

LUCAS GAVAZZA

**UTILIZAÇÃO DO CAVACO DE MADEIRA COMO COMBUSTÍVEL
ALTERNATIVO PARA A PRODUÇÃO DE VAPOR DE ÁGUA EM UMA
CALDEIRA AQUATUBULAR COM GRELHA FIXA DO TIPO PIN HOLE**

Guaratinguetá-SP

2014

LUCAS GAVAZZA

**UTILIZAÇÃO DO CAVACO DE MADEIRA COMO COMBUSTÍVEL
ALTERNATIVO PARA A PRODUÇÃO DE VAPOR DE ÁGUA EM UMA
CALDEIRA AQUATUBULAR COM GRELHA FIXA DO TIPO PIN HOLE**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica

Orientador (a): Prof. Dr. Messias Borges Silva

Guaratinguetá-SP

2014

Gavazza, Lucas

G281u Utilização do cavaco de madeira como combustível alternativo para a produção de vapor de água em uma caldeira aquatubular com grelha fixa do tipo PIN HOLE/ Lucas Gavazza – Guaratinguetá, 2014.

92 f : il.

Bibliografia: f. 91-92

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014.

Orientador: Prof. Dr. Messias Borges Silva

1. Biomassa 2. Energia elétrica e calor – Cogeração 3. Vapor d'água
I. Título

CDU 620.91

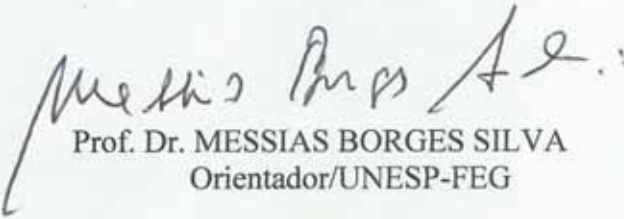
Lucas Gavazza

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. ANTONIO WAGNER FORTI
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MESSIAS BORGES SILVA
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. ANEIRSON FRANCISCO DA SILVA
UNESP-FEG


Eng. JOSÉ SÁVIO GONÇALVES ANTUNES PEREIRA
Membro Externo

Dezembro de 2014

DADOS CURRICULARES

Lucas Gavazza

NASCIMENTO 08.08.1989 – PIRASSUNUNGA / SP

FILIAÇÃO Antonio Augusto Gavazza
Silvia Helena Galvani Gavazza

2009/2014 Curso de Graduação
Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual
Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família.

Agradeço a DEUS.

Agradeço aos meus amigos.

Agradeço aos meus professores.

Agradeço aos meus colegas de trabalho.

GAVAZZA, Lucas. **Utilização do cavaco de madeira como combustível alternativo para a produção de vapor de água em uma caldeira aquatubular com grelha fixa do tipo Pin Hole**. 2014. 93 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Guaratinguetá, 2014.

RESUMO

O constante aumento no preço do petróleo e seus derivados, os créditos de carbonos, a preocupação com o meio ambiente aliados ao déficit de precipitação de água de chuva e falta de recursos hídricos que o Brasil sofreu no ano de 2014 ocasionou uma migração da participação das fontes de energia na matriz energética brasileira. O setor hidrelétrico sofreu grande baixa de 2013 até o momento, contribuindo, portanto para a geração e cogeração de energia em termelétricas que utilizam fontes renováveis de energia como combustível, como por exemplo: bagaço de cana, cavaco, casca de arroz, entre outros.

O preço de venda da energia elétrica no mercado atingiu o patamar de R\$ 807,00 por MWh em janeiro de 2014 (Fonte: ANEEL), aquecendo o setor termelétrico brasileiro. Embora as termelétricas utilizem em grandes quantidades a água como fluido vaporizante para a produção de energia elétrica e as utilizações em processos diversos, planos de reuso de água passaram a ser fator importante nessas indústrias.

A biomassa de maior uso vem sendo o bagaço de cana que é aliado ao setor sucroalcooleiro, mercado forte no Brasil, e consiste basicamente em utilizar o “resto” da cana de açúcar que as indústrias sucroalcooleiras jogariam fora. O mercado sucroalcooleiro é bem instável e dura apenas de seis a oito meses por ano, estando o restante do tempo no período conhecido como “entre safra” que corresponde ao plantio e colheita da cana para então entrar no período de “safra” que é a constante colheita da cana e moagem desta. Essa instabilidade do mercado e período ocioso leva as termelétricas a procurarem outras fontes de energia renováveis, como por exemplo, o cavaco de madeira (Pinho, Eucalipto, Laranjeira), casca de arroz, sorgo entre outras, para não ficarem dependentes do setor sucroalcooleiro.

O presente trabalho tem como objetivo o estudo do uso do cavaco de madeira como uma biomassa alternativa para a queima numa termelétrica que utiliza essencialmente bagaço de cana. A termelétrica em questão é constituída de duas caldeiras aquotubulares que produzem juntas 350 t/h de vapor a 67 bar e alimentam uma turbina de contrapressão e condensação com capacidade de 35 MW cada. O vapor também é utilizado em dois processos de terceiros, um consumindo vapor a 1,5 bar e outro consumindo vapor a 10 bar.

A elevada disponibilidade da biomassa do cavaco de madeira e o seu uso em diversas termelétricas bem como seu elevado PCI viabilizou sua utilização como biomassa alternativa, porém a utilização do cavaco como combustível é normalmente utilizada em grelhas do tipo rotativa, o estudo em questão tende a realizar a viabilidade do uso do cavaco numa grelha fixa do tipo Pin Hole.

PALAVRAS-CHAVE: Biomassa. Termelétrica. Cogeração. Cavaco. Bagaço. Vapor.

GAVAZZA, Lucas. Use of wood chips as an alternative fuel for steam generation in a water-tube boiler with a fixed grid type Pin Hole. 2014. 93 f. TCC (Graduate Work) – Graduate in Mechanical Engineering, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Guaratinguetá, 2014.

ABSTRACT

The steady increase in the price of oil and its derivatives, carbon credits, the concern with the environment combined with the precipitation of rain water and lack of water resources that Brazil has suffered in 2014 caused a migration of participation sources of energy in the Brazilian energy matrix. The hydropower sector suffered big drop at 2013 and is suffering so far, contributing thus to the generation and cogeneration of thermal energy using renewable energy sources such as: sugarcane bagasse, wood chips, rice husks, among others.

The selling price of the electricity market reached the level of R\$ 807, 00 MWh in January 2014 (Source: ANEEL), heating the Brazilian thermoelectric sector. Although thermoelectric use in bulk water as vaporizing fluid to produce electricity and use in various processes, water reuse plans have become an important factor in these industries.

The increased use of biomass has been the bagasse which is allied to the sugarcane sector, strong market in Brazil, and consists basically use the "rest" of sugar cane, sugarcane industries that would play out. The sugar and ethanol industry is very unstable and only lasts for 6-8 months a year, and the remaining time in the period known as "between crop" that corresponds to the planting and harvesting of sugarcane and then enter the period of "vintage" which is the constant cane harvesting and crushing it. This instability of the market and the thermoelectric idle period leads the thermoelectric industries to seek other sources of renewable energy, such as wood chips (pine, Eucalyptus, Orange), rice husk, sorghum among others, to not be dependent on alcohol sector.

The present work aims to study the use of wood chips as an alternative biomass for burning a fuel that essentially uses bagasse, the thermoelectric in question consists of two boilers that produce together 350 t / h of steam at 67 bar and feed a turbine backpressure and condensing capacity of 35 MW each, steam is also used in two processes parties, a consuming steam at 1.5 bar and consuming steam another 10 bar.

The high availability of the biomass of wood chips and its use in various well as its high thermal PCI enabled their use as an alternative biomass, but the use of the chip is typically used as a fuel on the grilles rotary type, the study in question tends to carry the feasibility of the use of wood chips on a fixed grid-type Pin Hole.

KEYWORDS: Biomass. Thermal. Cogeneration. wood chips. Bagasse. Steam.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz energética brasileira	13
Figura 2: Avanço anual do PLD	14
Figura 3: Componentes de uma caldeira	19
Figura 4: Caldeira aquatubular para combustíveis sólidos	20
Figura 5: Circulação da água no interior de tubos	20
Figura 6: Alimentação de combustível em fornalhas	22
Figura 7: Fornalha de Grelha Rotativa	23
Figura 8: Esquema de uma unidade geradora	24
Figura 9: Exemplo da instalação de um economizador	26
Figura 10: Variação da pressão estática	28
Figura 11: Tiragem balanceada	28
Figura 12: Mapa das vias de acesso principais à UTE Brotas	30
Figura 13: Mapa com a localização da UTE Brotas	30
Figura 14: Infraestrutura da UTE Brotas	31
Figura 15: Fluxograma dos processos de geração de energia na UTE Brotas	32
Figura 16: Processo de desmineralização da água	34
Figura 17: Esquema de funcionamento do desaerador	36
Figura 18: Caminho percorrido pela água até se transformar em vapor superaquecido.	38
Figura 19: Fluxograma simplificado dos superaquecedores	38
Figura 20: Fluxograma simplificado do dessuperaquecedor	39
Figura 21: Esquema do funcionamento da purificação do vapor	40
Figura 22: Esquema do transporte por esteiras do combustível	42
Figura 23: Sequencial da queima da biomassa na fornalha	43
Figura 24: Entrada do ar secundário realizando a turbulência na câmara de combustão	44
Figura 25: Caminho dos gases de combustão	45
Figura 26: Fluxograma simplificado da limpeza de grelha	46
Figura 27: Vista da área de Caldeira da UTE Brotas	51
Figura 28: Placa de identificação da caldeira	52
Figura 29: Desenho esquemático da caldeira	52
Figura 30: Ventiladores primário e secundário	54
Figura 31: Ventilador de ar de espargimento	54
Figura 32: Exaustores	55
Figura 33: Lajota da grelha do tipo Pin Hole	56

Figura 34: Grelha Pin Hole com os furos de entrada de ar primário	56
Figura 35: Mapa das Usinas num raio de 150 km da UTE Brotas	59
Figura 36: Biomassa: bagaço de cana	61
Figura 37: Biomassa: cavaco de madeira	62
Figura 38: Descarregamento de biomassa no pátio de bagaço	63
Figura 39: Pátio de biomassa	64
Figura 40: 7 dosadores de biomassa	64
Figura 41: Carta de controle do uso do bagaço a 100% e da mistura 50%/50%	65
Figura 42: Entrada dos dosadores de biomassa na esteira TT-01	65
Figura 43: Gráfico da variação de pressão x tempo	66
Figura 44: Dosadores de biomassa	67
Figura 45: Selagem perfeita	68
Figura 46: Selagem deficiente	68
Figura 47: Gráfico da temperatura da fornalha x tempo	69
Figura 48: Gráfico da temperatura do vapor x tempo	70
Figura 49: Gráfico do consumo específico das biomassas.	70
Figura 50: Esquema da dosagem de bagaço para a fornalha	71
Figura 51: Gráfico da temperatura do vapor x tempo	72
Figura 52: Medidores capacitivos de nível	73
Figura 53: Deposição de material sobre a grelha	74
Figura 54: Problemas após o teste de 10 dias da queima com cavaco de madeira	75
Figura 55: Diagrama de causa e efeito	76
Figura 56: Relação entre o poder calorífico e o teor de umidade	77
Figura 57: Gráfico da umidade do analisador x umidade do laboratório	78
Figura 58: Analisador portátil de umidade da MARRARI	79
Figura 59: Trator recolhendo cavaco do pátio	80
Figura 60: Bicos de limpeza de grelha	81
Figura 61: Novo soprador para limpeza de grelhas	82
Figura 62: Sopradores de grelha	82
Figura 63: Especificação dos sopradores	83
Figura 64: Cavaco não queimado eliminado pela limpeza de grelha	83
Figura 65: Operadores de campo realizando manobra de retirada de material não queimado	83
Figura 66: Acúmulo de material não queimado	84
Figura 67: Eliminação de cinzas da grelha por via úmida	84

Figura 68: Esquema da inclinação dos rotores	85
Figura 69: Detalhes da grelha Pin Hole	87
Figura 70: Depósito de areia + pedras + cinzas + material não queimado sobre a grelha	87
Figura 71: Depósito de areia + cinzas nas paredes dos tubos no interior da caldeira	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Produção de energia elétrica em GWh	14
Tabela 2: Dados de uso da biomassa e produção de vapor da UTE Brotas	50
Tabela 3: Usinas termelétricas próximas a Brotas	58
Tabela 4: Análise da umidade do cavaco de madeira	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Água bruta	Água proveniente do Ribeirão Claro
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CLP	Controlador Lógico Programável
DESMI	Unidade de desmineralização
ETA	Estação de tratamento de água
ETALG	Estação de tratamento de fuligem e água dos lavadores de gases
PCS	Poder calorífico superior
PCI	Poder calorífico inferior
PLD	Preço líquido das diferenças
TC01 a TC04	Transportadores de correias
TT01 e TT02	Transportadores de taliscas
UTE	Unidade Termelétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1	COMBUSTÍVEIS	17
3.2	CALDEIRAS E GERADORES DE VAPOR	17
4	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	29
4.1	SOBRE A EMPRESA	29
4.1.1	Localização e acessos	29
4.1.2	Infraestrutura	31
4.1.3	Descrição do Processo	32
4.1.4	Condições climáticas	47
4.1.5	Caracterização do terreno para fundação	47
4.1.6	Recursos hídricos para o suprimento da UTE	48
4.2	MOTIVAÇÃO	49
4.3	PRINCIPAIS COMPONENTES	52
4.4	ORGANIZAÇÃO DO PROJETO	57
4.5	RESULTADOS	66
4.6	PROBLEMAS	73
4.7	SOLUÇÕES	76
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	89
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

1 INTRODUÇÃO

“O cenário mundial atual é fortemente favorável ao uso de energia renovável e bioenergia.” (BEN, 2014). “O elevado preço do petróleo e os impactos ao meio ambiente principalmente pela queima dos combustíveis fósseis são fatores que viabilizam o uso da energia renovável.” (BARROS et al., 2006).

“O ano de 2014 foi marcado por condições hidrológicas desfavoráveis, houve redução da oferta de energia hidráulica.” (BEN, 2014). “Em 2013 o decréscimo foi de 5,4%. A menor oferta hídrica explica o recuo da participação de renováveis na matriz elétrica, de 84,5% em 2012 para 79,3% neste ano, apesar do incremento de 1.724 MW na potência instalada do parque hidrelétrico. A potência eólica atingiu 2.202 MW, o que proporcionou um acréscimo de 30,2% na geração de eletricidade a partir dessa fonte.” (BEN, 2014).

A seguir a matriz elétrica Brasileira no ano base de 2013 em comparação ao mesmo ano de 2012.

Figura 1: Matriz energética brasileira, ano base 2013.



Fonte: (BEN, 2014)

Observamos pela Figura 1 que a geração de energia elétrica por biomassa, eólica, gás natural, derivados do petróleo e carvão cresceu. Já a participação de energia hidráulica, petróleo e nuclear decaiu. O interessante nessa Figura é observar uma tendência maior à

mudança do foco da energia hidráulica para outras energias renováveis como a biomassa e a eólica.

Tabela 1: Produção de energia elétrica em GWh.

Fonte	2013	2012	Δ 13 / 12
Hidrelétrica	390.992	415.342	-5,9%
Gás Natural	69.017	46.760	47,6%
Biomassa ¹	39.679	34.662	14,5%
Derivados do Petróleo ²	22.090	16.214	36,2%
Nuclear	14.640	16.038	-8,7%
Carvão Vapor	14.801	8.422	75,7%
Eólica	6.579	5.050	30,3%
Outras ³	12.241	10.010	22,3%
Geração Total	570.025	552.498	3,2%

¹ Inclui lenha, bagaço de cana e lixívia

² Inclui óleo diesel e óleo combustível

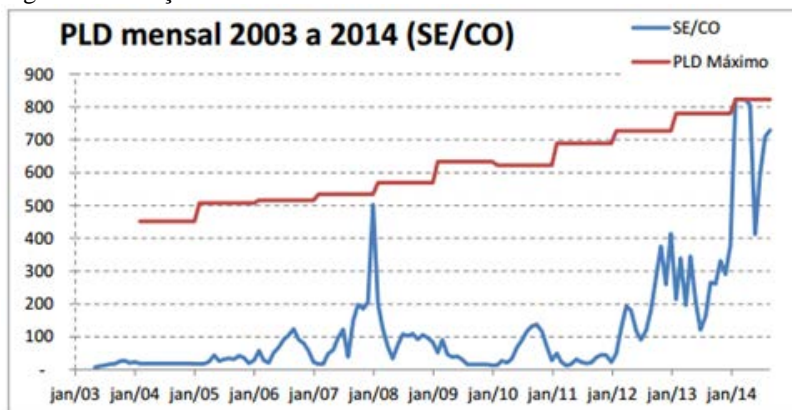
³ Inclui outras recuperações, gás de coqueria e outras secundárias

Fonte: (BEN, 2014)

“A energia eólica, embora sua participação na matriz energética do Brasil tenha crescido apenas 0,2% de 2012 para 2013, apresentou um crescimento de 30,3% se for comparado ao que se era produzido em GWh no ano anterior. A biomassa também teve um crescimento considerável de 14,5% já a hidrelétrica decaiu quase 6% em um ano. O ano de 2014 foi marcado pela falta de precipitação de chuvas e conseqüentemente uma diminuição dos recursos hídricos no país. A tendência é que devido a essa diminuição, a participação da energia renovável a partir de hidrelétricas caia ainda mais e ocorra a migração para os setores de energia renovável que utilizam a biomassa e a energia eólica.” (BEN, 2014).

O preço de venda de energia elétrica no mercado livre atingiu um patamar nunca atingido antes nesse ano de 2014:

Figura 2: Avanço anual do PLD



Fonte: ANEEL, 2014

“O PDL marcou o ano de 2014 por atingir o teto de R\$ 807,00 por Mwh, é o maior valor atingido em mais de dez anos. Esse valor aqueceu o setor de termelétricas no Brasil.” (ANEEL, 2014).

Cogeração com Bagaço

“São Paulo tem 4,25 milhões de hectares plantados de cana equivalente a 264 milhões de toneladas, resultando em 11 bilhões de litros de etanol e 20 milhões de toneladas de açúcar. São 150 usinas existentes em operação 1.700 megawatts de capacidade instalada, 70% da cogeração do estado está na mão deste setor.” Fonte: [7]

“O bagaço da cana-de-açúcar é o combustível das usinas de açúcar e álcool e utilizado localmente, logo após a moagem da cana. As modernas usinas não consomem todo o bagaço produzido e o excedente pode ser fornecido a terceiros, "in natura" ou seco e enfardado. O bagaço é queimado diretamente com 50% de umidade, como vem da colheita. A composição elementar é muito semelhante à lenha e suas propriedades podem ser tomadas como similares, exceto é claro, quanto a sua forma física.” Fonte: BIZZO, 2003.

2 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo viabilizar a utilização do consumo de combustível alternativo (cavaco de madeira) a ser utilizado na caldeira para a queima, em complemento ao combustível principal (bagaço de cana) sem prejudicar ou modificar os parâmetros de saída do vapor (67 bar a 490°C) e sem comprometer a estrutura e equipamentos da UTE, a partir da autorização para consumo de combustível alternativo pela análise dos gases de combustão. A proporção requerida será de 50% cavaco e 50% bagaço de cana em volume a serem queimados na caldeira.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Combustíveis

Segundo BAZZO (1995, p.18), “toda substância capaz de reagir com o oxigênio e liberar energia térmica é identificada como combustível”.

Podemos classificar os combustíveis fisicamente em três tipos distintos: sólidos, líquidos e gasosos.

Segundo BALESTIERE (2008, p.11), “O poder calorífico de uma substância corresponde à quantidade de calor que se desprende na queima total de uma unidade de massa do mesmo”.

“O Poder calorífico Superior e Inferior corresponde a quantidade de energia liberada por unidade de massa, ou de volume.” (BAZZO, p.18).

Para diferenciar PCS e PCI:

“Se os vapores de água formados durante a queima do hidrogênio, juntamente com a evaporação da umidade do combustível, se condensam em conjunto com os demais produtos, o valor obtido no processo de combustão se denomina Poder Calorífico Superior (PCS). Se o dispositivo utilizado na determinação do poder calorífico permite a evacuação dos vapores, o valor obtido corresponde ao Poder Calorífico Inferior (PCI). O valor correspondente à diferença entre os valores superior e inferior é o calor latente de vaporização da água nas mesmas unidade: $PCS = PCI + h_{lv}$.” (BALESTIERE, 2008, p.11).

