UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CARLOS BARTOLOTTO FILHO

AUMENTO DA EFICIÊNCIA E PRODUÇÃO DE VAPOR COM ESTUDO DE CASO EM UMA CALDEIRA AQUATUBULAR

SANTOS/SP

2015

CARLOS BARTOLOTTO FILHO

AUMENTO DA EFICIÊNCIA E PRODUÇÃO DE VAPOR COM ESTUDO DE CASO EM UMA CALDEIRA AQUATUBULAR

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, sob orientação da Profa. Dra. Karina Tamião de Campos Roseno e coorientação do Prof. Dr. Aldo Ramos Santos

SANTOS/SP

2015

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos

Bartolotto, Carlos Filho
Aumento da Eficiência e Produção de Vapor com estudo de caso em uma caldeira aquatubular.
/Carlos Bartolotto Filho. - 2015.
n. de f.76

Orientadora: Profa. Dra. Karina Tamião de Campos Roseno
Coorientador: Prof. Dr. Aldo Ramos Santos

Dissertação (Mestrado) - Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,Santos,SP,2015.

1. Pré-aquecedor ar/vapor. 2. Eficiência. 3. Caldeira. 4.Sistema de vapor.

I. De Campos Roseno, Karina Tamião, orientadora
II.Ramos, Aldo Santos, coorientador
III. Aumento da eficiência e produção de vapor com estudo de caso em uma caldeira aquatubular.

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas - Unisanta

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Carlos e Yara Bartolotto, que sempre me apoiaram em meus trajetos, à minha esposa Sandra , à minha filha Carolina e às minhas irmãs Renata e Rosana pelo apoio nas horas mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

À minha orientadora Profa. Dra. Karina Tamião de Campos Roseno, mais que professora, uma amiga e grande incentivadora, sempre disposta a me direcionar nos caminhos da área acadêmica, para que eu pudesse chegar até aqui.

Ao Professor Doutor Aldo Ramos Santos por ter trabalhado por muitos anos com meu pai, e hoje tê-lo envolto com este trabalho.

Ao Professor Doutor João Inácio da Silva Filho por ter compartilhado meu trabalho.

Às secretárias Sandra e Imaculada, pelo atendimento realizado nas horas que mais precisei.

Aos colegas do mestrado da UNISANTA que, na trajetória das matérias, estiveram sempre prontos para me ajudar.

Ao corpo docente do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, com especial destaque para a professora Dra. Karina Tamião de Campos Roseno, pelas orientações na área acadêmica.

E A DEUS POR MAIS ESTA OPORTUNIDADE.

EPÍGRAFE

"Há muitas pessoas de visão perfeita que nada veem. O ato de ver não é coisa natural, precisa ser aprendido".

Rubens Alves

RESUMO

A energia é um elemento essencial a ser considerado no desenvolvimento econômico e social de um país, sua economia através de mudanças de procedimentos e de hábitos é capaz de impactar positivamente no meio ambiente. Uma indústria que pretender atingir uma estrutura de custos racionalizada e conjuntamente mais competitiva, não pode admitir desperdícios ou utilizar a energia de maneira ineficiente. A utilização de calor em diversos setores industriais é fundamental nos principais processos de fabricação e esse calor é disponibilizado em grande parte por sistemas de geração de vapor. Dentre os geradores de vapor,destacam-se as caldeiras, as quais são basicamente um trocador de calor que trabalha com pressão superior à atmosférica, produzindo vapor através de energia térmica fornecida por uma fonte, e apresenta ainda diversos equipamentos integrados, que permitem a obtenção de maior rendimento térmico e de segurança. Neste contexto o presente trabalho verificou o comportamento de uma caldeira antes e após a remoção do pré-aquecedor ar/vapor, instalado dentro deste gerador de energia térmica. O pré-aquecedor tem por função aquecer o ar de combustão no início de operação da caldeira, mas consequentemente estava ocasionando perda de carga, devido ao depósito de fuligem. O intuito foi promover a melhoria na eficiência com menor consumo de combustível e ao mesmo tempo aumentar a produção de vapor, que segundo dados analisados apresentava uma diminuição ao longo do tempo. Com a retirada do pré-aquecedor ar/vapor houve uma alteração do tipo de combustível utilizado assim como no modo de operação da partida da caldeira, assunto este também estudado nesta pesquisa. Para o cálculo de eficiência da caldeira foi utilizado o método direto e o balanço de vapor foi efetuado através de um simulador. Diante dos bons resultados alcançados, observa-se o aumento imediato da eficiência, assim como da produção de vapor, ocasionando consequentemente ganhos financeiros e melhora em demasia na distribuição de vapor para os demais equipamentos da indústria.

Palavras Chave: Pré-aquecedor ar/vapor. Eficiência. Caldeira Aquatubular. Sistema de vapor.

ABSTRACT

Energy is an essential element to be considered in the economic and social development of a country, its economy through changes in procedures and habits can impact positively on the environment. An industry that want to achieve a streamlined cost structure and jointly more competitive, can not allow waste and use energy inefficiently. The use of heat in many industrial sectors is crucial in key manufacturing processes and this heat is provided largely for steam generation systems. Among steam generators, there is the boilers, which are basically a heat exchanger that works with superatmospheric pressure, producing steam by heat energy provided by a source, and also presents several integrated devices, which allow to obtain higher thermal efficiency and safety. In this context, the present study investigated the behavior of a boiler before and after removal of the air preheater / steam, installed inside of the thermal energy generator. The preheater has the function of heating the combustion air in the beginning of the boiler operation, but it was consequently causing pressure loss due to soot deposition. The aim was to encourage improvements in the efficiency with lower fuel consumption and at the same time increasing the production of steam, which according to data analyzed showed a decrease over time. With the removal of the preheater there was a change in the type of fuel used as well as the departure of boiler operating mode, this subject also studied in this research. For the boiler efficiency calculation was used the direct method and the steam balance was performed by a simulator. Given the good results achieved, there is an immediate increase efficiency, as well as steam production, thus causing financial gains and improved too much in steam distribution to other industry equipment.

Keywords: Pre-heater air/vapor. Efficiency. Water-tube boiler. Steam system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Caldeira aquatubular.....	20
Figura 2.	Caldeira flamotubular.....	22
Figura 3.	Caldeira elétrica.....	23
Figura 4.	Perdas e aproveitamento de energia na caldeira.....	27
Figura 5.	Diagrama básico da distribuição de vapor	30
Figura 6.	Localização do pré-aquecedor ar/vapor na caldeira.....	33
Figura 7.	Pré-aquecedor de ar/vapor no duto de ar da caldeira.....	34
Figura 8.	Vista detalhada do pré-aquecedor ar/vapor.....	34
Figura 9.	Localização do ventilador de ar.....	36
Figura 10.	Instalação do pré-aquecedor ar/vapor.....	37
Figura 11.	Duto de combustível.....	37
Figura 12.	Maçarico de queima de combustível.....	37
Figura 13.	Piloto de acendimento da caldeira.....	38
Figura 14.	Fornalha da caldeira.....	39
Figura 15.	Pré-aquecedor de ar/vapor em operação.....	40
Figura 16.	Desaerador.....	41
Figura 17.	Tubulões da caldeira.....	42
Figura 18.	Saída de vapor do tubulão superior.....	43
Figura 19.	Superaquecedor de vapor.....	43
Figura 20.	Pré-aquecedor de ar/vapor com depósito de fuligem.....	43
Figura 21.	Transmissor de medição de vapor.....	45
Figura 22.	Instalação da placa de orifício.....	45
Figura 23	Medidor de combustível Coriolis.....	46
Figura 24.	Sinal gerado pelo medidor Coriolis.....	46
Figura 25.	Monitoramento da vazão de vapor e combustível.....	47
Figura 26.	Malha de controle a três elementos.....	48
Figura 27.	Monitoramento do controle de nível.....	49
Figura 28.	Controle da vazão de combustível por limites cruzados..	50
Figura 29.	Simulador de vapor.....	52
Figura 30.	Produção de vapor em 2010.....	55

