



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CARLOS HENRIQUE CUNHA CAETANO

## **ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA CALDEIRA INDUSTRIAL**

São Luís – MA

2015

**CARLOS HENRIQUE CUNHA CAETANO**

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA CALDEIRA INDUSTRIAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Waldemir Silva de Lima

São Luís – MA

2015

CAETANO, Carlos Henrique Cunha

**Análise da Eficiência Energética de uma Caldeira Industrial/**

Carlos Henrique Cunha Caetano. – São Luís, 2015.

53f

Monografia (GRADUAÇÃO) – Curso de Engenharia Mecânica,  
Universidade Estadual do Maranhão, 2015.

Orientador: Prof. Dr. Waldemir Silva de Lima.

1. Equipamentos Industriais. 2. Geradores de Vapor. 3. Caldeira. I. Título

CDU: 621.18

**CARLOS HENRIQUE CUNHA CAETANO**

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA CALDEIRA INDUSTRIAL**

Aprovado em:     /     / 2015

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof.Dr. Waldemir Silva de Lima. (Orientador)  
Universidade Estadual do Maranhão

---

Prof.Msc. Carlos Antonio Angelim de Meneses  
Universidade Estadual do Maranhão (Examinador)

---

Prof.Msc Paulino Cutrim Martins  
Universidade Estadual do Maranhão (Examinador)

São Luís – MA

2015

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus que me deu o dom da vida, o que me proporcionou a oportunidade de escrever este trabalho. Graças a ele, após grandes dificuldades cheguei até esta etapa da minha vida.

Agradeço com muito amor aos meus pais José Ribamar Caetano e Maria de Fátima Cunha Caetano, que me instruíram durante todo esse tempo e que sempre fizeram além do possível para que não faltasse minha educação, Ao meu irmão Paulo Victor Cunha Caetano por estar seguindo os meus mesmos passos na carreira de engenheiro. Agradeço também a minha linda e querida irmãzinha Anna Laura Cunha Caetano, que com sua inocência de criança me inspira sempre a seguir em frente.

Agradeço ao meu orientador Prof. Waldemir pela ajuda e compreensão ao me orientar neste trabalho, bem como aos demais professores e amigos que compõem a banca examinadora, já que deixaram grande contribuição ao meu processo de formação.

Agradeço com carinho também a todos os meus amigos de curso, dos quais guardarei minha eterna gratidão e amizade pelos anos que passamos juntos ao longo do nosso processo de formação.

Para finalizar, agradeço a toda a equipe da EFAI Automação Industrial, em especial aos engenheiros Elvis Vasselai e Rodrigo Lorenssetti, por terem permitido acompanhar o trabalho realizado na Ambev - Filial Maranhão e sintetizá-lo neste TCC.

## **RESUMO**

Este trabalho apresenta em síntese o estudo dos sistemas de geração de vapor, suas características, principais componentes e subconjuntos, tipos de geradores de vapor mais empregados nas indústrias modernas, dando-se foco ao estudo da eficiência energética de uma caldeira industrial. Os dados aqui apresentados foram coletados em conjunto a empresa EFAI Automação Industrial durante o processo de melhoria e regulação do gerador de vapor modelo FA-M-20 de fabricação Aalborg, cuja capacidade de geração de vapor é de 20 t/h

**PALAVRAS-CHAVE:** Geradores de Vapor, Caldeira, Eficiência Energética.

## **ABSTRACT**

This paper presents in short the study of steam generation systems, their features, main components and sub-types of most used steam generators in modern industries, giving focus to the study of energy efficiency of an industrial boiler. The data presented here were collected together with the company EFAI Industrial automation in the process of improvement and regulation of steam generator model FA-M-20 manufacturing Aalborg, whose generation steam capacity is 20 t / h.

**KEYWORDS:** Steam Generators, Boilers, Energy Efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

Figura (1) – Esquema de uma locomotiva movida a vapor.....	17
Figura (2) – Esquema simplificado de uma usina nuclear.....	18
Figura (3) – Caldeira moderna de vapor e seus principais componentes.....	19
Figura (4) – Esquema simplificado de uma usina nuclear.....	19
Figura (5) – Caldeira moderna de vapor e seus principais componentes.....	19
Figura (6) – Gerador de Vapor Flamotubular.....	22
Figura (7) – Gerador de Vapor Aquotubular.....	22
Figura (8) – Esquema básico de uma caldeira horizontal.....	23
Figura (9) – Esquema básico de uma caldeira vertical.....	23
Figura (10) – Caldeira flamotubular de múltiplo passe de gases.....	25
Figura (11) – Caldeira aquotubular com a fornalha em corte.....	26
Figura (12) – Vista superior Filial Equatorial.....	32
Figura (13) – Casa de caldeiras.....	33
Figura (14) – Caldeira FA-M-20.....	33
Figura (15) - Placa de Identificação da Caldeira.....	34
Figura (16) – Manômetro de vapor da caldeira.....	36
Figura (17) – Gráfico da variação do percentual de O <sub>2</sub> ao longo do tempo.....	37
Figura (18) – Aparelho Teste 321-1 utilizado na medição dos gases de combustão.....	37
Figura (19) – Configuração do sistema de ar primário da caldeira biomassa.....	41
Figura (20) – Nova configuração do sistema de ar secundário da caldeira.....	42
Figura (21) – Tubos vaporizadores corroídos, retirados da caldeira para substituição.....	43
Figura (22) – Antes e depois da parede frontal dos tubos após manutenção.....	43
Figura (23) – Tamponagem dos tubos comprometidos da caldeira.....	44
Figura (24) – Reforma do extrator de cinzas e redler.....	45
Figura (25) – Refratário substituído do interior da parede traseira.....	46
Figura (26) – Analisador/controlador de injeção de O <sub>2</sub> no coletor de gases.....	46
Figura (27) – Interface homem-máquina.....	47
Figura (28) – Controle do Nível de O <sub>2</sub> .....	48
Figura (29) – Controle de Depressão da Fornalha.....	48
Figura (30) – Controle de Pressão de Vapor.....	49
Figura (31) – Controle de Nível de Água do Tubulão.....	49
Figura (32) – Mudança na dimensão das cinzas obtidas.....	51
Figura (33) – Ausência de fumaça escuras após intervenções na caldeira.....	51



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela (1) – Classificação das caldeiras segundo a NR13.....	24
Tabela 2) – Comparativo entre o grau de combustão e vaporização específica das caldeiras flamotubulares e aquotubulares.....	27

## **LISTA DE EQUAÇÕES**

Equação (1) – Eficiência de um Caldeira.....	31
Equação (2) – Eficiência de Combustão de uma Caldeira.....	38

## LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
AmBev - Companhia de Bebidas das Américas  
ASME - American Society of Mechanical Engineers  
ASTM - American Society for Testing and Materials  
Confea - Conselho Federal de Engenharia e Agronomia  
NR13 – Norma Regulamentadora para Caldeiras e Vasos de Pressão  
PMPT - Máxima pressão de trabalho admissível  
PTH - Pressão de Teste Hidrostático

## LISTA DE SÍMBOLOS

$B_0$  = quantidade de combustível admitida  
CO = monóxido de carbono  
CO<sub>2</sub> = dióxido de carbono  
Eff = Eficiência de combustão (%)  
 $H_u$  = calor aduzido por kg de combustível.  
 $\eta_k$  = rendimento da caldeira;  
O<sub>2</sub> = oxigênio  
 $Q_e$  = total de calor gerado pela caldeira;  
Ts = Temperatura de saída dos gases (°C)  
Ta = Temperatura ambiente (°C)  
V = Fator de acordo umidade.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>IV</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE TABELAS E EQUAÇÕES.....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLO .....</b>	<b>X</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2. JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>13</b>
<b>3. OBJETIVOS.....</b>	<b>14</b>
3.1. Objetivo Geral .....	14
3.2. Objetivo Específico.....	14
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>15</b>
<b>5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
5.1 Introdução aos Geradores de Vapor. ....	17
5.2 Generalidades sobre Caldeiras.....	18
5.3 Classificação das Caldeiras.....	21
5.4 Geradores Flamotubulares .....	24
5.5 Geradores Aquotubulares .....	25
5.6 Comparativo entre geradores flamotubulares e aquotubulares .....	27
5.7 Elementos que caracterizam os geradores de vapor .....	28
5.8 Condições que devem possuir os geradores.....	29
5.9 . Rendimento de uma Caldeira.....	30
<b>6. ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>31</b>
6.1. Considerações Iniciais.....	31
6.2. Levantamentos e Análises .....	36
6.3. Execução do Plano de Ação – Melhorias Mecânicas.....	40
6.3.1. Revitalização do Sistema de Ar Primário e Instalação dos Dampers .....	40
6.3.2. Instalação do Novo Sistema de Ar Secundário e Dampers.....	41
6.3.3. Revitalização dos tubos do sistema flamotubular. ....	43
6.3.4. Tamponamento dos tubos furados do sistema aquotubular. ....	44
6.3.5. Revitalização do sistema de extração de cinzas e redler. ....	45

6.3.6.	Reforma do refratário.....	45
6.4.	Execução do Plano de Ação – Melhorias de Automação .....	46
6.4.1.	Instalação de um analisador/controlador injeção de oxigênio.....	46
6.4.2.	Melhoria na interpretação e confiabilidade na interface homem-máquina.....	47
6.5.	Resultados obtidos.....	50
<b>7.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>52</b>
<b>8.</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>53</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O vapor de água é usado como meio de geração, transporte e utilização de energia desde os primórdios do desenvolvimento industrial. Inúmeros fatores colaboraram para a geração de energia através do vapor. A água é o composto mais abundante da Terra e portanto de fácil obtenção e baixo custo. Na forma de vapor tem alto conteúdo de energia por unidade de massa e volume. As relações temperatura e pressão de saturação permitem utilização como fonte de calor a temperaturas médias e de larga utilização industrial com pressões de trabalho perfeitamente toleráveis pela tecnologia disponível, já há muito tempo (BIZZO, 2013).

Toda indústria de processo químico tem vapor como principal fonte de aquecimento: reatores químicos, trocadores de calor, evaporadores, secadores e inúmeros processos e equipamentos térmicos. Mesmo outros setores industriais, como metalúrgico, metal mecânico, eletrônica, etc., podem se utilizar de vapor como fonte de aquecimentos de diversos processos (BIZZO, 2003).

Diante da grande aplicação dos geradores de vapor, justamente para o máximo aproveitamento energético é importante o estudo da eficiência desses equipamentos, buscando pontos de otimização dos parâmetros de combustão, como por exemplo: percentual de ar em excesso, percentual de CO<sub>2</sub> gerado na queima, temperatura dos gases, umidade do combustível, etc.

O presente trabalho fará um breve demonstrativo prático de um gerador de vapor real e as melhorias obtidas através de algumas intervenções feitas após a análise dos parâmetros causadores da baixa eficiência.