3.2 Caldeiras e geradores de vapor

Segundo PERA (1966, p.1), “gerador de vapor é um trocador de calor complexo que produz vapor a partir de energia térmica (combustível), ar e fluido vaporizante constituído por diversos equipamentos associados”.

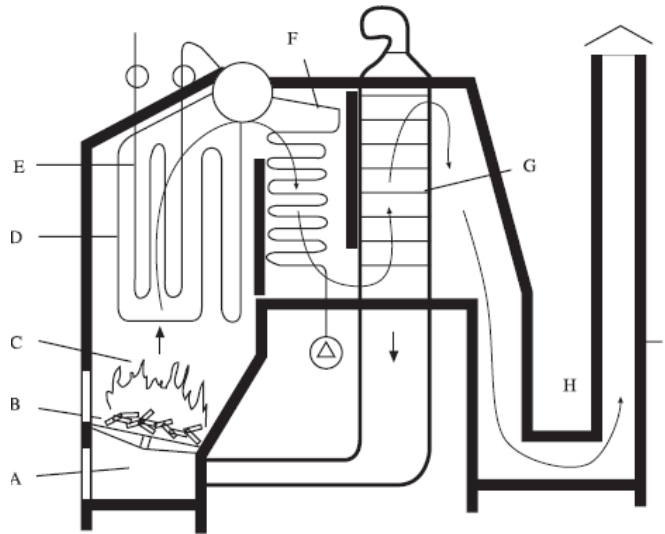
O principal fluido vaporizante é a água, que se tornou indispensável na indústria dos dias de hoje. Segundo BAZZO (1995, p.1), a preferência pelo vapor como fluido de trabalho é justificada pelo seu alto calor específico, aliada a ampla disponibilidade da água no meio industrial.

As unidades geradoras de vapor possuem muitos componentes que tem como objetivo aproveitar ao máximo a energia liberada na queima do combustível, a energia é aproveitada por meio da radiação e convecção dos gases de exaustão. A unidade geradora de vapor mais importante é a caldeira, existem basicamente dois tipos de caldeiras, a flamotubulares por onde os gases de exaustão percorrem por dentro de tubos, aquecendo a água que passa por meio desses tubos e as aquatubulares por onde a água é aquecida por dentro de tubos, e os gases de exaustão fazem a troca térmica com esses tubos até que a água se transforme em vapor. Falaremos especificamente de caldeiras aquatubulares.

Os principais componentes da caldeira estão listados logo abaixo:

- A) Cinzeiro
- B) Fornalha
- C) Câmara de combustão
- D) Tubos evaporadores
- E) Superaquecedor
- F) Economizador
- G) Pré-aquecedor de Ar
- H) Canais de gases
- I) Chaminé

Figura 3: Componentes de uma caldeira



Fonte: Pêra (1990)

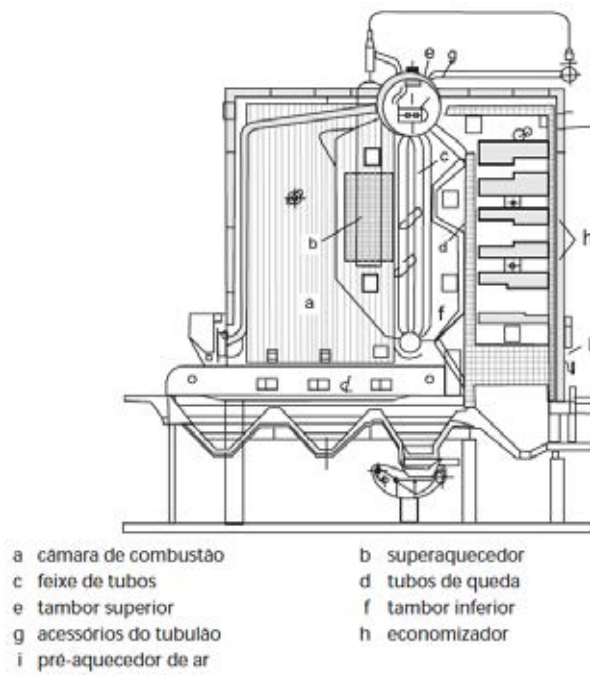
Caldeiras aquotubulares

“Somente foi possível a obtenção de maiores produções de vapor, a pressões elevadas e altas temperaturas com o advento das caldeiras de tubos de água. A circunstância dos tubos estarem situados fora dos corpos das caldeiras, a eles se unindo para constituírem um feixe tubular de água que compõe a parte principal de absorção do calor, permite a obtenção de superfícies de aquecimento praticamente ilimitadas.” (PERA, 1966, p.138).

De acordo com BAZZO (1995, p.73), as caldeiras aquotubulares são construídas de forma que a água circule por dentro de diversos tubos de pequeno diâmetro e dispostos na forma de paredes d’água ou de feixes tubulares.

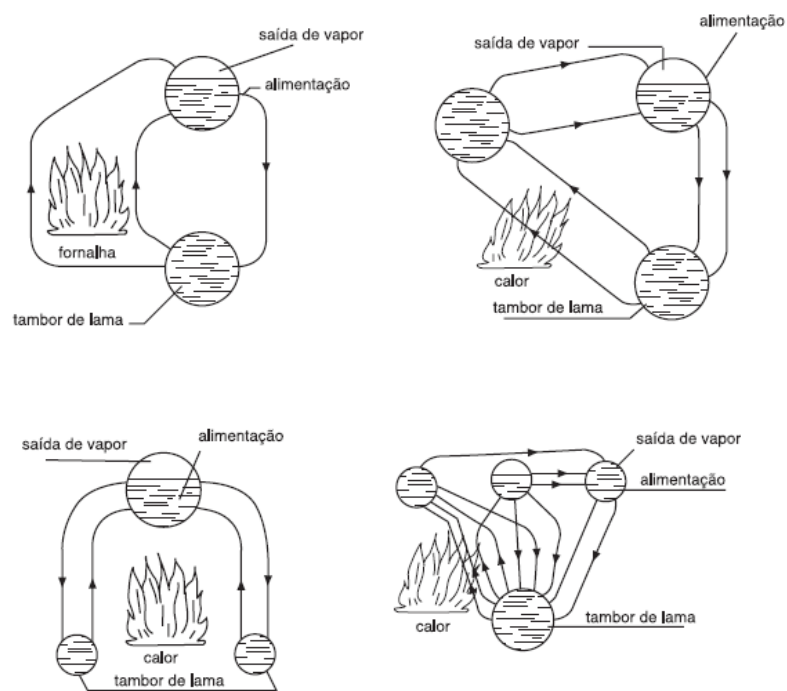
As paredes d’água são localizadas na câmara de combustão, onde é predominante a troca de calor por radiação. BAZZO (1995, p.74).

Figura 4: Caldeira aquotubular para combustíveis sólidos



Fonte: [4]

Figura 5: Circulação da água no interior de tubos



Fonte: Pera (1990)

Na Figura 5 podemos observar o sentido da água, o vapor por ser mais leve sobe para o tambor superior, a água líquida, mais pesada que o vapor, desce pelos tubos até os tambores inferiores até que atingem a temperatura de vaporização e sobem até o tambor superior, resultando numa circulação natural.

“A circulação natural é a característica principal da maioria das caldeiras aquotubulares. Entretanto sua abrangência é limitada nas unidades de grande porte, até pressões da ordem de 160 bar. (BAZZO, 1995, p.79).

Fornalha

Fornalha é o local onde o combustível será queimado, podendo ser sólido, líquido ou gasoso. No caso de combustíveis sólidos a queima pode ser realizada em grelha podendo ela ser de diversos tipos dependendo do combustível sólido em questão. Trataremos especificamente da queima em grelha.

De acordo com BAZZO (1995, p.11), a fornalha é o componente da unidade geradora de vapor destinado a converter a energia química do combustível em energia térmica.

Queima em grelha

Segundo BAZZO(1995 p.40), as fornaldas de queima em grelha têm sido projetadas para atenderem caldeiras de pequeno e médio porte, em geral com capacidades inferiores a 200 t/h de vapor.

Os principais combustíveis utilizados para a queima em grelha consistem em bagaço de cana, lenha, cavaco, e biomassa em geral. Carvão fóssil também pode vir a ser utilizado na queima em grelha. Uma importante característica do combustível é a sua granulometria que

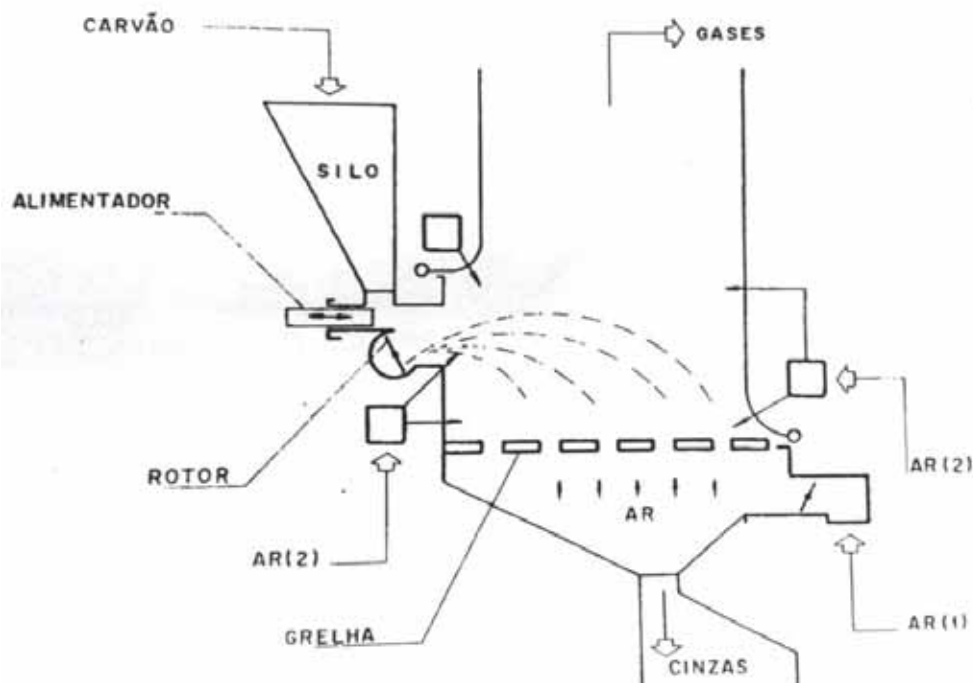
deve ser uniforme. Sua adaptação aos diversos tipos de combustíveis torna viável esse tipo de fornalha no cenário industrial atual.

Um ou mais rotores, adaptados com pás curvadas, espalham o combustível sobre a grelha. As partículas mais finas são queimadas antes de atingirem o leito. O leito de combustível é usualmente mantido entre 7 a 12 cm de espessura. (BAZZO, 1995 p. 40).

A alimentação de ar é realizada principalmente por meio de duas entradas: Primário (Ar primário) e Secundário (Ar secundário). O ar primário é o de maior vazão e entra pela parte de baixo da grelha, passando por ela através de furos na grelha. O ar primário é forçado para dentro da fornalha através de ventiladores. O ar secundário é soprado já no interior da câmara de combustão por ventiladores, ele se mistura aos gases de combustão formando uma turbulência que ajuda na queima do combustível ainda em suspensão.

“As cinzas remanescentes devem ser retiradas continuamente para que o fluxo de ar primário se mantenha bem distribuído sobre toda a extensão da grelha”. (BAZZO, 1995, p.40).

Figura 6: Alimentação de combustível em fornalhas de queima em grelha



Fonte: BAZZO, 1995

As grelhas podem ser do tipo:

Grelha fixa

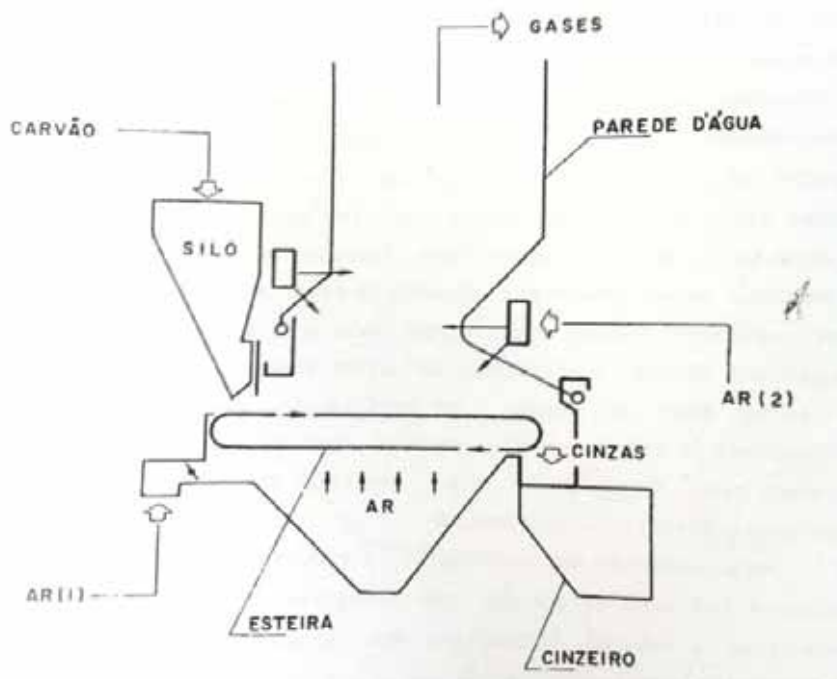
Grelha móvel

As fornalhas com grelha fixa operam com taxas de carregamento não muito maiores que $200 \text{ kg/m}^2\text{h}$. Essas taxas são menores que $200 \text{ kg/m}^2\text{h}$ se o carregamento for manual devido a entrada de ar falso na câmara de combustão prejudicando assim a combustão e podem chegar a valores superiores a $200 \text{ kg/m}^2\text{h}$ se a grelha for adaptada com carregamento automático e grelhas inclinadas.

As fornalhas com grelha móvel alcançam taxas de carregamento muito maiores que $200 \text{ kg/m}^2\text{h}$ por possuírem um sistema automático de remoção de cinzas. A remoção de cinzas melhora essa taxa de carregamento. Outros parâmetros que influenciam na taxa de carregamento que a fornalha suporta é a qualidade do combustível.

“O ar secundário é soprado através de duas ou mais fileiras de tubeiras, direcionadas para a câmara, logo acima da grelha, sob pressões de 600 a 800 mmH₂O e numa proporção variável em torno de 30% de todo o ar utilizado na combustão”. (BAZZO, 1995, p.44).

Figura 7: Fornalha de Grelha Rotativa



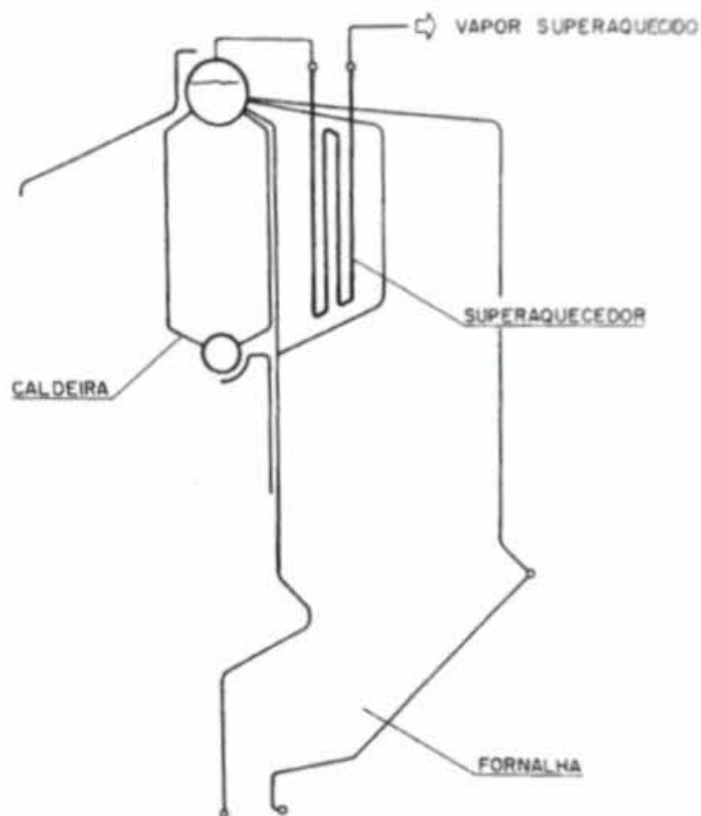
Fonte: BAZZO, 1995

Superaquecedores

Os superaquecedores são tubos que recebem o calor dos gases de combustão e transferem esse calor para o vapor no seu interior, o vapor no seu interior é o vapor gerado no tambor. O vapor passa a possuir propriedade de superaquecido. A troca de calor ocorre tanto por convecção como por radiação.

“A temperatura requerida para o vapor é fator determinante para localização do superaquecedor. Para temperaturas mais altas, é conveniente que sejam instalados o mais perto possível da câmara de combustão. (BAZZO, 1995, p.92).

Figura 8: Esquema de uma unidade geradora com detalhe para o superaquecedor



Fonte: BAZZO, 1995

O material dos superaquecedores é de acordo com a temperatura de trabalho do mesmo. Caso haja deposição de fuligem ou cinzas nos tubos dos superaquecedores a troca térmica fica deficiente nessas regiões sendo necessária a limpeza de fuligem dos tubos. Havendo caminho preferencial dos gases de exaustão no interior da câmara de combustão pode ocorrer rompimento dos tubos ou trincas localizadas devido ao excesso de calor naquela região.

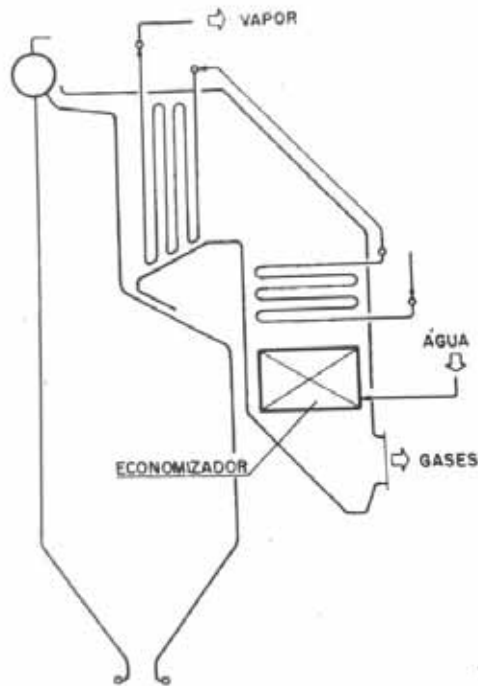
Economizadores

“Economizadores são trocadores de calor determinados a elevar a temperatura da água de alimentação da caldeira, mediante o aproveitamento de parcela da energia residual, ainda disponível nos gases de combustão”. (BAZZO, 1995, p.100).

Os economizadores podem aumentar a eficiência da caldeira uma vez que utilizam o calor dos gases de combustão para elevar sua temperatura e dessa forma necessitar de menos calor nos tubos do feixe evaporativo para se transformarem em vapor supersaturado. Aumentar a eficiência da caldeira significa diminuir o uso de combustível, melhorando dessa forma a relação Kg de vapor/ Kg de combustível.

Entretanto o uso do economizador fica restrito quanto a sua viabilidade econômica, principalmente pela energia a ser recuperada nos gases de combustão e o seu retorno financeiro. A utilização do economizador pode não ser viável se o combustível utilizado na queima possuir em sua composição o enxofre (S), pois pode se transformar no ácido sulfúrico que estará presente nos gases de combustão e entrando em contato com as paredes frias do economizador.

Figura 9: Exemplo da instalação de um economizador



Fonte: BAZZO 1995

Pré-Aquecedor de Ar

“Aquecedores de ar são trocadores de calor determinados a elevar a temperatura do ar utilizado na combustão. São componentes geralmente localizados no final do trajeto dos gases de combustão, após o economizador. A instalação do aquecedor de ar reduz a temperatura residual dos gases para valores mínimos e pode representar uma economia de energia na ordem de 5 a 10%. O aquecimento de ar traz vantagens consideráveis. Além de reduzir o consumo de combustível, aumenta a velocidade de combustão e contribui para que a queima ocorra de forma uniforme e estável. Em termos gerais, os aquecedores de ar funcionam em contra-corrente e se classificam em recuperativos e regenerativos”. (BAZZO, 1995, p.103).