Figura 31.	Consumo de combustível em 2010.....	56
Figura 32.	Produção de vapor em 2011.....	58
Figura 33.	Consumo de combustível em 2011.....	59
Figura A1	Compartimentos de entrada de ar na caldeira.....	70
Figura A2	Detalhe de uma lança do maçarico de gás.....	71
Figura A3	Piloto de acendimento da caldeira.....	71
Figura A4	Qualidade da chama no acendimento da caldeira.....	72
Figura A5	Qualidade da chama em carga nominal da caldeira.....	72
Figura A6	Registro de entrada de ar para controle da chama.....	73
Figura A7	Saída dos gases de combustão da fornalha.....	73
Figura A8	Duto de captação dos gases de combustão da caldeira.	74
Figura A9	Interior do tubulão superior.....	74
Figura A10	Interior de tubulão inferior com resíduo de lama.....	75
Figura A11	Feixes tubulares de interligação com os tubulões.....	75
Figura A12	Pré-aquecedor de ar/vapor com resíduo de fuligem.....	76
Figura A13	Isolamento térmico instalado nos tubos da caldeira.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Composição do Gás Natural.....	24
Tabela 2.	Composição do óleo combustível.....	24
Tabela 3.	Distribuição de pressão no *header* de vapor.....	51
Tabela 4.	Geração de vapor do processo industrial.....	54
Tabela 5.	Consumo de vapor no processo industrial.....	53
Tabela 6.	Produção de vapor e consumo de combustível em 2010.....	56
Tabela 7.	Produção de vapor e consumo de combustível em 2011.....	59
Tabela 8.	Ganhos financeiros com o aumento da eficiência.....	60
Tabela 9.	Produção da caldeira de 110.000 kg/h.....	61
Tabela 10.	Produção da caldeira de 120.000 kg/h.....	61
Tabela 11.	Produção da caldeira de 130.000 kg/h.....	62
Tabela 12.	Produção da caldeira de 140.000 kg/h.....	62
Tabela 13.	Produção da caldeira de 150.000 kg/h.....	62
Tabela 14.	Valores para a determinação do custo de vapor produzido no ano de 2010.....	63
Tabela 15.	Valores para a determinação do custo do vapor produzido no ano de 2011.....	63
Tabela 16.	Ganhos financeiros com o custo do vapor produzido.....	64
Tabela 17.	Ganhos financeiros com o aumento da produção da planta....	64

LISTA DE NOMENCLATURAS E SIGLAS

Blow down	Purga da caldeira
Campo	Local onde estão os equipamentos industriais
CLP	Controlador Lógico Programável
Check list	Avaliação dos equipamentos e instrumentos pelo operador
Calor sensível	É a energia térmica em movimento sem mudança de estado
Calor latente	É o calor adicional com mudança de estado
Downcomers	Tubos descendentes de água para o tubulão inferior
FT	Transmissor de Vazão
Header	Conjunto de tubulações que tem a função de distribuir o fluido
IHM	Interface Homem Máquina
Jusante	Lado de menor pressão
LD	*Ladder* (Linguagem de programação dos Controladores Lógicos)
LRC	Controlador Registrador de Nível
Linha	Termo utilizado na indústria expressando o significado de tubo
Mandrilagem	É o processo de usinagem de expansão dos tubos
Montante	Lado de maior pressão
NR 13	Normas de segurança em caldeiras
PCI	Poder Calorífico Inferior
pH	Método para analisar a acidez ou a alcalinidade da água
PRC	Controlador Registrador de Pressão
ppm	Parte por milhão
Pressão relativa	Pressão efetiva que se lê nos manômetros
Pressão absoluta	É a soma da pressão manométrica com a pressão atmosférica
Processo	É o conjunto de operações para obter um produto
Risers	Tubos ascendentes que conduzem o vapor ao tubulão superior
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
SPIE	Serviço Próprio de Inspeção em Equipamentos
Set Point	É o valor requerido para a variável controlada
TAG	Nome dado para identificação do equipamento na planta industral

LISTA DE SÍMBOLOS

C_p	Calor específico.....(kcal/kgºC)
h_a	Entalpia da água na entrada da caldeira .....(kcal/kg)
h_c	Coeficiente de transmissão de calor por convecção.. .....(kW/m²K)
h_v	Coeficiente de transmissão de calor por radiação.....(kW/m²K)
h_v	Entalpia do vapor na saída da caldeira.....(kcal/ºC)
m_v	Vazão em massa de vapor.....(kg/h)
m_c	Vazão em massa de combustível.....(kg/h)
η	Eficiência pelo método direto.....(%)
PC_P	Poder Calorífico a Pressão Constante.....(kcal/kg)
Q	Calor.....(ºC)
$T_{amb.}$	Temperatura ambiente..... (ºC)
T_{bw}	Temperatura média do costado da caldeira.....(ºC)
T_s	Temperatura de saída.....(ºC)
V_g	Volume dos produtos da combustão..... ($m^3/ kg_{comb.}$)

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO..... 17

1.1. Generalidades..... 17

1.2. Objetivo Geral..... 18

1.3. Objetivos específicos..... 18

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... 19

2.1. Caldeiras..... 19

2.2. Tipos de caldeiras Industriais..... 20

2.2.1. Caldeira Aquatubular..... 20

2.2.1.1. Equipamentos básicos da caldeira aquatubular..... 21

2.2.2. Caldeira flamotubular..... 21

2.2.3. Caldeira Elétrica..... 22

2.3. Combustíveis utilizados em caldeiras..... 23

2.4. Eficiência em caldeiras..... 24

2.4.1. Método Direto..... 25

2.4.2. Método Indireto..... 26

2.5. Modelo genérico de um simulador de balanço vapor..... 30

3. MATERIAIS E MÉTODOS..... 32

3.1. Estudo de caso: Caldeira aquatubular e seus componentes 32

3.1.1 Caldeira Aquatubular..... 32

3.1.1.1 Componentes da caldeira..... 32

3.2. Fundamentos teóricos utilizados na verificação e solução de problemas. 44

3.2.1. Cálculo da eficiência da caldeira..... 44

3.2.1.1. Medição da vazão de vapor e combustível 44

3.2.2. Método para controle das vazões de vapor e combustível..... 48

3.2.2.1. Controle da vazão de vapor pelo método de três elementos..... 48

3.2.2.2. Controle de combustível pelo método de limites cruzados..... 49

3.2.3. Método de simulação do sistema de vapor..... 51

3.2.4. Determinaçao do custo do vapor..... 53

3.2.5. Determinaçao da produção de vapor..... 51

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... 55

4.1. Cálculo da eficiência pelo método direto..... 55

4.1.1. Situação 1: Produção de vapor e consumo de combustível em 2010 55

4.1.2. Situação 2: Produção de vapor e consumo de combustível em 2011 pós-retirada do pré-aquecedor ar/vapor..... 58

4.2. Ganho financeiro com a redução do consumo de combustível..... 60

4.3. Melhora do balanço de vapor pós a retirada do pré-aquecedor ar/vapor 60

4.3.1. Situação 1: Produção da caldeira com 110.000 kg/h..... 60

4.3.2. Situação 2: Produção da caldeira com 120.000 kg/h..... 61

4.3.3. Situação 3: Produção da caldeira com 130.000 kg/h..... 61

4.3.4. Situação 4: Produção da caldeira com 140.000 kg/h..... 62

4.3.5. Situação 5: Produção da caldeira com 150.000 kg/h..... 62

4.4. Ganho financeiro com o aumento de produção da planta..... 63

4.4.1.Ganho com o custo do vapor produzido..... 63

4.4.2. Ganho com o aumento de produção da planta..... 64

4.5. Aumento da confiabilidade do processo devido a decisão da retirada do pré-aquecedor ar/vapor..... 65

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES..... 66

5.1. Conclusões..... 66

5.2. Sugestões..... 67

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 68

APÊNDICE 1 – Fotos detalhada da caldeira..... 70

1. INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

Recentemente, com a evolução dos meios produtivos no âmbito industrial, aumentou-se muito o consumo de energia e principalmente de vapor, fazendo com que fossem fabricados caldeiras de grande porte para que suprisse a pedida de mercado.