## 2. JUSTIFICATIVA

As indústrias modernas contam com geradores de vapor em grandes escalas para garantir o funcionamento sustentável dos seus processos, algo que também ocorre na Ambev do Maranhão. O vapor produzido pela casa de caldeiras alimenta toda a fábrica: processo de fervura da cerveja, aquecimento de soda cáustica para limpeza e esterilização das garrafas retornáveis, pasteurização da cerveja, esterilização de tubulações e equipamentos, entre outras atividades.

Em média a fábrica consome em torno de 20t/h de vapor, isso em demanda máxima a uma pressão de 8 kgf/cm<sup>2</sup>. Daí a necessidade de equipamentos confiáveis e eficientes, pois esta demanda reflete em grandes consumos de energia calorífica. Quando maior for a eficiência da caldeira durante o processo de geração de vapor, maior será a energia extraída do combustível, diminuindo o consumo e por consequência o custo empregado.

O trabalho aqui em questão demonstrará a análise e os resultados obtidos após as intervenções feitas na caldeira biomassa Aalborg FA-M-20, visto a melhoria de sua eficiência de combustão.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo Geral**

Demonstrar a análise e as melhorias apresentadas após as intervenções realizadas em uma caldeira industrial de modo a melhorar seu rendimento de combustão, ajustes de parâmetros na automação e regulagens, a fim de reduzir ao máximo a emissão de fumaça escura e melhoria da eficiência de combustão. Algumas limitações na automação e na parte mecânica impossibilitam alcançar melhores resultados tanto na redução da emissão de fumaça, quanto na melhoria da eficiência do equipamento.

#### **3.2. Objetivo Específico**

São objetivos específicos desta pesquisa os que seguem:

- Fazer a análise do antes e do depois da eficiência de combustão da caldeira;
- Mostrar as melhorias mecânicas e de automação realizadas na caldeira;
- Interligar as melhorias de eficiência obtidas as alterações feitas na caldeira;
- Demonstrar a melhoria na emissão dos gases resultantes da combustão.

#### 4. METODOLOGIA

O método de pesquisa utilizado neste trabalho será o “estudo de caso”, pois se trata de um estudo empírico aplicado especificamente dentro do de uma Casa de Vapor de uma Cervejaria real. Todos os dados e informações utilizadas para fundamentar este trabalho foram obtidos dentro da empresa, sendo boa parte referente extraída do banco de dados, pesquisas bibliográficas e levantamento de informações em campo.

Gil (1999) estabelece que o tipo de pesquisa para este método pode ser tanto exploratória quanto descritiva e explicativa. Neste caso a pesquisa teve foco explicativo. A pesquisa explicativa é aquela que tem como preocupação central identificar os fatos que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos (GIL, 1999). Sendo assim, essa pesquisa foi levantada através da identificação dos equipamentos críticos da linha de cerveja e das principais causas que contribuem para a ocorrência das falhas nesses equipamentos. Dessa forma, este trabalho é dividido em 5 etapas:

➤ **Etapa 1:** Referencia Bibliográfica.

Nesta etapa é realizada uma revisão bibliográfica o conceito de geradores de vapor, tipos de geradores, principais componentes e subconjuntos, estudo de métodos de cálculo der eficiência de combustão e mecanismos para aumento da eficiência.

➤ **Etapa 2:** Descrição do Gerador de Vapor

É feita uma breve abordagem sobre a empresa analisada, algo que já é pré-complementado na revisão bibliográfica, pois lá é mostrada a estrutura de uma caldeira genérica. É feita uma abordagem dos parâmetros de estudo.

➤ **Etapa 3:** Levantamento e análise dos dados de eficiência.

Nesta etapa é realizado o levantamento dos dados acerca do equipamento. O histórico dos parâmetros de eficiência da caldeira em estudo foi gerado entre



maio/2014 e julho/2015 em parceria com a empresa EFAI Automação Industrial, diante do qual estão registradas as propostas de melhorias e alterações a serem realizadas no equipamento.

➤ **Etapas 4:** Realização das alterações mecânicas e de automação na caldeira.

Após feita a análise dos parâmetros da caldeira, partiu-se então para a execução das alterações mecânicas e de automação a fim de melhorar a eficiência de combustão e emissão de fumaça escura da caldeira.

➤ **Etapas 5:** Conclusões e propostas de melhorias.

Demonstração dos resultados obtidos após as intervenções na caldeira, apontando as melhorias alcançadas e futuras ações a serem tomadas.

## 5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 5.1 Introdução aos Geradores de Vapor.

Segundo Torreira (1995) Gerador de vapor é um trocador de calor complexo que produz vapor de água sob pressões superiores a atmosfera a partir de energia térmica de um combustível e de um elemento comburente, ar, estando constituído por diversos equipamentos associados e perfeitamente integrados para permitir a obtenção do maior rendimento térmico possível. Esta definição abrange todos os tipos de geradores de vapor, sejam os que vaporizam água, vapor de óxido de difenil – vapor de água ou fluidos de alta temperatura, bem como as unidades mais simples de geração de vapor, comumente chamadas de caldeiras de vapor.

Ainda segundo Torreira (1995), na produção de energia mediante aplicação do calor que desprendem os combustíveis ao serem queimados nos geradores de vapor desenvolve-se o seguinte processo evolutivo: a água recebe calor através da superfície de aquecimento; com o aumento da temperatura é atingida a temperatura de ebulição, muda de estado transformando-se em vapor sob determinada pressão, superior a atmosférica, para uso externo. A potência calorífica do combustível converte-se assim em energia potencial no vapor, que por sua vez transforma-se em mecânica por meio de máquinas térmicas adequadas para a obtenção de energia elétrica, hidráulica ou pneumática.

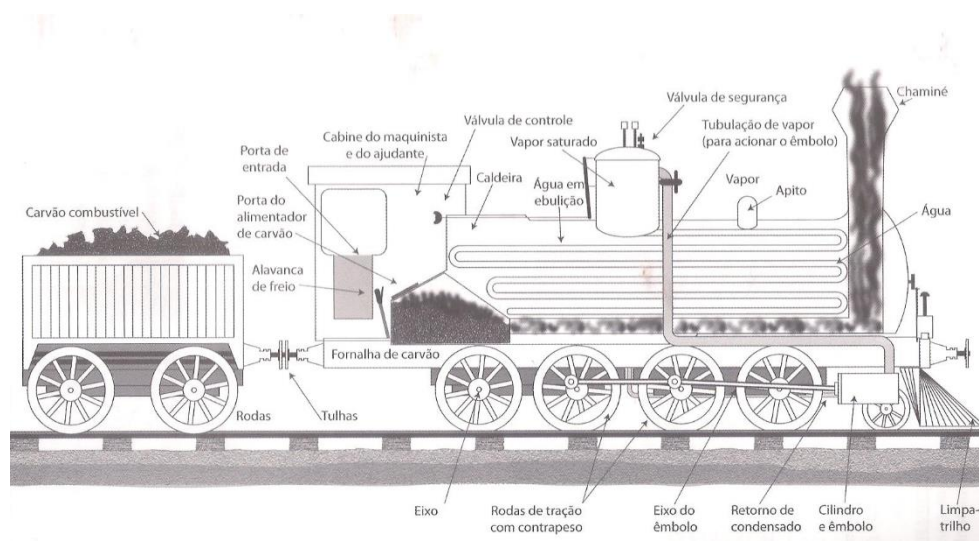


Figura (1) – Esquema de uma locomotiva movida a vapor. (Fonte: Botelho, 2013)

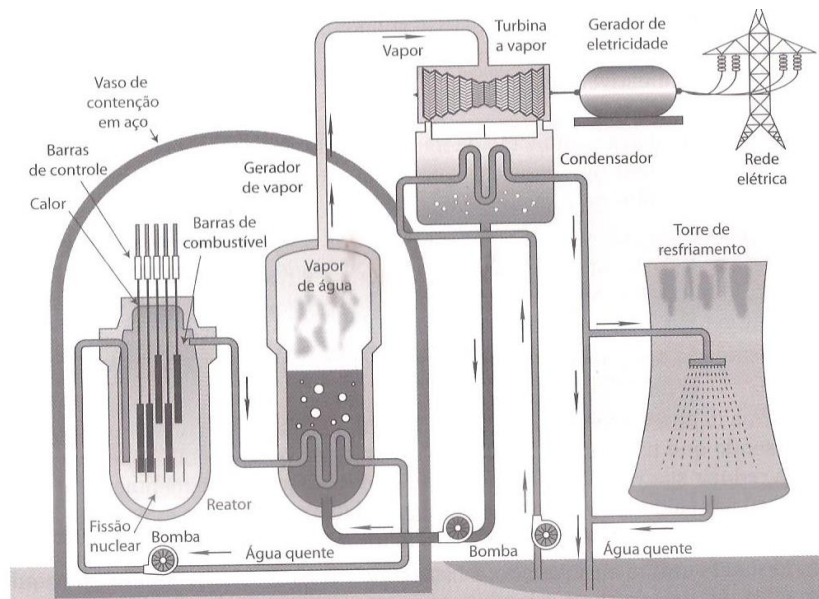


Figura (2) – Esquema simplificado de uma usina nuclear. (Fonte: Botelho, 2013)

## 5.2 Generalidades sobre Caldeiras.

Essencialmente o gerador de vapor conhecido como caldeira é um recipiente no qual a água é introduzida e pela aplicação de calor continuamente evaporada. Primeiramente montada sobre uma estrutura fechada de tijolos o combustível era queimado sobre uma grelha sistematizada no interior da estrutura supradita, sendo o calor direcionado diretamente para a parte interior do recipiente antes de sair em grande proporção para a atmosfera pelo tubo da chaminé (TORREIRA, 1995).

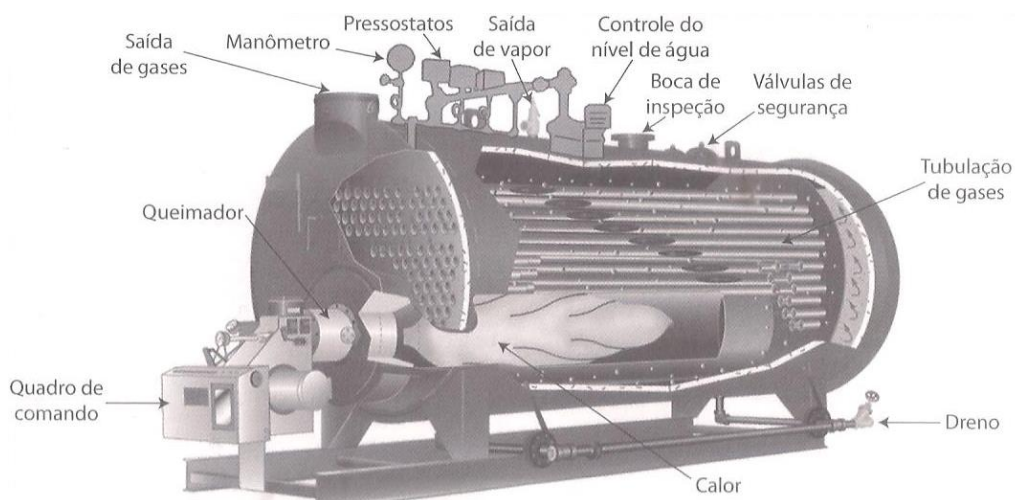


Figura (3) – Caldeira moderna de vapor e seus principais componentes. (Fonte: Botelho, 2013)

As primeiras aplicações práticas ou de caráter industrial de vapor surgiram por volta do século 17. O inglês Thomas Savery patenteou em 1698 um sistema de bombeamento de água utilizando vapor como força motriz. Em 1711, Newcomen desenvolveu outro equipamento com a mesma finalidade, aproveitando ideias de Denis Papin, um inventor francês. A caldeira de Newcomen era apenas um reservatório esférico, com aquecimento direto no fundo, também conhecida como caldeira de Haycock.