Tiragem

De acordo com PERA (1966, p. 198), tiragem é o processo que garante a introdução do ar na fornalha e a circulação dos gases da combustão por meio de todo gerador de vapor, até a saída para a atmosfera.

A tiragem consiste na movimentação do ar e gases do interior da caldeira para a atmosfera, utilizando o efeito de sucção da chaminé.

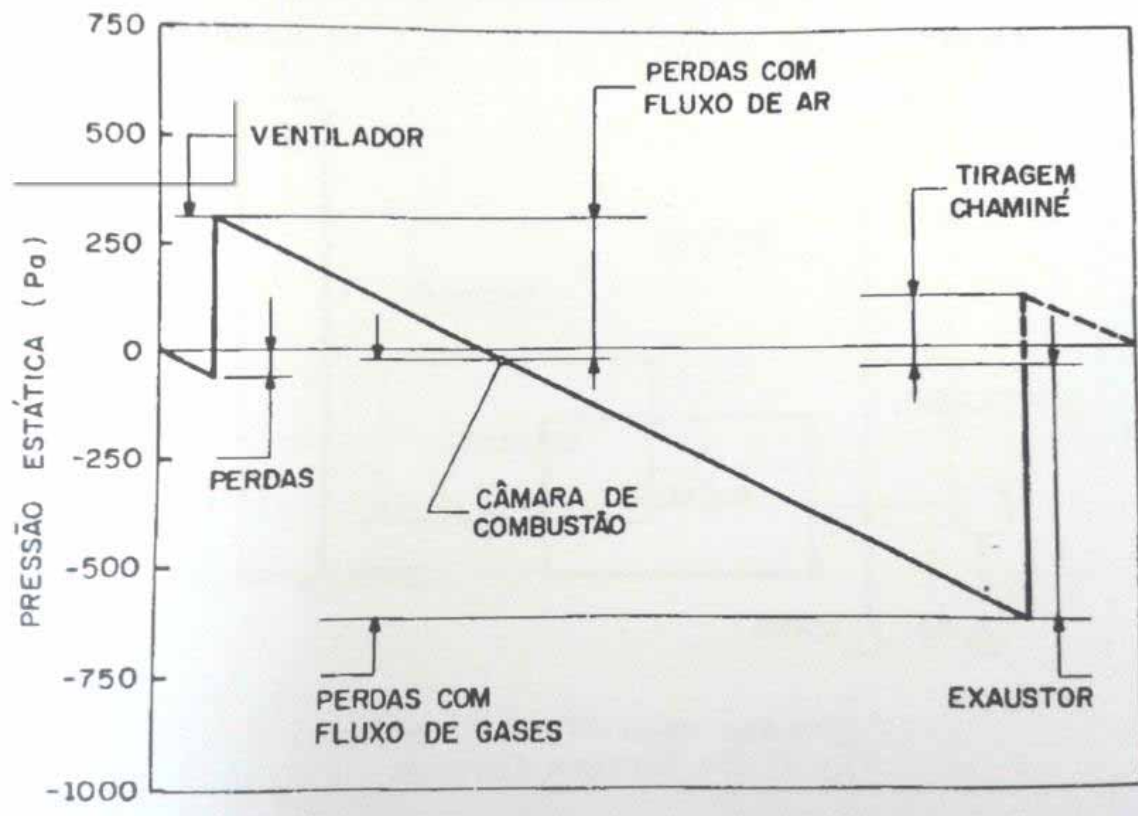
“A câmara de combustão pode operar em depressão ou pressurizada”. (BAZZO, 1995, p. 120).

O uso de ventiladores para a tiragem dos gases de combustão é viável quando se tem uma grande perda de carga devido a instalação dos superaquecedores, economizadores e pré-aquecedor de ar.

“As unidades adaptadas com tiragem forçada operam com um ou mais ventiladores prementes, gerando pressões positivas no interior da câmara de combustão, de modo a superar as perdas de carga e forçar os gases a se deslocar no sentido da chaminé(...). As unidades adaptadas com tiragem induzida tem um exaustor instalado na base da chaminé. Nesse caso, a câmara de combustão opera sempre em depressão”. (BAZZO, 1995, p.121).

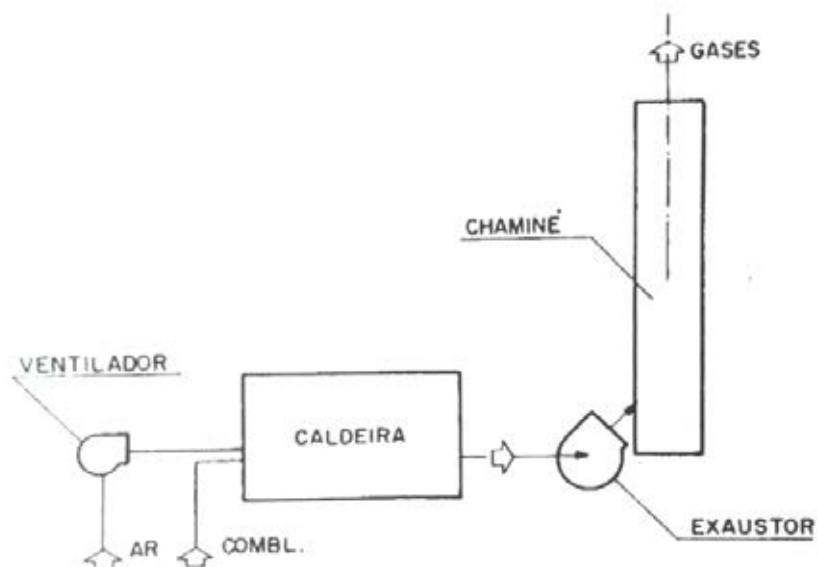
Em tiragem balanceada de acordo com BAZZO (1995, p.123), “A pressão no interior da câmara é normalmente negativa, na faixa de -1 a -10 mmH₂O.”

Figura 10: Variação da pressão estática em um sistema de tiragem balanceada.



Fonte: BAZZO, 1995

Figura 11: Tiragem balanceada



Fonte: BAZZO, 1995

4 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

4.1 Sobre a empresa

A Cogeração de Energia Elétrica Paraíso S.A., empresa privada pertencente à Rhodia, empresa do Grupo Solvay, explora uma central geradora termelétrica (UTE Brotas) anexa à planta de produção de açúcar e álcool da Usina Paraíso, a qual pertence ao Grupo Tonon. A implantação e exploração desta central termelétrica foram objeto da Resolução Autorizativa da ANEEL número 3.352, de 06 de março de 2012 e a liberação da UTE para operação comercial foi dada pela ANEEL por meio do Despacho número 1.386, de 06 de maio de 2013.

Esta central geradora termelétrica utiliza como combustível principal a biomassa (bagaço de cana, pontas e palha) resultante do processo produtivo da unidade industrial da Usina Paraíso. A UTE BROTAS fornece energia elétrica e vapor para a Usina Paraíso e comercializa o excedente de energia elétrica.

4.1.1 Localização e acessos

A UTE Brotas está localizada na Rodovia Brotas - Torrinhas, SP-197 Dr. Américo Piva, km 7,5, no município de Brotas, estado de São Paulo.

Coordenadas Geográficas:

Latitude: 22° 20' 59" S

Longitude: 48° 06' 25" W

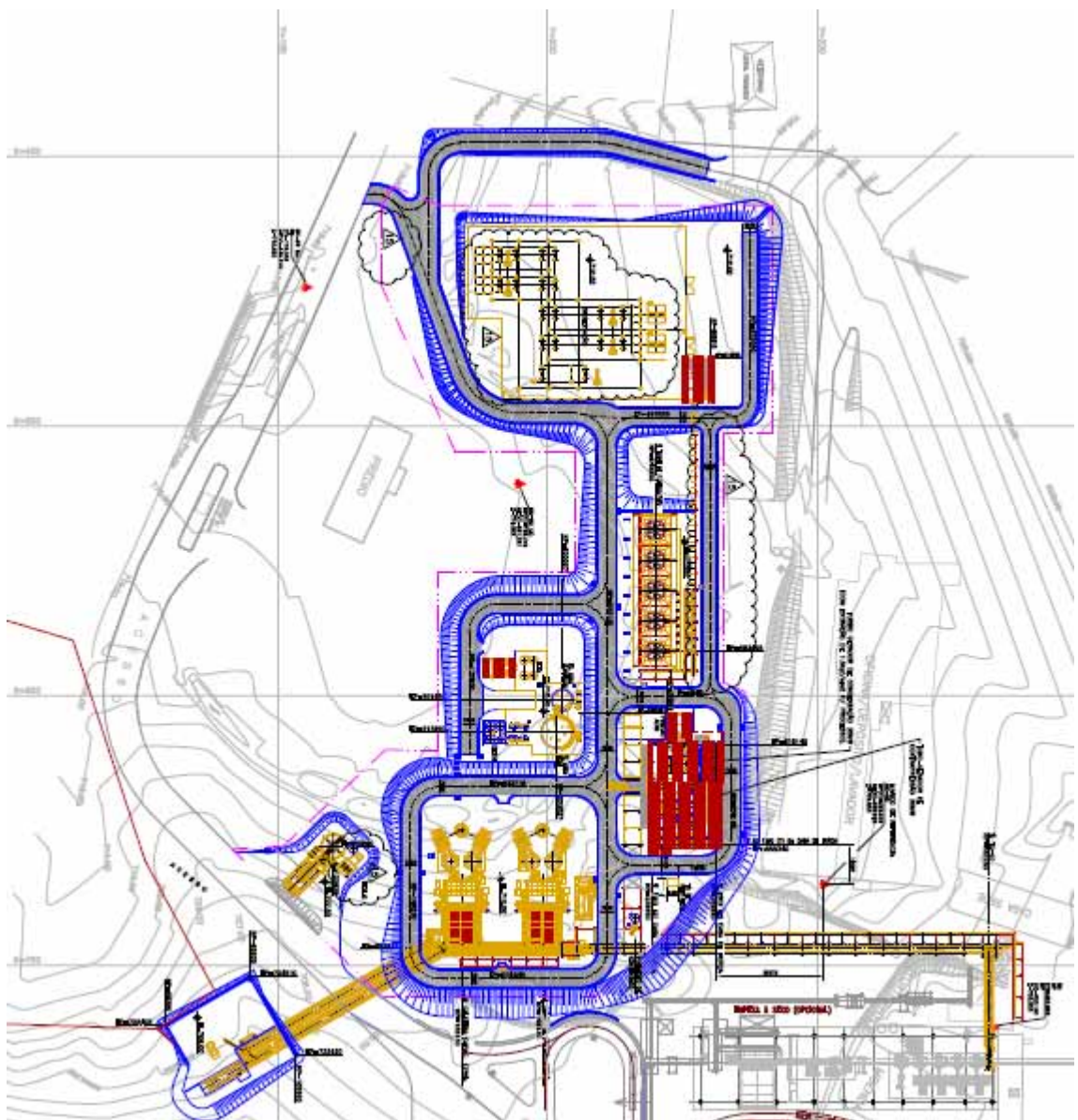
Vias de acessos principais à UTE BROTAS:

- Rodovias SP-197, SP-225, SP-310

4.1.2 Infraestrutura

A termelétrica está instalada com toda a infraestrutura necessária, desde o tratamento de água, bi-desmineralização da água, transporte de combustível por meio de esteiras transportadoras, caldeiras, torres de resfriamento, subestação, turbinas de contra pressão e condensação, periféricos, lavador de gases, estação de tratamento de fuligem e equipamentos de geração, assim como a conexão à rede de distribuição.

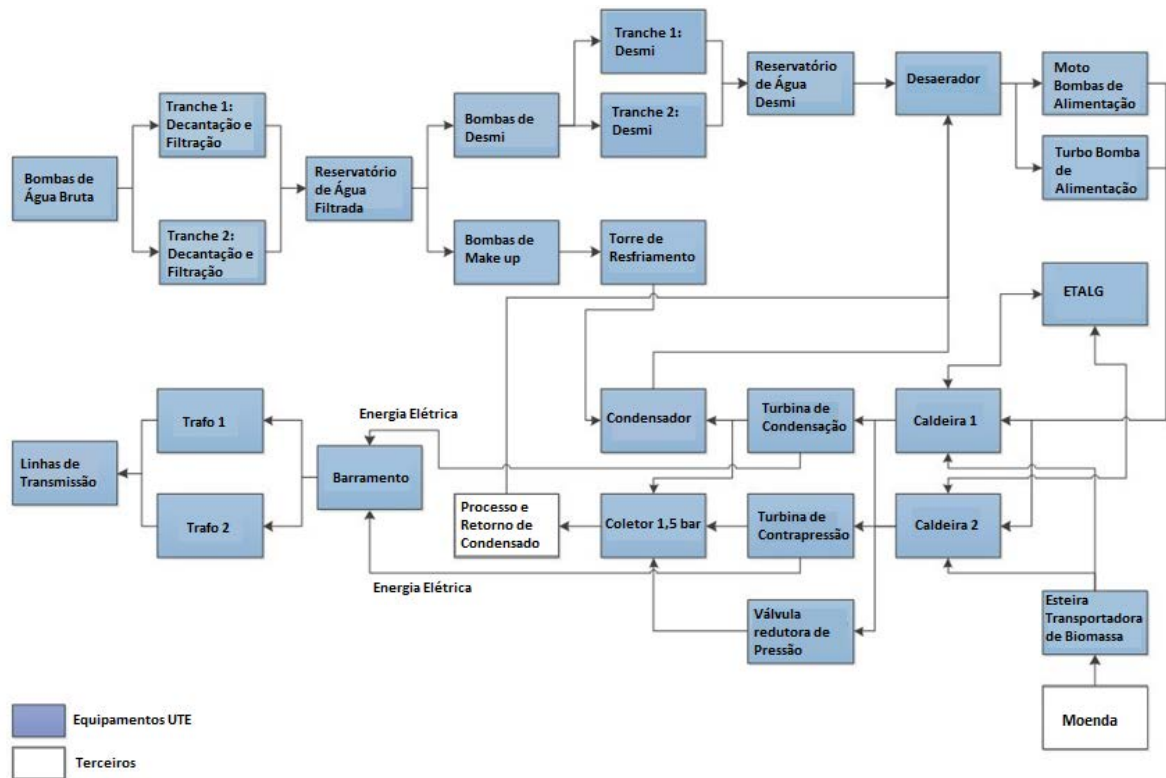
Figura 14: Infraestrutura da UTE Brotas



Fonte: Cogeração UTE Brotas, 2014

4.1.3 Descrição dos Processos

Figura 15: Fluxograma dos processos de geração de energia na UTE Brotas.



Fonte: IANES, 2014, adaptado.

A) Descrição do processo de tratamento de água

Clarificação e Filtração

A água bruta captada da represa da Usina Paraíso é enviada para um reservatório no qual é retirada e enviada para a ETA a uma vazão máxima de 210 m³/h e 2,0 kgf/cm². Chegando à ETA a vazão de água bruta é dividida em dois caminhos (105 m³/h para cada tranche), para o tranche I e II de decantação e filtração, onde receberá no dispersor hidráulico, a dosagem dos produtos químicos pelas bombas dosadoras. No dispersor hidráulico a água bruta receberá soluções de Hipoclorito de sódio numa concentração de 10%, Policloreto de

Alumínio (PAC) numa concentração de 10% e Barrilha leve também numa concentração de 10%, com a finalidade de neutralizar as cargas elétricas das partículas suspensas e os hidróxidos metálicos gerando assim uma flocculação parcial. A barrilha leve tem a função de corrigir a acidez, mantendo o pH da água flocculada entre 6,5 a 6,8. As dosagens realizadas por meio das bombas dosadoras são controladas por meio da descarga de lodo e dos três coletores de amostras localizados no flocculador decantador, sendo um da câmara de decantação, um da câmara de lodos suspensos e outro no nível de água clarificada.

A flocculação é provocada hidraulicamente no decantador, a água que sai do dispersor hidráulico entrará pela parte inferior do vaso decantador, por onde entrará na serpentina de mistura lenta por onde os flocos serão contituídos. A água já flocculada será conduzida para a câmara de lodos suspensos onde um defletor circular efetuará a repartição da água. Os coletores tubulares de lodo recolhem os flocos formados por meio de funis captadores que conduzem os flocos para a câmara de lodos situada na parte inferior do vaso, provocando a separação do material particulado e flocos, finalizando assim a clarificação. A dosagem correta das soluções será definida quando se observar pela descarga de lodos, a saída de lodos, a amostra colhida na câmara de lodos suspensos apresentarem flocos e a amostra na parte superior apresentar-se clarificada.

A água clarificada é captada na parte superior do Decantador na qual segue para o filtro de areia de dupla ação por onde 80% da água entrará pela parte inferior do filtro e 20% pela parte superior. O filtro de areia tem a função de reter os flocos remanescentes possibilitando uma menor turbidez. Finalizado esse processo de filtragem a água segue para o tanque de armazenagem de água clarificada e filtrada.

Desmineralização

A água clarificada e filtrada que está armazenada no reservatório é enviada para o filtro de carvão ativo com a finalidade de filtrar os particulados restantes e de se eliminar o excesso de cloro que é prejudicial às resinas dos trocadores iônicos, o carvão ativo apresenta grande porosidade e pelo efeito da capilaridade os coloides retidos preenchem os canais ou vazios do carvão.

Figura 16: Processo de desmineralização da água.



Fonte: GAVAZZA, 2014

Agora se inicia o processo de desmineralização propriamente dito, onde todos os sais dissolvidos na água são eliminados, a água passa pelos trocadores iônicos no qual se resume a um tanque cilíndrico onde no seu interior possui resinas, essas resinas são produtos sólidos insolúveis e em forma de grãos com as propriedades de trocar os íons que possuem pelos íons dos sais dissolvidos na água.

As resinas catiônicas possuem o íon H^+ que permutam com os cátions existentes nos sais dissolvidos na água a ser tratada. Após a água é enviada para o trocador aniônico na qual as resinas aniônicas possuem o íon OH^- que irão permutar com os ânions existentes na água.

Por fim a água desmineralizada passa por um ultimo trocador iônico, chamado de leito misto, pois realizará a troca catiônica e aniônica num mesmo recipiente por meio das resinas. O fluxo da água no trocador é realizado de cima para baixo. Após esse processo a água, agora bi desmineralizada, será enviada para um reservatório.

Após certo volume de água tratada, a quantidade de íons trocados entre as resinas se tornam ineficazes necessitando, portanto de uma regeneração. A regeneração nada mais é que a passagem de reagentes pelas resinas promovendo a troca dos íons retidos e retornando assim a resina em seu aspecto inicial.

A fase de regeneração se inicia pela injeção de solução ácida (HCl) na resina catiônica, na concentração recomendada pelo fabricante da resina, preparada previamente em reservatório de solução a parte. A solução é feita a partir da diluição de ácido no reservatório

de solução já contendo o volume correspondente de água requerido, seguindo-se de uma recirculação para homogeneização. A solução preparada é enviada ao vaso catiônico pelas bombas de solução ácida, comandadas diretamente pelo CLP da unidade.

Uma vez terminada a fase de injeção de solução ácida no catiônico, inicia-se a fase de lavagem das resinas com uma vazão e tempo pré-determinados e obtidos na fase de partida e configurados no automatismo. O controle da regeneração do catiônico é feito por meio de avaliação analítica do TAF (teor dos ácidos forte), inicialmente é esperado um valor alto de TAF e valor baixo de pH, que vai se estabilizando no decorrer da lavagem, diante de duas análises iguais de TAF. Estando pH estável, teremos como conclusão a regeneração do catiônico, observando também a manutenção da dureza (TH) permanente em zero ppm na saída.

Na regeneração da resina aniônica o princípio utilizado é o mesmo da resina catiônica, mas a diferença é o reagente a ser utilizado. No caso da resina aniônica será utilizado solução de soda caustica normalmente preparada com água e soda caustica NaOH a 50%, com uma solução em 5%. A lavagem das resinas é feita nos mesmos moldes que o realizado para as resinas catiônicas, o controle do final da regeneração do aniônico é feito pelas análises de sílica e condutividade.

