bagaço não o deixe com umidade inferior a 47%, isso se deve às condições de projeto da caldeira para que a temperatura da fornalha não exceda os 1.100°C.

A usina tem uma média anual de trituração de 1.100.000 toneladas de cana-de-açúcar, gerando 306.240 toneladas de bagaço seco. Tomando como referência a umidade de 51%, Tabela 3, teremos 462.422 toneladas de bagaço com capacidade de geração de 255.488MW anuais. Com a umidade de 47%, teremos 450.172 toneladas de bagaço úmido, com capacidade de geração de 277.981MW, portanto, a eficiência de geração de energia, na condição de trabalhar com o bagaço com 47%, aumenta em 8,8% em relação ao bagaço com 51% de umidade, que em números absolutos representa um acréscimo anual na geração de energia de 22.493MW, em média.