

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

BRAYAN BITTENCOURT BECKMAN

**ESTUDO SOBRE RECUPERAÇÃO DA CAPACIDADE MÁXIMA DE GERAÇÃO DE
VAPOR DE UMA CALDEIRA**

São Luís/Ma

2019

BRAYAN BITTENCOURT BECKMAN

**ESTUDO SOBRE RECUPERAÇÃO DA CAPACIDADE MÁXIMA DE GERAÇÃO DE
VAPOR DE UMA CALDEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Universidade Estadual do Maranhão, como requisito parcial para a graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Lima de Oliveira.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA MONOGRAFIA DEFENDIDA PELO(A)
ALUNO(A) BRAYAN BITTENCOURT BECKMAN
E ORIENTADA PELO PROF. DR. FERNANDO LIMA
DE OLIVEIRA

ASSINATURA DO ORIENTADOR

São Luís/Ma

2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO SOBRE RECUPERAÇÃO DA CAPACIDADE MÁXIMA DE GERAÇÃO
DE VAPOR DE UMA CALDEIRA**

Autor: Brayán Bittencourt Beckman

Orientador: Prof. Dr. Fernando Lima de Oliveira

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Monografia:

PROF. DR. FERNANDO LIMA DE OLIVEIRA.
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

PROFA. RAQUEL GOMES DE ARAUJO
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

PROF. ME. PAULINO CUTRIM MARTINS
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

A ata de defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

São Luís/MA, ____/____/____

AGRADECIMENTOS

Ao corpo docente desta instituição em especial ao meu orientador, pelo conhecimento transmitido, estímulo e principalmente liberdade de pensamento para criação deste e outros trabalhos.

A minha família, por todo suporte, incentivo e por sempre estarem presentes durante toda a minha vida.

Aos meus irmãos de fé, que estudaram comigo na escola e estão presentes até hoje, e principalmente os da faculdade, pelos momentos de descontração e apoio nos momentos difíceis.

A toda equipe ALUMAR, por me tornar um profissional integro e determinado.

A Deus, por simplesmente existir em mim e mostrar todos os dias o quanto a vida é maravilhosa.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo realizar o estudo sobre a recuperação da capacidade de geração de vapor de uma caldeira aquatubular. A capacidade desta caldeira é de 70 ton/h de vapor e pressão de trabalho de 17 bar. O estudo foi realizado através de inspeções na área e análises no sistema interno da Alumar para que fosse montada uma estratégia de manutenção para recuperar os pontos que reduzem a capacidade máxima de geração de vapor, os principais focos foram os pontos de entrada de ar falso, que reduzem a capacidade de combustão e produção de vapor para o consumo de combustível da caldeira. Neste estudo foram realizadas medições em campo com a finalidade de analisar a capacidade de geração de vapor e avaliação da taxa de evaporação. Os resultados mostram que a caldeira analisada apresenta uma capacidade de geração de 40 toneladas de vapor por hora, que é considerado baixo em relação a capacidade nominal de projeto de 70 toneladas por horas.

Palavras-chave: Caldeira. Vapor. Capacidade de geração.

ABSTRACT

This work aimed to carry out the study of the recovery of the steam generation capacity of a grid boiler. The capacity of this boiler is 70 ton/ h of steam and working pressure of 17 bar. The study was carried out through area inspections and analysis in Alumar's internal system to establish a maintenance strategy to recover the points that reduce the maximum steam generation capacity. The main focus was the false air inlet points, We have reduced combustion capacity and steam production for boiler fuel consumption. In this study field measurements were performed to analyze the steam generation capacity and evaporation rate evaluation. The results show that the analyzed boiler has a generation capacity of 40 tons of steam per hour, which is considered low in relation to the nominal project capacity of 70 tons per hour.

Key words: Boiler, steam, generation capacity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Gráfico esquemático de excesso de ar. Fonte: Bizzo (2003)	19
Figura 2 – Mapeamento dos trabalhos da caldeira 12	27
Figura 3 – Atividade de troca de sapatas	28
Figura 4 – Mapeamento das sapatas substituídas	29
Figura 5 – Recuperação dos refratários frontais e traseira	30
Figura 6 – Recuperação das juntas e dutos do ventilador secundario	32
Figura 7 – Recuperação das juntas e dutos ventilador induzido	32
Figura 8 – Recuperação dos dutos laterais da fornalha	32
Figura 9 – Destravamento dos dampers dos dutos laterais da fornalha	33
Figura 10 – Troca de linha de condensado lado leste da fornalha.....	33
Figura 11 – Recuperação estrutural do frontal	35
Figura 12 – Recuperação dos alimentadores 110-AL-14A/14B/14C/14D.....	36
Figura 13 – Recuperação do ciclone	37
Figura 14 – Recuperação da moega de fundo	38
Figura 15 – Recuperação das paredes dos módulos	39
Figura 16 – Troca das juntas universal de acionamento dos dampers	40
Figura 17 – Troca de mangas	40
Figura 18 – Recuperação das vedações e fixação das portas de visita das moegas do FL-012	41
Figura 19 – Destravamento dos Dampers	41
Figura 20 – Tamponamento do trocador de calor	42
Figura 21 – Esquema de tamponamento do trocador de calor	43
Figura 22 – Gráfico de produção de vapor ton/h.....	44
Figura 23 – Gráfico da corrente do ventilador induzido	45
Figura 24 – Gráfico da pressão do filtro mmH ₂ O.....	45
Figura 25 – Gráfico da temperatura na chaminé (°C)	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação segundo a origem dos combustíveis.....	17
Tabela 2 – Classificação dos combustíveis segundo seu estado.	18
Tabela 3 – Distribuição dos serviços (duração em dias corridos)	25
Tabela 4 – Mapeamento das sapatas trocadas	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
NBR	Norma Brasileira

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVO	14
2.1 OBJETIVO GERAL.....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1 COMPONENTES DAS CALDEIRAS	15
3.1.1 Cinzeiro	16
3.1.2 Fornalha ou câmara de combustão	16
3.1.3 Superaquecedores	16
3.1.4 Economizadores.....	17
3.1.5 Pré-aquecedores de ar	17
3.1.6 Chaminé.....	17
3.2 COMBUSTÍVEIS.....	17
3.2.1 Análises Elementar e Imediata	19
3.2.2 Excesso de Ar	19
3.3 TIPOS DE PERDAS	20
3.3.1 Perdas de Incombustos	21
3.3.2 Perda de calor Irrradiado.....	21
3.3.3 Perda de calor sensível	22
3.3.4 Perda pelo Calor Sensível dos Gases de Combustão.....	23
3.3.5 Perda Total.....	23
3.4 RENDIMENTO TÉRMICO.....	24
3.4.1 Determinação do Rendimento	25
4 MATERIAIS E METODOS	26
4.1 DESCRITIVO DOS SERVIÇOS REALIZADOS	26
4.2 DESCRIÇÃO GERAL DAS ATIVIDADES	26
4.3 DETALHAMENTO DAS ATIVIDADES REALIZADAS.....	27
4.3.1 Manutenção nas sapatas.....	27
4.3.2 Fornalha.....	30
4.3.3 Manutenção dos dutos do sistema de combustão e linhas de condensado	31

4.3.4 Frontal.....	33
4.3.5 Manutenção no Ciclone	36
4.3.6 Moegas do fundo da caldeira (cinzeiros).....	37
4.3.7 Filtro de Mangas	38
4.3.8 Trocador de calor.....	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	44
5.1.1 Produção de vapor (t/h) e Capacidade de produção de vapor	44
5.1.2 Entrada de ar (t/h)	45
6 CONCLUSÃO.....	48
REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

No meio industrial o vapor é aplicado em larga escala como fluido de trabalho, em especial para limpeza e esterilização, aquecimento e como força motriz (acionamento/movimentação). Os setores industriais em que são mais utilizados são: metalúrgica, química, bebida, alimentos, têxtil, papel e cosméticos.

No século XVII, Thomas Severy criou um sistema de bombeamento de água utilizando vapor como força motriz. Em seguida, Newcomen baseado neste sistema associado a conceitos de Denis Papin, construiu uma caldeira chamada Haycock. O projeto consistia em um reservatório esférico, com aquecimento direto no fundo. James Watt, em 1769, criou um novo modelo de caldeira com modificações estruturais. Ao invés de reservatório esférico, teria o corpo no formato de vagão, sendo esta a precursora das locomotivas. O problema desses geradores de vapor era falta de segurança, pois utilizavam fogo direto e apresentaram ruptura do recipiente liberando grande quantidade de energia devido a um grande acúmulo de vapor no interior dos recipientes.

No início do século XVIII, surgiram as primeiras caldeiras com tubos de água, que foram utilizadas para movimentar um barco a vapor no Rio Hudson, em 1856. Esse modelo desenvolvido por Stephen Wilcox associado com George Babcock, que utilizava tubos inclinados foi um grande sucesso comercial.

Finalmente, em 1880, Alan Stirling desenvolveu um gerador de vapor com os tubos curvados, onde a concepção da caldeira é utilizada até os dias de hoje em caldeiras de tubo de água, podendo ser classificadas como flamotubulares, aquatubulares mistas. Nas flamotubulares, os gases de combustão passam por dentro dos tubos, vaporizando água que fica por fora. As aquatubulares, apresentam o sistema inverso identificado nas flamotubulares, a água a ser vaporizada passa por dentro dos tubos, já os gases de combustão ficam envoltos. A escolha do vapor como fluido de trabalho é justificada pelo seu alto calor específico, aliado a ampla disponibilidade de água no meio industrial, portanto é de fácil obtenção e baixo custo. Os combustíveis dos geradores de vapor são classificados em líquidos, gasosos e sólidos.

Diferentemente da caldeira flamotubular, os modelos de caldeira aquatubular são mais utilizados em modernos projetos industriais, como as termelétricas e as refinarias de Alumina, visto que esse modelo tem a capacidade em produzir grandes quantidades de vapor, sempre a

elevadas temperaturas e pressão de trabalho. Esses geradores de vapor tem um grande custo de operação, impactando o custo da fabricação dos produtos nas unidades fabris.

O impacto da caldeira no processo industrial é idealizado em projeto, para isso é calculado o rendimento da(s) caldeira(s). Existem dois métodos de realizar esse cálculo, o método direto, que analisa o rendimento através da energia gerada em forma de vapor pela quantidade de combustível que foi consumido. Já o método indireto, que apresenta menor precisão, analisa as perdas de rendimento térmico do gerador de vapor associadas aos gases de combustão que saem pela chaminé.

É necessário avaliar o rendimento dos geradores de vapor constantemente para garantir um bom desempenho, reduzir desperdícios, otimizar o consumo de combustível, reduzir os riscos de impactos ambientais, e principalmente, assegurar o mínimo de perdas no processo.

Especificamente no processo Bayer de extração de alumina da Alumar, o minério de bauxita é refinado e misturado a uma solução de soda cáustica. A função da caldeira neste processo é gerar energia térmica (vapor) para o processo de extração da alumina.

Este trabalho teve como objetivo realizar o estudo de recuperação da capacidade de geração máxima de vapor de uma caldeira aquatubular. O estudo foi realizado através de inspeções na área e análises do sistema. Para isso, foram realizadas medições em campo com a finalidade de analisar a capacidade de geração de vapor.

Os resultados mostram que a caldeira analisada apresenta uma de geração de vapor muito abaixo da capacidade nominal de 70 ton/h, que é considerado baixo em relação a capacidade nominal de projeto de 70 toneladas por horas. Este resultado atribui-se a deficiência do sistema de ar de combustão. observou-se uma baixa produção de vapor para o consumo de combustível.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o todo o cenário de operação de uma caldeira a grelha localizada na Alumar, do fabricante Cobrasma, aplicada ao processo Bayer, levando em consideração seus principais componentes, identificação de pontos críticos que reduzem sua capacidade de geração de vapor, como desgaste de dutos do sistema de ar, substituição de equipamentos, peças em fim de vida útil.