No processo de regeneração do leito misto, primeiramente é feito uma drenagem para abaixar o nível e permitir uma expansão das resinas com injeção de ar para promover a separação natural das resinas catiônicas das aniônicas por diferença de densidade entre elas. A regeneração inicia-se pela passagem de solução de ácido clorídrico na resina catiônica o que é feito de baixo para cima e saindo pela cruzeta no centro. A lavagem é mantida até a estabilização do pH na faixa de 3,5 a 4. A resina aniônica é regenerada com solução alcalina aprox. 6% com entrada por cima e saída pelo centro, na sequência é feito a lavagem da resina seguindo o mesmo trajeto até a estabilização do pH em 9, o tempo de lavagem será definido na partida da unidade e configurado no CLP de automatismo da ETA.

Concluída a regeneração da resina aniônica, temos o rebaixamento do nível do vaso e a mistura da resina com ar, posteriormente o enchimento e desaeração para então iniciar a fase de pré-produção do leito misto até a estabilização da condutividade.

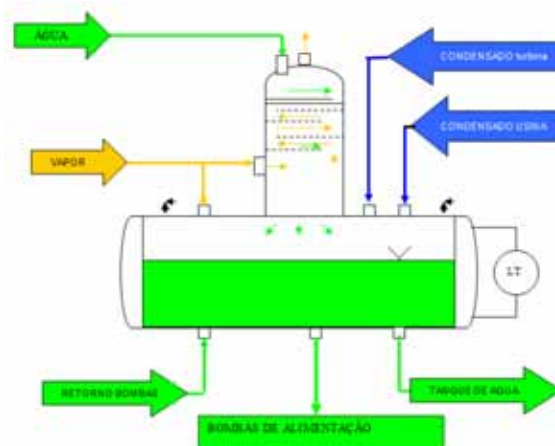
B) Processo de desaeração da água

Esse processo consiste numa importante fase, onde os gases dissolvidos na água (principalmente O₂ e CO₂), serão retirados e enviados para a atmosfera. A importância de se retirar os gases na água é devido ao fato de que a presença de O₂ na água na tubulação da caldeira ocasiona corrosão e diminui a eficiência da caldeira. A presença de CO₂ pode causar quedas sensíveis de pH, tornando o meio agressivo ao metal

A água Bi-desmineralizada entra por cima do desaerador, onde em seu interior possuem várias camadas de contato, como se fossem “pratos” para que a área de contato da água seja maior. Enquanto a água bi-desmi entra no desaerador, ao mesmo tempo temos o condensado de retorno da Usina e do condensador também voltando para o desaerador e uma certa quantidade de vapor sendo “injetada”, para aquecer a água por volta de 105°C, com esse pré-aquecimento, os gases se desprendem e por serem menos densos eles são eliminados para a atmosfera e no caminho, passando pelos “pratos” eles arrastam uma quantidade de gases que estão dissolvidos na água bi-desmi que esta entrando no desaerador.

Para a remoção completa do oxigênio dissolvido utiliza-se um tratamento químico complementar, com a utilização de sulfito de sódio, hidrato de hidrazina ou ácido ascórbico, esses produtos tem a função de “sequestrar” o oxigênio dissolvido na água de alimentação. Para se eliminar quimicamente o CO₂ utiliza-se amônia e aminas voláteis.

Figura 17: Esquema de funcionamento do desaerador.



Fonte: BUENO, 2012

C) Produção de vapor

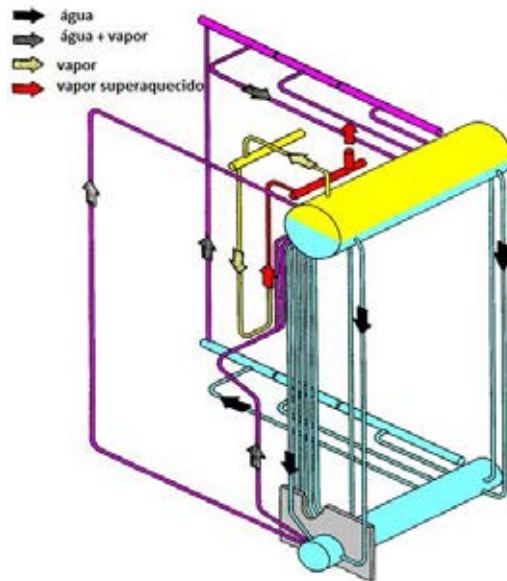
A água de alimentação das caldeiras é proveniente do desaerador e é bombeada por meio de três bombas titulares de 210 m³/h – 110°C – 100Kgf/cm², acionadas por motores elétricos de 1000 CV na tensão de 690 Vca e nos casos de falhas/indisponibilidades destas, o bombeamento será assegurado por uma turbo bomba de 420 m³/h – 100Kgf/cm² - 2100 CV com partida automática a partir da detecção da queda de pressão no coletor geral de água < 80 Kgf/cm².

A água bombeada passa opcionalmente pelo economizador (troca de calor entre água e os gases de combustão), onde é pré aquecida, em seguida enviada para um condensador de vapor saturado 67 Kgf/cm². Este condensador tem a função de produzir condensado na pressão e temperatura de saturação de 282°C destinado ao 1° controle da temperatura do vapor superaquecido e paralelamente pré aquecer a água de alimentação antes de sua admissão no balão da caldeira. Ao deixar o condensador a água de alimentação está a aproximadamente 145 °C, então entra no balão sendo distribuída ali uniformemente, através de uma tubulação especialmente instalada para evitar choques térmicos em função das diferenças existentes das temperaturas. O tubo de distribuição de água é localizado abaixo da linha de nível de operação.

A água de alimentação com maior densidade é direcionada para os circuitos descendentes do feixe evaporativo, e deste alimenta os coletores inferiores das paredes da fornalha, através dos down commers trocando calor no percurso, sendo aquecida até a temperatura de 282 °C, retornando ao tambor de vapor através dos circuitos ascendentes do feixe evaporativo, já se transformando em vapor saturado úmido. Nas paredes tubulares da fornalha ocorre a mudança de fase e a mistura de água e vapor é encaminhada ao balão de vapor, existindo para isso um conjunto de tubos de retorno interligando o tambor nos coletores superiores. Os tubos das paredes frontal e traseira são ligados através de coletores e esses diretamente ao tambor de vapor.

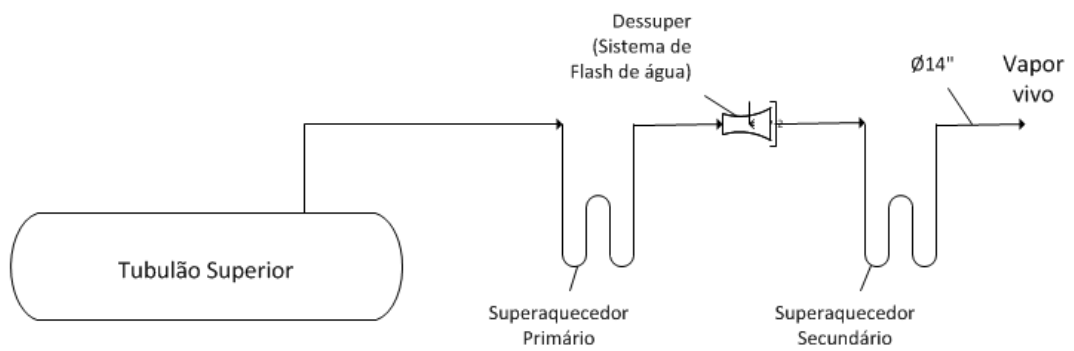
O vapor saturado que deixa o tambor de vapor é finalmente encaminhado para o superaquecedor, sendo este constituído de dois estágios de superaquecimento denominados primário e secundário.

Figura 18: Caminho percorrido pela água até se transformar em vapor superaquecido.



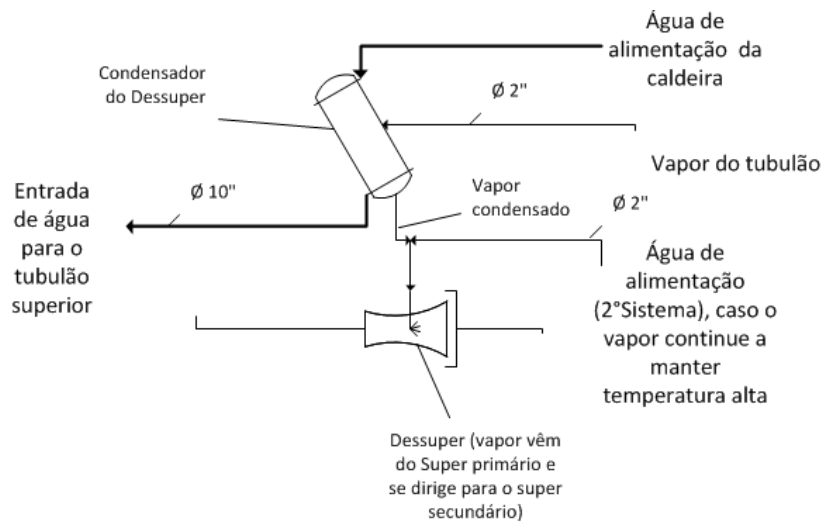
Fonte: Ricardo Lessa, 2012

Figura 19: Fluxograma simplificado dos superaquecedores



Fonte: GAVAZZA, 2014

Figura 20: Fluxograma simplificado do dessuperaquecedor.



Fonte: GAVAZZA, 2014

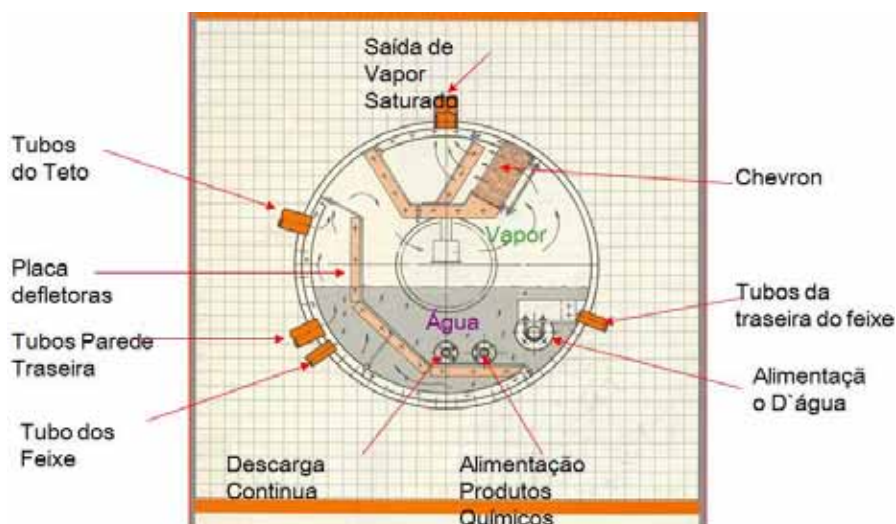
D) Sistema purificador de vapor

Internamente a caldeira possui um sistema purificador de vapor, composto de chapas defletoras e chevrons. As chapas defletoras dividem o tambor de vapor em duas zonas distintas, uma turbulenta e outra calma, diminuindo o arraste de água na saída de vapor, promovendo um choque das partículas de água arrastadas, o agrupamento destas e o retorno das mesmas para o circuito principal e garantindo uma maior estabilidade do nível de água no tambor de vapor.

Chevrons são cestos de chapas corrugadas, tendo eles a finalidade de promover uma contínua mudança de direção no fluxo do vapor, a fim de coletar as gotículas de água e redirecioná-las para o circuito. Desta forma, a primeira fase de purificação do vapor se inicia no balão de vapor, reduzindo o arraste natural de água para o superaquecedor e assegurando a produção de um vapor superaquecido seco, com elevado título, (Título igual a 1 significa vapor seco, título menor que 1 é uma mistura de vapor seco e água líquida). Na segunda fase o fluxo de vapor produzido mais gota de água de menor tamanho é forçada a incidir na parte metálica, resultando novamente de uma junção de gotas seguida da precipitação dentro do ciclone e finalmente, na terceira fase os elementos chevrons (cestos separadores) promovem

uma centrifugação em função da velocidade de escoamento promovendo a eliminação final e a água separada retorna naturalmente para o balão.

Figura 21: Esquema do funcionamento da purificação do vapor.



Fonte: Ricardo Lessa, 2012

E) Tratamento interno da água da caldeira

No interior da caldeira é realizado um tratamento complementar da água com adição controlada de fosfato de sódio (Na_3PO_4), aminas e dispersantes, propiciando controle rigoroso da concentração de sólidos totais e da sílica suspensa, bem como, um rigoroso controle de pH numa faixa pré determinada.

A injeção de produtos químicos no balão é realizada por meio de um tubo distribuidor assegurando melhor distribuição e homogeneização. O uso de aminas voláteis, permite uma correção do pH do vapor produzido, estabelecendo uma proteção contra corrosão nos sistemas de recuperação e retorno de condensado.

A caldeira dispõe também de recursos para drenagem de fundo do balão e uma purga contínua de superfície para garantir o controle da concentração de sílica suspensa além da desconcentração de sólidos totais precipitado. A purga contínua é feita por meio de um tubo coletor, com os furos para cima e colocado na linha de água e vapor do balão, sua principal

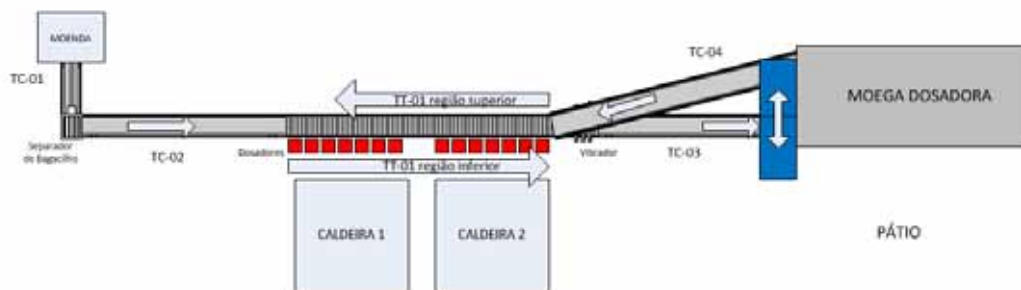
finalidade é a desconcentração de sílica, devendo operar com abertura da válvula regulada para o máximo de 5% da vazão nominal da caldeira, a concentração de sílica deverá ser mantida abaixo de 6 ppm, preferencialmente abaixo de 2 ppm. A drenagem de fundo é tomada em 4 (quatro) pontos distintos do balão e enviada para o balão de flash (que elimina o vapor para a atmosfera).

F) Descrição do processo de transporte por esteiras do combustível

O bagaço proveniente da moenda é transferido para a esteira TC-01 por onde percorre o caminho até chegar ao separador de bagacilho, é então transferido para a esteira TC-02. No outro lado da TC-02 o bagaço será deslocado na região superior da TT-01 por onde então se deslocará para a região inferior e entrarão nos 14 dosadores de bagaço para alimentar as caldeiras 1 e 2 (7 dosadores por caldeira). O excesso de bagaço ou o bagaço que não chegou a entrar no dosador continuará caminho pela TT-01 por onde passará pelo vibrador e em seguida será enviado através da esteira TC-03. Ao final da TC-03 o bagaço passará por um desviador onde pode seguir dois caminhos que será determinado no supervisão a partir da demanda necessária na caldeira. Caso a oferta de bagaço seja maior do que a demanda o bagaço será desviado para o pátio. Caso a demanda seja maior que a oferta o bagaço será desviado para a TC-04 por onde retornará mais a frente para a região superior da TT-01 e então para a região inferior da TT-01 e novamente para os dosadores.

O bagaço pode vir, ao invés da moenda, pelo pátio através da moega dosadora onde tratores preencherão a entrada da moega conforme instruído pelos controladores na sala de controle devido à necessidade ou não de bagaço na alimentação das caldeiras. O bagaço passará para a TC-04 onde se unirá ao bagaço que retornou pelo desviador de bagaço e então serão transportados até a TT-01 para finalmente serem dosados nos 14 dosadores de bagaço.

Figura 22: Esquema do transporte por esteiras do combustível



Fonte: GAVAZZA, 2014

G) Sequencial da queima

A biomassa, ou seja, o bagaço de cana é admitido no processo através dos transportadores de bagaço (esteiras). O combustível é dosado através de 07 dosadores de bagaço (em cada caldeira) e que ficam instalados na parte frontal da caldeira. Por conta da gravidade o bagaço alcança os espargidores, que contam com um sistema de ar pulsante, para promover a perfeita distribuição de combustível (bagaço) no interior da fornalha. A fornalha onde se processa toda a combustão é mantida em depressão de -5,0 mmca, controlada por uma tiragem induzida mantida pelos dois exaustores.

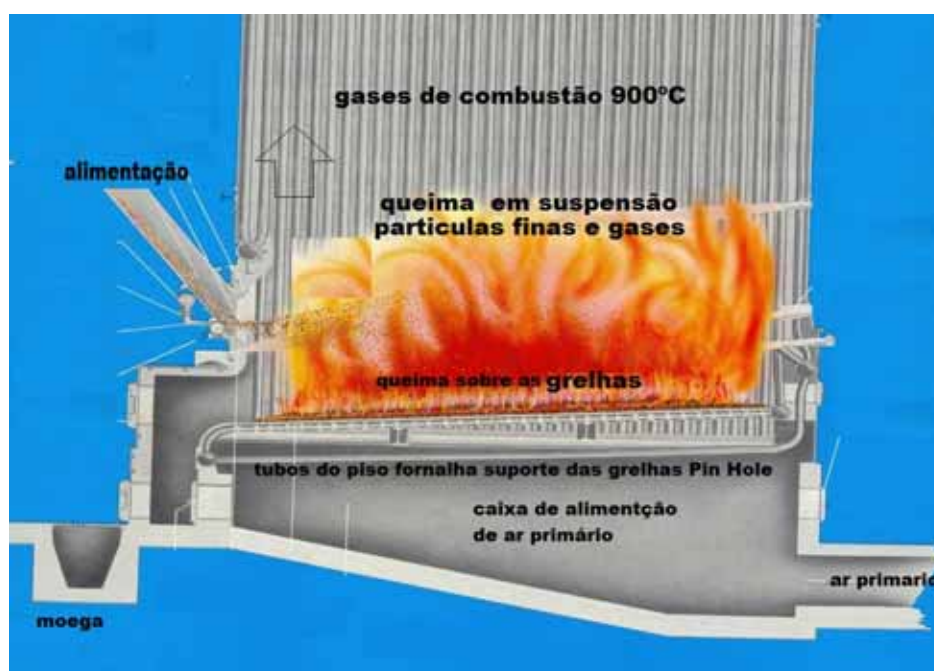
O sistema de ar secundário é responsável de assegurar uma queima do bagaço ainda em suspensão na fornalha, principalmente as partículas finas e voláteis carregadas pelos gases. As partículas mais pesadas são espalhadas uniformemente sobre a grelha fixa resfriada a água, formando um leito de bagaço fino. Para a queima desse leito que fica sobre a grelha, a Caldeira é provida de um ventilador forçado, onde o circuito do ar, passa pelo pré-aquecedor de ar a gás de baixa aquecendo este que é encaminhado por meio de dutos sob a grelha fixa. A queima do combustível será realizada 70% sobre a grelha e 30% em suspensão.

As grelhas conforme informado pelo fabricante, suportam normalmente temperaturas < 220°C, daí a necessidade da manutenção do resfriamento das mesmas com a água e com o ar primário. Os dutos de alimentação dos dosadores precisam ser mantidos sempre selados

(cheio de bagaço) durante toda a operação, sensores capacitivos de presença de bagaço estão instalados nos dutos de alimentação visando orientar o operador com indicação de nível alto/baixo/muito baixo na tela operacional. Ocorrendo nível muito baixo um intertravamento atua desligando o dosador correspondente para evitar a perda completa de selagem e a indesejável entrada de ar falsa e retrocesso de chama da fornalha para esteira transportadora potencializando um risco de incêndio externo.

Os gases provenientes da combustão sobem à região superior da fornalha, passando em seguida pelos superaquecedores, feixe evaporativo, pré-aquecedor de ar de alta e baixa e economizador. Por fim esses gases são limpos no Lavador, onde as partículas são retidas pela água do lavador, e os gases limpos são encaminhados para os ventiladores induzidos e lançados a atmosfera pela chaminé.

Figura 23: Sequencial da queima da biomassa na fornalha



Fonte: Ricardo Lessa, 2012, adaptado por Oswaldino Teixeira Bueno 2013.