A produção de vapor é um fator preponderante no plano estratégico das indústrias mundiais e significa que novas técnicas que facilitem o aumento da produção de vapor, assim como a eficiência da caldeira, serão sempre muito bem aceitas por todos aqueles que estão dentro de uma área industrial que fazem parte dessa corrida no setor de produção.

Muito se tem feito para facilitar o processo de aumento da produção de vapor e minimizar o consumo de combustível nas caldeiras, utilizando-se para isso diferentes técnicas em função das características de produção, como o melhor aproveitamento dos insumos a serem queimados, aproveitando assim de forma mais eficaz a energia produzida pela caldeira (ANDRADE, 2014).

Apesar dos avanços tecnológicos dessas melhorias, vale destacar componentes básicos da caldeira que causam perda de carga e influenciam diretamente tanto na eficiência, como na redução da produção de vapor, e nesse contexto cita-se o pré-aquecedor de ar/vapor, que é utilizado em caldeiras aquatubulares de grande porte. Este aquece o ar para retirar os resíduos de água, que poderiam reagir com o enxofre presente no óleo combustível formando o ácido sulfúrico. O pré-aquecedor ar/vapor tem função somente no início das operações da caldeira, mas que resultam em problemas de perda de carga devido ao acúmulo de fuligem, prejudicando não só o processo produtivo assim como o energético.

Muito embora os fabricantes tenham cada vez mais aumentado as inovações tecnológicas aperfeiçoando-se com as melhorias dos projetos, deve-se destacar que para cada tipo de produção industrial, existe uma característica específica de operação e manutenção dos equipamentos, e deve-se levar em conta que os ajustes são feitos de forma pontual tanto na análise de perda de carga, como na otimização do consumo de combustível, sendo que a técnica mais usada nos processos industriais são as simulações (CBC, 1998).

1.2. Objetivo geral

O presente trabalho abordou um estudo de caso que teve, como objetivo geral, melhorar a eficiência e a produção de vapor de uma caldeira do tipo aquatubular, retomando sua produção nominal de 150.000 kg/h, com a remoção do pré-aquecedor ar/vapor.

1.3. Objetivos específicos:

a) Comparar o rendimento da caldeira antes e após a retirada do pré-aquecedor ar/vapor.
b) Cálculo do ganho financeiro com o aumento de eficiência da caldeira.
c) Influência da produção de vapor na caldeira sobre o desempenho no processo industrial.
d) Estimar o cálculo do ganho financeiro da indústria com um aumento na produção de vapor.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica a ser apresentada traz uma abordagem dos geradores de vapor especificamente as caldeiras, que são de grande aplicação industrial. Este estudo pretende apresentar conceitos relevantes sobre este gerador de vapor e fornecer suporte técnico para outros trabalhos relacionados.

2.1. Caldeiras

Caldeira ou gerador de vapor é um equipamento que produz vapor através do calor transferido para a água transformando-a em vapor pelo processo de ebulição (BOTELHO E BIFANO, 2011).

O vapor gerado pode ser utilizado por exemplo para produzir energia através de uma turbina, mas deverá ser superaquecido a uma temperatura mais elevada, pois o vapor possui em sua formação gotículas de água que são prejudiciais para equipamentos industriais (DOE,1992).

Em caldeiras industriais, a água é distribuída internamente pelos tubos e exteriormente estão presentes os gases de combustão que em contato indireto com o fluido ocorre troca térmica, gerando o vapor utilizado.

Nos dias de hoje, as caldeiras são projetadas para altas vazões de vapor a grandes pressões, e possui a característica de adaptação do superaquecedor, que permite o fornecimento de vapor superaquecido, necessário para o processo industrial para o funcionamento das turbinas.

Uma das vantagens de uma caldeira a vapor, é que atendem às cargas flutuantes, ou seja, aos aumentos instantâneos na demanda de vapor e também pode-se considerar que são de construção fácil, custo relativamente baixo, bastante robustas e exigem pouca alvenaria (FOGLIATTO, 2009). Entre as desvantagens pode-se destacar o rigoroso processo de aquecimento para elevação de carga, devido a grande quantidade de isolamento térmico e além disso, pelo fato de existir a compactação de seus elementos básicos de operação, apresentam dificuldades para a instalação dos equipamentos internos.

2.2. Tipos de caldeiras industriais

2.2.1. Caldeira aquatubular

Caldeira aquatubular é o tipo de gerador de vapor que através da combustão originam gases que circulam na zona de radiação, aquece os tubos com água que convertem em vapor os quais são interligados com um tubulão superior e um tubulão inferior, conforme figura 1.

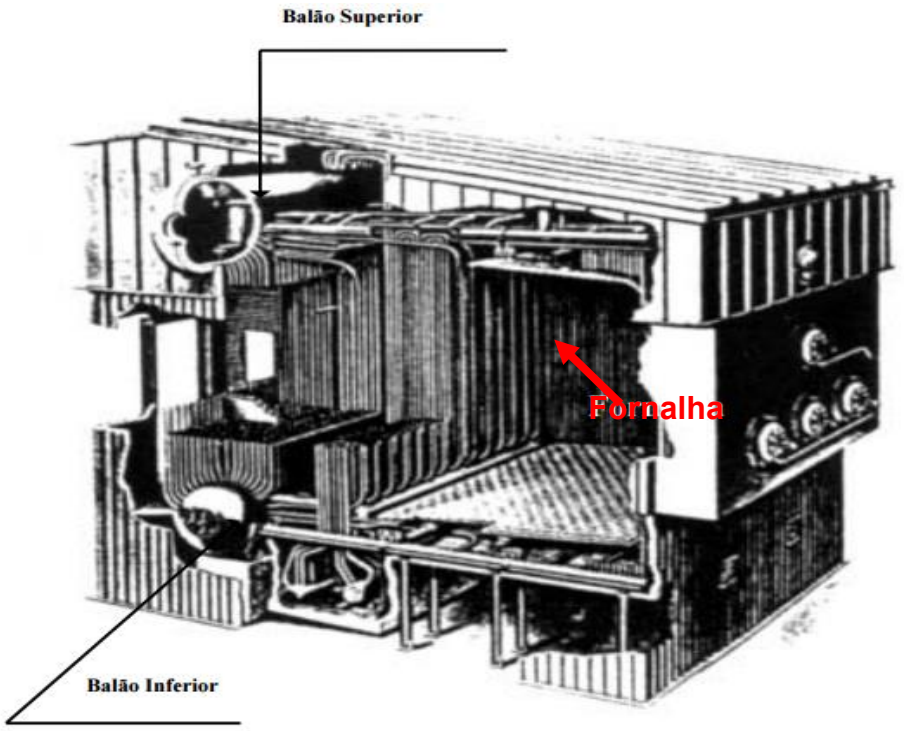

Figura 1 – Caldeira aquatubular.
(Fonte: VEGA, 1989)

No início, as caldeiras aquatubulares eram fabricadas para produzir vapor com baixas pressões e temperaturas, devido ao ar para combustão ser fornecido com baixas vazões, ocorrendo consequentemente uma menor produção de vapor (BOTELHO E BIFANO, 2011).

Com a inovação tecnológica e a necessidade de se obter uma maior produção de vapor, surgiram as caldeiras fabricadas com vazões e pressões em alta escala. Um dos progressos mais significativos no seu desenvolvimento, foi a evolução da construção da zona de convecção, permitindo com isso, um alto coeficiente de troca

térmica, fato este que ampliou a produção das caldeiras acima de 100 t/h e pressões acima de 53 kgf/cm².