Por fim, aplicar possíveis melhorias que façam que a mesma volte a operar em sua máxima capacidade de produção. Até o início deste estudo as caldeiras estavam operando de forma estável na faixa de 40 ton/h de geração de vapor.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Destacar os principais componentes de uma caldeira aquatubular, em especial a referente neste estudo e o impacto de cada componente no seu desempenho, mostrar as principais perdas em uma caldeira e os possíveis métodos, como técnicas manutenção preditiva, inspeções visuais e cálculos, para eliminar os pontos de perdas para que a caldeira volte a operar em sua máxima capacidade de geração de vapor e por fim, avaliar os resultados após a execução da estratégia aplicada;

3 REVISÃO DE LITERATURA

Baseado nos estudos de Hildo Pera (Geradores de Vapor de Água Caldeiras – 1990), de conhecimento empírico do funcionamento de caldeiras, aliado ao conhecimento da manutenção na indústria de primeiro mundo, buscou-se aprimorar o funcionamento da caldeira de grelha, uma forma de conhecer a quantidade do desperdício energético é mediante o cálculo do rendimento térmico dos geradores de vapor.

Mesmo tendo fonte de combustíveis em abundância, os geradores de vapor precisam apresentar um uso eficiente deste recurso energético para reduzir perdas de energia térmica e otimizar os ganhos de produção. Para as unidades fabris, este parâmetro é de grande relevância, a análise é baseada na proporção do vapor gerado pelo consumo da energia combustível.

O rendimento térmico é inversamente proporcional às perdas de calor, quanto mais perdas houverem, menor será o rendimento, reduzindo a capacidade do processo produtivo, tornando mais cara a produção do produto final. A eficiência térmica de caldeiras aquatubulares estão na faixa de 75 e 85%, abaixo disso, a caldeira apresenta uma perda excessiva de energia, exigindo maior queima de combustível para produzir a quantidade nominal de vapor, nesse cenário o processo de geração se torna mais custoso e agressivo ao meio ambiente, por isso se faz necessário uma correção imediata.

A máquina a vapor tornou-se a principal fonte produtora de trabalho do século XIX e seu desenvolvimento se deu no esforço de melhorar seu rendimento, a confiabilidade e a relação peso / potência. O advento da energia elétrica e do motor de combustão interna no século XX, todavia, condenaram pouco a pouco, nos países mais industrializados, a máquina a vapor ao quase esquecimento.

(Disponível em: <http://www.chdvalvulas.com.br/artigos-técnicos>>).

3.1 COMPONENTES DAS CALDEIRAS

As caldeiras possuem diversos componentes e sistemas auxiliares, sendo alguns deles necessários para sua operação e outros com a finalidade de aumentar o rendimento térmico, aproveitando melhor a energia térmica contida nos gases de combustão.

3.1.1 CINZEIRO

Após a combustão, os materiais inertes se transformam em cinzas e são depositados nesse compartimento. Também, quando ocorre uma combustão incompleta, restos de combustível que atravessam as grelhas e caem neste recipiente com as cinzas.

3.1.2 FORNALHA OU CÂMARA DE COMBUSTÃO

A fornalha é o componente da unidade geradora de vapor onde a energia química do combustível é convertida em energia térmica. De acordo com o tipo e com a qualidade do combustível disponível, as configurações têm se alternado entre fornalhas para queima em suspensão, queima em grelha ou queima em leito fluidizado (BAZZO, 1995).

A função geral da fornalha é evaporar as substâncias voláteis do combustível, elevar à temperatura e realizar a combustão do combustível (Buecker, 2002). Para combustíveis sólidos, as fornalhas são equipadas com grelhas, já para combustíveis líquidos e gasosos utiliza-se queimadores. A fornalha é constituída de tijolos refratários para que o calor seja irradiado no interior, sendo que para a fixação desses tijolos também se utiliza argamassa refrataria.

De acordo com Gilman (2010), existem os tipos fornalhas com combustão sobre suporte e fornalha para queima suspensa. A primeira delas é utilizada para queima de combustíveis sólidos ou a granel, fazendo uso de grelhas fixas, inclinadas, basculantes ou rotativas. Por outro lado, fornalhas para queima suspensa são utilizadas para combustíveis líquidos, gasosos e sólidos pulverizados, onde se tem um queimador responsável pela combustão homogênea na fornalha.

3.1.3 SUPERAQUECEDORES

A função destes componentes, segundo Bazzo (1995), é elevar a temperatura do vapor que vem do tambor da caldeira até o estado termodinâmico de vapor superaquecido. Os superaquecedores são utilizados para processos especiais, onde se requer alta temperatura do vapor, ou em processos de geração de eletricidade, onde turbinas a vapor são alimentadas para produzir potência mecânica de eixo.

3.1.4 ECONOMIZADORES

A função do economizador é aproveitar a calor gerado pelos gases de combustão que acabaram de deixar a fornalha, passando por um trocador de calor para aquecer a água de alimentação da caldeira (BUECKER, 2002).

3.1.5 PRÉ-AQUECEDORES DE AR

A função dos pré-aquecedores de ar segundo Gilman (2010) é a de aquecer o ar que participa no processo de combustão na fornalha, mediante uso de um trocador de calor localizado na parte final do caminho dos gases de combustão, antes da chaminé. Devido que a troca térmica acontece entre dois compostos gasosos, normalmente são necessárias grandes superfícies de contato; com isso, pré-aquecedores de ar são equipamentos volumosos (BIZZO, 2003).

Com esta troca de calor, tem-se um aumento no rendimento térmico, devido ao aproveitamento extra do calor contido nos gases de exaustão.

3.1.6 CHAMINÉ

A chaminé é o componente onde acontece a liberação dos gases de combustão para a atmosfera. Esta é dimensionada com altura e diâmetro apropriados a fim de produzir a tiragem requerida para a boa circulação dos gases de combustão no sistema.

3.2 COMBUSTÍVEIS

Bazzo (1995) define o termo combustível como toda substância capaz de reagir com oxigênio liberando energia térmica. Carvalho Junior e McQuay (2007) afirmam que, quando esta substância química entra em contato com o oxidante, é produzida uma reação de tipo exotérmica, liberando assim energia na forma de calor. Os elementos químicos mais importantes dos combustíveis são o carbono e o hidrogênio. Outros elementos presentes podem ser o enxofre, o nitrogênio, o oxigênio e pequenas quantidades de metais.

Para reagir com o combustível, ar atmosférico é utilizado por apresentar a grande vantagem de não ter custo. Entretanto, o ar contém relativamente pouco oxigênio, existindo 3,76 volumes de nitrogênio por cada volume de oxigênio (BAZZO, 1995).

Segundo Teixeira e Lora (2004), os combustíveis podem ser classificados nos seus estados sólido, líquido e gasoso. As Tabelas 1 e 2 apresentam a classificação dos combustíveis segundo a sua origem e estado no qual se encontram.

Tabela 1 - Classificação segundo a origem dos combustíveis.

Origem	Combustível natural	Combustível derivados
Fosseis	Petróleo	Gás liquefeito de petróleo (GLP), gasolina, óleos diesel, combustíveis
	Carvão mineral	Gases manufacturados, coque
	Gás natural	Gás natural liquefeito (GNL)
Naturais	Resíduos agroindustriais	Bagaço de cana, lixivia negra, casca de arroz
	Lenha	Carvão vegetal, gases manufacturados, metanol
	Resíduos animais	Biogás
Nucleares	Uranio	U-235, U238
	Tório	Th-232

Fonte: Teixeira e Lora (2004)

Tabela 2 – Classificação dos combustíveis segundo seu estado.

Estado físico	Combustíveis
Sólidos	Carvão mineral, carvão vegetal, xisto, lenha
Líquidos	Óleos combustíveis
Gasosos	Gas natural, GLP, biogás

Fonte: Teixeira e Lora (2004)

3.2.1 ANÁLISES ELEMENTAR E IMEDIATA

A análise dos processos de combustão requer a quantificação da composição química do combustível. Dessa maneira, pode ser determinada a quantidade teórica de ar necessária para a combustão e estimar as características do gás produzido no processo.

A composição química elementar de um combustível informa o percentual de massa ou volume de elementos químicos de interesse, determinados mediante normas ASTM. Estes elementos são normalmente representados pelo carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O) e nitrogênio (N), expressos em base seca. Já, a análise imediata determina o teor de umidade (W), material volátil (MV), carbono fixo (CF) e cinzas (A).

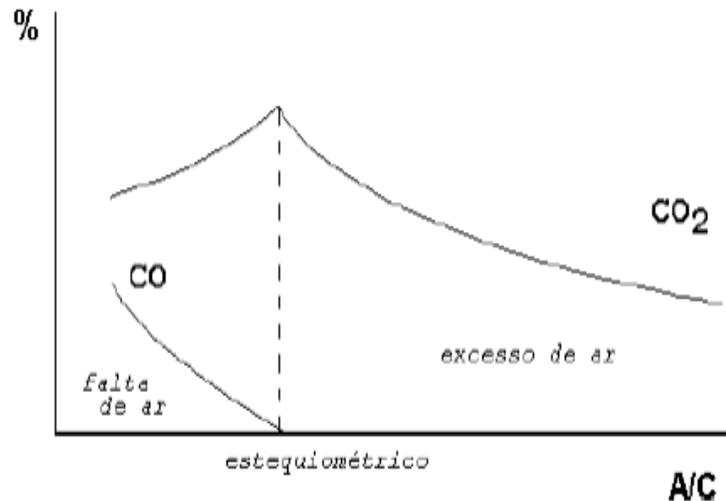
3.2.2 EXCESSO DE AR

A análise dos processos de combustão requer a quantificação da composição química do combustível. Dessa maneira, pode ser determinada a quantidade teórica de ar necessária para a combustão e estimar as características do gás produzido no processo.

A composição química elementar de um combustível informa o percentual de massa ou volume de elementos químicos de interesse, determinados mediante normas ASTM. Estes elementos são normalmente representados pelo carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O) e nitrogênio (N), expressos em base seca. Já, a análise imediata determina o teor de umidade (W), material volátil (MV), carbono fixo (CF) e cinzas (A).

A reação de combustão deve ter um percentual de excesso de ar, pois na prática, nem todas as partículas de ar se misturam com o combustível devido ao pouco tempo de contato com o oxidante e às ineficiências desse contato. Assim, evita-se uma combustão pobre com a presença de monóxido de carbono (BAZZO, 25 1995). A Figura 1 apresenta um esquema da variação dos compostos CO₂ e CO produzidos em função da relação ar/combustível. A relação ar/combustível determina o excesso de ar utilizado nas reações de combustão.

Figura 1 - Gráfico esquemático de excesso de ar.



Fonte: Bizzo (2003)

Entretanto, deve se utilizar sempre um excesso de ar apropriado para cada situação, pois, além do oxigênio, o ar traz consigo uma grande quantidade de nitrogênio que é um gás relativamente inerte e que diminui a temperatura dos gases de combustão, resultando numa perda de desempenho do sistema gerador de vapor (Gilman, 2010). Segundo Buecker (2002), a quantidade do excesso de ar a ser adotada depende do tipo do combustível.

Geralmente, um excesso de ar razoável para combustíveis gasosos fica entre 5 a 10 %; já para combustíveis líquidos, que possuem uma maior viscosidade, o excesso de ar pode estar entre 10% e 30%. No caso dos combustíveis sólidos, o excesso de ar depende muito da granulometria, tipo de fornalha e forma de alimentação do combustível.

A composição química elementar de um combustível informa o percentual de massa ou volume de elementos químicos de interesse, determinados mediante normas ASTM. Estes elementos são normalmente representados pelo carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O) e nitrogênio (N), expressos em base seca. Já, a análise imediata determina o teor de umidade (W), material volátil (MV).

3.3 TIPOS DE PERDAS

Existem duas grandes categorias de perdas:

- a) As perdas inevitáveis

b) As perdas indesejáveis

Dentro de cada categoria, procurar-se-á identificar e avaliar cada um dos tipos de perdas, algumas expressivas, outras de importância menor e finalmente as últimas de poucos significados. Entretanto, se faz necessário caracterizá-las a fim de impedir falhas, independente das interpretações de importância.