Figura 24: Entrada do ar secundário realizando a turbulência na câmara de combustão.



Fonte: BUENO, 2012

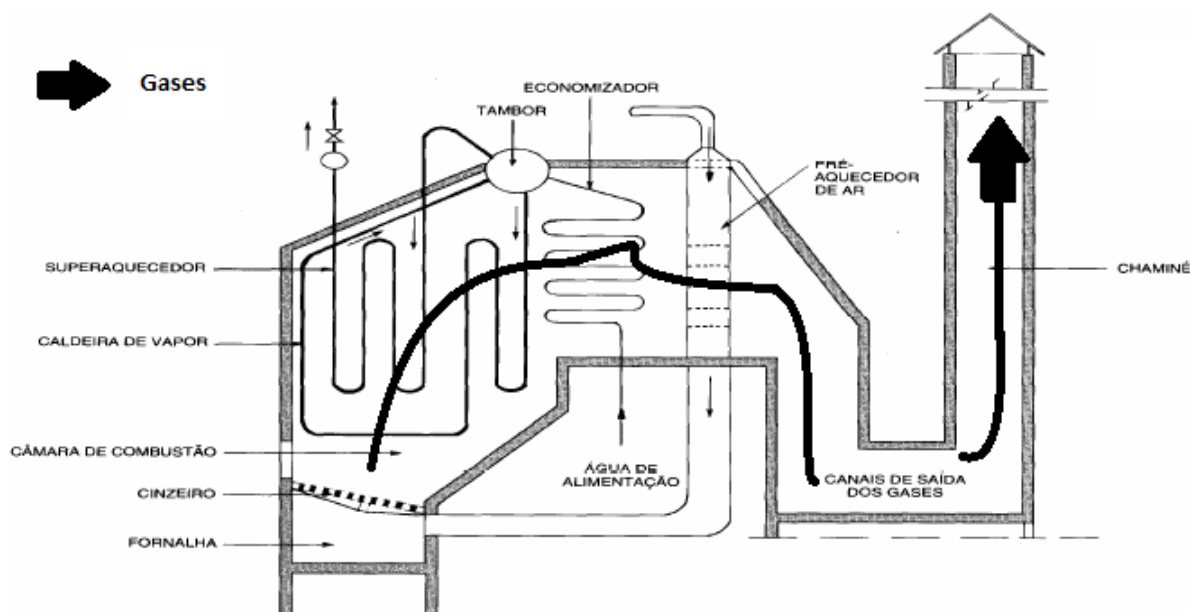
H) Caminho dos gases

O ventilador primário é responsável por enviar o oxigênio para realizar a combustão através da grelha pin hole, o ar passará pelos pré-aquecedores de ar onde receberá calor proveniente dos gases de combustão que estão sendo enviados para o lavador de gases. Ao receber calor o ar entra na fornalha por baixo da grelha, e passa através dos orifícios distribuídos na grelha.

O ar que entra no ventilador secundário também passará pelos pré-aquecedores, mas depois eles irão entrar pelas laterais da fornalha criando assim uma turbulência dentro da fornalha e permitindo que ocorra a queima do combustível ainda em suspensão.

Após a queima, os gases da combustão seguirão caminho passando através do economizador e dos pré-aquecedores de ar, por onde perderá calor. Em seguida ele é "lavado" pelos retentores de fuligem na qual as gotículas de água derrubam as partículas de fuligem em suspensão no ar e que são responsáveis pela poluição atmosférica. Essas partículas saem então dos lavadores de gases e são encaminhadas para a estação de tratamento de fuligem.

Figura25: Caminho dos gases de combustão



Fonte: Pêra (1990), adaptado

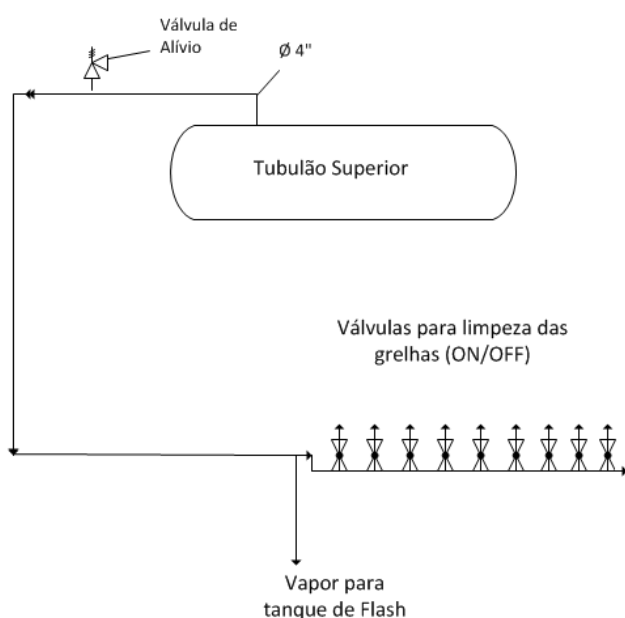
I) Sistema de limpeza de grelha

Na grelha fixa, a limpeza é realizada através de sopragem com vapor oriundo do tambor de vapor após redução da pressão $67 \text{ Kgf/cm}^2 / 15 \text{ Kgf/cm}^2$ não havendo dessuperaquecimento, o vapor de 15 Kgf/cm^2 é então enviado para os bicos de sopragem e limpeza, distribuídos estrategicamente em toda a área superior da grelha. A correta disposição dos bicos de sopragem garantem o efeito de varredura e uma eficiente remoção com o vapor. A limpeza é feita sequencialmente começando pelo soprador 9 até o soprador 1.

As cinzas provenientes da grelha Pin Hole são continuamente descarregadas em uma calha coletora, que por via úmida são conduzidas até o tanque de selagem cuja principal função é a de assegurar a vedação entre o ambiente da fornalha, que por sua vez é regularmente mantida despressurizada (-4 a -7 mmca) e o ambiente externo, desta forma evitando a indesejável entrada de ar falso na fornalha, ou a saída de gases de combustão, as cinzas então seguem para o sistema de tratamento de cinzas denominado ETALG.

A operação de limpeza de grelha é fato importantíssimo para a operação segura da caldeira, pois sem a realização da limpeza bem sucedida das grelhas poderá ocorrer a obstrução crescente da entrada do principal fluxo de ar de combustão ascendente e deteriorando assim a queima sobre as grelhas a partir do qual teremos acúmulo de depósitos de bagaços não queimados e maior geração de monóxido de carbono devido a insuficiência de ar comburente. Igualmente teremos uma redução da carga térmica liberada com queda da produção de vapor, pressão de vapor da caldeira, arraste de não queimados para fora da zona de combustão, o que irá implicar em outros riscos.

Figura 26: Fluxograma simplificado da limpeza de grelha.



Fonte: GAVAZZA, 2014

J) Sistema de limpeza de fuligem

Tem como finalidade a limpeza periódica das superfícies de troca térmica, nas regiões de maior tendência à deposição de fuligem. O vapor utilizado para sopragem é oriundo do tambor de vapor a partir de uma redutora de 67 Kgf/cm² / 14 Kgf/cm² neste caso sem dessuperaquecimento, e os sopradores são acionados por comando do supervisório. O sistema de sopragem é constituído pelos seguintes sopradores: seis sopradores de fuligem tipo rotativo

fixo instalado no feixe evaporativo e dois sopradores de fuligem tipo retrátil instalado no superaquecedor.

Nos sopradores de fuligem tipo rotativo fixo, o elemento de sopro permanece no interior da caldeira e é equipado com um bocal de sopragem em cada espaçamento entre tubos. Estão instalados nas regiões de temperaturas moderadas e sujeitas á formação de depósitos/incrustações mais leves. Os sopradores do tipo retrátil caracterizam-se por uma lança, provida em sua extremidade de dois bicos Venturi opostos, introduzida na caldeira com um movimento helicoidal. Estão instalados na região da caldeira de elevadas temperaturas dos gases de combustão.

4.1.4 Condições climáticas

Condições climáticas típicas da região de Brotas - SP.

Altitude acima do nível do mar: 636 m.

Temperatura média: 25 °C.

Umidade Relativa Média: 60%.

4.1.5 Caracterização do terreno para fundação da UTE

O solo típico da região de Brotas, no local da UTE, é argiloso / arenoso.

A fundação utilizou estacas perfuradas profundas, concretadas no local.

4.1.6 Recursos hídricos para o suprimento da UTE

São utilizados os recursos hídricos de águas superficiais existentes na Usina Paraíso, de acordo com Outorga publicada no Diário Oficial do Poder Executivo do Estado de São Paulo, datado de 08 de janeiro de 2011: captação superficial - Ribeirão Claro ou do Varjão, vazão 160 m³/h - período 24 h/d - 30 dias.

4.2 Motivação

Após a moagem da cana para extração do caldo, obtém-se o material denominado bagaço, constituído de fibra (48%), água (50%) e sólidos dissolvidos (2%). A quantidade de bagaço obtida varia de 250 a 300 kg de bagaço por tonelada de cana, e o açúcar nele contido representa uma das perdas do processo. O bagaço alimenta a caldeira, onde é queimado, e a energia liberada transforma água em vapor. A cana-de-açúcar ainda dispõe de outro resíduo que é parcialmente usado como combustível, a palha. Denomina-se palha todo o restante da planta que não pertence aos colmos (caule que contém o açúcar). A palha é constituída de folhas verdes, folhas secas e ponteiro. A quantidade disponível de palha é a mesma que a do bagaço, ou seja, 250 a 300 kg de palha por tonelada de cana com 50% de umidade.

Até alguns anos atrás toda a palha era queimada antes da colheita para permitir a colheita manual. Com a gradual redução das queimadas ao longo do tempo, culminando com a sua proibição a partir de 2014, e consequente aumento da colheita mecanizada, passou a existir uma disponibilidade deste resíduo para uso como combustível. Uma parte da palha é voluntariamente deixada no campo para proteção do solo agrícola, o que faz com que a palha efetivamente coletada como biomassa para queima em caldeira represente, na prática, de 15% a 20% da biomassa [porcentagem = $\text{palha}/(\text{bagaço} + \text{palha})$].

O poder calorífico inferior do bagaço com 50% de umidade é de aproximadamente 7430 KJ/kg (equivalente a 2,06 Mwh/t). A palha de cana no momento da colheita também tem em média 50% de umidade e o mesmo poder calorífico do bagaço.

A quantidade de biomassa de cana (bagaço + palha) gerada pelo processamento industrial da Usina Paraíso é teoricamente capaz de atender a demanda da central termelétrica, considerando o consumo de cada unidade de produção de energia térmica. Todavia, na prática, a geração de biomassa pode sofrer quebras devido a condições climáticas adversas, variações do rendimento agrícola, rendimento da coleta da palha, necessidades de manutenção. Ocorrem também outros problemas como, por exemplo, queda de eficiência da moagem impactando na umidade do bagaço, com isto reduzindo o seu poder calorífico útil. Tudo isto faz com que seja necessário utilizar um combustível alternativo (por exemplo, cavaco de madeira), para compensar as reduções da disponibilidade de biomassa que ocorrem durante a safra sem, contudo, ultrapassar o total licenciado de combustível para consumo na UTE. Além disso, o

uso de um combustível alternativo, como cavaco de madeira, deverá também tornar viável a operação da central termelétrica por mais tempo durante a entressafra, desta forma permitindo maximizar a geração de energia para o SIN (Sistema Interligado Nacional). A sequência abaixo tem o objetivo de ilustrar este contexto.

Tabela 2: Dados de uso da biomassa e produção de vapor da UTE Brotas

Dados	Unidade	Valor
Moagem	t/h	500,08
Bagaço	t/h	135,02
Palha	t/h	25
Biomassa Total	t/h	160,03
Dias efetivos de moagem	Dias	208,3
Biomassa disponível	t	800.000,00
	Unidade	Valor
Safra	Dias	208,3
Produção de vapor	t/h	310
Consumo específico	t vapor / t biomassa	2,15
Consumo de biomassa	t/h	144,21
Consumo de biomassa da safra	t	720.949,37
	Unidade	Valor
Entressafra	Dias	109,7
Produção de vapor	t/h	126,6
Consumo específico	t vapor/ t biomassa	2
Consumo de biomassa	t/h	63,3
Consumo de biomassa da safra	t	166.656,24

Fonte: Cogeração UTE Brotas, 2014

4.3 Principais componentes

Figura 27: Vista da área de Caldeira da UTE Brotas.



Fonte: GAVAZZA, 2014

Caldeira

Quantidade: duas caldeiras

Capacidade de produção de vapor: 175.000 kg/h

Pressão de trabalho: 67 kgf/cm²

Temperatura do vapor: 490 °C

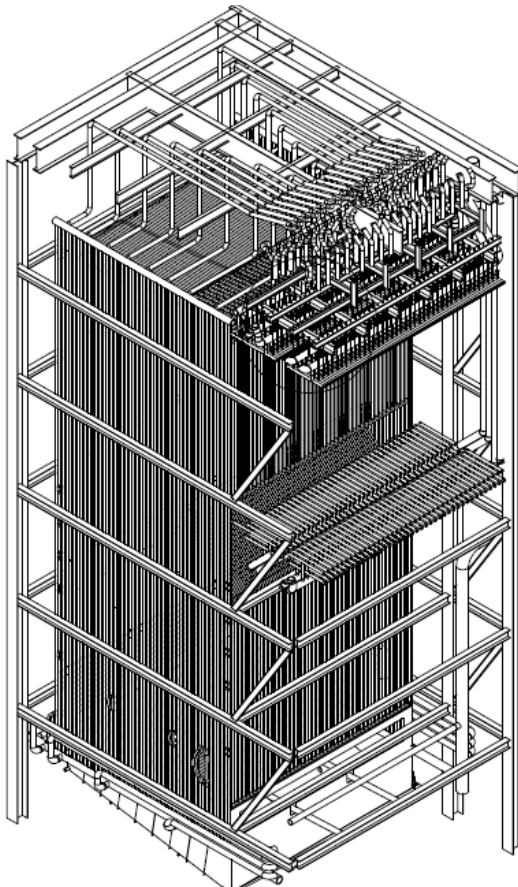
Fabricante: IPLAN

Figura 28: Placa de identificação da caldeira.

IPLAN Engenharia, Projetos, Indústria e Serviços Ltda Piracicaba - SP Fone: (19) 3413 - 7001	
MODELO	IPLAN 1 B 175/67 - 490
NÚMERO DE REGISTRO	021/2011 - N : 01
ANO DE FABRICAÇÃO	2011
CAPACIDADE DE PROD. DE VAPOR	175.000 kg/h
PRESSÃO MÁX. DE TRAB. ADMISSÍVEL	81 kgf/cm ²
PRESSÃO DE TESTE HIDROSTÁTICO	121,5 kgf/cm ²
PRESSÃO DE TRABALHO	67 kgf/cm ²
TEMPERATURA DO VAPOR	490 °C
ÁREA DE AQUECIMENTO	4.672 m ²
NORMA DE PROJETO	ASME - SEC. I
ANO DE EDIÇÃO	2007 AD. 2007
DESTINATÁRIO	COGERAÇÃO PARAISO - UTE BROTAS - SP

Fonte: GAVAZZA, 2014

Figura 29: Desenho esquemático da caldeira.



Fonte: Ricardo Lessa, 2012

Ventilador de tiragem forçada (FDF) – Ventilador de Ar Primário

Quantidade: duas unidades por caldeira

Modelo: AFI – 180 – SWSI/12

Vazão: 179-207 m³/h

Pressão estática: 144 mmca

Acionamento: Motor elétrico

Rotação: 682 RPM

Potência consumida: 133,93 HP

Marca: AFC

Tipo Motor: W22

Potência motor: 150 HP – 4 Polos

Fabricante motor: WEG

Ventilador de ar secundário (Auxiliar)

Quantidade: duas unidades por caldeira

Modelo: D-320-1640-SWSI/8

Vazão: 85.584 m³/h

Pressão estática: 600 mmca

Acionamento: motor elétrico

Rotação: 1.190 RPM

Potência consumida: 230,89 HP

Tipo motor: TRIF W22

Potência motor: 300 HP – 6 Polos

Fabricante motor: WEG

Figura 30: Ventiladores primário e secundário



Fonte: GAVAZZA, 2014

Figura 31: Ventilador de ar de espargimento

Ventilador de ar de espargimento

Quantidade: uma unidade por caldeira

Modelo: D-200-1-900-SWST

Vazão: 15.000 m³/h

Rotação: 2.166 RPM

Potência consumida: 41,68 HP

Pressão estática: 600 mmca



Fonte: GAVAZZA, 2014

Marca: AFC

Potência motor: 50 HP – 4 Polos

Fabricante motor: WEG

Ventilador de tiragem induzida (IDF) – Exaustor

Quantidade: duas unidades por caldeira

Modelo: D-420-2.280-SWSI/7

Tipo: Radial

Vazão: 288.620 m³/h

Pressão estática: 313 mmca

Acionamento: motor elétrico

Potência consumida: 445,2 HP

Rotação: 799 RPM

Marca: AFC

Potência motor: 500 HP – 4 Polos

Fabricante motor: WEG

Figura 32: Exaustores



Fonte: GAVAZZA, 2014

Fornalha

Altura: 22.300 mm

Largura: 9.462 mm

Profundidade: 9.120 mm

Tipo de tubos: Aletados

Grelha

Tipo: PIN HOLE

Largura: 9.380 mm

Profundidade: 9.160 mm

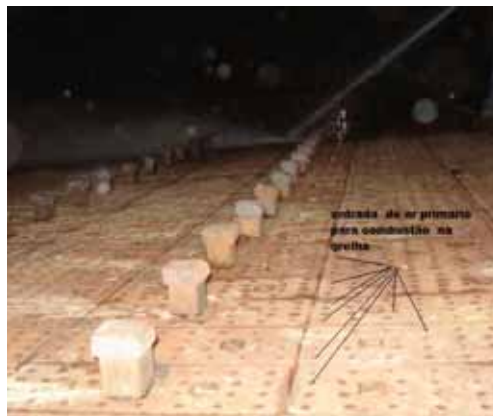
Área da grelha: 86 m²

Figura 33: Lajota da grelha do tipo Pin Hole.



Fonte: GAVAZZA, 2014

Figura 34: Grelha Pin Hole com os furos de entrada de ar primário.



Fonte: GAVAZZA, 2014

4.4 Organização do trabalho

Cronograma

janeiro/2014: Coleta de dados e identificação de potenciais fornecedores

Março/2014: Visita a Caldeira Lanxess, discussão com IPLAN

Abril/2014: Primeiros testes (poucas horas, 1 dia)

Abril/2014: Teste de 3 dias em 1 caldeira (durante o desligamento da moenga devido a chuva)

Abril/2014: Obtenção de instruções Agência Ambiental de como proceder para retirar a licença de biomassa fora da temporada.

Mai/2014: Operação de 10 dias com 1 caldeira (acumulação de cavaco, formação de pedras dentro da caldeira (sintetização de areia)

Junho/2014: Resumo do teste industrial após manutenção geral

Julho/2014: Fim dos testes – Relatório final com análise externa até Abril.

Agosto/2014: Licença da Agência garantida para queimar 50% cavaco de madeira x 50% bagaço.

A primeira ação foi mapear os fornecedores de cavaco de madeira num raio de 150 Km, caso o fornecedor estivesse fora desse raio o custo com transporte somados ao preço da tonelada de cavaco não seriam lucrativos havendo assim prejuízos. Neste raio se encontram outras usinas termelétricas que utilizam o bagaço de cana e algumas que utilizam o cavaco de madeira.