2.2.1.1. Equipamentos da caldeira aquatubular

Segundo Pereira et al., (2002), os equipamentos acessórios que compõe uma caldeira aquatubular industrial com altas pressões e temperaturas são:

a) Tubulão superior: recebe a água de alimentação;
b) Tubulão inferior: tem a função de armazenar a água liquefeita e resíduos que diariamente são drenados;
c) Tubos ascendentes (*risers*): enviam o vapor ao tubulão superior;
d) Tubos descendentes *(downcomers):* enviam a água ao tubulão inferior;
e) Ventilador de tiragem forçada: fornece ar para dentro da caldeira para que haja a combustão;
f) Fornalha: é a região onde se processa a transformação da água em vapor;
g) Superaquecedor: tem a função de elevar a temperatura do vapor, retirando gotículas remanescente de água;
h) Pré-aquecedor de ar/vapor: consiste em elevar a temperatura do ar no acendimento da caldeira, que ainda esta em processo de elevação de carga, para que não ocorra a reação das gotículas de água com o enxofre do óleo combustível a ser queimado como também a corrosão dos equipamentos internos da caldeira;
i) Bomba de água: tem a função de manter a circulação de água a ser convertida em vapor na caldeira;
j) Pré-aquecedor tubular ar/gás: tem a função de aquecer o ar aproveitando a energia dos gases de combustão quando a caldeira estiver em plena carga.

2.2.2. Caldeira flamotubular

A caldeira flamotubular mostrada na figura 2, caracteriza-se pela circulação interna dos gases de combustão através dos tubos no interior da caldeira, os quais ficam envoltos com água e fixados nos espelhos por meio de uma mandrilagem. Esse equipamento é construído para operar com pressões limitadas e pode operar com

diversos tipos de combustíveis, o queimador está localizado na parte frontal da fornalha (BEGA, 2003).

Segundo Telles (2001), esse tipo de caldeira é de construção simples e a distribuição dos tubos pode ser tanto horizontais como verticais, sendo os equipamentos com tubos horizontais os mais utilizados nos processos industriais, embora atinjam pressões máxima de operação de 10 kgf/cm².

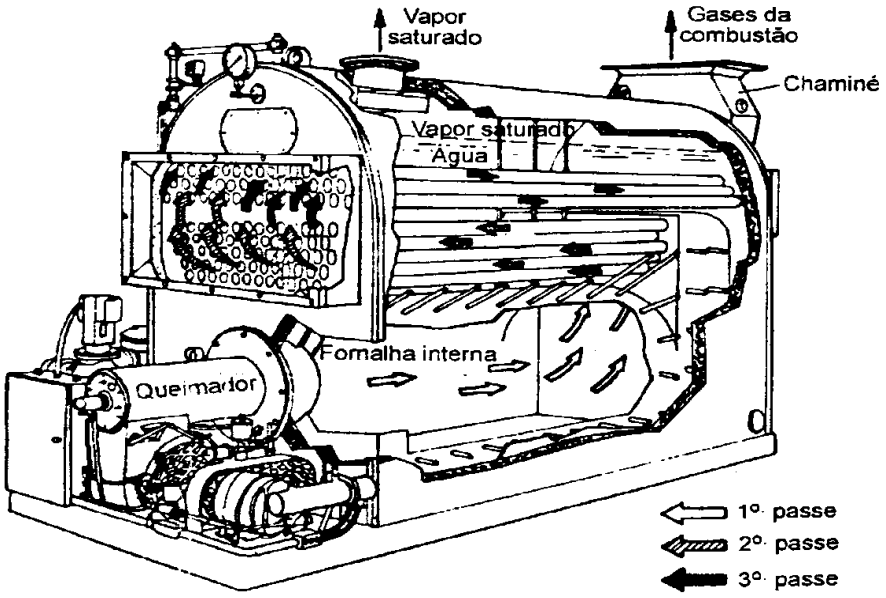

Figura 2 – Caldeira flamotubular.

(Fonte: OLIVEIRA,2008)

2.2.3. Caldeira Elétrica

De concepção simples, as caldeiras elétricas possuem elementos responsáveis pela geração de calor através de fios metálicos chamados de resistores, com carga resistiva projetada e envoltas por uma camada de material dielétrico (ELETROPAULO, 2004).

Conforme observado na figura 3, este tipo de caldeira contém certo nível de água em seu interior, na qual estão submersos um ou mais resistores que são instalados, em geral, na parte lateral da caldeira e são alimentados por uma fonte externa de energia elétrica.

Apesar de ser um equipamento de alta eficiência, devido ao alto custo de energia elétrica, este tipo de caldeira fica inviabilizada nos processos industriais, pois o custo do vapor acaba se tornando muito expressivo.

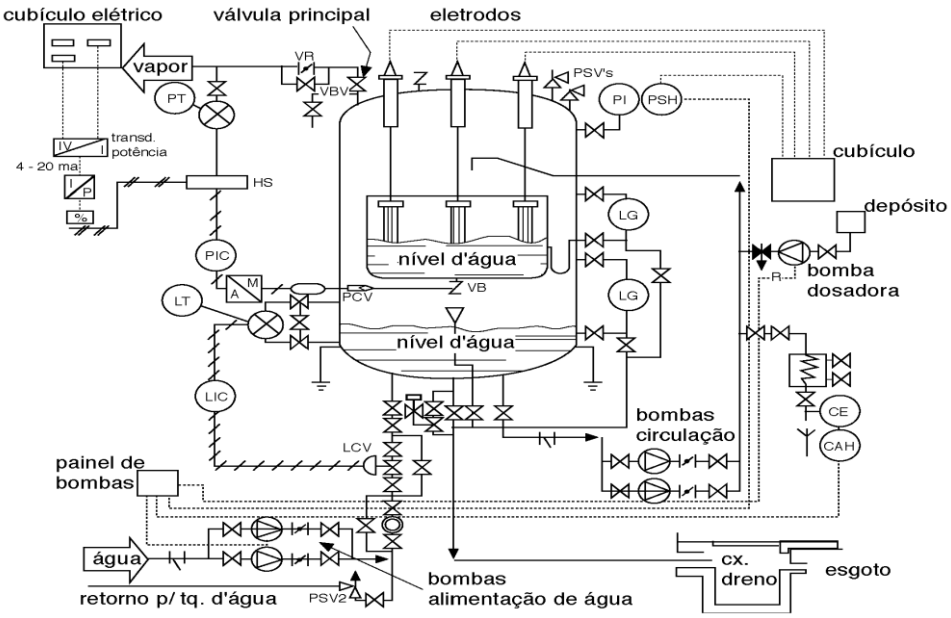

Figura 3 – Caldeira elétrica.

(Fonte: OLIVEIRA, 2008)

2.3. Combustíveis utilizados em caldeiras

Diversos são os tipos de combustíveis utilizados para a queima em caldeiras. Eles podem ser do tipo natural como carvão mineral ou madeira, ou derivados como é o caso do gás natural, *fuel gas* e óleo, que são os combustíveis mais utilizados para a queima em processos industriais.

O gás natural contém uma mistura de hidrocarbonetos leves, entre os quais se destaca o metano (CH_4), que se deposita no subsolo da terra que é gerado através da decomposição da matéria orgânica, além disso o gás natural é uma energia carente de enxofre cuja a composição é mostrado na tabela 1 (GARY, 2004).

Tabela 1 - Composição do Gás Natural.

Composição	% em peso
Metano	89,35
Etano	8,03
Propano	0,78
Iso butano	0,04
n-butano	0,03
n-pentano	0,01
CO_2	1,00
N_2	0,48
Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	13.746

Já o óleo combustível é obtido a partir do processamento do petróleo, constituindo as frações mais pesadas desse produto. A composição do óleo combustível possui várias derivações e depende do tipo de refino e do petróleo, sendo caracterizado pela grande quantidade de carbono e a presença de enxofre, como verificado na tabela 2 (GARY, 2004).

Tabela 2 - Composição do óleo combustível.

Composição	% em peso
Carbono	84,63
Hidrogênio	9,84
Enxofre	**5,50**
Cinza	0,02
Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	9.674

2.4. Eficiência em caldeiras

Segundo a ELETROBRÁS (2005 a), um dos fatores preponderantes para o desempenho da caldeira é o aumento de sua eficiência, com a diminuição do consumo de combustível. Para mensurar a eficiência, são utilizados dois métodos, o método das entradas e saídas (Método direto) e o método do balanço de energia (Método indireto) (ASME, 1998).