Enquadradas em ambas as categorias, vamos encontrar as chamadas:

- a) Perdas de incombustos
- b) Perdas de calor irradiado
- c) Perdas de calor sensível
- d) Perdas diversas

3.3.1 PERDAS DE INCOMBUSTOS

Enquadram-se nestas as perdas de calor representado pela matéria combustível recolhida nos cinzeiros na forma de carbono livre e a perda de calor representada pelo carbono contido na fuligem elutriada ao longo da caldeira (BIZZO, 2003).

$$P_1 = \frac{z \times t \times 8100 \times 100}{100} \quad (1)$$

onde,

z = teor de umidade das cinzas

t = teor de carbono livre detectado nas cinzas, (%)

e 8100 kcal/kg representa o calor de combustão do carbono livre.

3.3.2 PERDA DE CALOR IRRADIADO

Neste, diversas são as perdas detectáveis. Iniciamos-se com a primeira delas por abertura, onde verificam-se principalmente com combustíveis sólidos alimentados manualmente. O calor dissipado por irradiação através de aberturas, pode atingir valor expressivo e na maioria dos casos, ignorado pelo usuário. É comum encontrarem-se bocas de alimentação de combustível escancaradas durante todo o período de operação da caldeira e não apenas quando necessário.

A avaliação desta perda se faz com a aplicação da Lei de Stephan – Boltzmann, como segue:.

$$Q_i = c \times S \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right] \quad (2)$$

Cujo valor convertido em termos de porcentagem se apresenta como segue:

$$P_2 = \frac{Q_i}{B \times PCI} \times 100 \quad (3)$$

Nas expressões “S” é o valor da abertura em m², “c”, a constante de irradiação do leito incandescente, geralmente admitido igual a 4 kcal/m².h°K^o, sendo T_f e T_a as temperaturas absolutas do interior da fornalha e do ar ambiente em graus Kelvin.

3.3.3 PERDA DE CALOR SENSÍVEL

O calor sensível dissipado da energia total produzida pela queima do combustível é representado nas aplicações mais complexas, por três valores.

$$P_3 = \frac{z \times C_p \times \Delta t \times 100}{PCI} \quad (4)$$

z = teor de cinzas recolhidas no cinzeiro

C_p = calor específico médio da cinza a pressão constante, geralmente situado entre 0,3 kcal/kg°C.

Δt = a diferença de temperatura da cinza ao se desprender do suporte e da temperatura do combustível ao ser projetado na fornalha.

Dependendo da concepção construtiva do suporte a temperatura das cinzas pode situar-se entre 450 a 1000°C.

Perda de calor sensível representado pela quantidade de calor que acompanha o volume de ar falso a temperatura ambiente que penetra no circuito da caldeira de princípio de operação induzida através de aberturas próprias de operação da caldeira ou por frestas e rachaduras existentes no envoltório.

Denominação de ar falso, porque reflete não só na queda de eficiência do processo, como ainda na produção de vapor da unidade pelo resfriamento que introduz na temperatura dos gases de combustão.

A determinação desta perda, denominada P4, se faz com a expressão,

$$P4 = \frac{Var \times Cpar(tg - tar)}{PCI} \times 100 \quad (5)$$

Var = representa o volume que pode ser admitido pelas aberturas, considerando a totalidade da secção destas, uma velocidade do ar de 4m/s e dado em Nm³/h.

Cpar = calor específico médio do ar a pressão constante dado em kcal/Nm³.°C.

tg = temperatura de saída dos gases na chaminé em °C

tar = temperatura do ar ambiente em °C.

3.3.4 PERDA PELO CALOR SENSÍVEL DOS GASES DE COMBUSTÃO

Os gases desprendidos pela chaminé, já atravessaram todos os aparelhos trocadores de calor do gerador de vapor e não tem como ceder o conteúdo térmico de que ainda dispõe.

Por conseguinte, estes gases finais resultantes da queima do combustível representam uma quantidade de calor expressiva e a mais significativa perda do processo cuja determinação se obtém com a fórmula.

$$P5 = \frac{Vg \times Cp \times \Delta t}{B \times PCI} \times 100 \quad (6)$$

Cujos termos tem o significado:

Vg = volume dos gases produzidos pela queima de B quilogramas de combustível de PCI definido.

Cp = calor específico médio a pressão constante dos gases em kcal/m³.°C

Δt = a diferença de temperatura dos gases na saída da chaminé e a do ar ambiente em °C

3.3.5 PERDA TOTAL

A perda total de um gerador de vapor resulta da soma de todas as perdas parciais de fato constatadas e avaliadas pelos métodos presentes neste capítulo.

A perda total de uma caldeira em serviço regular varia de acordo com a sua concepção, com o regime de carga e método de condução, podendo oscilar entre 8 a 35%. As maiores perdas geralmente se constam nas caldeiras emparedadas operando com combustíveis sólidos. Perdas da ordem de 10% e até menores são reproduzidas pelos modernos geradores de vapor, queimando combustíveis líquidos e gasosos. (PERA, HILDO, 1990).

3.4 RENDIMENTO TÉRMICO

Segundo Pêra (1990), por definição, rendimento térmico de um gerador de vapor é a fração do potencial calorífico do combustível alimentado na fornalha que é absorvida pela água para transforma-se em vapor.

Na verdade, participam da combustão dois produtos: o combustível e o ar, este portador também de uma determinada quantidade de calor normalmente considerada nos cálculos de caldeiras.

Conhecida a descarga de vapor produzido pela caldeira **D**, a entalpia do vapor **h_v**, e a entalpia da água de alimentação **h_a**, o calor contido no vapor se calcula pela expressão:

$$Q_u = D(h_v - h_a) \quad (7)$$

Q_u = Calor Útil

h_v e h_a , dados em kcal/kg são obtidos nas tabelas de vapor.

D = descarga de vapor em kg/h

O calor de combustão se calcula com a fórmula:

$$Q_c = (1 - p_i)B \times PCI \quad (8)$$

B representando a quantidade de combustível alimentado na fornalha em kg/h, e p_i o teor de incombustos.

A esse calor se adiciona o calor do ar, calculado por:

$$Q_{ar} = V_{ar} \times C_{par} \times t_{ar} \quad (9)$$

V_{ar} = volume de ar real necessário para a queima de B kg de combustível dado em Nm^3/h

C_{par} = calor específico médio do ar a pressão constante em kcal/ $Nm^3^{\circ}C$

t_{ar} = a temperatura do ar em $^{\circ}C$

O calor total introduzido na fornalha corresponde na soma:

$$Q_t = Q_c = Q_{ar} \quad (10)$$

O rendimento térmico pela definição é a relação:

$$N = \frac{Qu}{B \times PCI} \quad (11)$$

$$N = \frac{D(hv - ha)}{B \times PCI} \quad (12)$$

Da equação (12) se estabelece outra que permite avaliar a quantidade de combustível consumido.

$$B = \frac{Qu}{PCI \times N} \quad (13)$$

$$N = \frac{D(hv - ha)}{B \times PCI} \quad (14)$$

3.4.1 DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO

Segundo Pêra (1990), há dois métodos para determinar o rendimento de um gerador de vapor. Da equação (13) se identifica o primeiro, chamado método direto, que se obtém o rendimento se for conhecida duas quantidades: a descarga de vapor e o consumo de combustível na mesma unidade de tempo, porquanto as entalpias se obtêm direto das tabelas 1 e 2 em função da pressão e temperatura.

O método indireto: avalia o rendimento pelo conhecimento das perdas.

$$N = 100 - \sum p \quad (15)$$

Onde $\sum p$ representa a soma de todas as perdas.

A somatória das perdas para combustíveis sólidos implica em determinações do peso das cinzas, temperatura das cinzas, e quantidades de materiais elutriados.

A perda de calor sensível se faz pelo conhecimento do teor de CO₂ nos gases e a sua temperatura. Caldeiras operadas com gás e óleo facilitam consideravelmente a aplicação do método indireto.

4 MATERIAIS E METODOS

4.1 DESCRITIVO DOS SERVIÇOS REALIZADOS

As atividades foram distribuídas em 9 etapas principais e com os tempos de execução baseados em experiências anteriores, como mostrado na tabela 3.

Tabela 3: Distribuição dos serviços (duração em dias corridos)

Nome da tarefa	Duração
Abertura de portas	0,46 dias
Manutenção nas sapatas	3,75 dias
Fornalha	4,29 dias
Manutenção dos dutos do sistema de combustão	19,02 dias
Frontal da caldeira	7,52 dias
Manutenção no ciclone - ca -12	17,73 dias
Moegas do fundo da caldeira	1,71 dias
Dutos de vapor e condensado	2,48 dias
110-FL-012 - Filtro de mangas	15,42 dias
Tubulão	1,08 dias
Fechamento de portas	0,25 dias
Procedimento de desbloqueio e start up	0,25 dias

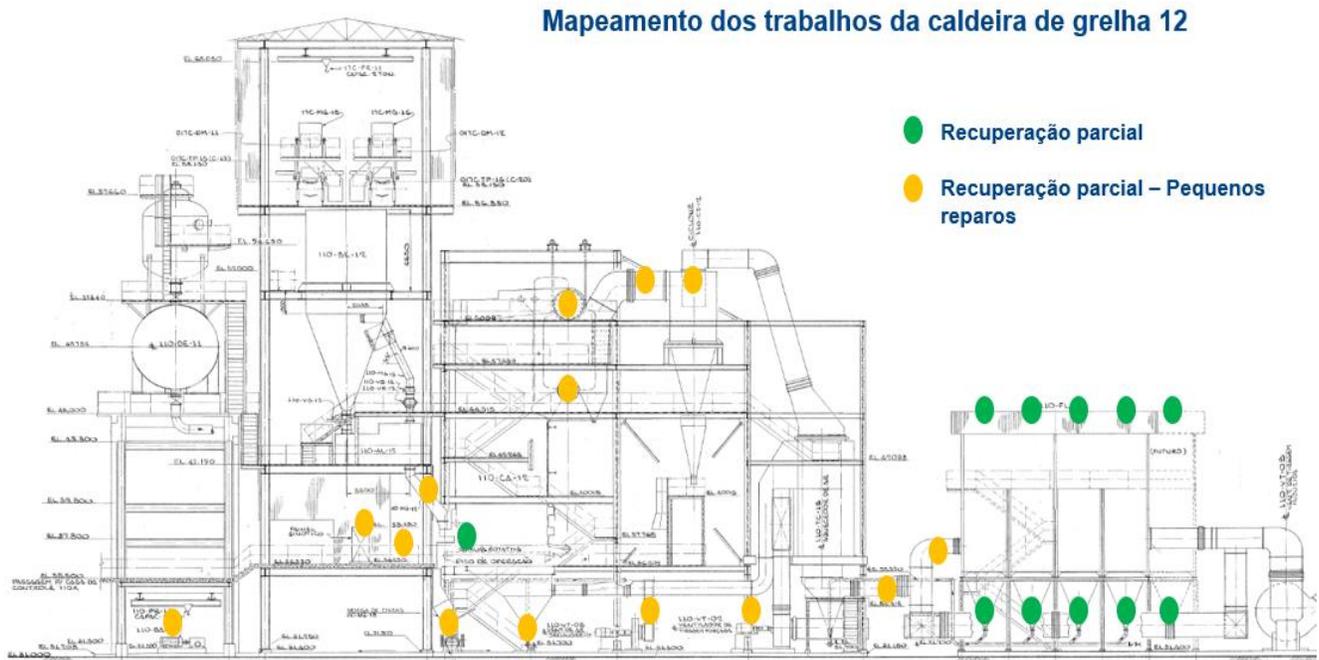
FONTE: Autor próprio (2019)

4.2 DESCRIÇÃO GERAL DAS ATIVIDADES

- a) Manutenção em sapatas;
- b) Fornalha;
- c) Manutenção dos dutos do sistema de combustão e linhas de condensado;
- d) Frontal da caldeira;
- e) Manutenção no ciclone;
- f) Moegas do fundo da caldeira;
- g) 110-FL-012 - Filtro de Mangas;

- h) Tubulão;
- i) Trocador de calor.