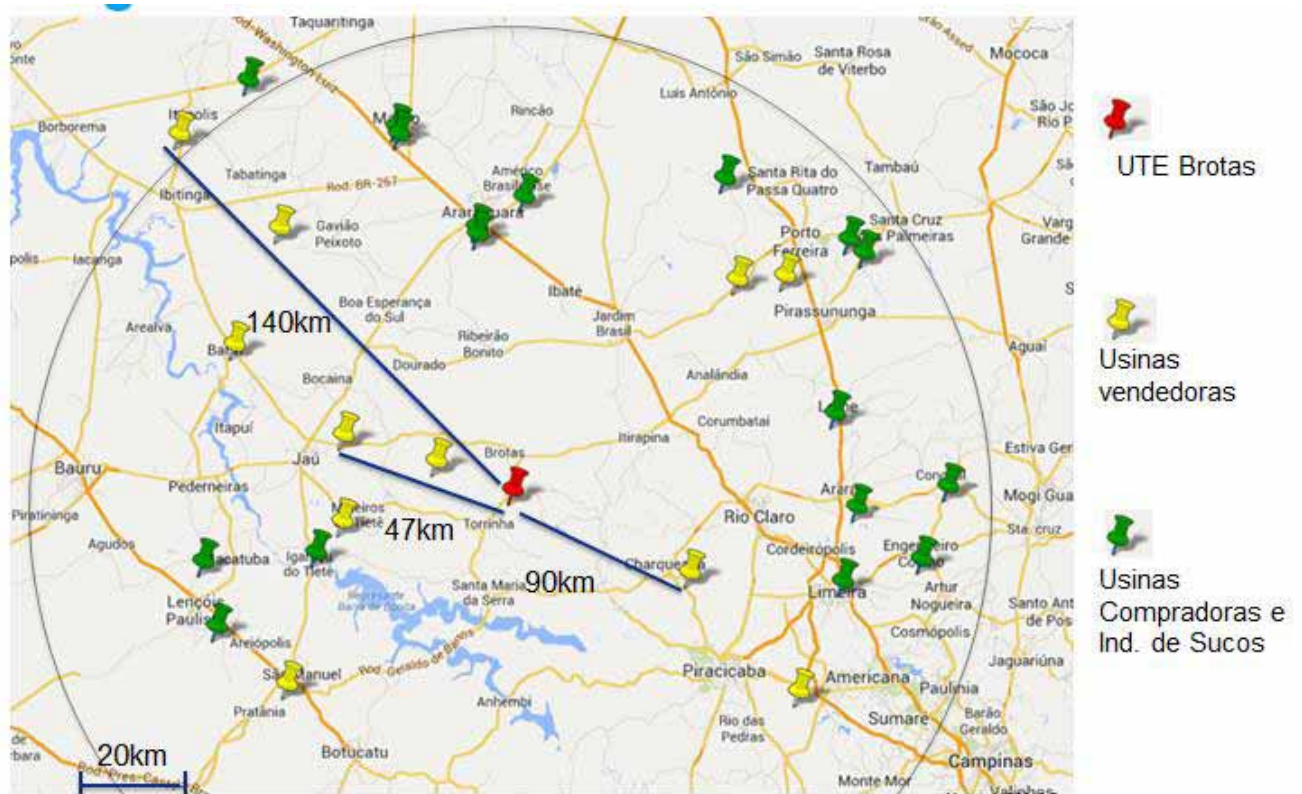
Usinas Próximas (raio de 150 Km)

Tabela 3: Usinas termelétricas próximas a Brotas

Group	Mill	City	Distance from Brotas (Km)	High pressure boiler	EE generation capacity
	SEIS LAGOAS	BROTAS	30	NO	
	MOMESSO	MINEIROS DO TIETE	50	NO	
RAIZEN	DOIS CORREGOS	DOIS CORREGOS	50		
TONON	SANTA CANDIDA	BOCAINA	50	YES	34 MW
	GRIZZO	JAU	55	NO	
RAIZEN	BARRA	BARRA BONITA	60	YES	136 MW
	CENTRAL PAULISTA	JAU	70		12 MW
	NOVA ERA ENERGIA	IBATE	80	NO	
RAIZEN	DIAMANTE	JAU	80	NO	7 MW
RAIZEN	SERRA	IBATE	80		15 MW
	DELLA COLETTA	BARIRI	83	NO	3 MW
BALDIN-BIO	TABOÃO	PIRASSUNUNGA	90	YES	45 MW
BALDIN-BIO	SÃO PEDRO	PIRASSUNUNGA	90	NO	
RAIZEN	COSTA PINTO	PIRACICABA	93	YES	75 MW
ABEGOIA	SÃO LUIZ	PIRASSUNUNGA	95	YES	70 MW
IPIRANGA	DESCALVADO	DESCALVADO	95	NO	
	SANTA LÚCIA	ARARAS	100	NO	
	GRANELLI	CHARQUEADA	100	NO	
RAIZEN	ARARAQUARA - ZANIN	ARARAQUARA	100		16 MW
	SÃO MANOEL	SÃO MANOEL	100	NO	15 MW
SÃO MARTINHO	IRACEMA	IRACEMAPOLIS	100	YES	14 MW
	CIA MULLER	PORTO FERREIRA	100	NO	
	SÃO JOÃO	ARARAS	100		
RAIZEN	TAMOIO	ARARAQUARA	105		
ZILOR	SÃO JOSE	MACATUBA	105	YES	80 MW
DINE	MARINGA	ARARAQUARA	110	YES	60 MW
ZILOR	BARRA GRANDE	LENCOIS PAULISTA	110	YES	63 MW
	FERRARI	PIRASSUNUNGA	120	YES	66 MW
BIOSEV	CRESCIUMAL	LEME	120	YES	42 MW
	SANTA CRUZ	AMERICO BRASILIENSE	120	YES	84 MW
	DEST. SANTA MARIA	LENCOIS PAULISTA	120		1 MW
DINE	SANTA RITA	SANTA RITA DO PASSA QUATRO	130		
	FURLAN	SANTA BARBARA DO OESTE	130	NO	
	VALE VERDE	AVARÉ			
	SANTA FÉ	NOVA EUROPA	160	NO	

Fonte: GAVAZZA, 2014

Figura 35: Mapa das Usinas num raio de 150 km da UTE Brotas.



Fonte: GAVAZZA, 2014 (adaptado do GOOGLE Maps)

Disponibilidade de combustível alternativo (cavaco de madeira)

A utilização de cavaco de madeira como combustível é uma prática bem estabelecida no estado de São Paulo, incluindo a região que se encontra num raio de até 200 km da UTE Brotas. Existem diversos fornecedores deste tipo de combustível, que estão aptos a fornecer cavaco proveniente, principalmente, de florestas plantadas de eucalipto ou pinus (madeira, galhos, raízes). Dentre as outras fontes disponíveis se podem citar o cavaco de laranjeira, proveniente da renovação das plantações e, também, cavaco da reciclagem de pallets (sem pintura ou tratamento). Por outro lado a utilização de cavaco pelas caldeiras da UTE é uma operação de caráter complementar à utilização do combustível principal, para suprir a eventual falta ou redução da disponibilidade deste último, tanto na safra quanto no período de entressafra da cana. Assim sendo, o volume previsto de combustível alternativo a ser

consumido é menor do que o do combustível principal (ordem de grandeza 10%), sendo perfeitamente compatível com a capacidade de suprimento pelo mercado de cavacos já existente.

O PCI do cavaco de madeira é normalmente maior do que o PCI da biomassa de cana, dependendo do tipo de cavaco e da umidade. São comuns valores de PCI de 2,3 a 3,5 MWh/t. Porém, como o volume deste combustível alternativo é relativamente pequeno, comparado ao do combustível principal, os cálculos de rendimento que se seguem foram feitos unicamente considerando o combustível principal.

Ciclo Termodinâmico:

A UTE Brotas está implantada anexa à unidade industrial da Usina Paraíso, do Grupo Tonon. Ela consiste num processo de cogeração o qual supre as necessidades de vapor e energia elétrica do processo produtivo de fabricação de etanol e açúcar, e gera excedentes de energia elétrica para comercialização. A capacidade de geração instalada é de 70 MW (capacidade nominal).

O combustível principal para geração de energia primária (térmica) para produção de energia elétrica é o resíduo sólido, denominado bagaço, resultante do esmagamento da cana-de-açúcar. A cana-de-açúcar ainda dispõe de outro resíduo que é usado como combustível, a palha. Denomina-se palha todo o restante da planta que não pertence aos colmos (caule que contém o açúcar). A palha é constituída de folhas verdes, folhas secas e ponteiro.

Como combustível alternativo a geração de energia primária também pode utilizar cavaco de madeira, de forma complementar à biomassa de cana de açúcar. O cavaco de madeira é obtido de origem sustentável e pode ser utilizado isoladamente ou em misturas com a biomassa de cana de açúcar servindo, especialmente, para complementar o combustível durante paradas ou diminuições da moagem de cana, por exemplo, devido às condições climáticas, ou manutenção, e no período da entressafra.

Este processo de obtenção de energia elétrica, conhecido como cogeração, pode ser definido como a produção combinada de calor útil e trabalho mecânico, geralmente

convertido total ou parcialmente em energia elétrica. Este processo possibilita a otimização do potencial energético destinado aos processos industriais, com consequente redução da quantidade de combustível utilizado nas configurações convencionais.

A geração de energia elétrica é feita através do Ciclo Térmico de Rankine, o mais tradicional e convencionalmente utilizado. O Ciclo de Rankine é realizado em três tipos de equipamentos principais: caldeira, turbina a vapor e gerador elétrico. A UTE Brotas conta com duas caldeiras, duas turbinas a vapor e dois geradores elétricos instalados.

Especificações do combustível

Combustível: Bagaço de cana

Umidade: 52%

Poder calorífico superior (PCS): 2.189 Kcal/Kg

Poder calorífico inferior (PCI): 1.725 Kcal/Kg

Composição Química:

Carbono: 47%

Hidrogênio: 6,5%

Oxigênio: 44%

Cinzas: 2,5/3,1%

Figura 36: Biomassa: bagaço de cana



Fonte: <https://carbonosustentavelbrasil.wordpress.com/2009/09/18/briquete-nao-e-bagaco-entenda-a-diferenca/#more-196>

Figura 37: Biomassa: cavaco de madeira



Fonte: http://www.lippel.com.br/lippel/uploads/produto_imagens/85/picador-florestal-a-tambor-PTML-240-320-x-600-plus-zoom-6.jpg

Combustível: Cavaco de madeira (Pinheiro, Eucalipto, Laranjeira)

Umidade: 15/20%

Poder calorífico superior (PCS): 4.525/5.057 Kcal/Kg

Poder calorífico inferior (PCI): 3.854 Kcal/Kg

Composição Química:

Carbono: 49-50%

Hidrogênio: 6%

Oxigênio: 44-45%

Nitrogênio: 0,1-1%

Pequenas quantidade de Cálcio (Ca), Potássio(K) e magnésio(Mg)

Uso do cavaco de madeira como combustível secundário

O cavaco de madeira é armazenado no Pátio, onde é recebido por meio de caminhões que são pesados na entrada e depois pesados novamente na saída para o controle da quantidade de biomassa que foi descarregada.

Ainda no pátio são coletadas algumas amostras da biomassa e levada para o laboratório no qual será realizada a medição da umidade pelo método gravimétrico (estufa). Para determinação da umidade as amostras de cavacos são submetidas ao clássico método gravimétrico (base úmida), descrito em diversos manuais de secagem e normas como NBR 7190, onde as amostras úmidas são submetidas à secagem em estufa a $103^{\circ}\text{C} \pm 2$.

A dosagem de cavaco nas caldeiras começa pelo carregamento de tratores com pá carregadeira do pátio, onde também é armazenado bagaço, até a moega dosadora na qual será transportada através de esteiras transportadoras até a esteira que distribui a biomassa nos sete dosadores localizados na entrada da caldeira.

Figura 38: Descarregamento de biomassa no pátio de bagaço



Fonte: GAVAZZA, 2014

Figura 39: Pátio de biomassa



Fonte: GAVAZZA, 2014

A Figura 39 mostra o pátio de bagaço e cavaco. A dosagem é feita por meio de três tratores com pá carregadeira. Caso haja excesso de combustível, a esteira transportadora TC03 retorna o combustível pelo o desviador de biomassa que, por meio do supervisor, escolhe se deve voltar para o circuito na esteira TC04 e voltar a alimentar as caldeiras ou se é descarregado no pátio para armazenagem.

Figura 40 : Moega dosadora



Fonte: GAVAZZA, 2014

Figura 41: 7 dosadores de biomassa



Fonte: GAVAZZA, 2014

Figura 42: Entrada dos dosadores de biomassa na esteira TT-01.



Fonte: GAVAZZA, 2014

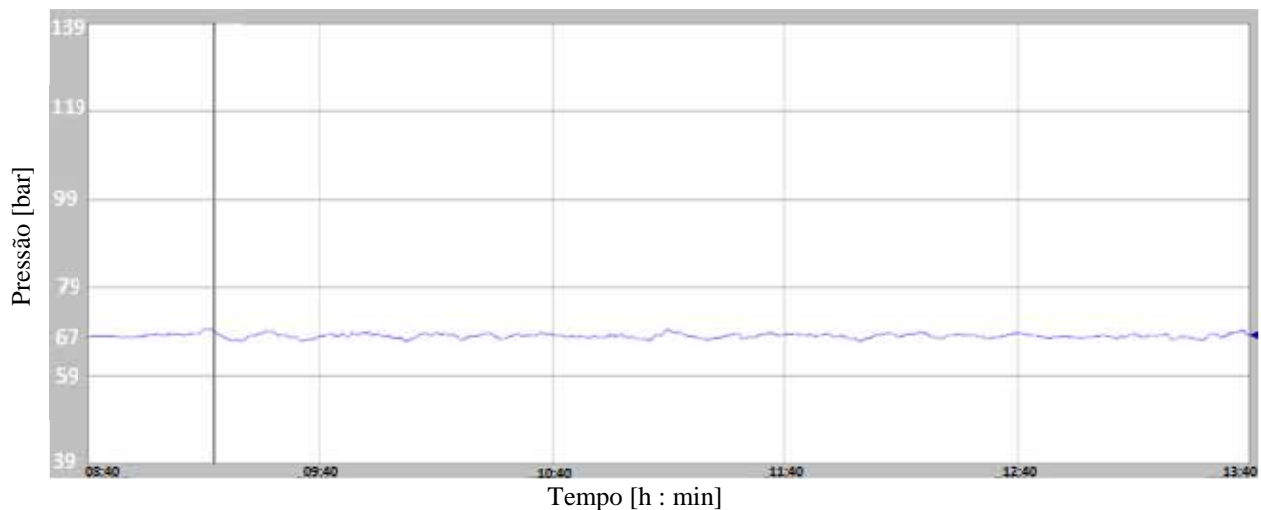
Inicialmente foi feito um teste com duração de 10 dias com a proporção de peso de 50% cavaco de madeira e 50% bagaço de cana para avaliar os efeitos no processo e produção de vapor.

Durante esse teste foram comparados várias variáveis do processo em relação a produção com 100% bagaço de cana, os valores foram coletados por operadores no supervisor e no campo.

4.5 Resultados

Ao se iniciar os testes utilizando o cavaco de madeira na caldeira 1, observamos que a pressão do vapor média é de 70 [bar] um pouco acima da pressão de trabalho normal de 67 [bar], embora a pressão esteja acima do normal ela se mantém num ritmo estável como podemos observar no gráfico a seguir:

Figura 43: Gráfico da variação de pressão x tempo



Fonte: Supervisório UTE Brotas, 2014

Essa estabilidade é bem explicada pela melhor selagem das bicas dosadoras pelo uso do cavaco em relação ao uso do bagaço de cana. O cavaco de madeira possui um PCI maior que o PCI do bagaço e quando utilizado para a queima, a temperatura da fornalha aumenta chegando próximo aos 900°C. Esse aumento na liberação de energia influencia na pressão do vapor que conseqüentemente sobe. A dosagem de combustível pode então ser reduzida pelas bicas dosadoras, passando de 90% da capacidade de rotação das bicas, para cerca de no máximo 70%.

Figura 44: Dosadores de biomassa (combustível: 50% cavaco 50% bagaço), imagem do supervisório



Fonte: Supervisório UTE Brotas, 2014

Essa diminuição da dosagem de combustível ajuda a selar as bicas dosadoras mais facilmente uma vez que a biomassa que está sendo enviada para a caldeira se encontra mais compactada (devido à diminuição na velocidade de dosagem), e assim não permite a entrada de ar falso na fornalha. Essa selagem ajuda a controlar a pressão de vapor e a depressão da caldeira, que se encontra em torno de -5 mmH₂O (lembrando que a caldeira opera com tiragem induzida).

Figura 45: Selagem perfeita (note que não há entrada de ar falso na fornalha)



Fonte: GAVAZZA, 2014

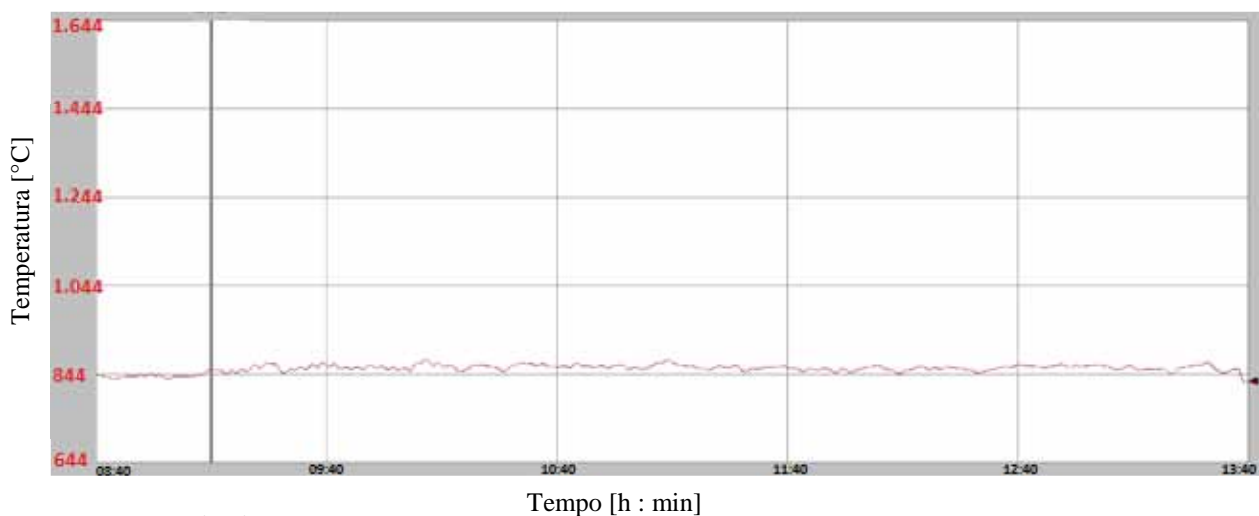
Figura 46: Selagem deficiente, entrada de ar falso para o interior da fornalha



Fonte: GAVAZZA, 2014

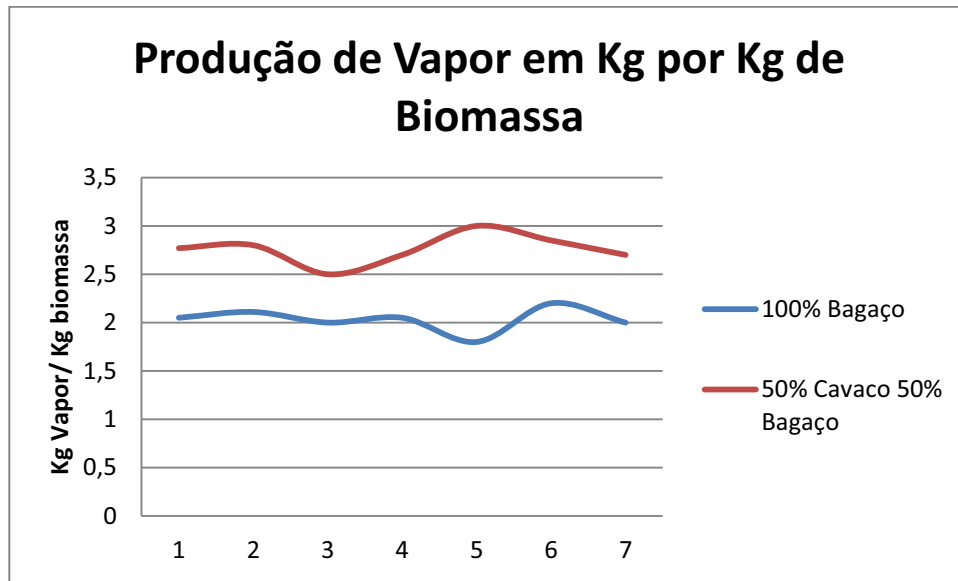
Com um PCI maior, a energia liberada também é maior. A temperatura da fornalha ficou em torno de 844°C, chegando a 900°C (dependendo da carga de combustível que está sendo alimentada). Essa energia “extra” liberada, sendo por radiação ou convecção dos gases de combustão tem impacto na pressão e temperatura do vapor. O uso de uma biomassa com PCI mais elevado influencia também na quantidade em Kg de vapor produzido por Kg de biomassa utilizada.