O método direto avalia de maneira direta a quantidade de energia produzida na forma de vapor pela quantidade de energia fornecida pelo combustível, estabelecendo uma relação única de eficiência. Já método indireto, apresentado nas centrais elétricas (Eletrobrás, 2005 a) utiliza a análise das pincipais perdas do gerador para obter o valor da eficiência, verificando as perdas pela chaminé, por radiação, convecção, por purgas, ao combustível não queimado convertido em cinzas e a combustão incompleta, possibilitando a identificação dos principais pontos de perda, os quais devem receber maior atenção nas instalações, afim de, reduzir ao mínimo as perdas (AGUIAR, 2014)

A eficiência em caldeiras tem como objetivo estabelecer o máximo rendimento com o melhor aproveitamento do combustível, sendo determinada pela energia presente nos gases de combustão para elevar a temperatura do ar, quando a caldeira esta em operação nominal.

Para os métodos de cálculo de eficiência do gerador de vapor, deve-se levar em consideração que a confiabilidade desses métodos está vinculada a credibilidade de precisão dos instrumentos de medição. O método indireto apesar de mais preciso, possui uma derivação maior dos efeitos de perdas e imprecisões de medições, podendo ocasionar uma maior possibilidade de erro devido à complexidade de obter as informações de suas variáveis.

2.4.1. Método direto

O método direto de cálculo de eficiência consiste no balanço dos fluxos energéticos de entrada conforme a equação 2.1, ou seja, é a relação entre o produto da massa de vapor e o ganho das entalpias (transformação da água de alimentação em vapor), pelo produto da massa de combustível e o seu Poder Calorífico Inferior (ELETROBRÁS, 2005 a).

$$\eta = \frac{m_v * (h_v - h_a)}{m_c * \mathrm{PCI}} \qquad (2.1)$$

Sendo:

ɳ a Eficiência pelo método direto (%);

m_v a Vazão em massa de vapor (kg/h);

h_v a Entalpia do vapor na saída da caldeira (kcal/kg);

h_a a Entalpia da água na entrada da caldeira (kcal/kg);

m_c a Vazão em massa de combustível (kg/h);

PCI o Poder calorífico inferior do combustível queimado (kcal/kg).

Quanto maior for a demanda de vapor, maior será a sua produção, aumentando com isso a carga da caldeira e, consequentemente, a quantidade de água consumida e combustível queimado. Quanto maior a pressão ou a temperatura do vapor, maior será sua entalpia.

Embora seja um método simples, os dados das variáveis são medidos com maior precisão pelos instrumentos, fato este preponderante para a obtenção de um valor com maior confiabilidade para cálculo da eficiência.

2.4.2. Método indireto

O cálculo de eficiência pelo método indireto, consiste na somatória das perdas existentes em uma caldeira, ou seja, é a determinação do rendimento bruto pelas perdas de energia (NHAMBIU, 2013).

A figura 4 e a equação 2.2 mostram a distribuição da energia aproveitada e perdida em uma caldeira.

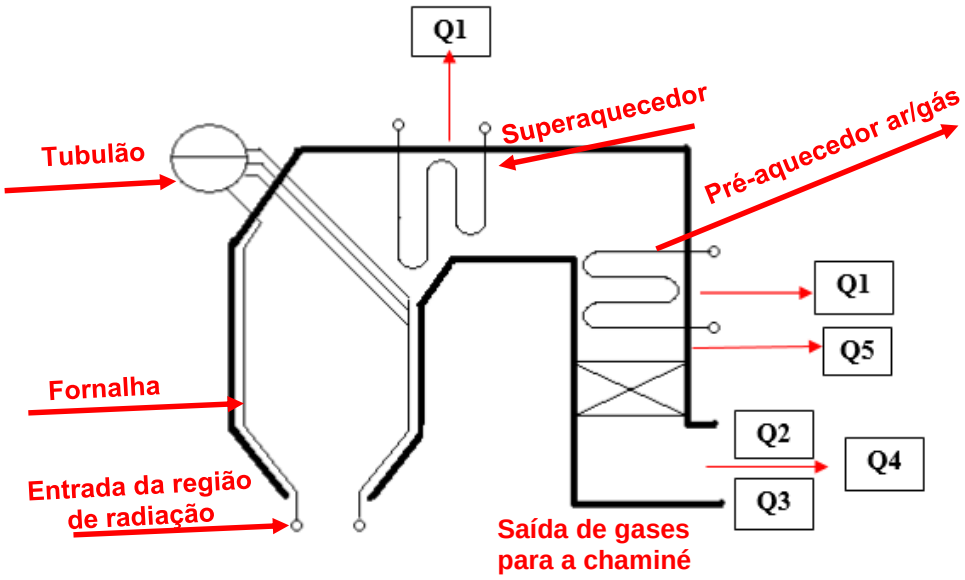

Figura 4 – Perdas e aproveitamento de energia na caldeira.
(Fonte: NHAMBIU, 2013)

$$Q1+Q2+Q3+Q4+Q5=100\ \% \qquad (2.2)$$

Em que:

Q1 - Calor utilizado para a vaporização da água, ou seja, é a energia aproveitada para que ocorra a vaporização da água, fornecida pelo superaquecedor da caldeira.

Q2 - Perdas de calor com os gases de combustão; trata-se da perda nos gases na saída pela chaminé da caldeira; para isso deve-se reduzir o máximo possível a temperatura de escape do gás de combustão (NHAMBIU, 2013).

Apesar de ser minimizada, há sempre uma perda líquida de calor na caldeira, conforme a equação 2.3.

$$Q2 = V_{gcomb.}.\ C_{pg}.\ (T_S - T_{amb.}) \qquad (kcal/kg_{comb.}) \qquad (2.3)$$

Sendo:

$V_{gcomb.}$ Vazão volumétrica dos produtos da combustão (m³/$kg_{comb.}$);

C_{Pg} Calor específico médio dos gases (kcal/kg);

T_s Temperatura dos gases na saída da caldeira (ºC);

$T_{amb.}$ Temperatura ambiente (ºC).

Q3 - Perdas devido à combustão incompleta; essa perda ocorre quando há falta de oxigênio, produzindo calor e gerando gases com componentes combustíveis como o CO e CH_4 (GARY, 2004).

A energia produzida pela pós-queima desses componentes constitui a perda de energia pela combustão incompleta Q3 (kcal/$kg_{comb.}$) calculada pela equação 2.4.

$$Q3 = (126{,}4CO + 108H_2 + 354{,}2CH_4 . V_g . (1-0{,}01\ q4) \quad (\text{ kcal/}kg_{comb.}). \qquad (2.4)$$

Em que:

CO, H_2 e CH_4 Concentrações volumétricas dos produtos da combustão incompleta dos gases na base seca (%);

V_g Volume dos gases secos em (m³/ $kg_{comb.}$);

(1-0,01.q_4) Fator de correção devido à diferença entre o consumo de combustível calculado e o real.

Q4 - Perdas devido ao Combustível não queimado. A perda de energia com o combustível não queimado, é determinada pela presença de cinzas e escórias retiradas da caldeira. Na queima de óleo ou gás, esta perda de energia apresenta-se na forma de partículas sólidas ou fuligem, que podem ser formadas nas zonas de combustão de alta temperatura, com deficiência de oxigênio (NHAMBIU, 2013).

A perda de calor, devido ao combustível não queimado, depende de vários fatores preponderantes na caldeira, como produção de vapor, controle de combustão e temperatura na zona de radiação da fornalha. A equação 2.5. demonstra as perdas de calor devido ao combustível não queimado.

$$Q4=3{,}21\ A.\left(a_{esc.+cin.}\frac{C_{esc.+cin}}{100\ C_{esc.+cin}} + a_{vol.}.\frac{C_{vol.}}{100C_{vol}}\right) \quad (kcal/kg) \qquad (2.5)$$

Sendo:

A: Teor de cinzas do combustível (%) ;

$a_{esc.+cin.}$ e $a_{vol.}$: Frações de cinza do combustível presente nas escórias+cinzas e cinzas volantes (%)

$C_{esc.+cin.}$ e $C_{vol.}$: Teor de matéria combustível presente na escória + cinzas e nas cinzas volantes (%).