Figura 2: Mapeamento dos trabalhos da caldeira 12



FONTE: Autor próprio (2019)

4.3 DETALHAMENTO DAS ATIVIDADES REALIZADAS

4.3.1 MANUTENÇÃO NAS SAPATAS

A grelha da caldeira Cobrasma TAG-110-CA-012, em sua fornalha, possui quatro fileiras (A, B, C e D) com 123 sapatas em cada fileira, que é acionada por eixo com 5 engrenagens motrizes e 5 correntes ligadas as sapatas.

A função da grelha é transportar o carvão lançado pelo alimentador ao longo da fornalha, com o objetivo de fazer a queima homogênea por completo. Ao final do transporte ela deposita as cinzas geradas pelo processo de queima na moega de cinzas leves (cinzeiro).

O mal funcionamento destes componentes resulta em travamentos, queima não uniforme do carvão, baixa performance de produção de vapor e consequente indisponibilidade operacional da caldeira.

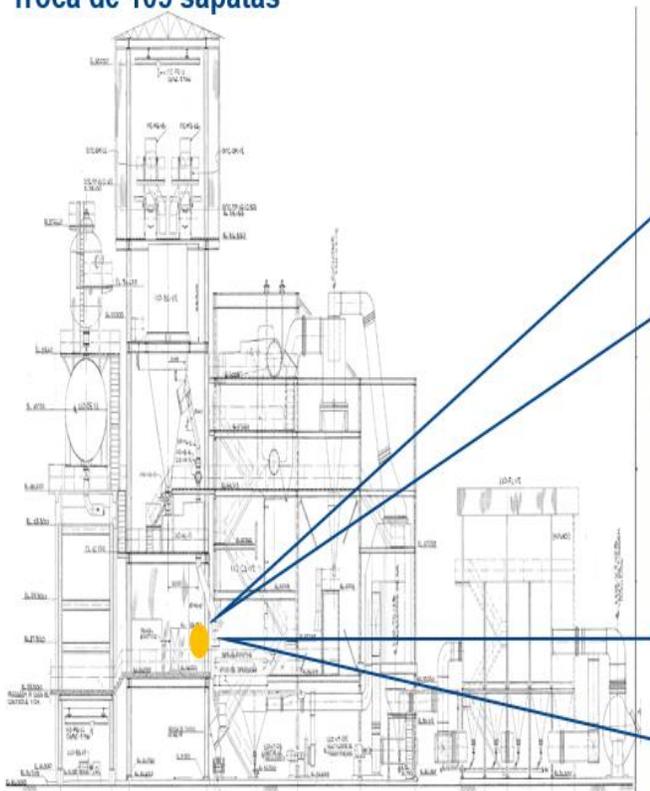
Tabela 4: Mapeamento das sapatas trocadas

	A	B	C	D
Total de sapatas trocadas	29	24	16	34
103	28%	23%	16%	33%

FONTE: Autor próprio (2019)

Figura 3: Atividade de troca de sapatas

Troca de 103 sapatas



FONTE: Autor próprio (2019)

Figura 4: Mapeamento das sapatas substituídas

Posição de sapatas substituídas - 110A-CA-12				
Colunas				
Linhas	A	B	C	D
1	1	1		
2	1	1	1	
3	1	1		1
4	1	1		1
5	1	1		1
6				
7				
8				1
9			1	
10				1
11	1			
12				
13				
14		1		
15				1
16				1
17				1
18				
19				1
20				
21				1
22				1
23				
24				
25				
26				1
27				
28				
29				1
30				1
31				
32				
33				
34	1			
35	1			
36				
37				
38	1			
39		1		
40				
41				1
42				
43	1	1		
44			1	1
45	1		1	
46	1	1		1
47	1			
48		1		1
49			1	
50	1			
51				
52			1	1
53		1		
54	1			
55				
56				
57	1			1
58				1
59	1			
60				
61	1		1	
62				1
63				
64	1		1	1
65				1
66				1
67				1
68				
69				1
70				1
71	1			
72				1
73	1			1
74	1			
75				1
76				
77	1			1
78				1
79				1
80				1
81	1			1
82				1
83	1			1
84				1
85	1			1
86				1
87	1			1
88				1
89	1			
90				1
91				1
92	1			1
93				1
94				
95				
96				
97				
98				
99				
100				
101				
102				
103				
104				
105				
106				
107				
108				
109				
110				
111				
112				
113				
114				
115				
116				
117				
118				
119				
120				
121				
122				
123				

FONTE: Autor próprio (2019)

4.3.2 FORNALHA

A fornalha da caldeira Cobrasma possui revestimentos refratários nas paredes frontal, laterais e traseira. Essas camadas refratárias, compostas pelos materiais:

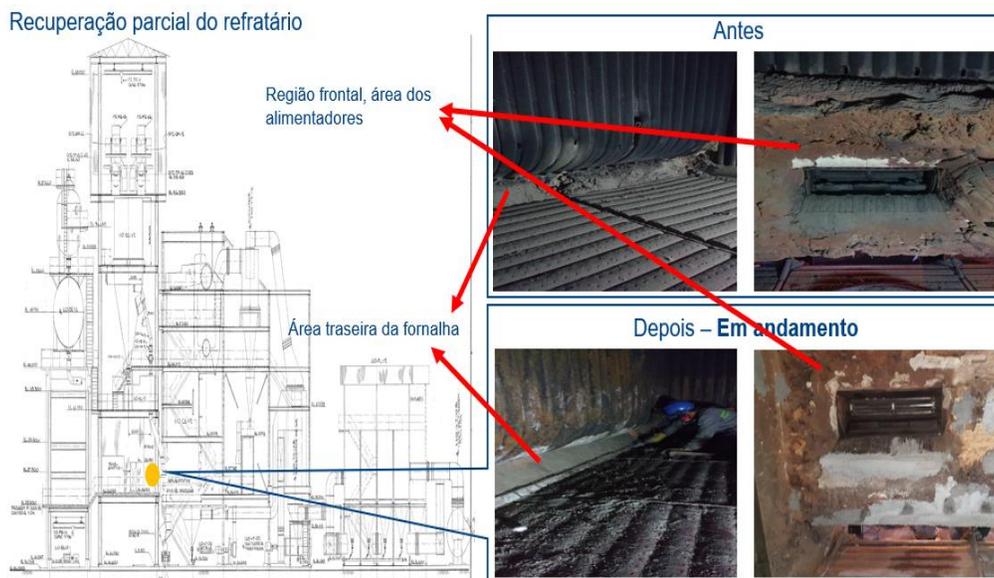
- a) Plibrico 80 Air Bond: Aplicado na área frontal dos alimentadores;
- b) Castibar PAC: Aplicado no frontal superior (acima dos alimentadores) e frontal inferior (Abaixo do frontal);
- c) Concreto refratário denso antierosivo classe B Castibar PAB: Aplicado abaixo do frontal.

O refratário tem função de isolamento térmico dos alimentadores, frontal e fornalha durante a operação das caldeiras.

Atividades realizadas:

- a) Recuperação parcial do refratário das partes frontais, laterais e traseira da fornalha;
- b) Soldagem de âncoras;
- c) Recuperação parcial do refratário inferior do frontal, abaixo dos alimentadores e bandejas da fornalha.

Figura 5: Recuperação dos refratários frontais e traseira



FONTE: Autor próprio (2019)

4.3.3 MANUTENÇÃO DOS DUTOS DO SISTEMA DE COMBUSTÃO E LINHAS DE CONDENSADO

Os dutos de ar das caldeiras Cobrasma tem a função de direcionar o ar dos ventiladores primários e secundários para combustão no leito da fornalha.

As caldeiras possuem 3 ventiladores, sendo 2 ventiladores (primário e secundário) de sopragem de ar para a fornalha e 1 ventilador (Induzido) responsável pela tiragem de gases da fornalha.

Estas tubulações, dutos e juntas sofrem desgastes devido a oxidação ao longo do tempo e furam. A principal causa dos furos se deve pela infiltração da água de chuva ou do próprio processo através do isolamento térmico danificado além da própria umidade do ar.

Estes furos causam perdas, entrada de ar falso e conseqüente baixo rendimento na combustão devido à ineficiência dos ventiladores primários e secundários.

Principais serviços realizados:

- a) Recuperação dos dutos de ar do ventilador de ar secundário (110-VT-005);
- b) Recuperação de todos os dutos de ar dos ventiladores de ar primário (110-VT-002);
- c) Recuperação de ar do ventilador induzido (saída da fornalha para ciclone, fornalha para filtro, filtro para EX) (110-VT-008);
- d) Troca de todo o isolamento térmico das linhas de ar dos ventiladores induzidos;
- e) Recuperação dos dutos de ar laterais de ar da fornalha;
- f) Recuperação de linha de condensado lado leste da fornalha.

Figura 6: Recuperação das juntas e dutos do ventilador secundário

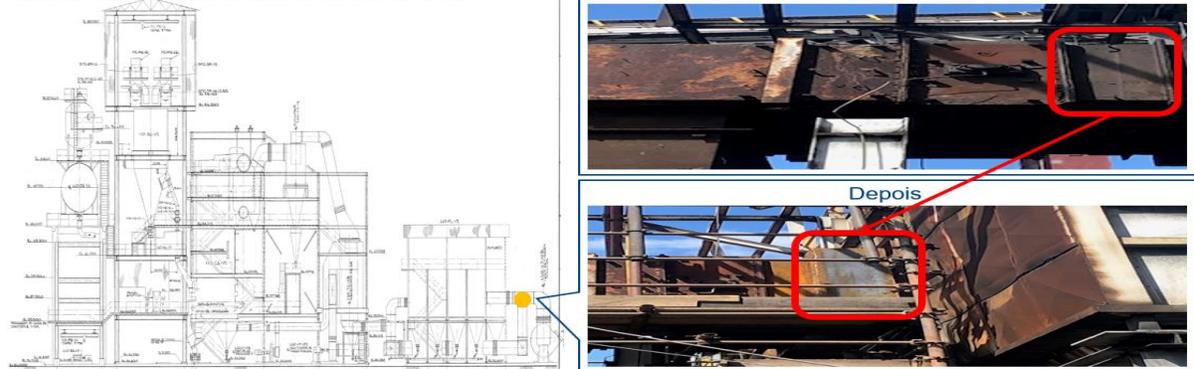
Dutos de ar do VT-005 danificados apresentando entrada de ar falsa



FONTE: Autor próprio (2019)

Figura 07: Recuperação das juntas e dutos ventilador induzido

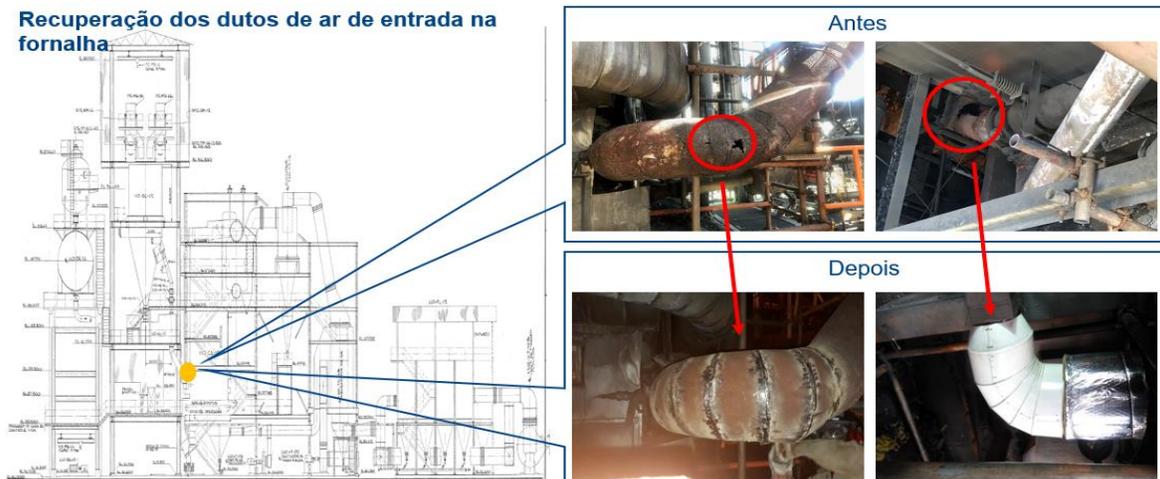
Recuperação dos dutos de ar do VT-008



FONTE: Autor próprio (2019)