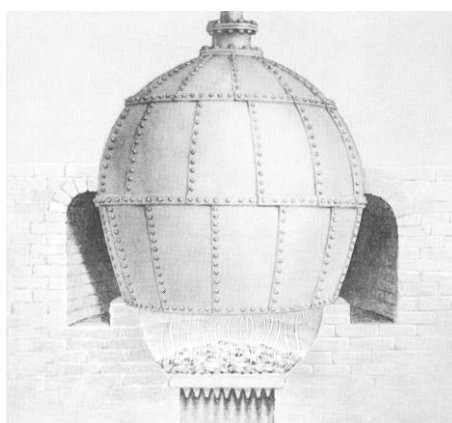


Figura (4) - Caldeira de Haycock, 1720. (Fonte: Bizzo, 2013).

James Watt modificou um pouco o formato em 1769, desenhando a caldeira Vagão, a precursora das caldeiras utilizadas em locomotivas a vapor. Apesar do grande desenvolvimento que Watt trouxe a utilização do vapor como força motriz, não acrescentou muito ao projeto de caldeiras. Todos estes modelos provocaram desastrosas explosões, devido a utilização de fogo direto e ao grande acúmulo de vapor no recipiente. A ruptura do vaso causava grande liberação de energia na forma de expansão do vapor contido.

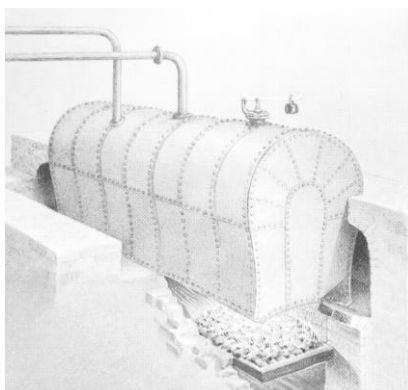


Figura (5) - Caldeira Vagão de James Watt, 1769. (Fonte: Bizzo, 2013).

Nos finais do século 18 e início do século 19 houveram os primeiros desenvolvimentos da caldeira com tubos de água. O modelo de John Stevens movimentou um barco a vapor no Rio Hudson. Stephen Wilcox, em 1856, projetou um gerador de vapor com tubos inclinados, e da associação com George Babcock tais caldeiras passaram a ser produzidas, com grande sucesso comercial. Em 1880, Alan Stirling desenvolveu uma caldeira de tubos curvados, cuja concepção básica é ainda hoje utilizada nas grandes caldeiras de tubos de água.

Qualquer que seja o tipo de caldeira considerado sempre estará composta por três partes essenciais que são: a fornalha ou câmara de combustão, a câmara de água e a câmara de vapor. Os condutores para descargas dos gases da chaminé não formam parte integral da caldeira; constituem construções independentes que são adicionadas ao corpo resistente da mesma, não estando expostas à pressão do vapor.

A fornalha ou câmara de combustão é a parte da caldeira onde se queima o combustível utilizado para a produção de vapor. Se for empregado carvão ou lenha, a fornalha compõe-se de grelhas sobre as quais este é queimado; de um espaço livre passa o desenvolvimento das chamas, denominado de câmara de combustão e finalmente de um espaço localizado embaixo das grelhas denominado depósito de cinzas pelo qual penetra o ar necessário à combustão.

Quando a caldeira queima combustíveis líquido, gases ou produtos pulverizados, suprimem-se as grelhas e o depósito de cinzas; neste caso, a fornalha está constituída por uma câmara no interior da qual, e mediante combustores ou queimadores é injetado o combustível gasoso, líquido ou pulverizado, que queima ao entrar em contato com o ar comburente que entra na fornalha através de portas especiais.

As câmaras de água e vapor constituem as superfícies internas da caldeira propriamente dita. Estão constituídas de recipiente metálicos herméticos de resistência adequada que adotam a forma de invólucros cilíndricos, coletores, tubos, etc., devidamente comunicados entre eles; na sua face interna contém a água a ser vaporizada, estando a quase totalidade da superfície externa em contato com as chamas ou gases da combustão. A parte inferior deste recipiente recebe o nome de

câmara de água; o espaço limitado entre a superfície da água e a parte superior denomina-se câmaras de vapor.

Por último, os condutores de fumaça e a chaminé, dispostos na parte final do percurso que seguem os gases no interior da caldeira, tem como objetivo conduzir para o exterior os produtos da combustão que transmitiram parte de seu calor para a água e vapor, através da superfície de aquecimento.

A chaminé tem também a função de aumentar a velocidade de descarga dos gases, produzindo uma tiragem natural que promove a entrada de ar à fornalha acelerando assim a combustão.

### 5.3 Classificação das Caldeiras.

Segundo Torreira (1995) a ideia de direcionar os produtos quentes da combustão através de tubos dispostos no interior da caldeira surgiu o projeto da caldeira denominada flamotubular que não somente aumenta a superfície de aquecimento exposta à água, como também produz uma distribuição mais uniforme do vapor em geração, através da massa de água. Em contraste com a ideia precedente, o projeto de caldeiras aquotubulares mostrou um ou mais coletores unidos por uma grande quantidade de tubos através dos quais circulava a mistura de água e vapor. O calor flui do exterior dos tubos para a mistura.

Esta subdivisão das partes sob pressão tornou possível a obtenção de grandes capacidades e altas pressões. Diante destes conceitos subdivididos os geradores em:

- Geradores flamotubulares;
- Geradores aquotubulares;

Nos geradores flamotubulares os gases de combustão circulam pelo interior dos tubos vaporizadores que se encontram submersos na água do gerador, no entanto que no segundo grupo considerado a água e o vapor circulam pelo interior dos tubos mencionados, cuja superfície externa está em contato com os gases.

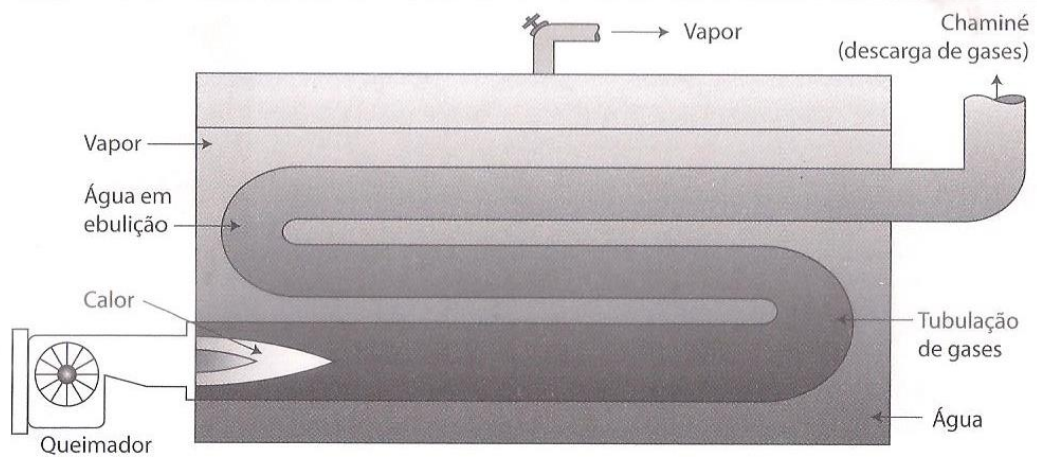


Figura (6) – Gerador de Vapor Flamotubular. (Fonte: Botelho, 2013)

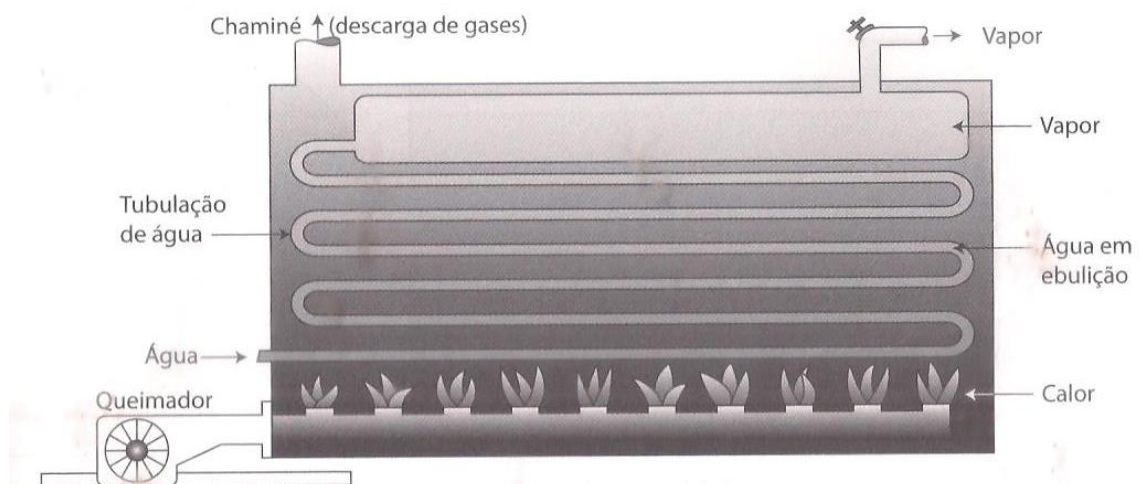


Figura (7) – Gerador de Vapor Aquotubular. (Fonte: Botelho, 2013)

De acordo com a disposição dos tubos podem ser:

- Horizontais;
- Verticais.