Q5 - Perdas de calor pelo costado e tubos da caldeira. Sabe-se que quando a caldeira está em operação, a temperatura na periferia da caldeira é maior do que a do ambiente, ou seja, a perda de calor é causada pela transferência entre as superfícies do gerador de vapor e a temperatura ambiente. A totalidade da perda de calor depende da área do costado da fornalha, da camada de isolamento térmico, dos dutos e da temperatura do meio ambiente; essa perda de calor é calculada pela equação 2.6.

$$Q5 = \frac{A_{bw}}{B_r}(h_c + h_r)\,(T_{bw} - T_{amb..}) \qquad (kcal/.kg_{comb.}) \qquad (2.6)$$

Sendo,

A_{bw} Área da superfície do costado e outras partes da caldeira (m²);

B_r Fluxo de radiação (kW/m²K);

h_c e h_r Coeficientes de transmissão de calor por convecção e radiação (kW/m²K);

T_{bw}, $T_{amb.}$ São, respectivamente, as temperaturas média do costado e meio ambiente (ºC).

2.5. Modelo genérico de um simulador de balanço vapor

Um modelo genérico de um simulador de vapor, consiste na distribuição de equipamentos básicos de geração, distribuição e recuperação do sistema que tem o intuito de facilitar a caracterização de um processo em uma empresa (ELETROBRÁS, 2005 b).

A figura 5 representa a descrição esquemática de um sistema de vapor.

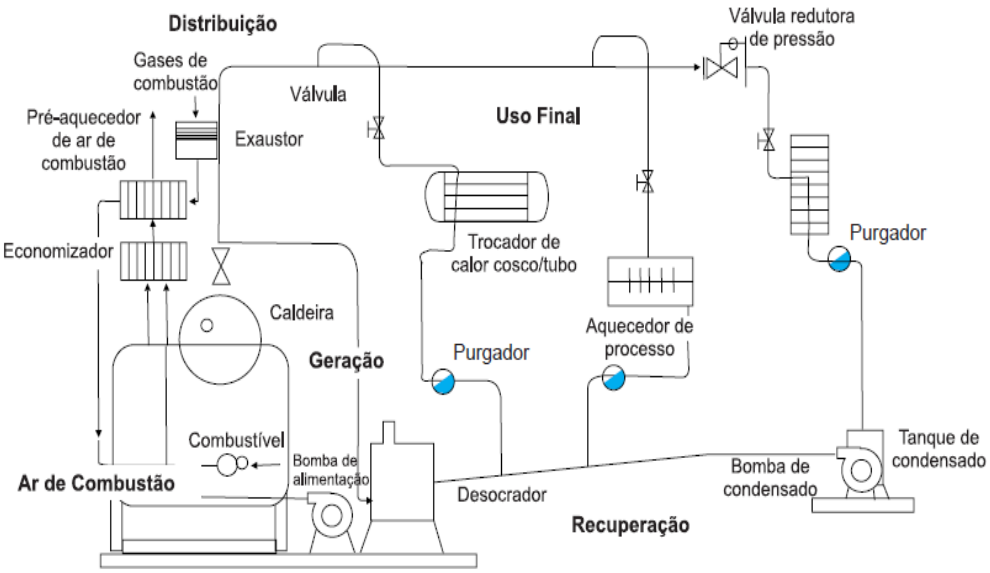

Figura 5 – Diagrama básico da distribuição de vapor.
(Fonte: Eletrobrás, 2005b).

O vapor gerado na caldeira é proveniente da troca térmica entre os gases resultantes da combustão e a água nos dutos na região da fornalha, ocorrendo assim a mudança da fase líquida para a fase vapor.

Após a geração de vapor, ocorre o direcionamento para o sistema de distribuição denominado *header,* que tem por função o transporte até os pontos de consumo dos

equipamentos localizados em locais distantes da caldeira, com vazões estabelecidas de acordo com o projeto de cada equipamento.

O sistema de distribuição opera com vários níveis de pressões obtidas através de válvulas redutoras de pressão, turbinas, bombas e geradores de energia elétrica de contrapressão, para que ocasione essa redução na pressão. Um sistema eficiente de distribuição de vapor contempla uma constante estabilização de pressão do vapor, uma boa drenagem de condensado e deve possuir um adequado sistema de isolamento térmico (ELETROBRÁS, 2005 b).

Em um processo industrial, além do vapor ser utilizado em torres de destilação e reatores, este também é usado em trocadores de calor, turbinas, e utilidades em geral. No caso do trocador de calor, o vapor transfere sua energia a um fluido de processo até sua temperatura de especificação e o condensado é enviado para o sistema de retorno. Já em uma turbina, o vapor converte sua energia térmica em trabalho mecânico para acionar equipamentos como: bombas, compressores, ou geradores elétricos. Em torres de fracionamento, o vapor tem a função de servir como fluido que auxilia a separação dos componentes de um líquido.

Após o condensado ser retirado do processo através dos purgadores e condensadores, ele retorna para um vaso e será bombeado de volta para o desaerador, que tem por função retirar o oxigênio dissolvido o que poderia propiciar corrosão na caldeira. Quando esse fluido estiver livre destas impurezas, será então enviado para a sucção das bombas de alimentação, que tem por função aumentar a pressão da água para ser retornada à caldeira completando o ciclo básico.

A visualização e o entendimento deste tipo de simulador contribui para que a operação do sistema seja feita de forma mais confiável, além de minimizar as perdas eminentes de vapor, podendo ajudar na identificação de problemas em um processo industrial.

Dentro deste contexto o presente trabalho fez um estudo de caso em uma caldeira do tipo aquatubular, que apresentava queda da eficiência ao longo do tempo. Os objetivos descritos anteriormente nesta dissertação, foram atingidos, utilizando-se os conceitos apresentados nesta revisão bibliográfica além dos fundamentos teóricos e outros aspectos relacionados e de grande relevância para a operação da caldeira que são mostrados no capítulo de materiais e métodos a seguir, o capítulo mostra também a caldeira estudada em detalhes.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Estudo de caso: Caldeira aquatubular e seus componentes

3.1.1. Caldeira aquatubular

Este tópico apresenta as características de fábrica de uma caldeira aquatubular e faz uma caracterização de forma simplificada dentro do processo ao qual pertence. Ressalta-se que o equipamento apresentado foi o alvo de estudo da presente dissertação.

A caldeira estudada caracteriza-se por uma capacidade de geração máxima contínua de 150.000 kg/h de vapor superaquecido a 53 kgf/cm² e 400 ºC. A temperatura da água de alimentação na saída do desaerador é de 120 ºC e do gás na saída da fornalha de 1246 ºC, e foi projetada para a queima de óleo e gás combustível através de quatro maçaricos, fornecendo energia suficiente para que o vapor possa chegar aos níveis de pressão e temperatura especificados.

3.1.1.1. Componentes da caldeira

Um dos componentes que integram a caldeira aquatubular é o pré-aquecedor de ar/vapor o qual foi o equipamento alvo do estudo atual. Esse pré-aquecedor situa-se na tubulação de ar para a combustão que é realizada no interior da caldeira, como mostra a figura 6.