Figura 8: Recuperação dos dutos laterais da fornalha

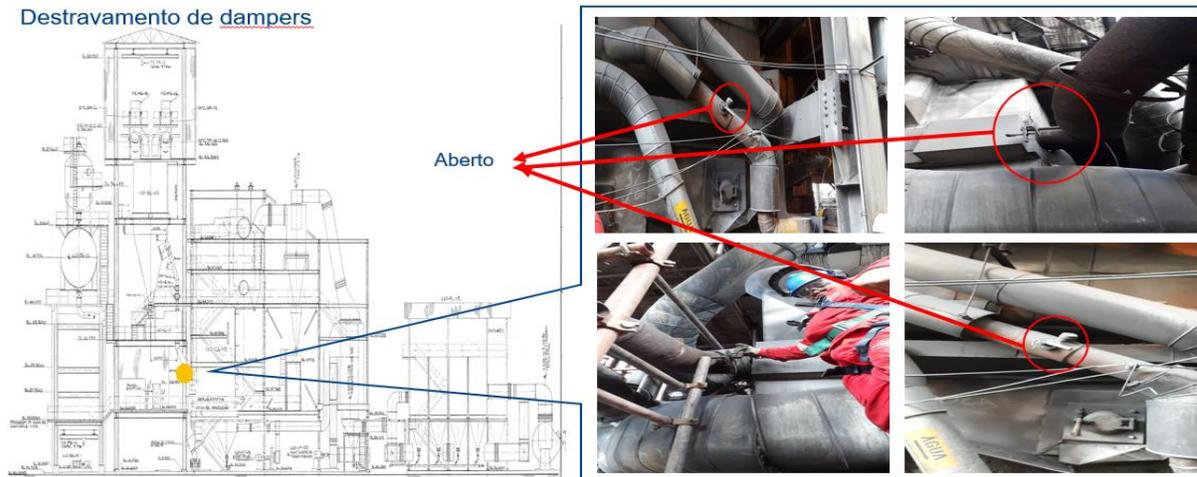
Recuperação dos dutos de ar de entrada na fornalha



FONTE: Autor próprio (2019)

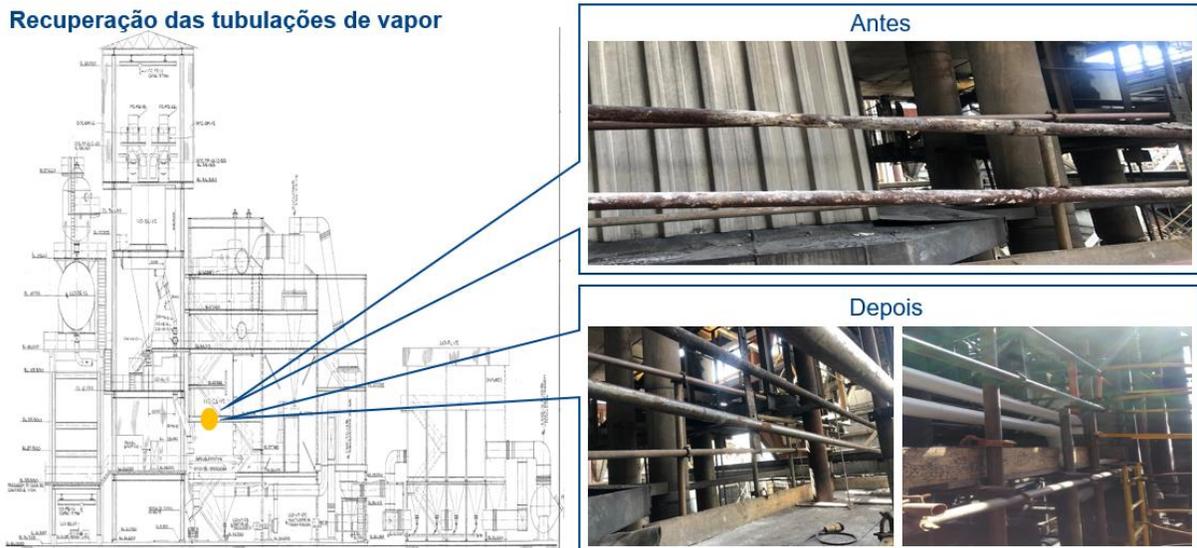
Feito destravamento dos dampers dos dutos de alimentação de ar laterais da fornalha.

Figura 9: Destravamento dos dampers dos dutos laterais da fornalha



FONTE: Autor próprio (2019)

Figura 10: Troca de linha de condensado lado leste da fornalha



FONTE: Autor próprio (2019)

4.3.4 FRONTAL

O conjunto frontal é responsável pela alimentação e distribuição de carvão de forma uniforme em toda a fornalha. Composto por 04 alimentadores cujo fabricante dos componentes é

a Detroit, estes equipamentos são compostos por rotores, aletas, esteiras, caixas de selagem, acionamentos, barras, chapas de desgastes e carcaça.

O carvão chega até este equipamento por correias transportadoras, onde através das moegas de distribuição chegam até as esteiras e rotores dos alimentadores, após é lançado para o fundo das esteiras da grelha na parte traseira da fornalha. Com o movimento reverso da grelha, o carvão é distribuído de forma uniforme internamente na fornalha. O mal funcionamento dos alimentadores acarretam em baixa geração de vapor, superaquecimento das sapatas e travamento do conjunto das esteiras e alimentador por excesso de temperatura concentrada em pontos concentrados do equipamento.

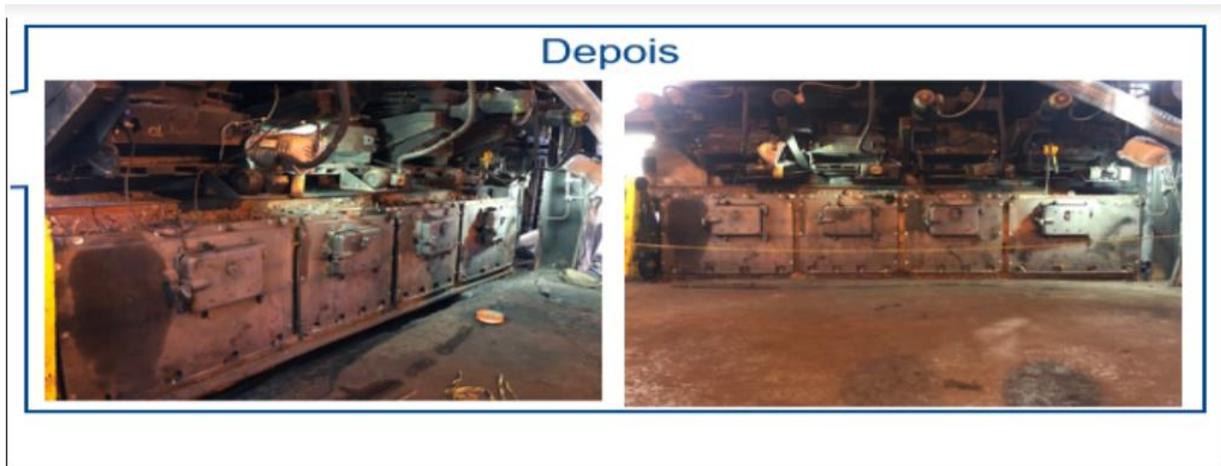
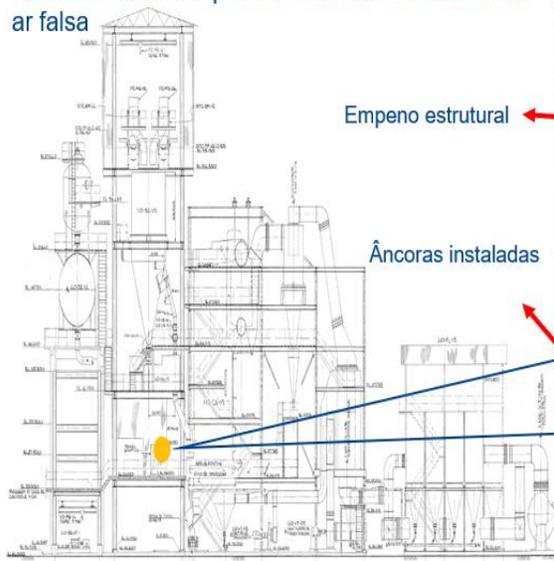
Na estrutura do frontal foram identificados empenos estruturais em toda a sua extensão e o refratário comprometido e em alguns pontos ausência do mesmo. Os empenos no conjunto do frontal acarretam em entradas de ar falso devido a falha de vedação entre o ambiente interno e externo, superaquecimento nos conjuntos dos alimentadores e exposição do colaborador a temperaturas elevadas durante as inspeções de rotina.

Serviços realizados:

- a) Recuperação dos rotores dos alimentadores de carvão;
- b) Troca das esteiras dos alimentadores de carvão;
- c) Lubrificação dos componentes dos alimentadores de carvão;
- d) Reativação do sistema de lubrificação dos alimentadores de carvão;
- e) Desempeno das vigas de sustentação do frontal;
- f) Fabricação de bandeja do alimentador;
- g) Desempeno das portas do frontal;
- h) Troca do refratário superior do frontal;
- i) Aplicação de refratário área inferior do frontal.

Figura 11: Recuperação estrutural do frontal

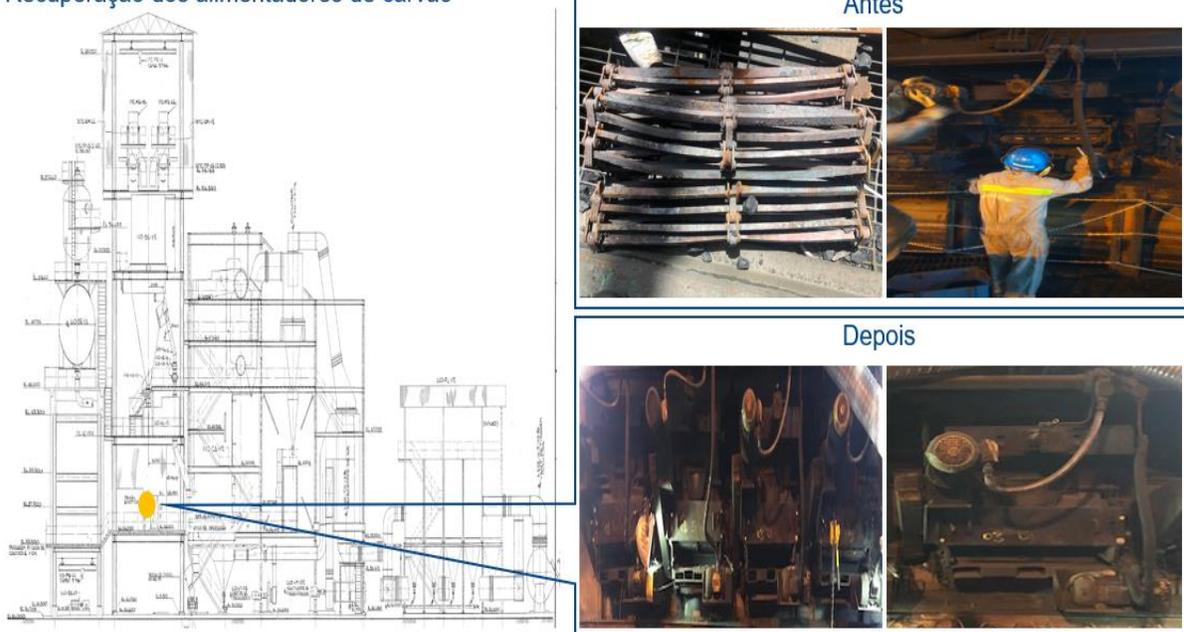
Painéis frontais empenados causando entrada de ar falsa