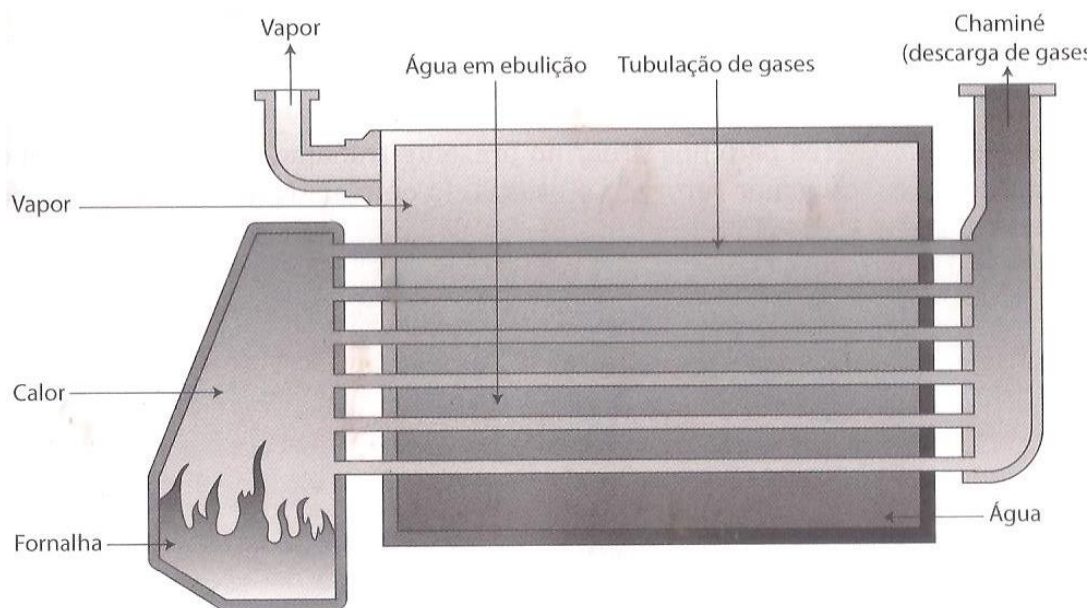


Figura (8) – Esquema básico de uma caldeira horizontal. (Fonte: Botelho, 2013)

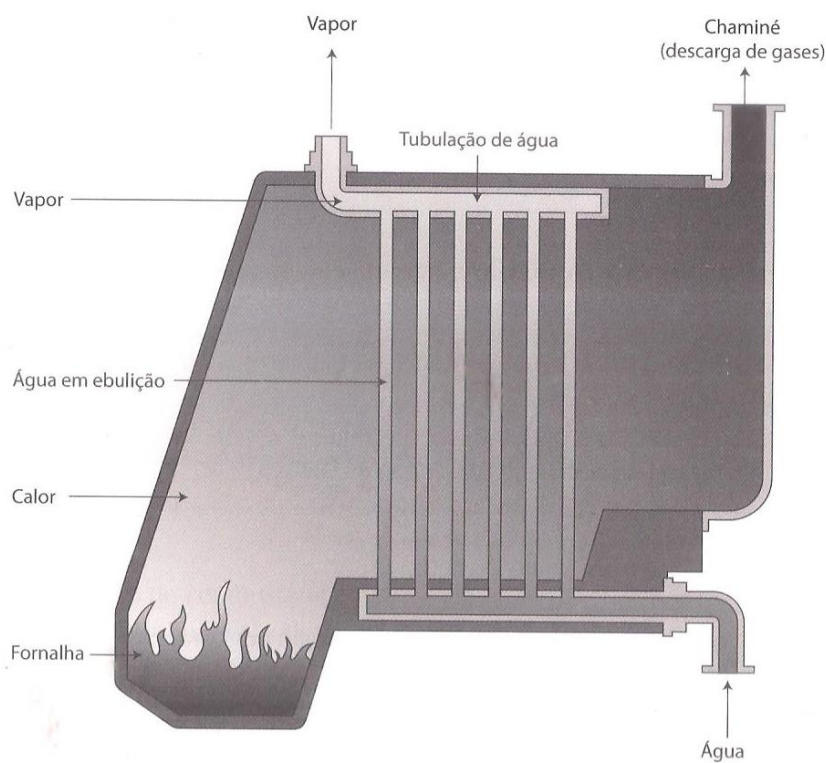


Figura (9) – Esquema básico de uma caldeira vertical. (Fonte: Botelho, 2013)

Segundo a NR13 as caldeiras são divididas em:

- Categoria A;



- Categoria B;
- Categoria C.

A tabela (1) mostra com detalhes o critério desta classificação.

Tabela (1) – Classificação das caldeiras segundo a NR13. (Adaptado de Botelho, 2013)

<b>Tabela de categoria de Caldeiras segundo a NR13</b>		
<b>Categoria A</b>	<b>Categoria B</b>	<b>Categoria C</b>
Pressão interna maior que 19,98 kgf/cm <sup>2</sup>	Não se enquadram em A ou C, são as mais comuns.	Pressão interna menos que 5,99 kgf/cm <sup>2</sup> e volume menor que 100 litros.

Quanto ao vapor produzido são classificadas em:

- Caldeiras de vapor saturado;
- Caldeiras de vapor seco.

No caso do vapor seco, as caldeiras possuem superaquecedores que desumificam o vapor saturado, tornando-o seco e invisível, elevando sua temperatura a cerca de 400 °C.

Conforme sua localização e transporte classificam-se em:

- Estacionárias;
- Locomóveis;
- Navais.

#### 5.4 Geradores Flamotubulares

As caldeiras deste tipo ou simplesmente tubulares, contém a água no interior de um invólucro dentro do qual encontram-se também as fornalhas e câmaras de combustão, e os tubos vaporizadores no interior dos quais circulam os gases da combustão no seu percurso até a chaminé. Conforme o sentido da direção dos gases

no interior dos geradores ou caldeiras como a partir de agora serão denominados; estes equipamentos poderão ser classificados em:

- Geradores de chama de retorno de simples ou dupla frente;
- Geradores de chama direta.

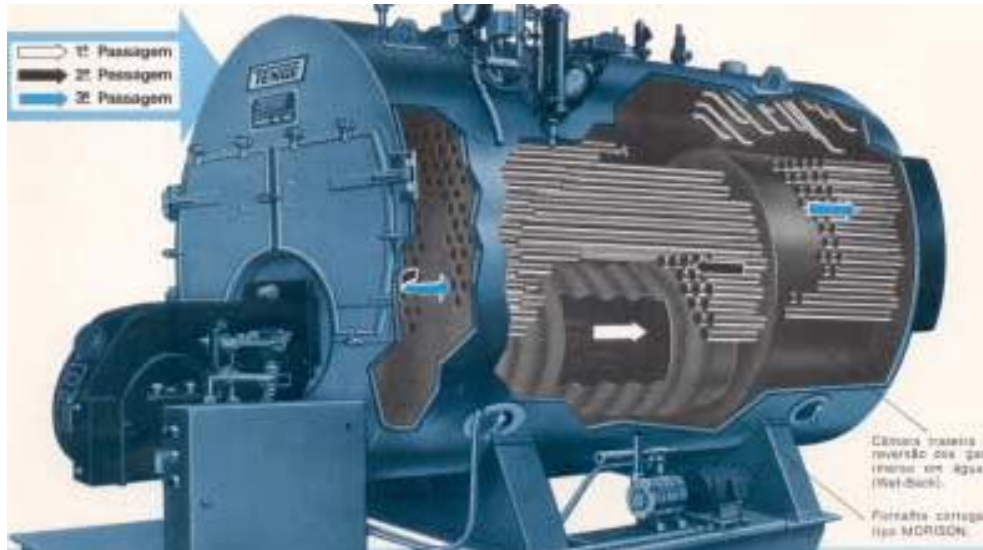


Figura (10) – Caldeira flamotubular de múltiplo passe de gases (Adaptado de Bizzo, 2003).

No primeiro tipo, os gases da combustão circulam em um sentido através das fornalhas e câmaras de combustão, e no sentido oposto pelo interior dos tubos no sentido dos condutos de fumaça e chaminé. No segundo dos tipos acima mencionados, os gases percorrem um caminho direto desde a fornalha até os condutos de fumaça para finalmente chegar até a chaminé. Em todas estas caldeiras as fornalhas, as câmaras de combustão e os tubos estão submersos na água contida no interior do invólucro, isto é, encontram-se submetidos a pressão do vapor da caldeira.

## 5.5 Geradores Aquotubulares

O emprego deste tipo gerador resulta inevitável quando necessária a obtenção de grandes capacidades e elevadas pressões de vapor. Devido à subdivisão interna destes geradores, em coletores e tubos de pequeno diâmetro, podem ser

constituídos com chapas de pouca espessura, resultando aptas para suportar altas pressões.

Devido a sua forma a quantidade de água que contém é relativamente pequena; permitem desenvolver em um reduzido volume uma grande superfície de aquecimento e dispô-la de forma conveniente para a melhor transmissão de calor, volta de uma ampla câmara de combustão, independente da estrutura resistente do gerador.

Pelos motivos expostos, a vaporização específica deste tipo de gerador é muito superior ao que pode ser obtido nos flamotubulares, sendo portanto seu peso para igual potência, consideravelmente menor.

De acordo ao sistema de circulação interna da água os geradores podem ser classificados em:

- Geradores de circulação natural;
- Geradores de circulação forçada.

No primeiro caso a circulação interna é natural e provocada pelas correntes de convecção que se estabelecem por diferença térmica, sendo no ultimo essa circulação obtida artificialmente, por meios mecânicos externos (bombas).

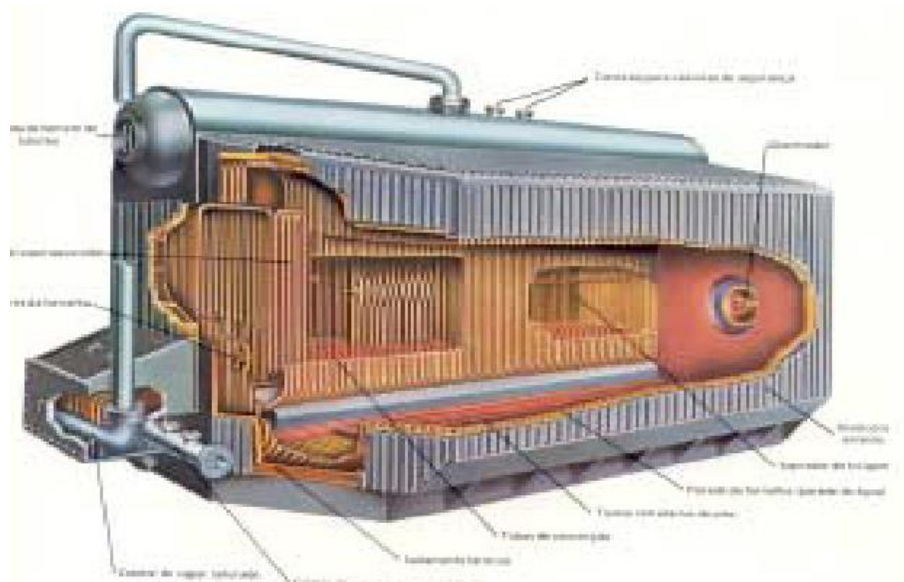


Figura (11) – Caldeira Aquotubular com a fornalha em corte. (Adaptado de Bizzo, 2003).