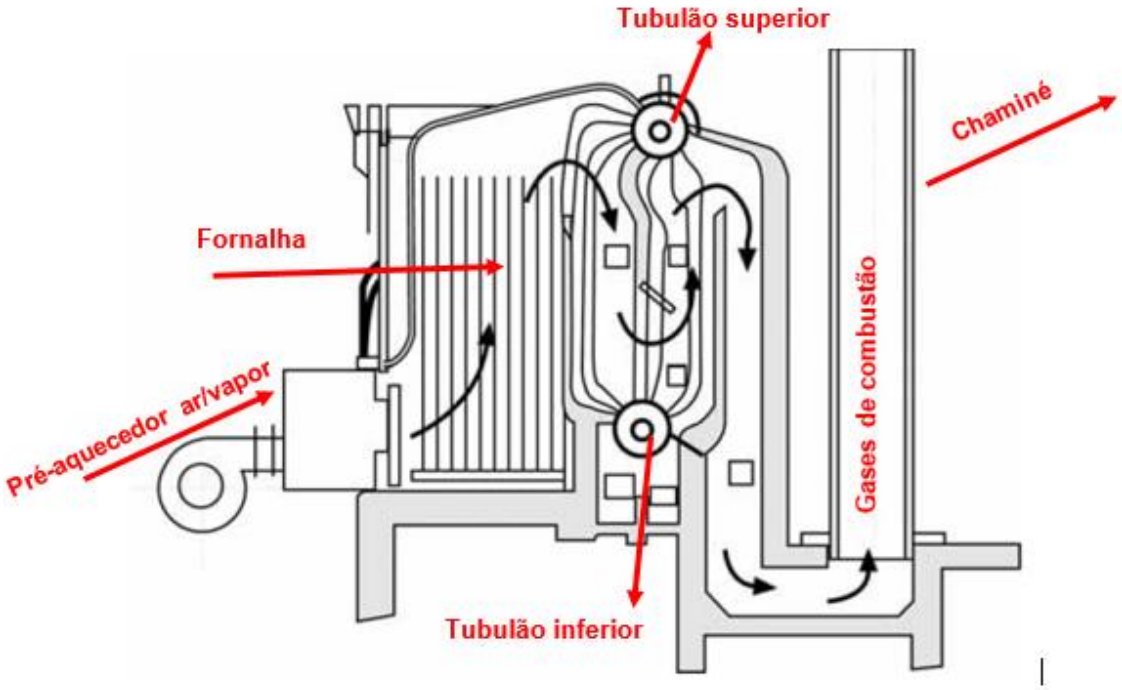

Figura 6 – Localização do pré-aquecedor ar/vapor na caldeira.
(Fonte: PÊRA,1990)

O pré-aquecedor ar/vapor identificado na figura 7, tem a função de aquecer o ar de combustão para não permitir que a temperatura dos gases de saída se estabeleça abaixo do ponto de orvalho (*Dew Point),* evitando assim sua condensação parcial e formação do meio corrosivo cujo principal componente é o ácido sulfúrico (PERRY, 2008). Isso se deve ao fato que, no acendimento da caldeira, há queima de óleo combustível que contém enxofre, e com a reação do ar ainda com resíduo de condensado os gases de combustão, inicia-se um processo de corrosão das partes internas dos equipamentos existentes na caldeira. Com isso, torna-se evidente a necessidade de ações para manter esta temperatura acima do *dew point,* para a preservação do material.

Figura 7 - Pré-aquecedor de ar /vapor no duto de ar da caldeira.

A transmissão de calor nos aquecedores de ar é feita mediante vapor e possui uma separação dos fluidos envolvidos, sendo que o vapor flui internamente aos tubos, enquanto que o ar passa pelo lado externo aletado como demonstrado na figura 8.

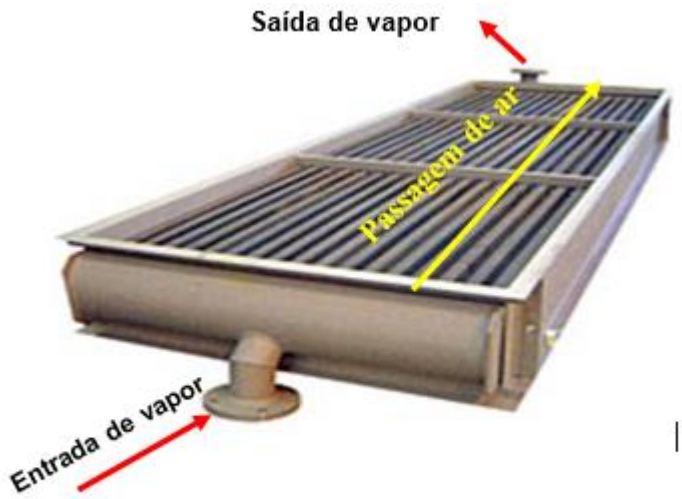

Figura 8 – Vista detalhada do pré-aquecedor ar/vapor.

A região do feixe é soldada aos tubos aletados em suas extremidades, para permitir uma adequada distribuição do fluido do lado dos tubos. O material de fabricação desses tubos e as aletas é o aço-carbono galvanizado externamente, para melhorar a ligação metálica entre ambos, e proporcionar resistência a desgastes térmicos, mecânicos e à corrosão. A operação do pré-aquecedor de ar/vapor é feita

com vapor nos internos dos tubos para propiciar uma alta transmissão de calor do lado do ar, e devido à baixa turbulência e a presença das aletas retangulares, possibilita otimização da área de troca, resultando assim em uma construção compacta.

Esses tipos de equipamentos devem possuir uma válvula regulatória de admissão de vapor e uma válvula de saída para o condensado direcionado ao purgador de vapor, para evitar os golpes de aríete os quais poderiam causar danos no equipamento.

A produção de vapor gerada pela caldeira com o pré-aquecedor de ar/vapor, inicia-se com a captação de ar feita diretamente da atmosfera que é insuflado através de um ventilador de tiragem forçada de duplo acionamento, ou seja, pode ser operado por energia elétrica ou turbina. A função do ventilador é fornecer uma quantidade de ar suficiente para prover o oxigênio necessário à combustão, fornecendo também um excesso para que a combustão completa seja realizada. Quando em operação, este direciona o ar através de um duto como representado na figura 9, que tem a função de encaminhar este fluido para o frontal da caldeira, para se combinar com o combustível e ser efetuada a combustão completa.

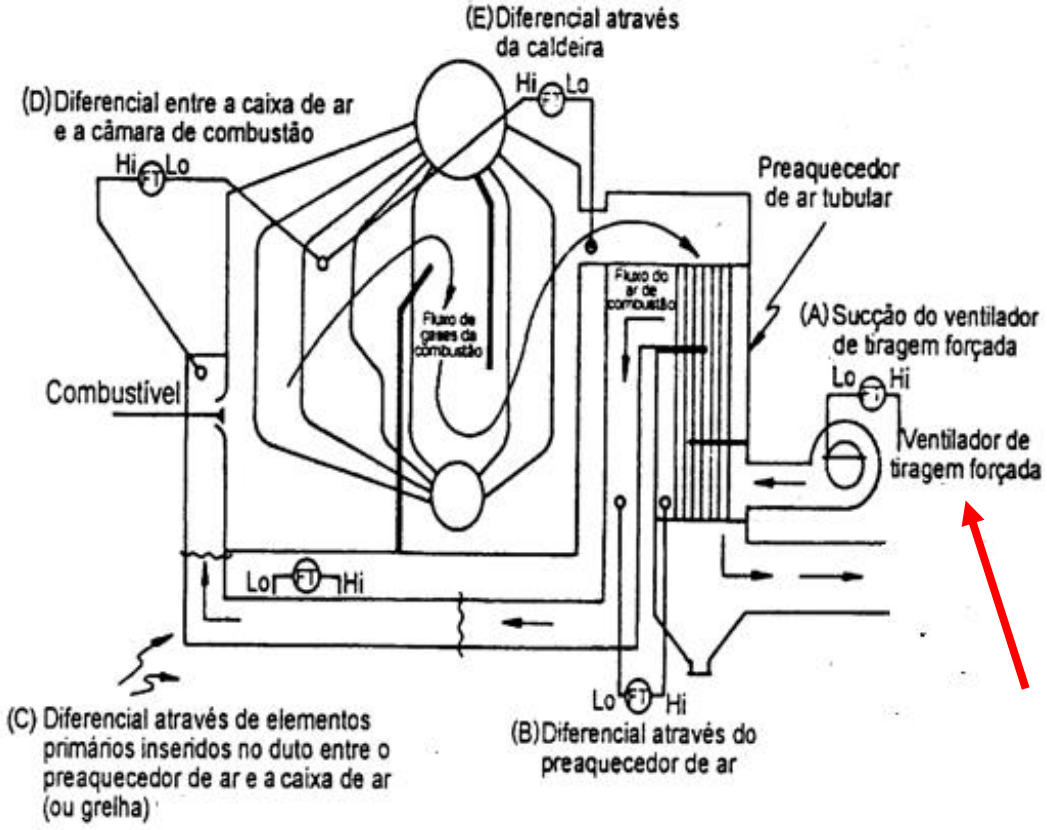

Figura 9 – Localização do ventilador de ar.
(Fonte: PROMINP/PETROBRÁS, 2008)

Apesar de possuir uma baixa pressão de insulflamento, a vazão é alta, podendo ocorrer ressonância nas paredes dos dutos, comprometer a sua estrutura, e até mesmo outras partes da caldeira. A figura 10 demonstra o pré-aquecedor de ar/vapor instalado na caldeira.