FONTE: Autor próprio (2019)

Figura 12: Recuperação dos alimentadores 110-AL-14A/14B/14C/14D

Recuperação dos alimentadores de carvão



FONTE: Autor próprio (2019)

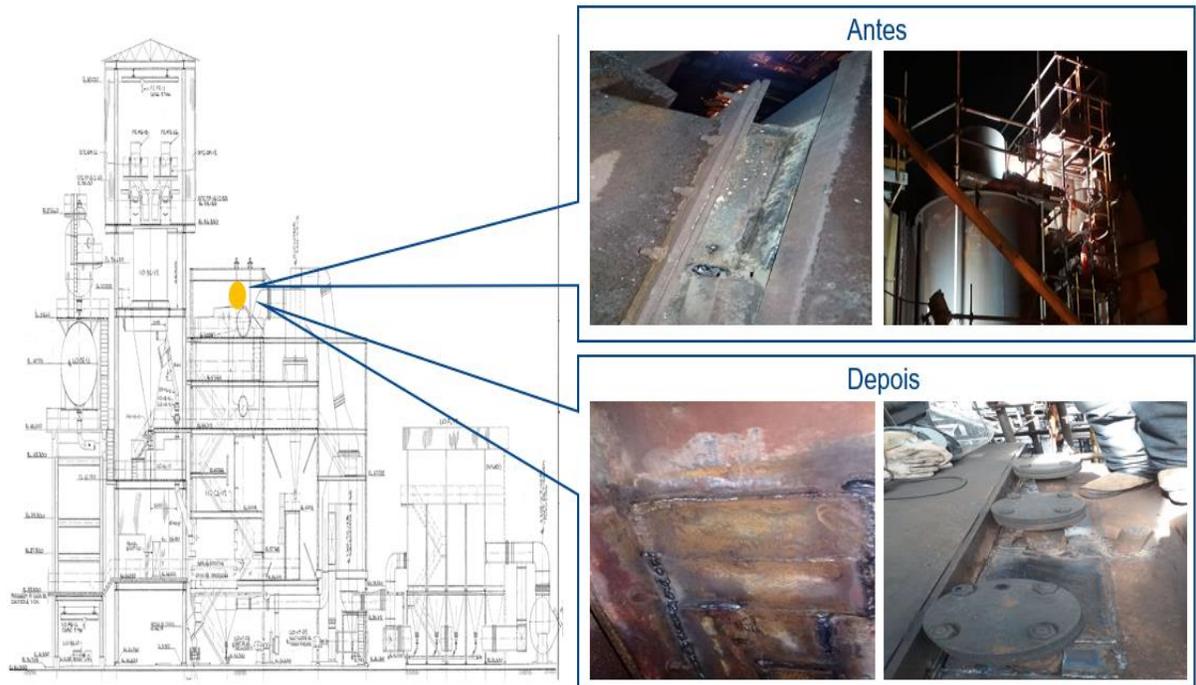
4.3.5 MANUTENÇÃO NO CICLONE

O ciclone é localizado no topo central da caldeira de grelha, tem como principal função a separação da cinza leve da grossa, que são separadas através do movimento intenso de correntes de ar geradas pelo 110-VT-002, que converge as cinzas mais densas das bordas para o centro do ciclone, transportando essas cinzas de volta para o processo para serem queimadas na fornalha. As cinzas mais leves são enviadas para o sistema de filtragem 110-FL-012. Os furos localizados na estrutura do ciclone diminuem a eficiência de produção de vácuo para arraste das cinzas, o que resulta em baixo desempenho da caldeira.

Serviços realizados:

- a) Recuperação estrutural do ciclone (bocal, bordas e juntas).

Figura 13: Recuperação do ciclone



FONTE: Autor próprio (2019)

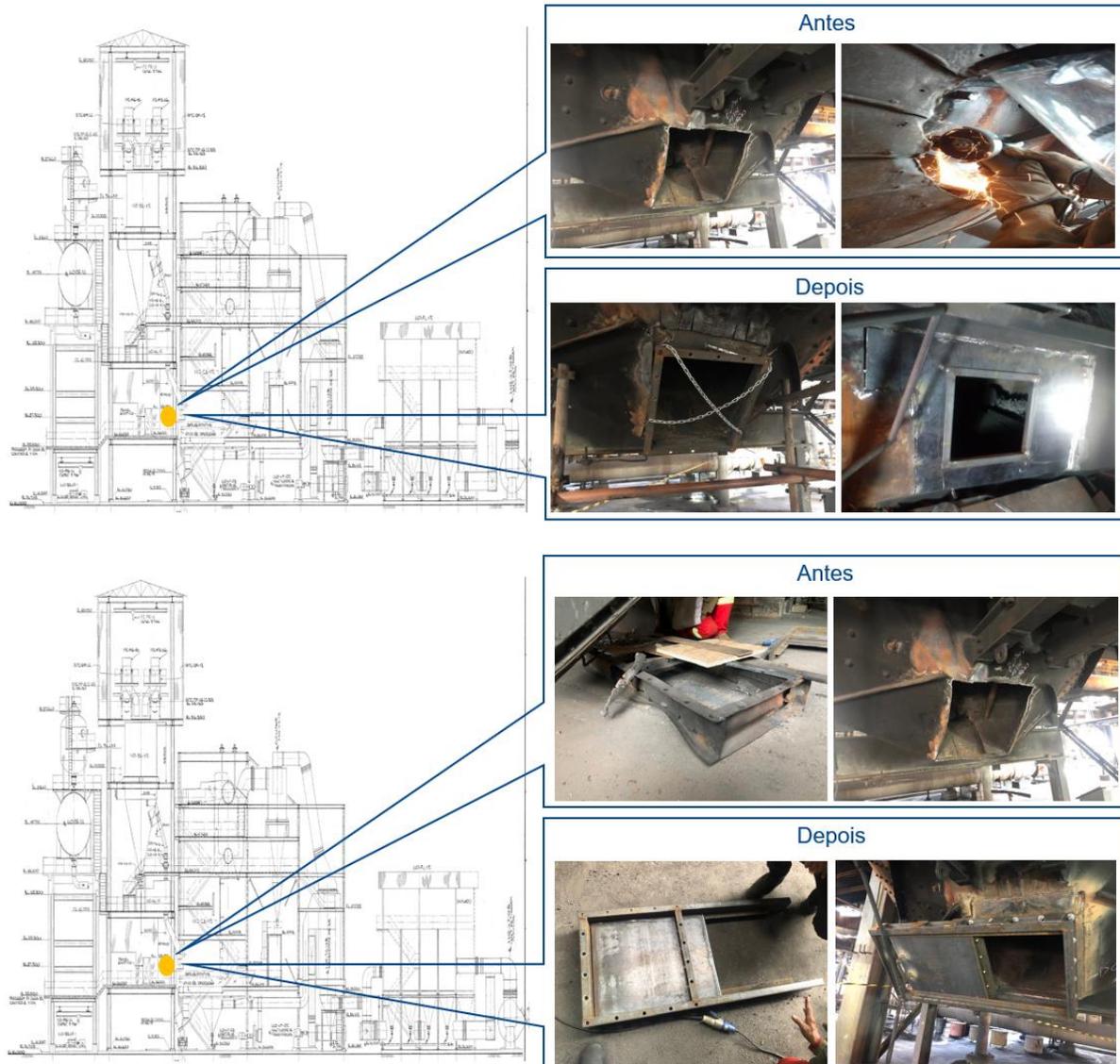
4.3.6 MOEGAS DO FUNDO DA CALDEIRA (CINZEIROS)

Moegas de fundo da grelha tem a função de receber a cinza resultante do processo da queima interna do carvão na fornalha e transporte até os moinhos, que sequencialmente transportam as cinzas para o silo 14. O processo de descarte das cinzas está sendo feita de forma manual, através de operadores que fazem o descarte no pátio ao lado da ferramentaria do 110X. Os pontos de empeno e aberturas das paredes dessas moegas expõem os operadores às cinzas quentes.

Serviços realizados:

- a) Recuperação da rampa de descarga;
- b) Recuperação da válvula faca;
- c) Eliminação de aberturas das paredes laterais da moega.

Figura 14: Recuperação da moega de fundo



FONTE: Autor próprio (2019)

4.3.7 FILTRO DE MANGAS

O filtro de mangas da caldeira Cobrasma tem a função de separar os gases das cinzas leves, através de mangas que permitem a passagem dos gases e retêm as cinzas.

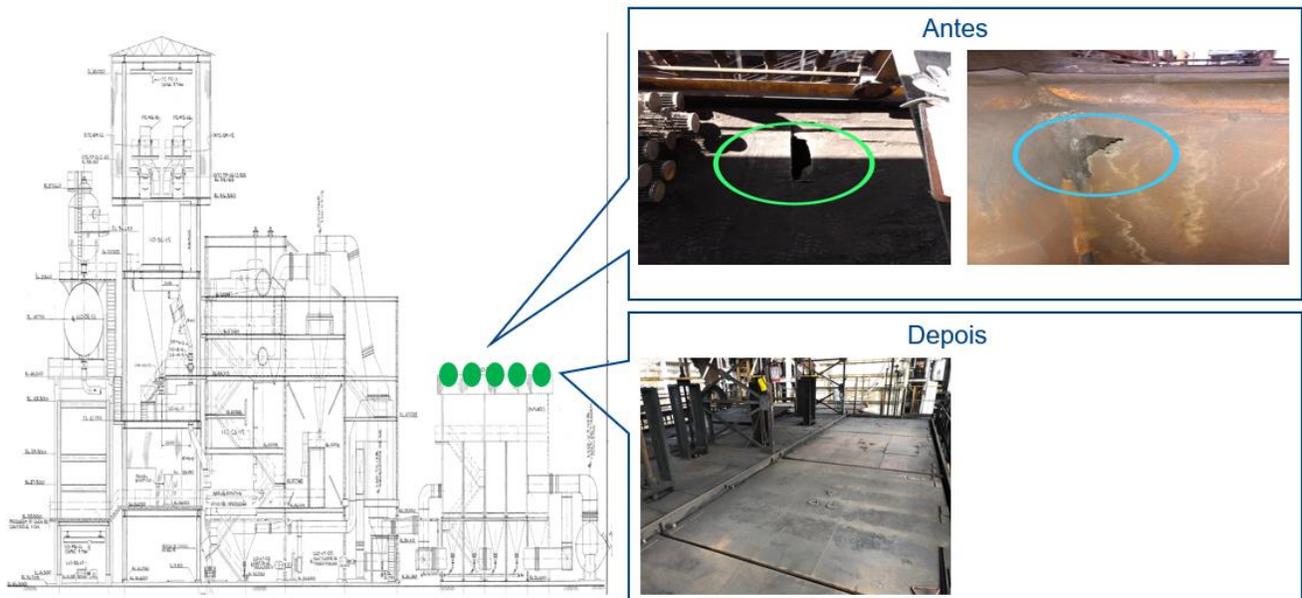
Este equipamento é dividido entre câmara de gases limpos e câmara de gases sujos e é composto por 10 módulos sendo cada modulo é composto por 144 mangas. As mangas foram devido a desgaste por abrasão e químico (Enxofre dos gases em contato com as mangas e variação de temperatura) e contato físico entre a gaiola danificada no fundo e a manga,

permitindo assim, a passagem de cinzas para a câmara de gases limpos. Esta falha não é aceitável pois estes gases com cinza são jogados no ambiente pela chaminé.