## 5.6 Comparativo entre geradores flamotubulares e aquotubulares

As caldeiras aquotubulares permitem desenvolver graus de combustão muito superiores aos obtidos nas flamotubulares pelo fato da fornalha não formar parte integral da caldeira. Desta forma podem ser constituídas câmaras de combustão amplas especialmente apropriadas para queima de combustível. Além do exposto e como devido à disposição da superfície de aquecimento, grande parte do calor desprendido pelo combustível transmite-se por radiação, poderá ser obtida uma elevada vaporização específica.

Na tabela (2) só reproduzida com fins comparativos podem ser observados dados sobre graus de combustão e vaporização de caldeiras flamotubulares e aquotubulares.

Tabela (2) – Comparativo entre o grau de combustão e vaporização específica das caldeiras flamotubulares e aquotubulares. (Adaptado de Torreiro, 1995).

Tipo de Caldeira	Grau de Combustão			Vaporização Específica		
	Carvão	Petróleo		Carvão	Petróleo	
	Kg/m <sup>2</sup> hG	Kg/m <sup>2</sup> hV	Kg/m <sup>2</sup> hV	Kg/m <sup>2</sup> G	Kg/m <sup>2</sup> hV	Kg/m <sup>2</sup> hV
Flamotubulares	120 - 180	1,5 – 2,5	-	1100 a 1400	30 – 35	30 - 35
Aquotubulares	250 - 400	5 - 8	150 - 200	1800 a 3300	30–35	70-100

Da tabela acima deduz-se que as caldeiras aquotubulares possuem maior vaporização específica que as flamotubulares o que pode ser obtida uma elevada capacidade (peso de vapor/hora) com caldeiras de pouco peso e volume.

Em resumo tem-se listado abaixo as vantagens de uso das caldeiras aquotubulares em relação as flamotubulares:

- a) maior grau de combustão e vaporização específica;
- b) menor peso e ocupam menor volume;
- c) maior pressão de trabalho: flamotubulares não ultrapassam 25 kg/cm<sup>2</sup>.

- d) menor tempo necessário para atingir a pressão de operação;
  - e) maior rendimento térmico devido melhor disposição da superfície de aquecimento.
- Aquotubulares (entre 80% e 85%), flamotubulares (não superam os 78%).

#### 5.7. Elementos que caracterizam os geradores de vapor

Segundo Torreiro (1995), os elementos que caracterizam os geradores e em forma geral qualquer aparelho de vaporização, são os seguintes:

1. Máxima pressão de trabalho admissível (PMPT) – é o valor permitido durante o funcionamento normal do gerador, para a pressão efetiva do vapor, medida em determinado ponto, definido pelo código adotado na sua construção pelas regras da boa técnica. Com o intuito de evitar que este valor possa ser ultrapassado são colocados dispositivos automáticos de descarga de vapor em excesso, denominados de válvulas de segurança.
2. Pressão de prova (PTH) - é a pressão de ensaio hidrostático a que deve ser submetido o gerador.
3. Capacidade de evaporação ou potência do gerador é o peso de vapor que é capaz de produzir em uma hora. Na atualidade é normal expressar a medida de capacidade de um gerador como inicialmente estabelecido em kg/h ou mesmo em ton/h.
4. A produção normal de vapor define a quantidade de vapor capaz de ser gerado por uma caldeira em condições de pressão de regime, temperaturas e eficiência garantidas pelo fabricante. A produção de picos corresponde à maior descarga de vapor, em determinados períodos de tempo, capaz de ser obtido no mesmo gerador.
5. Superfície de aquecimento ou calefação é a que compreende as partes metálicas que se encontram em contato, por uma das suas faces com a água e vapor da caldeira e pela oposta com os produtos da combustão. A medição desta superfície efetua-se pelo lado exposto às chamas e gases. A superfície sempre é definida em m<sup>2</sup>.

6. Superfície das grelhas ou volume de fornalha nas caldeiras que queimam carvão ou petróleo respectivamente. Este elemento determina conjuntamente com o anterior a potência da caldeira, ou seja, a capacidade de produzir num tempo dado um peso de vapor tanto maior quanto mais elevados seja seus valores.
7. Além das características principais supra mencionadas caracterizam-se também as caldeiras por seu peso, superfície dos superaquecedores de vapor, economizadores de água de alimentação, aquecedores de ar, volumes das câmeras de água e vapor, etc. Outras considerações adicionais a serem observadas na ocasião da seleção de um gerador poderão incluir:
  - tipo de combustível e características;
  - equipamentos de combustão;
  - pressão e temperatura do vapor;
  - variação da demanda de vapor;
  - eficiência térmica desejável;
  - custo de instalação, operação e manutenção;
  - espaço necessário e/ ou disponível;
  - amortização do investimento;

#### 5.8. Condições que devem possuir os geradores

Toda caldeira deve apresentar, em sua superfície externa e bem visível, placa de identificação com, no mínimo, as seguintes informações:

- número do fabricante;
- número de registro do fabricante;
- número da caldeira;
- ano de fabricação;
- máxima pressão de trabalho admissível – PMPT/  $\text{cm}^2$ );

- Pressão de prova hidrostática (Kgf/h ou t/h);
- Capacidade de produção de vapor (kg/h ou t/h);
- Área da superfície de aquecimento (m<sup>2</sup>).

Toda empresa que possui caldeira deve manter um prontuário atualizado, com documentação original do fabricante, abrangendo, no mínimo, especificações técnicas, desenhos detalhados, tipo de revestimento, provas ou testes realizados durante a fabricação e montagem, características funcionais, e a fixação da respectiva, PMPT além de laudos de ocorrências diversas, que constituirá o histórico da vida útil da caldeira.

## 5.9. Rendimento de uma Caldeira

De uma maneira bem geral, o rendimento percentual de uma caldeira  $\eta_k$  pode ser obtido pela relação entre o calor útil transmitido e o calor aduzido, onde ao calor útil se devem acrescentar, para efeitos de cálculo, além do calor do combustível também os calores externos, como por exemplo, o calor do ar do preaquecedor de ar e vapor, o calor percentual dos combustíveis, e o equivalente da potência de acionamento, entre outros. A equação (1) transmite isso de forma simplificada:

$$(1) \quad \eta_k = \frac{Q_e}{B_0 \cdot H_u} \cdot 100$$

Onde:

$\eta_k$  = rendimento da caldeira;

$Q_e$  = total de calor gerado pela caldeira;

$B_0$  = quantidade de combustível admitida;

$H_u$  = calor aduzido por kg de combustível.

## **6. ESTUDO DE CASO**

### **6.1. Considerações Iniciais**

Antes de tudo, o presente trabalho espelha os resultados de análise e parecer realizados em recipientes sob pressão em cumprimento a Norma Regulamentadora NR-13 aprovada pela Portaria nº 23 de 27.12.94 do Ministério do Trabalho, conforme CONFEA: Lei nº 5.194 de 24/12/1966 e conforme CLT: ART 188. A inspeção periódica objetiva verificar as condições operacionais de segurança em equipamentos sob regime de trabalho contínuo desde 07/86. Antes e durante essa inspeção foram executados os seguintes serviços para garantir uma maior segurança, eficiência e operacionalidade da caldeira:

1. Despressurização da caldeira, resfriamento e abertura das portas frontais, portas de inspeção superior e das portas de acesso a fornalha e tubos para inspeção;
2. Realizado processo de soldagem com tamponamento em dois tubos verticais da parte frontal da fornalha;
3. Inspeção e manutenção no quadro de comando da caldeira;
4. Fechamento das portas de inspeção e portas de acesso à fornalha;
5. Acendimento e pressurização da caldeira;
6. Verificado acionamento das bombas de alimentação de água da caldeira com descarga de fundo da caldeira e garrafa de nível;
7. Verificado calibração de abertura das válvulas de segurança nas pressões de ajuste;
8. Realização de testes complementares de segurança na coluna de nível da água, pressostato de alta pressão e verificação de funcionamento dos exaustores e ventiladores;
9. Elevação da pressão do vapor até abertura das válvulas de segurança na pressão de ajuste;



10. Teste de acumulação das válvulas de segurança;
11. Verificação do fechamento das válvulas de segurança;
12. Verificação de saída dos gases na chaminé;
13. Teste do sistema de dampers e ventilador;
14. Verificação dos parâmetros operacionais no painel eletrônico do quadro elétrico da caldeira;
15. Colocação da caldeira em linha de operação.

Tendo em vista as análises dos resultados alcançados nos exames, testes e ensaios, julgado o recipiente sob pressão – CALDEIRA MISTA, Horizontal, Marca AALBORG INDUSTRIES S/A, fabricado por AALBORG INDUSTRIES S/A. Equipamento de ano de fabricação 2008, de propriedade da AMBEV SA, localizada na Av. Eng. Emiliano Macieira, 16, km 16,5, – bairro Pedrinhas, CEP: 65.095-603; São Luís - MA, apto a operação normal na PMTA de 11,95 kgf/cm<sup>2</sup>. As figuras (14) e (15) ilustram a casa de caldeiras da unidade, que é composta por duas caldeiras modelo ATA-MP-815 e uma AABORG FA-M-20.



Figura (12) – Vista superior Filial Equatorial – AmBev. (Google Maps, 2015)



Figura (13) – Casa de caldeiras. (Fonte: autor)

O objeto de estudo deste trabalho é o gerador de vapor modelo FA-M-20 AALBORG, que usa biomassa como combustível, para ser mais preciso babaçu, conforme a figura (16).



Figura (14) – Caldeira FA-M-20. (Fonte: autor)

Abaixo mais informações do equipamento:

- Gerador de Vapor – Classe B;
- Caldeira FA-M-20;
- Número de Ordem: 10874.

Placa de identificação:

- Nome do fabricante: AALBORG INDUSTRIES S/A.
- Endereço do fabricante: Rua Divino Espírito Santo, 1100, Carangola – RJ.
- Ano de fabricação: 2008;
- Ordem de fabricação: 10874;
- Pressão PMTA: 11,95 kgf/cm<sup>2</sup> (170 psig);
- Pressão PTH: 17,93 kgf/cm<sup>2</sup>;
- Área da superfície de Vaporização: 686 m<sup>2</sup>;
- Capacidade de produção de vapor: 20.000 Kgv/h;
- Tipo de caldeira: Ambitubular.

Abaixo a foto da placa de identificação:



Figura (15) - Placa de Identificação da Caldeira. (Fonte: autor).

Outras características:

- Tipo: Mista.
- Modelo: Horizontal.
- Código de projeto: ASME I, 2007.