Figura 47: Gráfico da Temperatura da fornalha x tempo



O gráfico a seguir mostra essa produção de vapor por biomassa utilizada, comparando a utilização de 100% bagaço com a mistura de 50%/50%. Para realizar a construção do gráfico foram utilizados dados dos totalizadores das balanças que estão localizadas na entrada da TC02 que recebe o bagaço da moenda da Usina, da TC03 e da TC04. Utilizando somente bagaço como biomassa conseguimos uma produção de em média 2,1 Kg de Vapor por Kg de biomassa. Já com a utilização da mistura das biomassas a produção aumentou para em média 2,7 Kg de vapor produzido por Kg de biomassa utilizada.

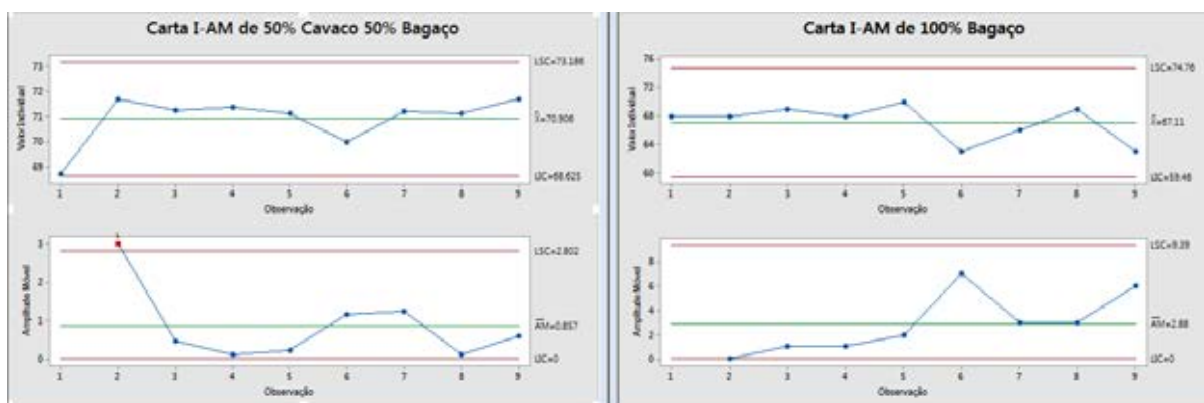
Figura 48: Gráfico do consumo específico das biomassas.



Fonte: GAVAZZA, 2014

Realizando então um estudo mais detalhado da pressão do vapor, comparando a utilização do combustível composto por 100% bagaço de cana e depois com o combustível composto por 50% cavaco de madeira e 50% bagaço de cana no gráfico a seguir feito no Software MINITAB 17.

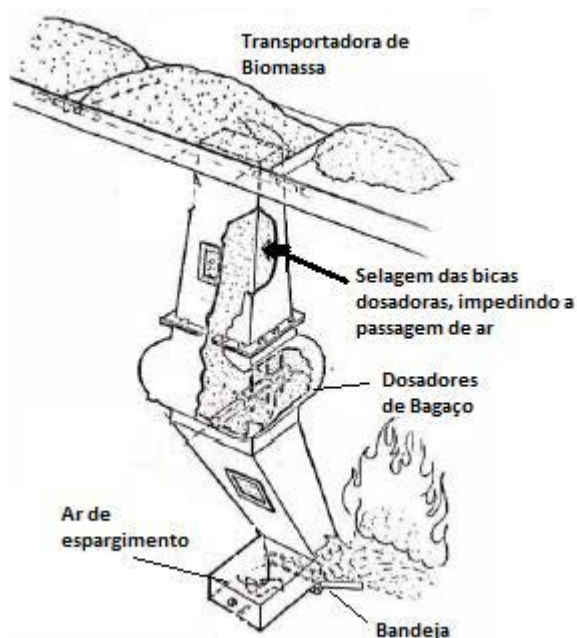
Figura 49: Carta de controle do uso do bagaço a 100% e da mistura 50%/50%.



Fonte: GAVAZZA, 2014

Foram realizadas 9 medidas, sendo que cada medida foi coletada utilizando a média de cada hora no supervisório. Observando a carta de controle a mistura de cavaco com bagaço mostrou apenas o primeiro ponto em cima da LIC e o restante dos pontos próximo a linha média de 70,9 [bar], observando a amplitude o valor médio esteve entre 0,857. O ponto 1 para o ponto 2 pode ser explicado por algum evento no processo fora do normal, como por exemplo o travamento de algumas bicas dosadoras devido a obstrução por causa de pedras ou objetos estranhos, esses materiais estavam juntado com a biomassa de cavaco de madeira e esse problema será tratado mais adiante. Ignorando o ponto 1 temos um processo bem estável comparado ao uso de 100% de bagaço como podemos observar na carta de controle do uso de 100% de bagaço. Embora a média da pressão estivesse em torno de 67,11 [bar] o processo variou muito e em pouco tempo, chegando a valores inferiores de 64 [bar] e superiores de 70 [bar]. A amplitude esteve em torno de 2,88, valor muito superior do obtido com o uso da mistura de biomassa.

Figura 50: Esquema da dosagem de bagaço para a fornalha.

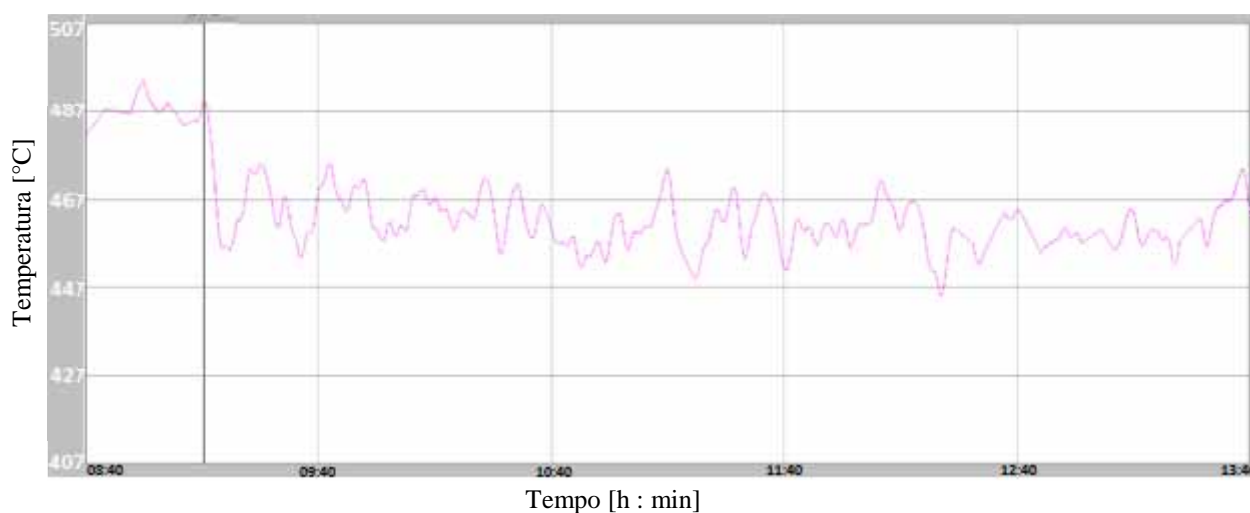


Fonte: EMPRESARIAL (2002), adaptado.

Outro gráfico que podemos avaliar é do da variação de temperatura do vapor ao longo do tempo. Pelo gráfico podemos observar que a temperatura cai bruscamente em certo

momento esse fato pode ser explicado pelo mesmo motivo que houve uma queda de pressão do vapor no mesmo momento, como observamos anteriormente na carta de controle da pressão do vapor, o travamento de algumas bicas dosadoras devido à obstrução de material estranho, diminuindo assim a carga de combustível na caldeira. Logo após a queda ocorre a estabilização novamente da temperatura pelo aumento da carga das outras bicas dosadoras ou pela desobstrução das bicas travadas. O travamento das bicas ocorre pelo aumento da amperagem que é sinalizada no supervisório e atingindo um certo valor o CLP age com segurança emitindo alarmes até então realizar o desligamento da bica com problema.

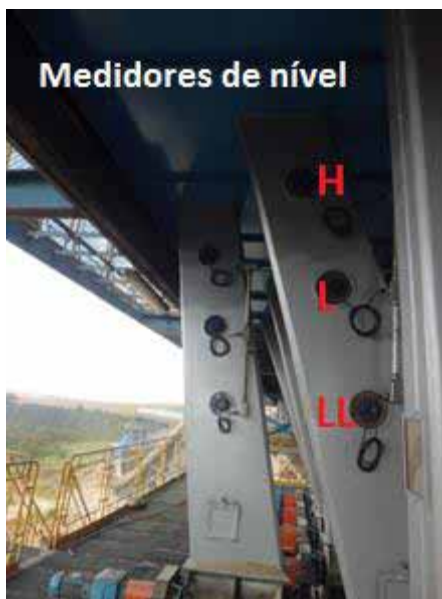
Figura 51: Gráfico da temperatura do vapor x tempo



Fonte: Supervisório UTE Brotas, 2014

A foto a seguir mostra os medidores de nível capacitivos de biomassa nos dosadores, caso ocorra falta de biomassa ou obstrução, ele envia um sinal de aviso no supervisório. Eles funcionam basicamente pela variação da capacitância obtida entre a sonda do medidor e a parede do dosador. Cada material possui uma constante dielétrica diferente, sendo a do ar diferente do da biomassa.

Figura 52: Medidores capacitivos de nível



Fonte: GAVAZZA, 2014

4.6 Problemas

Os problemas provenientes da queima da mistura de 50% de cavaco com 50% de bagaço foram se agravando dia após dia. O principal problema que observamos foi a formação de material não queimado sobre a grelha.

O cavaco, por ser mais pesado que o bagaço, não queima em suspensão então quase que a totalidade de cavaco que entrou na caldeira acabou caindo sobre a grelha. Outro agravante foi a presença de materiais estranhos junto ao combustível, como pedras, grandes quantidades de areia, pedaços de metais e plástico.

Todo esse material que ficou depositado sobre a grelha e passou a se acumular na fornalha prejudicou a queima pelo bloqueio do ar primário, a medida que o material se depositava sobre a grelha, este iria se aglomerando e não se queimava, grudando na grelha fixa e fechando grande parte das passagens de ar primário, tornando a combustão incompleta e aumentando assim os níveis de CO devido a falta de ar.

Figura 53: Deposição de material sobre a grelha.



Fonte: GAVAZZA, 2014

Outro problema encontrado foi a sobrecarga no sistema de tratamento de cinzas e fuligens que recebeu uma quantidade imensa de areia e cavaco não queimado, prejudicando assim a estação de tratamento.

Problemas de entupimento das vias úmidas de limpeza de fuligem e de grelha se tornaram comuns e que quando eram desentupidas inundavam a área embaixo da caldeira com areia, pedras e cavaco não queimado.

Em questões operacionais, os operadores de campo tiveram muito trabalho (após a parada da caldeira e esfriamento da mesma para liberação de entrada) para retirar o material aglutinado dentro da fornalha, utilizou-se até picaretas para que o material aglomerado podesse ser retirado. Os operadores tiveram que trabalhar arduamente para realizar tal manobra operacional.

Figura 54: Problemas após o teste de 10 dias da queima com cavaco de madeira.



Fonte: GAVAZZA, 2014

Os dosadores de biomassa estavam em constante travamento devido à quantidade de pedras e material estranho que era enviado junto com o cavaco.

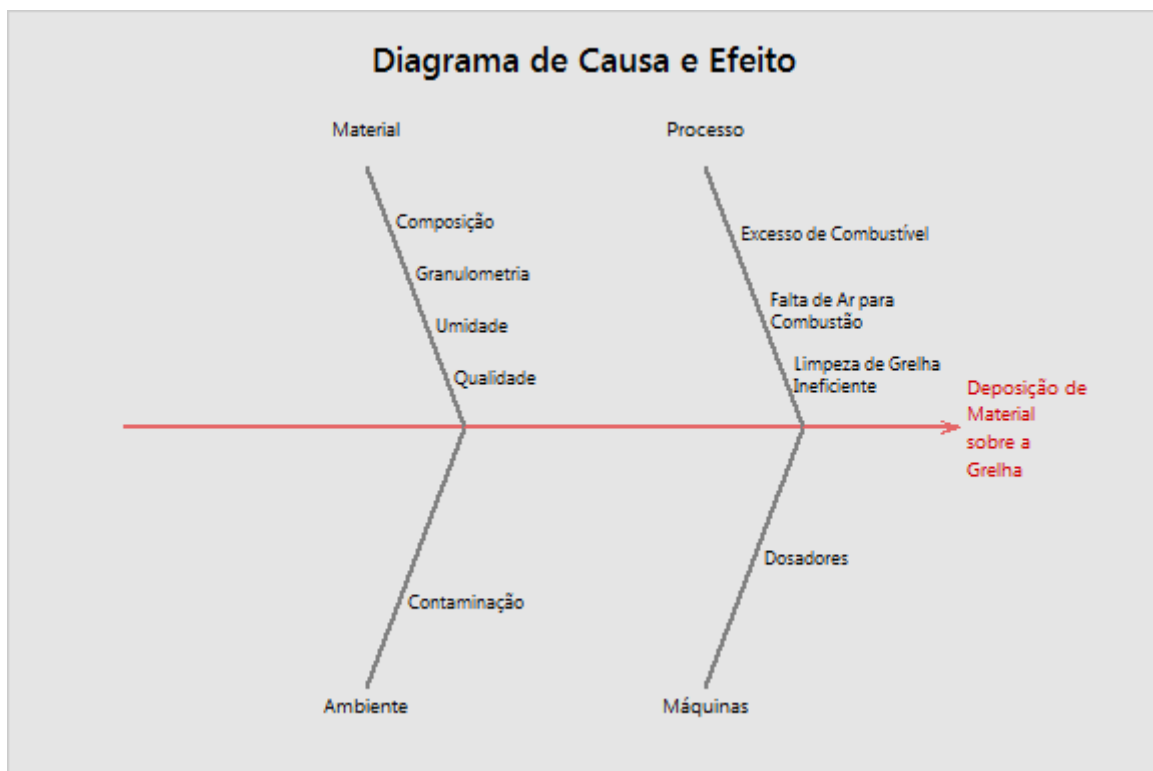
Após certo período de tempo as variáveis do processo não estavam mais estáveis e era difícil manter a caldeira em funcionamento exigindo o máximo dos operadores do supervisor e do campo para manter a caldeira em atividade.

Materiais não queimados começaram a serem enviados em zonas de não combustão até a chaminé, aumentando assim a emissão de partículas para a atmosfera.

4.7 Soluções

Para solucionar os problemas encontrados primeiramente foi realizado um *Brainstorm* com toda equipe de operação e manutenção. O *Brainstorm* é uma importante ferramenta de solução de problemas. A partir dessa ferramenta várias ideias foram geradas, tanto para a solução dos problemas atuais, quanto que as causas desses problemas. Após esse *Brainstorm* foi realizado uma triagem das principais possíveis causas e a partir dessas causas foi utilizada uma ferramenta de qualidade conhecida como Causa e Efeito:

Figura 55: Diagrama de causa e efeito



Fonte: GAVAZZA, 2014

A partir das causas foi realizado um estudo particular sobre cada uma delas e as que foram consideradas plausíveis foram listadas e solucionadas. A seguir serão apresentadas as principais causas e suas soluções.

Causa: Material

Sub causa: Má qualidade da biomassa dificultando a sua queima na fornalha.

Solução:

Triagem dos fornecedores. Muitas pedras, pedregulhos, pedaços de metal, plástico e objetos estranhos foram encontrados junto com a biomassa. Essa contaminação difere de fornecedor para fornecedor, foi realizado então uma triagem entre os fornecedores selecionando aqueles que enviaram biomassa com a menor quantidade possível de material estranho, além de prejudicar a queima na caldeira, os materiais estranhos por serem bem mais pesados que a biomassa causando o desperdício de capital que deveria estar sendo utilizado para a compra do combustível solicitado.

Causa: Material

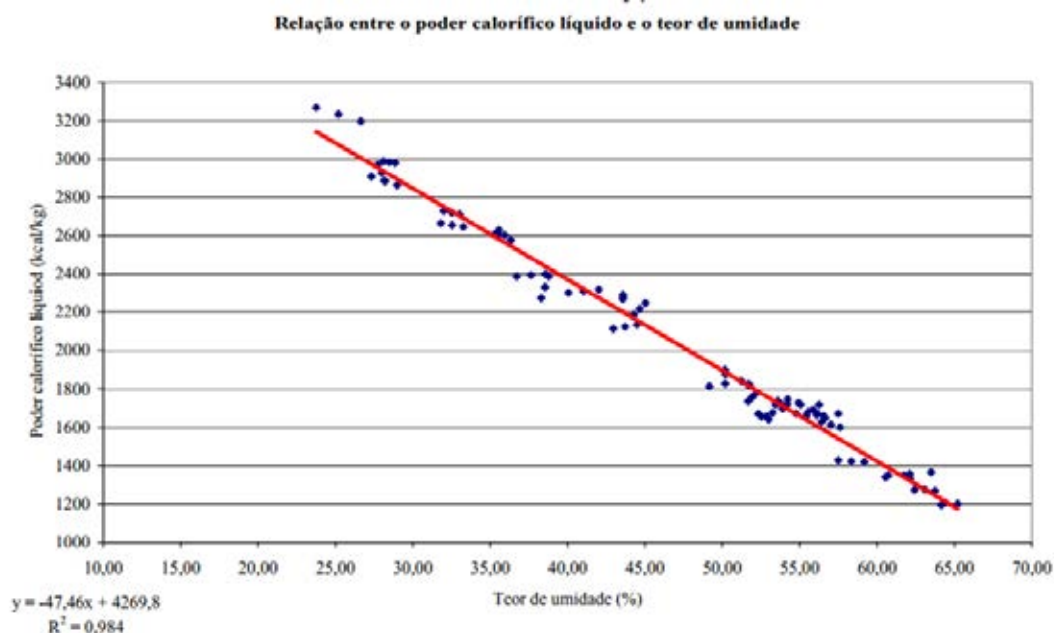
Sub Causa: Umidade interfere na queima correta do combustível

Solução:

A umidade tem influência direta no Poder calorífico do combustível como podemos observar abaixo:

Relação entre o poder calorífico líquido e o teor de umidade em madeira tipo Pinus e Eucalyptus:

Figura 56: Relação entre o poder calorífico e o teor de umidade em madeira do tipo Pinus e Eucalyptus.



Fonte: (BRAND, 2007)

Foi realizado medições de umidade da biomassa em laboratório, mas como a medição em laboratório é lenta, requer alta disponibilidade de tempo do operador e abrange uma pequena quantidade de biomassa. Foi realizado então a compra de um medidor portátil de umidade M75, É um equipamento portátil e com leitura instantânea, desenvolvido pela empresa Marrari Automação. A capacidade volumétrica de amostragem do equipamento é de 35 litros e apresenta 350 mm x 400 mm de dimensão no qual seu funcionamento consiste na leitura da capacitância dielétrica do material, cada material possui um valor diferente e a água possui um certo valor que ao ser lido pelo analisador este realiza a leitura equivalente em bits. De acordo com o fabricante, as leituras de umidade apresentam precisão de 2 % p.p. para materiais com granulometria e composição uniforme quando comparado ao método gravimétrico (estufa).

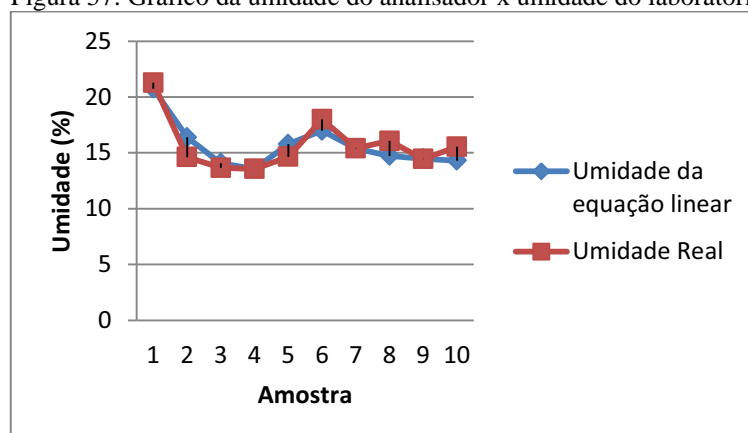
Esses bits são comparados com a umidade de laboratório para que seja construída a curva de umidade daquele tipo específico de material, como podemos observar na Tabela 4.