Serviços realizados:

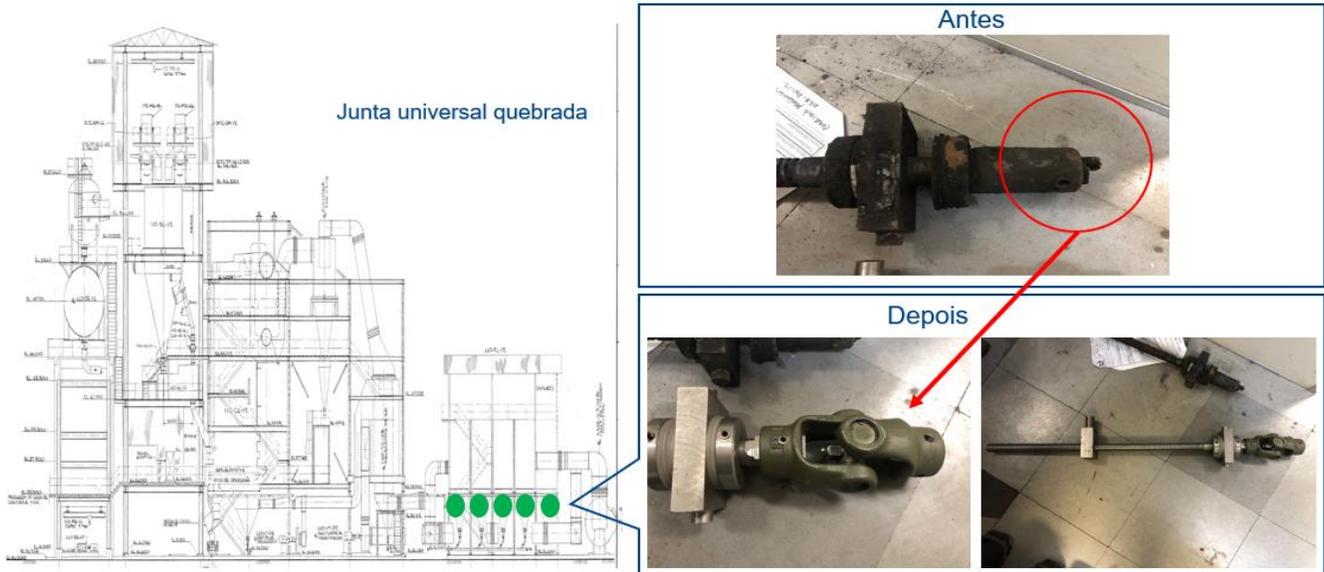
- a) Troca de 100% das mangas dos 10 módulos (1440 mangas no total);
- b) Recuperação dos headers dos 10 módulos;
- c) Troca das gaiolas danificadas (64 no total);
- d) Recuperação e destravamento dos dampers dos 10 módulos;
- e) Troca das vedações das tampas superiores de acesso aos módulos;
- f) Troca das vedações das moegas de fundo do filtro;
- g) Recuperação das paredes dos módulos;
- h) Troca do acionamento dos dampers dos módulos 110-FL-012D/E/F/H;
- i) Lubrificação / exercitação da abertura e fechamento dos dampers.

Figura 15: Recuperação das paredes dos módulos



FONTE: Autor próprio (2019)

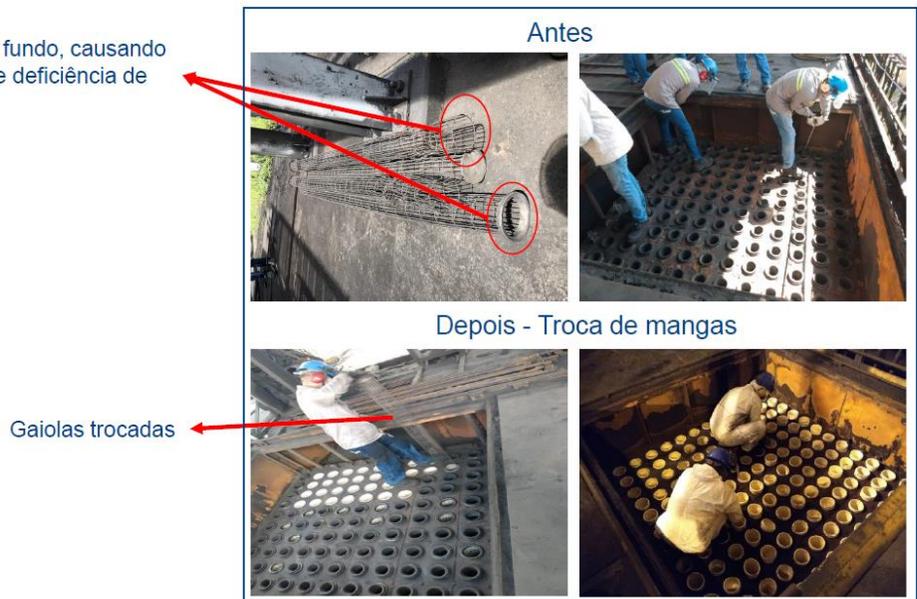
Figura 16: Troca das juntas universal de acionamento dos dampers



FONTE: Autor próprio (2019)

Figura 17: Troca de mangas

Gaiolas comprometidas sem o fundo, causando perda prematura das mangas e deficiência de filtragem



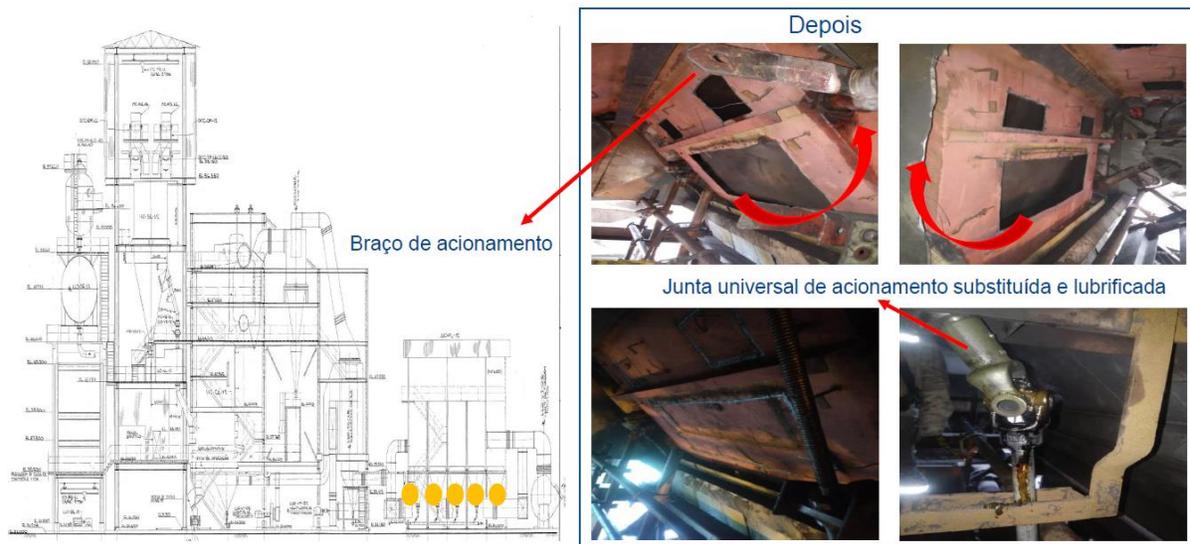
FONTE: Autor próprio (2019)

Figura 18: Recuperação das vedações e fixação das portas de visita das moegas do FL-012



FONTE: Autor próprio (2019)

Figura 19: Destravamento dos Dampers



FONTE: Autor próprio (2019)

4.3.8 TROCADOR DE CALOR

Trocador de calor é responsável por inserir ar quente na fornalha. Os gases provenientes da combustão interna da fornalha são retirados da fornalha através de processo de exaustão pelo

ventilador induzido, estes gases passam por processo de separação dos sólidos no ciclone e em seguida entram no trocador de calor aquecendo as paredes externas dos 1152 tubos do trocador.

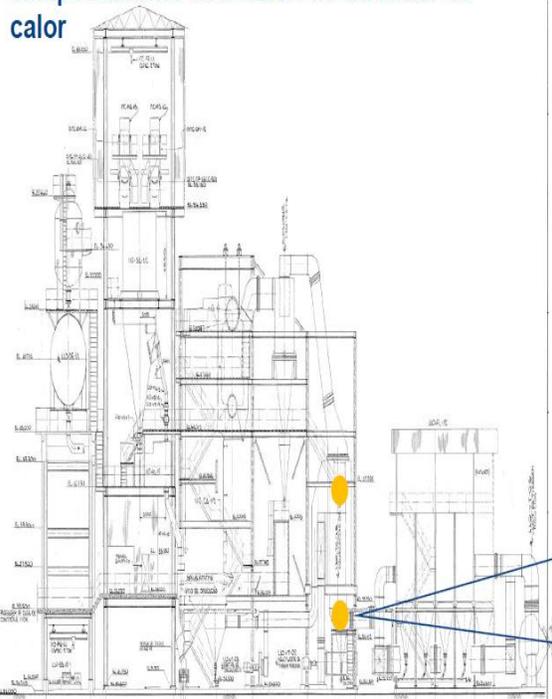
O ventilador de ar primário, pega o ar ambiente e transporta o esse ar que passa internamente nos tubos já aquecidos pelo ar da exaustão da fornalha e os joga através de dutos na fornalha a uma temperatura de 165°C como mostrado na figura 27. O vazamento desses tubos causa baixa performance da caldeira, jogando menos ar que o necessário na fornalha. Foram tamponados nesta parada 86 tubos.

Serviços executados:

- a) Inspeção dos tubos do trocador de calor;
- b) Projeto de tampão para isolamento do tubo;
- c) Tamponamento dos tubos do trocador de calor;
- d) Recuperação das juntas de expansão entrada e saída de ar.

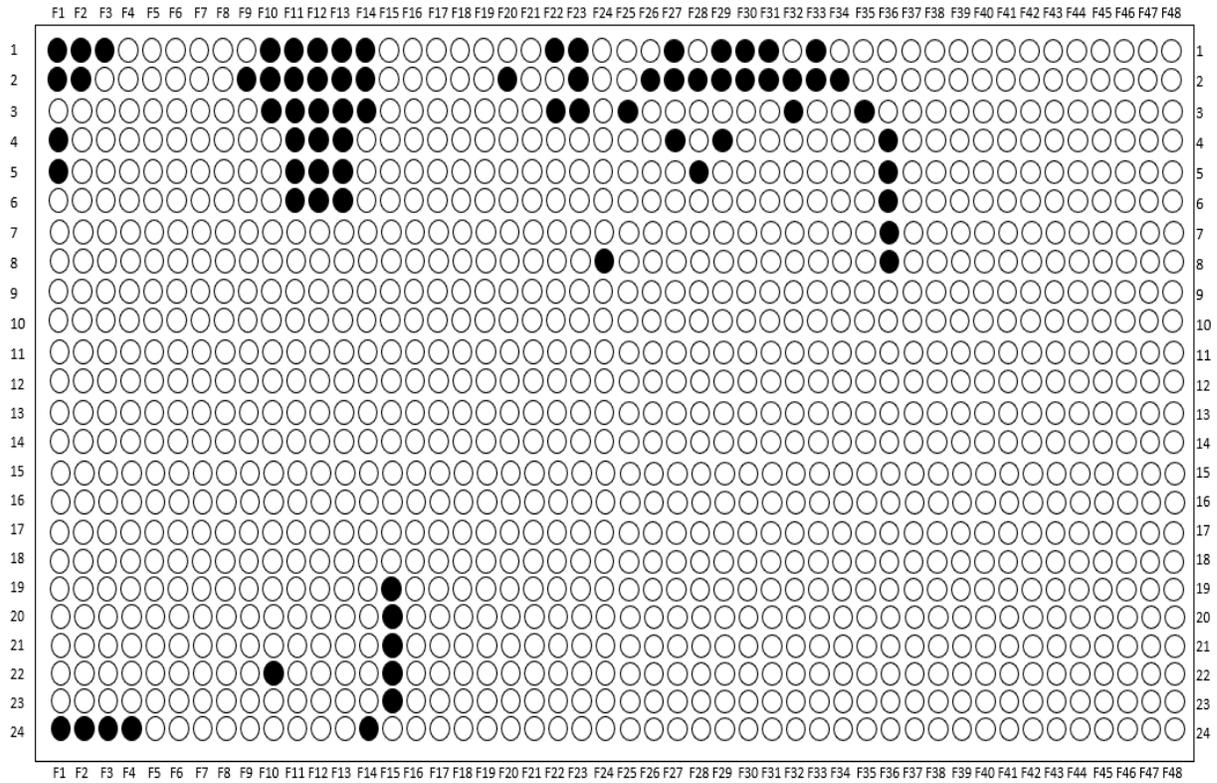
Figura 20 – Tamponamento do trocador de calor