- Inspecionado: TRD 305.
- Código de projeto/Ano: ASME: I/2007
- FURNALHA
- AQUATUBULAR, TUBOS DE AÇO ASTM – 178 – C

#### Tipo de caldeira:

- Denominação: GERADOR DE VAPOR HORIZONTAL AQUATUBULAR.
- Características da superfície: CHAPA DE AÇO ASTM – 285 – C
- Construção: Soldada.
- Extremidades fechadas por: espelhos.
- Tubos de gases: Diâmetro: 2”; espessura da parede: 3,0 mm.
- Material dos tubos: Aço ASTM – A – 178.
- Combustível utilizado: Biomassa
- Poder calorífico inferior da casca de babaçu: 4.500 kcal/kg.
- Características da fornalha: Tiragem Forçada.

#### Fornalha:

- Aquotubular, tubos de aço ASTM – 178 – C

#### Acessórios existentes:

- Garrafa de nível de água
- Indicadores de nível de água: 02(Dois) com visor de vidro plano de 1/2”, acoplado com 05 eletrodos de nível.
- Torneiras de prova: 01 (UMA) em cada descarga da garrafa de nível.

#### Manômetro:

- Manômetro de pressão de vapor: 01 (UM)
- Descrição do manômetro:
- Marca: WILLY;
- Diâmetro: 200 mm;
- Escala: (0 – 20kg/cm<sup>2</sup> e de 0 a 300 psi).



Figura (16) – Manômetro de vapor da caldeira. (Fonte: autor)

## 6.2. Levantamentos e Análises

A primeira etapa foi a realização das medições de gases na caldeira biomassa da unidade, com o objetivo mencionar os itens de melhorias que podem ser feitos na caldeira, relacionados a automação e sistema de queima, a fim de realizar um trabalho visando a melhoria de eficiência e melhoria das condições operacionais.

Foram realizadas medições dos gases de saída da caldeira com equipamento marca TESTO. Analisando os dados observou-se que existem variações dos valores de oxigênio. Abaixo o gráfico com as medições de oxigênio, onde pode ser visto em linhas vermelhas os pontos máximos e mínimos ideais para se obter a maior eficiência de combustão da caldeira, que estaria em torno de 87,0%. Em azul os valores medidos de oxigênio, e os valores calculados de eficiência da combustão. A partir destas medições pode se observar que temos uma variação de eficiência da combustão calculada entre 72,8% a 84,1% (valores referentes a medição realizada em 11/11/2014). Para o cálculo da eficiência de combustão usou a seguinte expressão:

Equação (2): 
$$\text{Eff} = 100 - \{V \times [(T_a - T_s) / (21 - O_2)]\}$$

Onde:

Eff = Eficiência de combustão (%)

V = Fator de acordo com tipo de combustível e umidade (1,03, no caso do babaçu)

Ts = Temperatura de saída dos gases (°C)

Ta = Temperatura ambiente (°C)

O<sub>2</sub> = percentual de oxigênio.

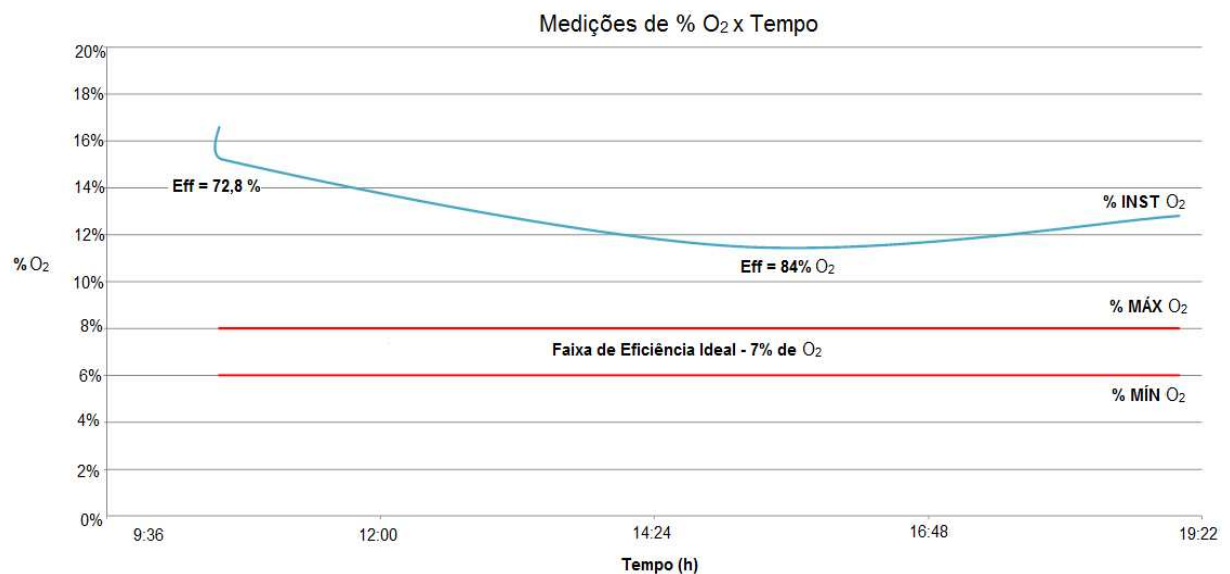


Figura (17) – Gráfico da variação do percentual de O<sub>2</sub> ao longo do tempo. (Fonte: autor)



Figura (18) – Aparelho Testo 327-1 utilizado na medição dos gases de combustão. (Fonte: autor)



Em inspeção realizada com o equipamento fora de operação foram identificados vazamentos de ar entre os estágios e baixa vedação da grelha. Com a caldeira em operação realizamos ajustes de parâmetros na automação e ajustes na combustão a fim de reduzir ao máximo a emissão de fumaça. Algumas limitações na automação e na parte mecânica impossibilitam alcançarmos melhores resultados tanto na redução da emissão de fumaça, quanto na melhoria da eficiência do equipamento. O próprio desgaste do equipamento limita as ações de melhoria de eficiência. Para isso abaixo estão listados os itens que devem ser melhorados na caldeira para que sejam atingidos os objetivos. Estes itens estão divididos em duas partes, Automação e Mecânica:

#### 1) Melhorias na Automação

- a. Alterar a lógica da automação com o objetivo de deixar a operação da caldeira mais robusta. Alguns exemplos de problemas que dificultam a operação da caldeira: a caldeira só liga se houver pressão interna. E em casos onde sejam necessários fazer paradas programadas para manutenção a caldeira possui dificuldade de inicializar a operação.
- b. A automação dos acionamentos das grelhas devem ser feitas por pulso intermitentes de acionamento (PWM - PULSE WIDTH MODULATION) e não por inversor de frequência. Pois hoje os motores das grelhas estão operando com frequências muito baixas, menores do que 5 Hz.
- c. Reparametrizar os inversores de frequência.
- d. Revisar o comando de acionamento das roscas de combustível, pois estão operando com frequências muito baixas, entre 4 a 8 Hz.
- e. Refazer a lógica de medição de vapor. Hoje a caldeira está medindo vazão de vapor mesmo estando desligada ou indicando 24t/h aleatoriamente.
- f. Melhorar a lógica de comando da grelha 2, pois a mesma não obedece corretamente os comandos da malha de controle de combustão
- g. Melhorar todas as malhas de controle, especialmente a malha de controle de combustão, que hoje está operando com 2 elementos: pressão de vapor e vazão de

vapor. Porém a influência da vazão de vapor está exagerada, causando distúrbios no controle e causando a saída de fumaça preta pela chaminé.

h. Instalar um analisador e controlador de oxigênio para medir e controlar a injeção de ar e combustível da caldeira. Consequentemente o sistema de ar secundário passará a ter papel importante no controle da combustão.

## 2) Melhorias Mecânicas

a. Deverá ser feito uma revitalização no redler de retirada de cinza para evitar a entrada de ar falso que existe.

b. Refazer todo o sistema de ar primário, melhorando a distribuição de ar em baixo da grelha. Atualmente existem muitas entradas de ar indesejadas, prejudicando a combustão. Por isso deverá ser feito novos dutos de ar primário com possibilidades de ajustes de fluxo.

c. Refazer todo o sistema de ar secundário com a instalação de novos bicos de ar secundário. Pois atualmente a localização e distribuição destes bicos não tem efeito nenhum sob a combustão, entrando apenas como excesso de ar, prejudicando a eficiência da caldeira.

d. Eliminar entradas de ar falso por baixo do grelhado e na caixa de ar.

Em novas medições realizadas em 25/02/2015 a caldeira apresentou uma emissão de CO<sub>2</sub> entre 5% a 6,5% (este número representa uma eficiência de combustão muito baixa). Esta baixa emissão de CO<sub>2</sub> está relacionada à entrada de ar falso que existe na caixa de ar da grelha e na caixa de cinzas da grelha. Como a entrada de ar é excessiva em baixo da grelha, a combustão fica muito diluída por oxigênio. O excesso de ar ideal para este tipo de equipamento seria na ordem de 60% e atualmente este número chega a 320%. Percebe-se que as dificuldades encontradas para fazer a regulagem do equipamento estão sendo maiores a cada vez que fazemos os ajustes no equipamento. A tendência é que com o passar do tempo os desgastes irão aumentar e se tornar cada vez mais difícil o acerto dos parâmetros.

A eficiência ideal da caldeira deveria ser de 85% porém atualmente, devido a entrada de ar falso, a eficiência calculada está na ordem de 65-70%. Devido a inexistência de um ar secundário eficiente no equipamento, não é possível queimar



os voláteis incombustos, principalmente o monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos. E, por isso, quando diminui a entrada de ar primário, a fumaça escura começa a aparecer cada vez mais intensa. Portanto, deve-se instalar um sistema de ar secundário, utilizando o ventilador de ar existente, capaz de queimar estes incombustos. Atualmente a emissão de CO chega a valores acima de 3.000ppm com CO<sub>2</sub> de 6,5%. Significa que: se diminuir o CO<sub>2</sub> (através da eliminação de ar falso) irá aumentar a emissão de CO (monóxido de carbono).

A máxima emissão atmosférica permitida pelo CONAMA para este tamanho de equipamento é de 1.000ppm. Atualmente a biomassa fica estocada ao tempo, sujeita a intempéries climáticas. Certa época do ano chove muito em São Luís, isto faz com que a biomassa absorva muita água e isto acaba atrapalhando a combustão, através da diminuição do PCI (Poder Calorífico Inferior). Levantamentos prévios que fizemos, a biomassa chega a diminuir cerca de 10-15% do seu PCI somente através do acúmulo de água da chuva. Uma medida importante é a construção de um galpão de estocagem para proteger esta biomassa das intempéries climáticas.

Acredita-se, se forem feitas as devidas melhorias na automação e também as melhorias mecânicas acima citadas, a caldeira poderá atingir níveis de excessos de ar na faixa de 50-70%, resultando em um CO<sub>2</sub> na faixa de 12-13%. Esta melhoria tem como consequência o aumento da eficiência para 85% através da redução do desperdício térmico e através do controle de combustão. Isto representa uma melhoria de 15% de eficiência.