Tabela 4: Análise da umidade do cavaco de madeira

#	Bits	Umidade obtida pela equação linear	Umidade do laboratório	Erro
Amostra 1	24983	207.468	21.28	-0.5332
Amostra 2	16235	163.728	14.62	17.528
Amostra 3	11639	140.748	13.66	0.4148
Amostra 4	10589	135.498	13.56	-0.0102
Amostra 5	15055	157.828	14.64	11.428
Amostra 6	17460	169.853	18	-10.147
Amostra 7	14272	153.913	15.4	-0.0087
Amostra 8	12953	147.318	16.06	-13.282
Amostra 9	12422	144.663	14.44	0.0263
Amostra 10	12087	142.988	15.54	-12.412

Fonte: GAVAZZA, 2014

Figura 57: Gráfico da umidade do analisador x umidade do laboratório



Fonte: GAVAZZA, 2014

O erro médio de leitura da umidade real medida em laboratório e do medidor de umidade é de 0,08% para mais ou para menos.

Conforme observamos pelo gráfico acima a umidade está de acordo com o valor especificado e essa causa foi descartada da geração do efeito final da causa-efeito, mas foi mantida a medição de umidade do combustível no pátio para caso venha a acontecer, recusar combustível fora das especificações.

Figura 58: Analisador portátil de umidade da MARRARI®



Fonte: MARRARI, 2014

Causa: Material

Sub causa: Granulometria

Solução:

Selecionar cavacos com granulometria de 2 a 3 [cm], cavacos com granulometria maior são mais pesados e mais difíceis de queimar e acabavam se aglomerando na grelha da caldeira prejudicando a entrada de ar primário na caldeira.

Causa: Ambiente

Sub causa: Contaminação de materiais estranhos

Solução:

Evitar a contaminação de terra no cavaco, uma vez que os tratores ao coletar cavaco no pátio acabam por trazer juntamente com o combustível a terra do pátio, foi realizada então um treinamento com os operadores de tratores para que eles coletassem a biomassa alguns

centímetros acima do terreno, embora essa solução desperdice uma certa quantidade de combustível o mesmo desperdício é cessado ao ser feito o descarregamento de biomassa numa mesma localidade. Está sendo estudo a possibilidade de posteriormente o pátio de biomassa ser totalmente coberto e o chão cimentado.

Figura 59: Trator recolhendo cavaco do pátio



Fonte: GAVAZZA, 2014

Causa: Processo

Sub causa: Grelha não compatível

Limpeza ineficiente de grelha

Solução:

A operação de limpeza de grelha é fato importantíssimo para a operação segura da caldeira, pois sem a realização da limpeza bem sucedida das grelhas poderá ocorrer a obstrução crescente da entrada do principal fluxo de ar de combustão ascendente e deteriorando assim a queima sobre as grelhas a partir do qual teremos acúmulo de depósitos de bagaços não queimados e maior geração de monóxido de carbono devido a insuficiência de ar comburente. Igualmente teremos uma redução da carga térmica liberada com queda da produção de vapor, pressão de vapor da caldeira, arraste de não queimados para fora da zona de combustão, o que irá implicar em outros riscos.

A grelha utilizada é do tipo fixa Pin Hole, a grelha mais utilizada, que foi encontrada nas usinas da região, para este tipo de biomassa é a grelha rotativa que elimina as cinzas

automaticamente. Estudos foram feitos para a substituição da grelha fixa por uma rotativa mas sua substituição foi dita como inviável por todas as empresas especializadas que foram solicitadas, a substituição da grelha além de possuir um valor elevado pode comprometer toda a estrutura da caldeira bem como sua eficiência, uma vez que a caldeira em questão não foi projetada para grelha rotativa.

A solução encontrada foi expandir a limpeza de grelha, antes realizada por 9 bicos de sopragem, uma décima válvula foi instalada com os mesmos parâmetros das outras válvulas, utilizando uma pressão de 15 [Kgf/cm²], a limpeza passou a ser realizada começando a partir da décima válvula. O tempo de limpeza de grelha também foi modificado a partir do controle do nível de cinzas sobre a grelha pelo visor da caldeira, sendo antes realizado de 2 em 2 horas, agora o processo mostrou ser mais eficaz se realizado de 1 em 1 hora, para se chegar a essa conclusão a formação do montante foi constantemente analisada em campo. Um problema observado nessa diminuição do tempo de limpeza de grelha e a maior perda de vapor para a atmosfera e também a eliminação de combustível não queimado pela via úmida. A recuperação deste combustível pode servir de assunto para trabalhos futuros.

O material dos bicos de injeção de vapor são de Liga GX 40.

Figura 60: Bicos de limpeza de grelha, à direita na extremidade da caldeira se encontra o décimo soprador.



Fonte: GAVAZZA, 2014

Figura 61: Novo soprador para limpeza de grelhas



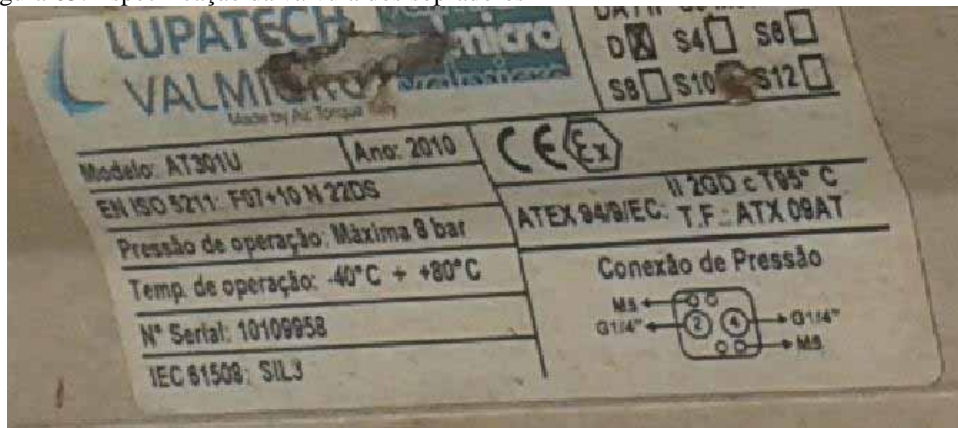
Fonte: GAVAZZA, 2014

Figura 62: Sopradores de grelha



Fonte: GAVAZZA, 2014

Figura 63: Especificação da válvula dos sopradores



Fonte: GAVAZZA, 2014

Figura 64: Cavaco não queimado eliminado pela limpeza de grelha



Fonte: GAVAZZA, 2014

Figura 65: Operador de campo realizando manobra de retirada de materiais não queimados



Fonte: GAVAZZA, 2014

Figura 66: Acúmulo de material não queimado



Fonte: GAVAZZA, 2014

Figura 67: Eliminação de cinzas da grelha por via úmida.



Fonte: GAVAZZA, 2014

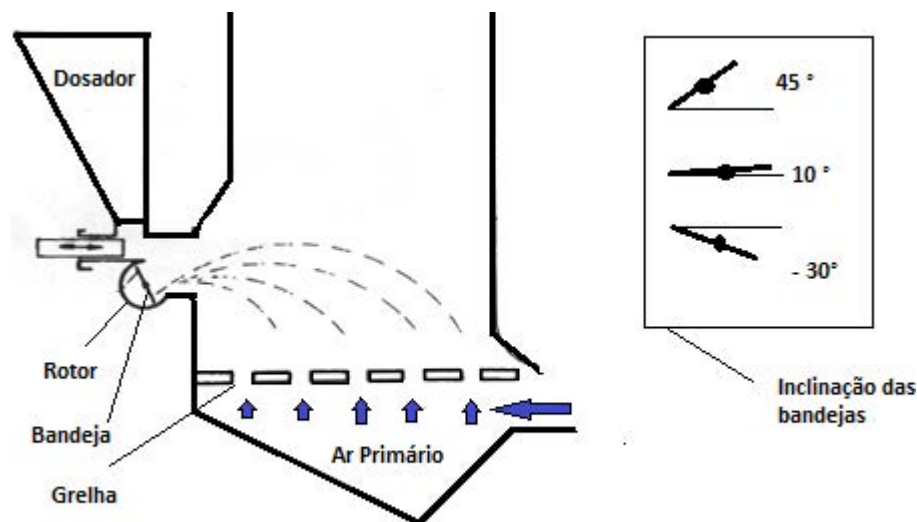
Causa: Processo

Sub causa: excesso de combustível

Solução:

Havia muita aglomeração de combustível não queimado sobre a grelha. Observando a aglomeração podemos identificar que as “bandejas” por onde o combustível era direcionado para sofrer uma orientação na deposição na fornalha estavam direcionadas todas a uma mesma inclinação de 0° . Deste modo a maior parte do combustível se concentrava no meio da grelha, e não era espalhado uniformemente.

Figura 68: Esquema da inclinação das “bandejas”



Fonte: BAZZO, 1995, adaptado por GAVAZZA 2014.

Foi então decidido modificar essa inclinação, alternando entre os dosadores o ângulo de inclinação em comparação ao outro, ficando então da seguinte forma:

1° dosador: inclinação: 45°

2° dosador: inclinação: 10°

3° dosador: inclinação: -30°

4° dosador: inclinação: 45°

5° dosador: inclinação: 10°

6° dosador: inclinação: -30°

7° dosador: inclinação: 45°

Essa modificação melhorou a distribuição de combustível sobre a grelha não permitindo assim que combustível não queimado ficasse retido sobre a grelha e que mais combustível caísse sobre ele formando assim um aglomerado de biomassa sendo impossível realizar a sua queima. Um estudo mais aprofundado a respeito dos ângulos das bandejas poderia ser realizado para trabalhos futuros, encontrando assim uma angulação ótima de trabalho para melhorar a uniformidade de queima da biomassa.

Causa: Processo

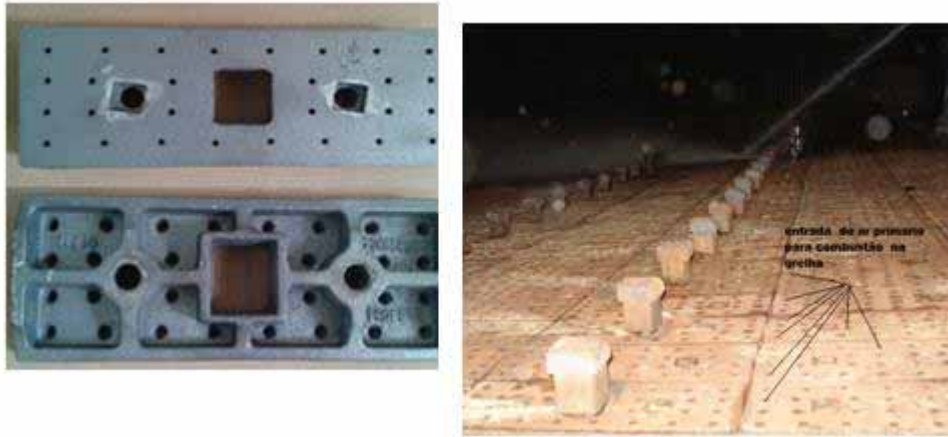
Sub causa: Falta de Ar

Solução:

A formação de combustível não queimado sobre a grelha também pode ter sido ocasionada pela falta de ar para realizar a combustão. Uma modificação na queima de cavaco foi o aumento da proporção de O₂ na queima. A proporção de O₂ é controlada por medidores de CO instalados na saída da chaminé.

Mas como podemos avaliar nos problemas da queima do cavaco, a queda na temperatura do vapor está diretamente ligada a aglomeração de material sobre a grelha que prejudica a entrada de ar primário na caldeira e afeta a distribuição dos gases de combustão para a troca de calor nos tubos do feixe evaporativo e superaquecedor, diminuindo assim a temperatura do vapor. A Figura 57 mostra o formato da grelha. Podemos observar os furos na grelha para a passagem do ar primário, na figura em questão se encontra um furo central por onde se aloja um bico de limpeza.

Figura 69: Detalhes da grelha Pin Hole



Fonte: GAVAZZA, 2014

Conclui-se então que o problema da aglomeração de material sobre a grelha não ocorre devido a falta de ar na caldeira, mas a falta de ar na caldeira é devido a aglomeração de material sobre a grelha que dificulta a passagem de ar primário sob a grelha. Essa falta de ar posteriormente ajuda na aglomeração de mais material sobre a grelha. Sendo então um efeito conectado onde um acaba por afetar o outro.

Figura 70: Depósito de areia + pedras + cinzas + material não queimado sobre a grelha



Fonte: GAVAZZA, 2014

Figura 71: Depósito de areia + cinzas nas paredes dos tubos no interior da caldeira



Fonte: GAVAZZA, 2014

5 CONCLUSÃO

Perante a necessidade de aumentar seu faturamento referente à energia elétrica vendida e somada a dificuldade de entrega de bagaço de cana pela sua Usina parceira (devido baixa produtividade do setor e à escassez hídrica), decidiu-se pela inovação, buscando biomassas alternativas para usar como combustível.

Este projeto envolveu aspectos de tecnologia, operação, mercado de biomassa, licenciamento ambiental (CETESB) e registro em agência reguladora (ANEEL). Em consequência do sucesso do projeto foi possível aumentar a exportação de eletricidade de fonte renovável para a rede interligada, inclusive nos períodos de entressafra da cana-de-açúcar. Foi criada uma flexibilidade operacional com impacto positivo tanto na OEE global da unidade quanto na redução das emissões de CO₂ do Brasil, uma vez que a energia injetada na rede reduz a necessidade do despacho de termelétricas que utilizam combustível fóssil (gás natural, óleo combustível ou carvão). Além das discussões com ANEEL e CETESB.

A utilização do cavaco de madeira garantiu uma melhor estabilidade da geração de vapor da UTE beneficiando os nossos clientes consumidores de vapor.

O provisionamento de biomassa para compensar a falta de bagaço de cana na entressafra ou em períodos de parada da moagem ficou mais fácil devido à maior flexibilidade no combustível e maior número de fornecedores.

O uso do cavaco de madeira foi incluído na licença ambiental de operação concedida pela CETESB. E a utilização do cavaco de madeira proporciona a operar nos períodos de entressafra quando a energia geral em Brotas substitui uma usina térmica a óleo que emite 65% a mais de toneladas de CO₂ equivalente comparada com a nossa unidade.

Criação ou manutenção de empregos na área de produção e transporte de cavaco de madeira, na região em torno de Brotas (até aprox. 100 km).

As caldeiras foram concebidas para queimar apenas bagaço de cana. Com algumas pequenas modificações desenvolvidas, foi possível queimar misturas de bagaço e cavaco de madeira, permitindo aumentar a utilização das mesmas e otimizar a geração de energia. Essa inovação desenvolvida está sendo compartilhada com fornecedores de caldeira do setor.

O projeto permite aumentar o faturamento anual e aproveitar oportunidades de mercado quando há oferta de biomassa a baixo custo, reduzindo os custos operacionais e

também estendendo a operação do site de Brotas durante os períodos de entressafra do setor sucroalcooleiro, onde se pode conseguir oportunidade de venda de energia com altos preço devido baixa oferta e alta demanda dos dias atuais. Entre aumento de receita e custo evitado da compra de energia no mercado spot, o ganho do projeto foi de 18,6 milhões de reais, o custo do projeto foi de apenas 50 mil reais.

Menor dependência da geração de energia elétrica perante a oferta de bagaço-de-cana do setor.

Desafios e ideias para trabalhos futuros

Reaproveitar melhor o combustível não queimado que é eliminado na limpeza de grelha. O combustível não queimado é eliminado pela via úmida juntamente com as cinzas e é enviado a estação de tratamento de fuligem e cinzas.

Melhorias na captação do cavaco no pátio de biomassa, como por exemplo instalando uma peneira rotativa na entrada da moega para a retenção de pedras e materiais estranhos.

Instalação de um analisador de umidade na esteira TC02 e TC04 para analisar a umidade da biomassa que entra na caldeira.

Instalação de secadores de biomassa na entrada da caldeira para elevar o PCI e assim melhorar a relação Kg de vapor por Kg de biomassa.

Estudo de outros tipos de biomassa para a queima, como por exemplo o sorgo que está sendo estudado para a implementação em 2015.

Aumento da porcentagem de cavaco na mistura com o bagaço de cana para 60% a partir da utilização de catalisadores de queima ou através de outras modificações na caldeira diminuindo ainda mais a dependência com o mercado da cana-de-açúcar.

Estudo do ângulo ótimo das “bandejas” direcionadoras de combustível para uma melhor uniformidade da queima do combustível na fornalha e sobre a grelha.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14929**: madeira –determinação do teor de umidade de cavacos – método por secagem em estufa. Rio de JANEIRO, 2003. 3 p.

BALESTIERI, José Antonio Perrella. **Máquinas Térmicas**: Material de apoio à disciplina. Guaratinguetá: Unesp - Departamento de Energia, 2008.

BARROS, Geraldo Sant'ana de Camargo et al. **AGRONEGÓCIO BRASILEIRO**: Perspectivas, desafios e uma agenda para seu desenvolvimento. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Esalq/usp, Centro de Estudo Avançados em Economia Aplicada Cepea, 2006.

BAZZO, Edson. **Geração de vapor**. 2. ed. Florianópolis: Editora da Ufsc, 1995. 216 p.

BIZZO, W. A. **Geração, distribuição e utilização de vapor**. Campinas: Unicamp, 2003. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP4.pdf>> Acesso em: 18 nov. 2014.

BORGNACKE, Claus; SONNTAG, Richard E.. **Fundamentos da termodinâmica**: Tradução da 8ª Edição. 8. ed. São Paulo: Blucher, 2013.

BRASIL. FRANCISCO COSTA. (Org.). **Bioenergia**: Conferência nacional de Bioenergia. São Paulo: Coordenadoria de Comunicação Social, 2008.

BUENO, Oswaldino Teixeira. **Manual operacional das caldeiras UTE Brotas**. Brotas: Ute Brotas, 2012.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS (Brasil) (Org.). **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO USO DE VAPOR**. Rio de Janeiro: EletrobrÁs Centrais Elétricas Brasileiras, Procel Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, 2005. 196 p.

CERAGIOLI, Natalia Sousa. **QUALIDADE DE CAVACOS PRODUZIDOS EM SISTEMAS FLORESTAIS DE CURTA ROTAÇÃO DE EUCALIPTO PARA FINS ENERGÉTICOS**. 2013. 47 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2013. Disponível em: <<http://www.pg.fca.unesp.br/Teses/PDFs/Arq1036.pdf>>. Acesso em: 06 jan. 2014.

DUBBEL, **Manual de Construção de Máquinas**. Ed. Hemus: São Paulo, 1974.

FRANCISCO, Rodrigo Pereira. **ESTUDO TERMOQUÍMICO DA QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS EM CALDEIRAS USANDO BALANÇOS DE ENERGIA SÃO JOÃO DEL REI - MG 2012**. 2012. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de São João Del-rei, São João del Rei, 2012.

GAVAZZA, Lucas; IANES, Graziella. **Manual de Processos: UTE Brotas**. Brotas: Rhodia Solvay Group, 2014.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc Editora, 2003.

NORMA REGULAMENTADOR BRASIL. **NR13: Manual Técnico de Caldeiras e Vasos de Pressão**. Brasília: Secretaria de Inspeção do Trabalho (sit), Departamento de Segurança e Saúde no Trabalho (dsst), 2006.

PERA, Hildo. **Geradores de vapor de água: Caldeiras**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1966.

PEREIRA, C.A.A., et all, **Geração e Distribuição de Vapor** Apostila Petrobrás S/A, 1993.

RICARDO LESSA (Brasil). Iplan. **CURSO SOBRE CALDEIRA IPLAN: MODELO 1B 175/67 - 490**. Brotas: Iplan, 2012.

SANTOS, A.H.M; et all, **Instrumentação e Controle Aplicado a Caldeiras** Itajubá: FUPAI, 1993.

TORREIRA, R. P., **Geradores de Vapor**. Editora Libris, São Paulo, 1995.

VIERA, Ana Clara. **CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA PROVENIENTE DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS**. 2012. 56 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.