Tamponamento dos tubos do trocador de calor



FONTE: Autor próprio (2019)

Figura 21 – Esquema de tamponamento do trocador de calor



FONTE: Autor próprio (2019)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

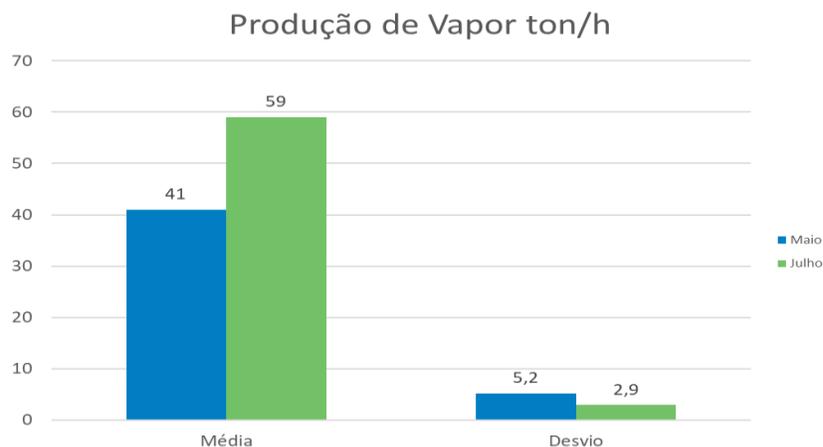
Para comparação das performances da caldeira, foram levantados os seguintes dados nos períodos de maio de 2019 e julho de 2019 após sofrer as manutenções:

- a) Produção de vapor (t/h) e Capacidade de produção de vapor
- b) Entrada de ar (t/h)
- c) Temperatura do ar de entrada (°C)
- d) Pressão de saída (kPa)
- e) Delta P dos filtros de manga (mmH₂O)
- f) Temperatura dos gases de saída (°C)
- g) Troca térmica do pré-aquecedor de ar (°C)
- h) Abertura do induzido (%)
- i) Corrente do induzido (A)

5.1.1 PRODUÇÃO DE VAPOR (T/H) E CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE VAPOR

A caldeira em avaliação tem capacidade de projeto de 70 t/h, durante a operação desta a capacidade apresentada foi de 60 t/h, conforme observado na figura 22.

Figura 22 – Gráfico de produção de vapor ton/h



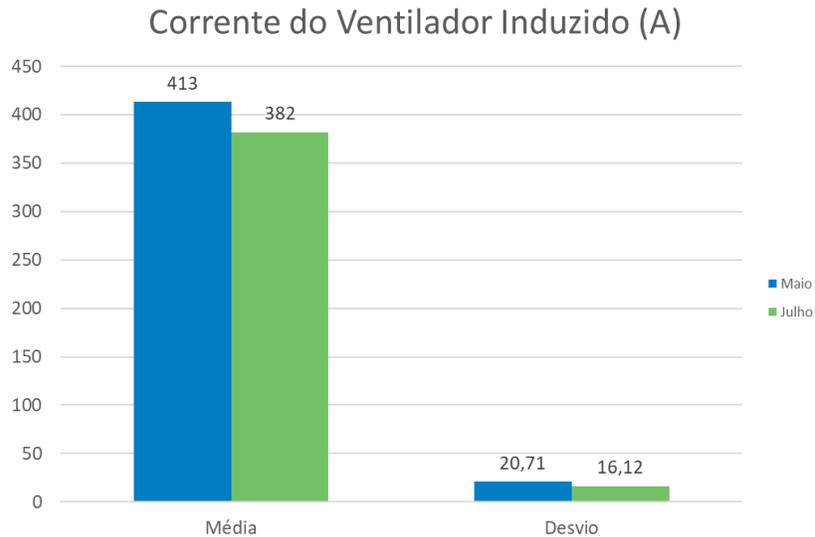
FONTE: Autor próprio (2019)

Houve um aumento na faixa de 41% na geração de vapor após a manutenção.

5.1.2 ENTRADA DE AR (T/H)

Outro parâmetro importante é a corrente do ventilador induzido, que é responsável pela retirada dos gases de exaustão, a abertura do ventilador (OP) deve trabalhar em cascata de acordo com a pressão da fornalha, o aumento da corrente elétrica do VT induzido pode causar desarme por corrente ou por aquecimento do mesmo.

Figura 23 – Gráfico da corrente do ventilador induzido

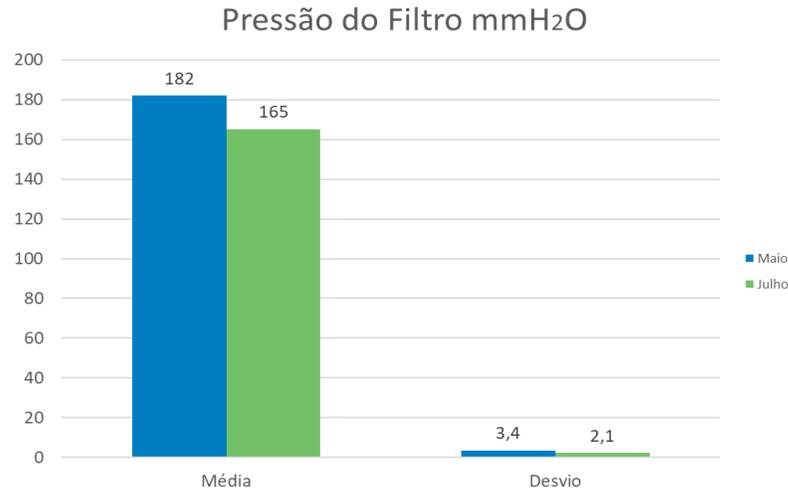


FONTE:
(2019)

Autor próprio

Conforme observa-se na figura 23, podemos observar que houve uma redução na corrente elétrica do ventilador induzido, o mesmo voltou a operar dentro da amperagem nominal do motor.

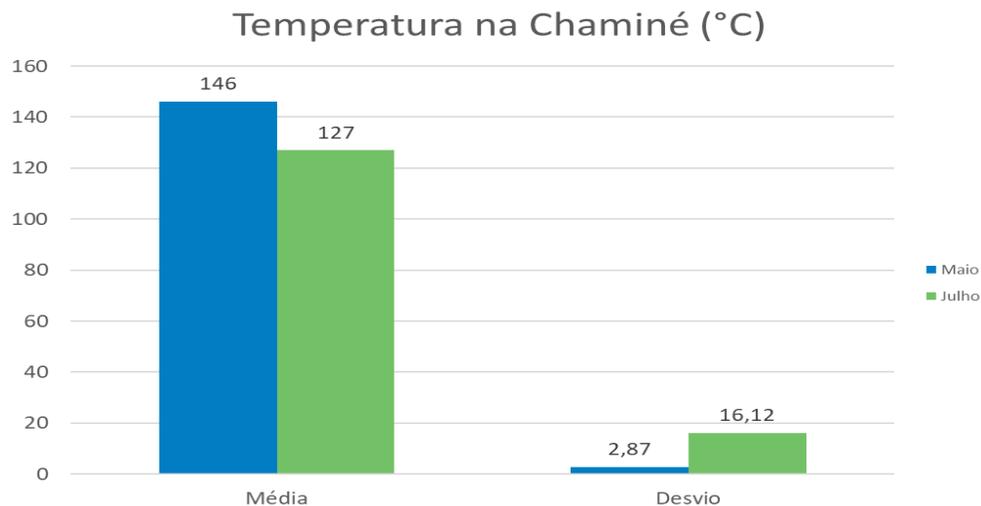
Os gases de exaustão são filtrados no filtro de mangas para serem enviados para a atmosfera, a pressão elevada impede aumento de carga da caldeira.

Figura 24 – Gráfico da pressão do filtro mmH₂O

FONTE: Autor próprio (2019)

Conforme se observa na figura 24 houve uma diminuição significativa na pressão do filtro de mangas devido substituição das mangas e ao tamponamento dos tubos do trocador de calor, pois parte do ar do ventilador primário que deveria entrar na fornalha estava sendo enviado para o filtro de mangas, aumentando o diferencial de pressão do filtro e aumentando a corrente elétrica do ventilador.

O aumento da temperatura dos gases de saída significa perda energética, pois o calor que deveria ser reaproveitado pelo ar de combustão, está sendo enviado para a atmosfera.

Figura 25 – Gráfico da temperatura na chaminé (°C)

FONTE: Autor próprio (2019)

Conforme observa-se na figura 25, houve uma redução na temperatura dos gases devido a troca térmica deficiente no trocador de calor.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi avaliada uma caldeira de grelha rotativa alimentada com carvão mineral, a caldeira do modelo Cobrasma, ano de fabricação: 1978. Este gerador de vapor possui capacidade de vapor de 70 ton/h, sendo sua pressão operação de 17 bar.

Os resultados mostram que a caldeira analisada apresentou aumento na geração de vapor após a manutenção realizada. Este resultado atribuiu-se as correções realizadas nos dutos de ar, trocador de calor, filtros de manga, principal motivo da limitação do ar de combustão e delta P elevado nos filtros. Também para melhorias, devem-se realizar manutenções periodicamente e trocas de equipamentos e dutos que apresentam defeitos devido ao fim de vida útil.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, E.B.; SASSERON, J.L.; OLIVEIRA FILHO, D. **Princípios sobre combustíveis, combustão e fornalhas**. Viçosa, MG: UFV, 1985.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS- ABRAF. 2011. **Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2010**. Brasília, 2011.
- BAZZO, E. **Geração de vapor**. 2 ed. Florianópolis: UFSC, 1995.
- BIZZO, W.A. **Apostila Geração, Distribuição e Utilização de vapor**. Unicamp, 2003.
- BRITO, J.O. & BARRICHELO, L.E.G. **Características do Eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca**. IPEF, Piracicaba, 1978.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L.E.G. **Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis**. São Paulo: 1982.
- BUECKER, B. **Basics of Boiler and HRSG Design**. Oklahoma: Penn Well Corporation, 2002
- GILES, Randal V. **Mecânica dos fluidos e hidráulica**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil.
- GILMAN, G.F.; Gilman, J. **Boiler Control Systems Engineering**. Research Triangle Park: International Society of Automation, 2010.
- JANKOWSKY, I.P. **Fundamentos de secagem de madeiras. Documentos Florestais**. Piracicaba, 1990.
- KREITH, Frank. **Princípios da transmissão de calor**. São Paulo: Edgard Blucher, 1977.
- MCQUAY, M.Q. **Princípios de combustão aplicada**. Editora da UFSC, Florianópolis, 176 p., 2007.
- MENDES, A. S., MARQUES, M.H.B, MARTINS, V. A. **Programas de secagem para madeiras brasileiras**. IBAMA, 1998.
- PERA, Hildo. **Geradores de Vapor: um compêndio sobre a conversão de energia com vistas à preservação da ecologia**. São Paulo: Fama 1990.
- SALAMA, C., 1982. “Estudo da viabilidade de utilização de óleos vegetais em substituição ao óleo diesel”. **Programa de Planejamento Energético**. COOPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- TELLES SILVA, C. Pedro; **Vasos de Pressão**. Rio de Janeiro, RJ: 1996.
- VAN, Wylen; GORDON, Jhon. **Fundamentos da Termodinâmica clássica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1976.