### 6.3. Execução do Plano de Ação – Melhorias Mecânicas

#### 6.3.1. Revitalização do Sistema de Ar Primário e Instalação dos Dampers

Foram modificados e instalados dampers ao longo do grelhado de forma a ter maior controle do fluxo de ar primário, sendo possível alcançar os pontos de baixa concentração de também evitar o excesso de O<sub>2</sub> a medida que o combustível desce pelas gralhas. A função dos dampers é justamente direcionar e controlar o fluxo de ar que chega ao grelhado. Foram eliminadas as entradas de ar falso. O ar entra por baixo

do grelhado mas antes disso passa com uma caixa de ar e entra em contato com os tubos de água da caldeira. Os tubos durante o processo de pleno funcionamento da caldeira estão aquecidos com água em torno de 100°C, trocando calor com o ar primário e aquecendo o mesmo, que chega a atingir em torno de 70°C. Dessa forma o ar entra na fornalha pré-aquecido, facilitando a reação de combustão.



Figura (19) – Configuração do sistema de ar primário da caldeira biomassa. (Fonte: autor).

### 6.3.2. Instalação do Novo Sistema de Ar Secundário e Dampers.

Da mesma forma que no sistema de ar primário, foram instalados dampers para o controle do fluxo de ar secundário. Este ar igualmente ao ar primário irá reagir com o combustível, porém em uma etapa posterior a queima. Após a queima do combustível sólido parte do carbono desprendido reage com o  $O_2$  (gás oxigênio) formando  $CO_2$  (dióxido de carbono), porém uma parcela desse carbono é despendida junto aos produtos da queima na forma de  $CO$  (monóxido de carbono), o que resulta em uma queima incompleta.

É justamente aí onde está a oportunidade de extrair mais energia do combustível, injetando-se ar em pontos estratégicos (acima da chama), aproveitando a alta temperatura na qual se encontra o CO e garantindo sua reação com o O<sub>2</sub> proveniente do ar secundário, e gerando percentual satisfatório de CO<sub>2</sub> nos gases de combustão.



Figura (20) – Nova configuração do sistema de ar secundário da caldeira. (Fonte: autor).



### 6.3.3. Revitalização dos tubos do sistema flamotubular.

Outro problema enfrentado pela caldeira era o alto nível de corrosão no qual já se encontravam seus tubos do sistema flamotubular, visto a grande perda na espessura da parede dos tubos e presença de furos, causando problemas de inundação e perda de rendimento. Por esses tubos circulam os gases da queima.

Foram trocados 100% dos tubos vaporizadores, proporcionando um aumento da vida útil da caldeira e evitando problemas futuros de corrosão precoce e desgaste das partes metálicas.



Figura (21) – Tubos vaporizadores corroídos, retirados da caldeira para substituição (Fonte: autor).

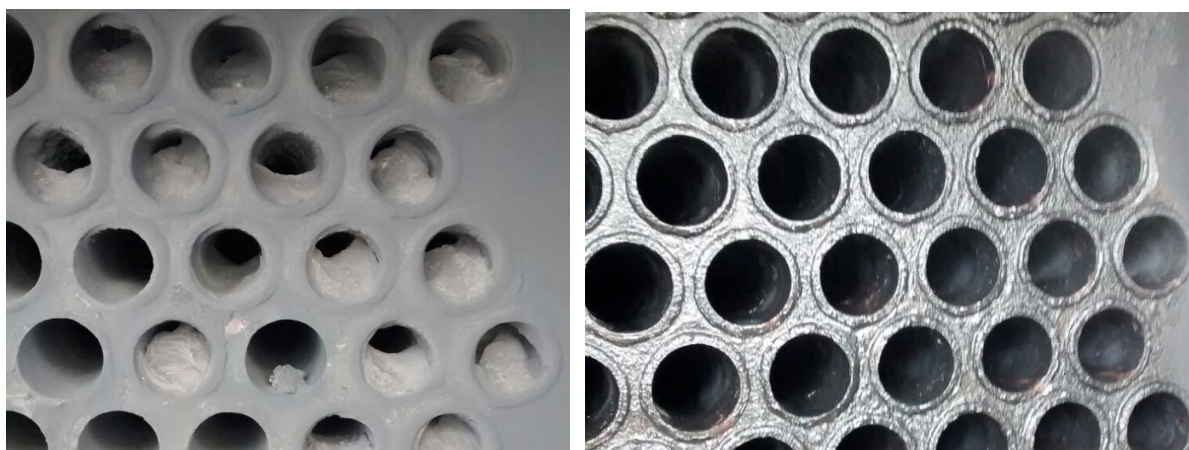


Figura (22) – Antes e depois da parede frontal dos tubos após manutenção. (Fonte: autor).

#### 6.3.4. Tamponamento dos tubos furados do sistema aquotubular.

Na parte aquotubular, os tubos constituem a parte mais exposta, pois estão em contato direto com as altas temperaturas da fornalha, sendo necessário apresentarem maior resistência que as tubulares devido as severas condições de operação (próximo dos 900°C).

Logo, estes tubos estão mais sujeitos ao desgaste por perda de propriedades mecânicas, daí a importância de garantir os níveis ideais e circulação de água para evitar pontos de superaquecimento dos tubos. Esse desgaste é evitado através de uma troca térmica eficiente com a água.

Foi necessário realiza a tamponagem de três tubos da parede aquotubular pois apresentavam vazamento de água e foram condenados por perda de espessura através de ensaio de ultrassom. O procedimento de tamponagem está detalhado na figura (23). Os tubos foram isolados próximo ao coletor principal.



Figura (23) – Tamponagem dos tubos comprometidos da caldeira. (Fonte: autor).

#### 6.3.5. Revitalização do sistema de extração de cinzas e redler.

Foram substituídos todos os parafusos (M10x 40mm) e porcas (sextavada M10 auto-travante) e recolocados os raspadores faltantes. Revitalizado o sistema de esticador. Com isso espera-se obter melhor taxa de retirada de cinzas e diminuição dos travamentos do redler, mantendo um fluxo contínuo de extração.

O próprio desgaste natural exigiu a necessidade de manutenção do sistema de extração, visto a quantidade enorme de raspadores soltos ou com os parafusos de fixação comprometidos. O constante travamento e deslize da corrente dos raspadores foi tratado com a reforma do esticador, visto que o mesmo já não exercia sua função.



Figura (24) – Reforma do extrator de cinzas e redler. (Fonte: autor)

#### 6.3.6. Reforma do refratário

Através de inspeção, decidiu-se trocar parte dos refratários da caldeira. Principalmente na parede traseira e caixa de cinzas da grelha, pois os mesmos encontravam-se bastante avariados e não proporcionavam mais o isolamento térmico adequado. A figura (27) mostra o estado do refratário retirado.





Figura (25) – Refratário substituído do interior da parede traseira (Fonte: autor)

#### 6.4. Execução do Plano de Ação – Melhorias de Automação

##### 6.4.1. Instalação de um analisador/controlador injeção de oxigênio

Este instrumento é de tecnologia EFAI e funciona com o intuito de controlar a injeção de ar e combustível da caldeira através da análise do percentual de oxigênio em excesso medido nos gases de combustão. Consequentemente o sistema de ar secundário passará a ter papel importante na combustão. Busca-se com esse controlador aumentar a eficiência da queima.



Figura (26) – Analisador/controlador de injeção de  $O_2$  no coletor de gases. (Fonte: autor).

#### 6.4.2. Melhoria na interpretação e confiabilidade na interface homem-máquina.

Foram estabelecidos e calibrados no controlador da caldeira os valores-alvo dos parâmetros de medição (setpoints), de forma a otimizar o desempenho e controle do equipamento, conforme mostra a figura (29). Seguem abaixo alguns parâmetros de controle e seus setpoints:

- Controle do O<sub>2</sub>: 7%;
- Controle de Pressão de Vapor: 9 kgf/cm<sup>2</sup>;
- Controle do Nível do Tubulão de água: 70%;
- Controle de Depressão na Fornalha: - 5 mm H<sub>2</sub>O,



Figura (27) – Interface homem-máquina. (Fonte: autor).



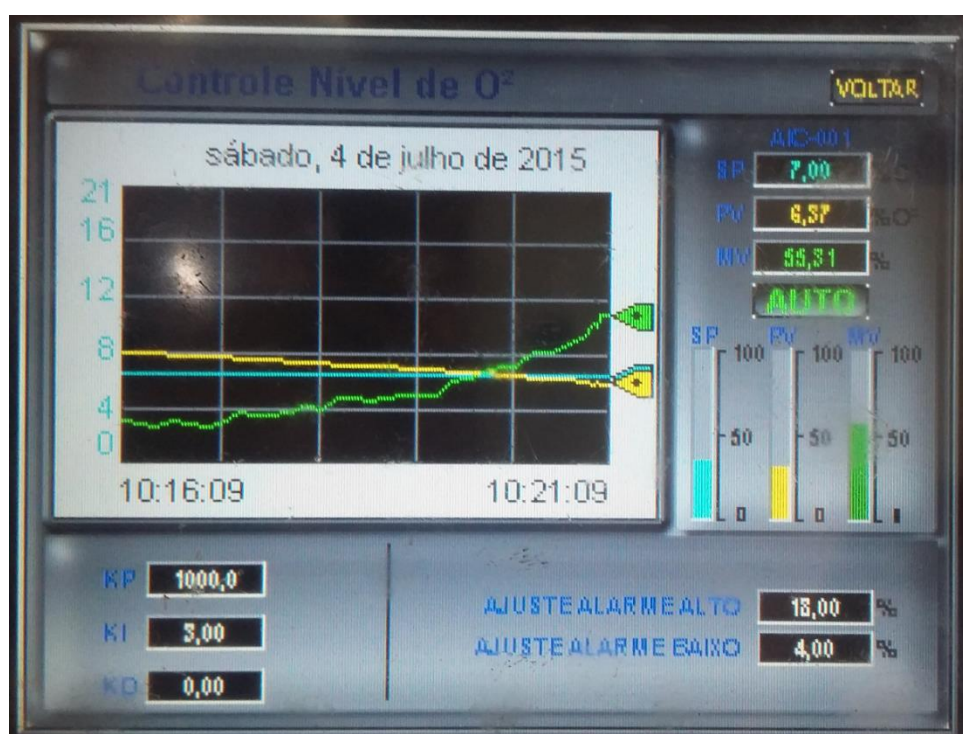


Figura (28) – Controle do Nível de O<sub>2</sub>. (Fonte: autor).

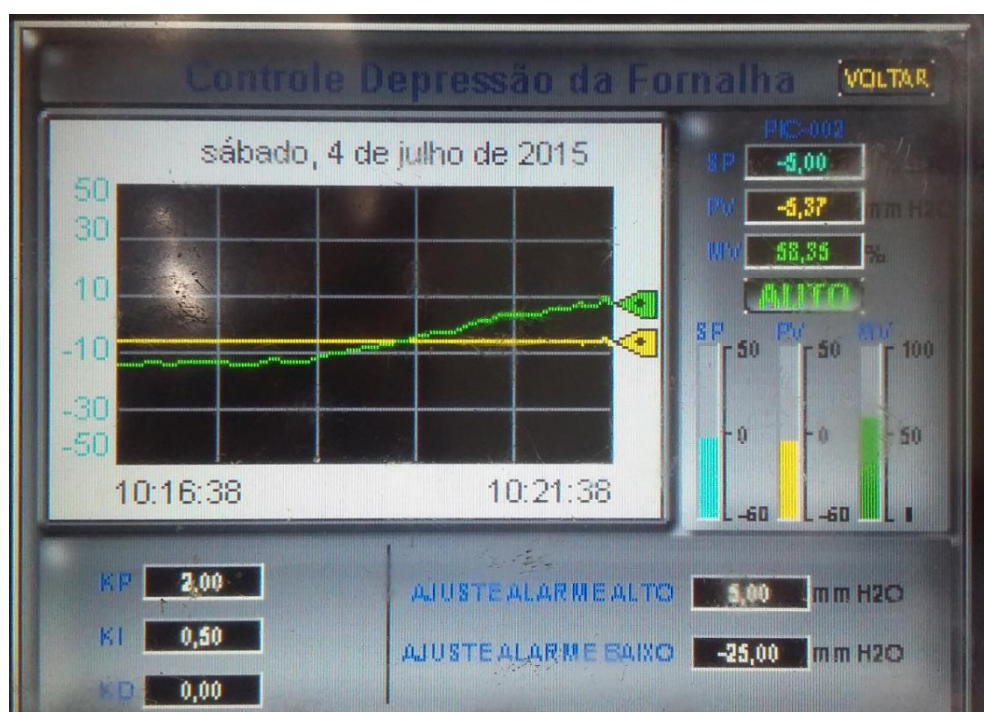


Figura (29) – Controle de Depressão da Forno. (Fonte: autor).

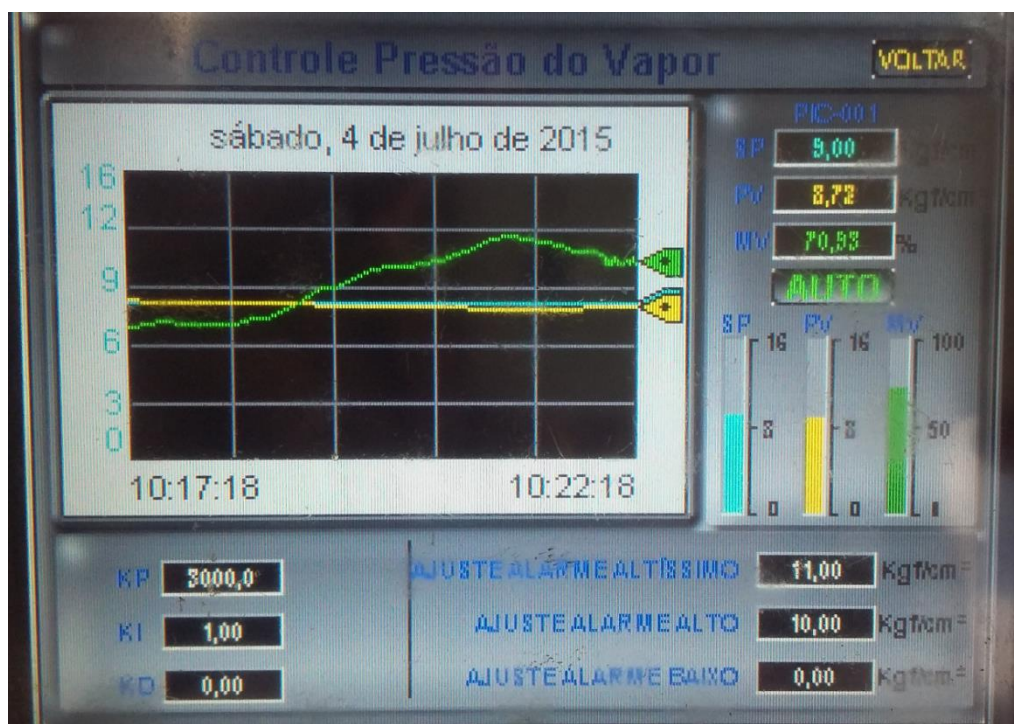


Figura (30) – Controle de Pressão de Vapor. (Fonte: autor).

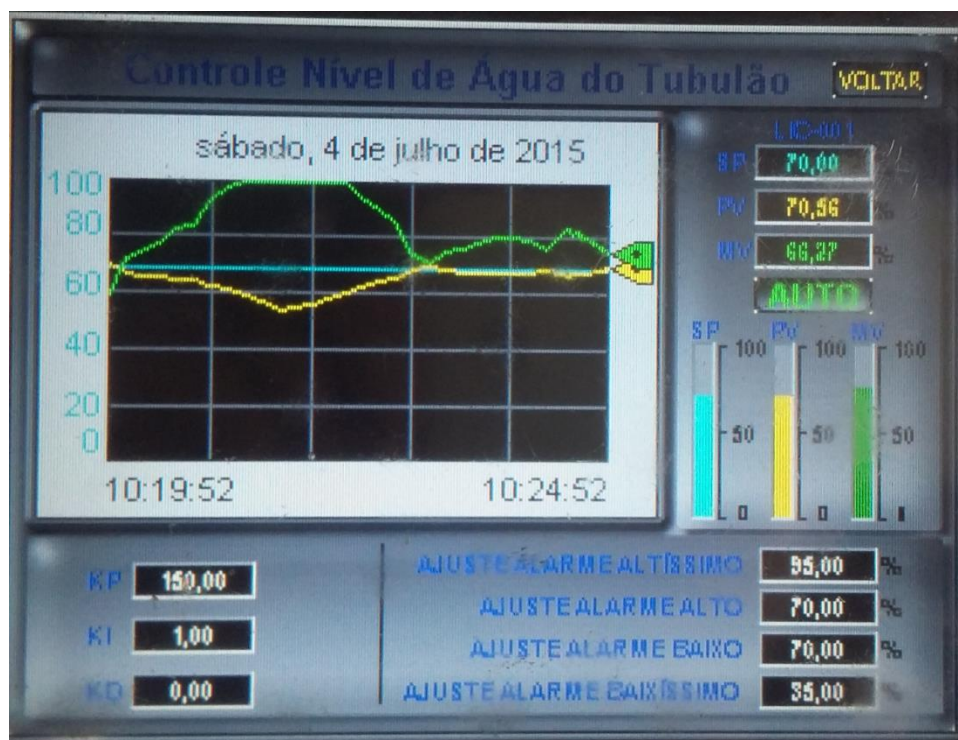


Figura (31) – Controle de Nível de Água do Tubulão. (Fonte: autor).

## 6.5. Resultados obtidos

Está sendo feito o acompanhamento diário dos parâmetros operacionais da caldeira, mas são notórias algumas melhorias já obtidas:

- Controle da dimensão das cinzas;
- Diminuição da emissão de fumaça preta;
- Aumento do % de CO<sub>2</sub> nos gases de queima;
- Diminuição da perda térmica por excesso de ar;
- Aumento da eficiência de combustão da caldeira.

Nesta primeira etapa de modificações a caldeira passou a operar com um excesso de ar de aproximadamente 150%, resultando em um CO<sub>2</sub> em torno de 13% e temperatura de gases de combustão em torno de 165°C na saída do coletor, o que está próximo ao ótimo que é 14%, com uma eficiência estimada de aproximadamente 85%. Acreditou-se que foram feitas as devidas melhorias na automação e também as melhorias mecânicas na caldeira. Com as devidas regulagens poderemos atingir níveis de excessos de ar na faixa de 50-70%, resultando em um CO<sub>2</sub> na faixa de 13-14%. Esta melhoria tem como consequência o aumento da eficiência para 86-87% através da redução do desperdício térmico e através do controle de combustão (injeção de ar e combustível corretos). O processo de regulagem da performance da caldeira ainda está em andamento e sendo supervisionado pela EFAI, sendo a próxima visita prevista antes do fim de julho de 2015.

As figuras (34) e (35) mostram respectivamente as melhorias nas cinzas obtidas e diminuição da fumaça escura durante operação.





Figura (32) – Mudança na dimensão das cinzas obtidas. (Fonte: autor)



Figura (33) – Ausência de fumaça escuras após intervenções na caldeira. (Fonte: autor)

## **7. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Diante das alterações realizadas na estrutura da caldeira biomassa Aalborg FA-M-20 foram observados os primeiros sinais de melhoria dos parâmetros de desempenho do equipamento.

As modificações mecânicas e de automações foram realizadas em conjunto com a equipe de manutenção da Ambev, sendo feito o acompanhamento diário dos parâmetros da caldeira junto a operação.

Obteve-se a princípio uma evolução significativa na eficiência de combustão da caldeira, que passou de uma média de 70% para 85%, bem como do nível de emissão de fumaça escura e aumento no percentual de CO<sub>2</sub>, o que representa uma combustão mais efetiva. Ainda não se tem histórico da melhoria do consumo de combustível, mas é algo que está sendo gerado para acompanhamento no segundo semestre de 2015.

Ainda existem futuros projetos de melhoria para a caldeira, como por exemplo a troca de toda a parede aquotubular por tubos novos, visto a existência de tamponados, e de alteração nas roscas de alimentação da fornalha, mas é algo que requer custos e estão fora do escopo atual.

## 8. REFERENCIAS

BIZZO, Waldir Antonio. **Geração, Utilização e Distribuição de Vapor**. UNICAMP. São Paulo, 2003.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos. **Operação de Caldeiras**. Gerenciamento, Controle e Manutenção. 1. Editora Blucher. São Paulo, 2013.

DUBBEL, **Manual do Engenheiro Mecânico**. 13ª Edição alemã. São Paulo: Editora Hemus, 1979.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5. ed. São Paulo, 1999.

LORENSETTI, Rodrigo. Relatório de Inspeção e Manutenção, Caldeira FA-M-20 Cat.B. EFAI Automação Industrial. São Luís, 2015.

PEREIRA, Feitosa Pereira. **Relatório de Inspeção Extraordinária, Caldeira FA-M-20 Cat.B**. Pressão Máxima. São Luís, 2015.

TEIXEIRA, Marcos Alexandre. **Biomassa de Babaçu no Brasil**. FEM – UNICAMP. São Paulo.

TORREIRA, Raul Peragallo. **Geradores de Vapor**. Editora Libris. São Paulo, 1995.