Figura 10 – Instalação do pré-aquecedor ar/vapor.

O combustível responsável para a realização da combustão na fornalha ou zona de radiação, é direcionado através de um duto mostrado na figura 11, também para a região do frontal de queima da caldeira, se lançando diretamente para o maçarico queimador, que tem a finalidade de envio do combustível para iniciar o processo da combustão.

Esse maçarico possui dois tipos de lanças: a central que é a responsável para a queima de óleo combustível e oito lanças periféricas que são utilizadas quando na queima de gás, como mostrado na figura 12.

Figura 11 – Duto de combustível.

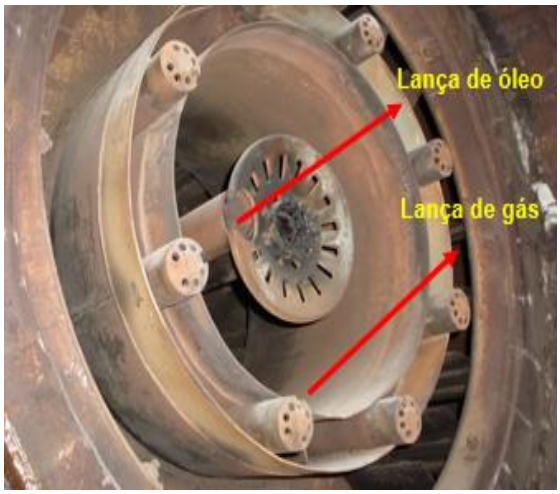

Figura 12 – Maçarico de queima de combustível.

Após a entrada de ar e óleo combustível, é feita a ignição para iniciar o processo de combustão para produção de vapor, que é realizada através de um dispositivo de acendimento também conhecido como piloto de acendimento. Esse sistema é composto de um pequeno maçarico a gás, um sensor de detecção de chama conhecido como eletrodo, um ignitor para a geração da faísca, e ainda um pequeno duto de ar para iniciar o processo de combustão como mostra a figura 13.

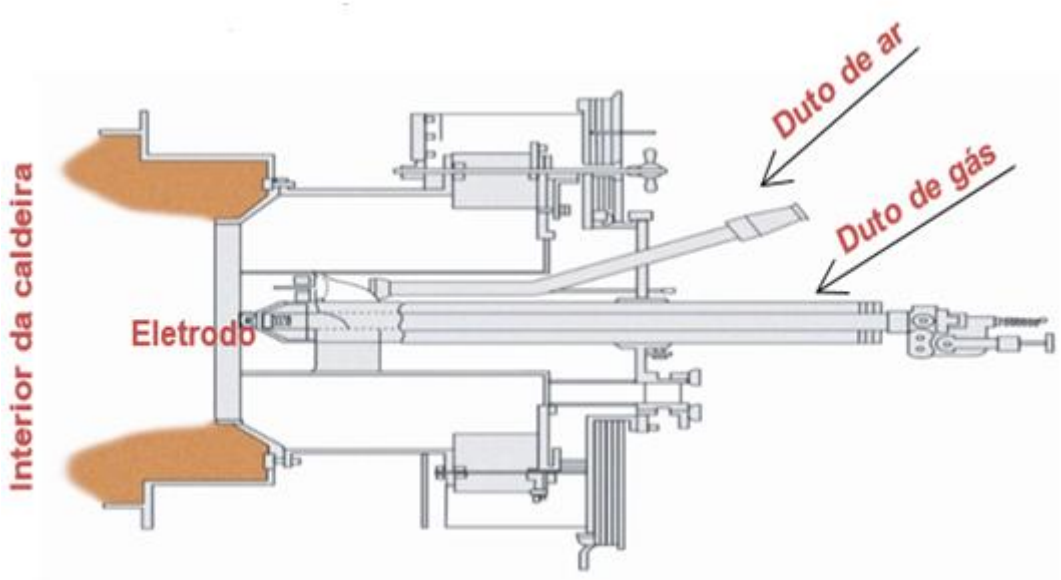

Figura 13 – Piloto de acendimento da caldeira.

Quando se inicia o acendimento na fornalha mostrada na figura 14 com óleo combustível, a chama é produzida iniciando com isso o processo de combustão e o início da transferência de energia para os tubos aquecendo a água que será convertida em vapor.

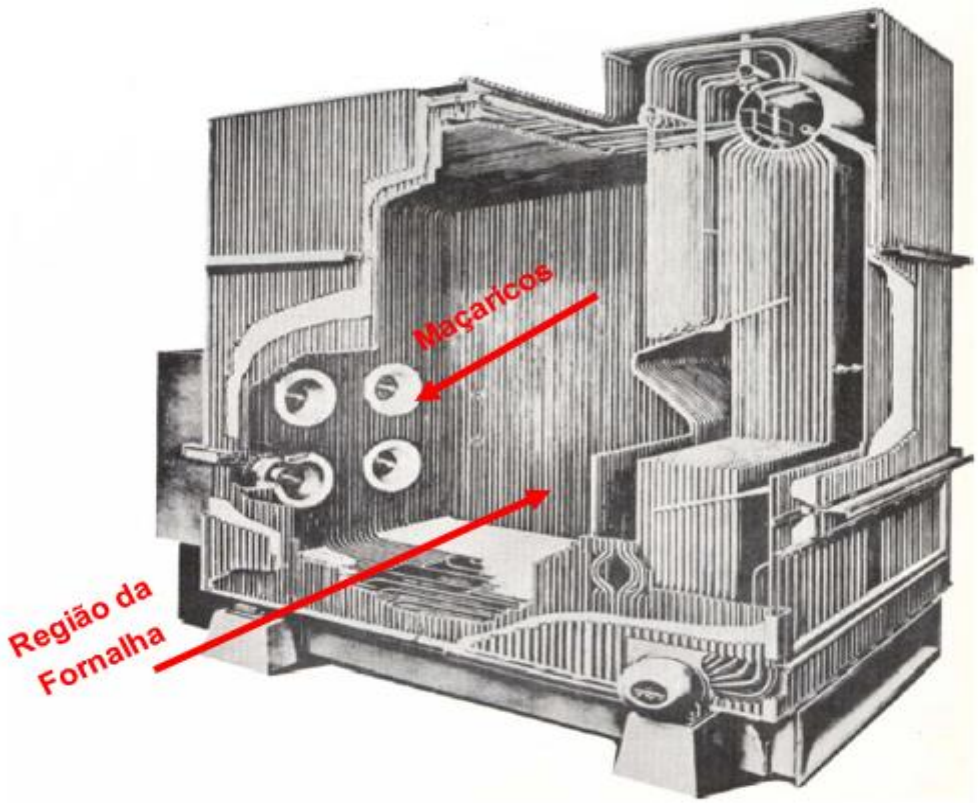

Figura 14 – Fornalha da caldeira.
(Fonte: CBC, 1998).

No processo de acendimento da caldeira, feito com óleo combustível, os gases de combustão apresentam uma temperatura baixa tornando necessário o início de operação do pré-aquecedor de ar/vapor, com o objetivo de elevar a temperatura do ar para retirar o condensado, como mostra a figura 15.

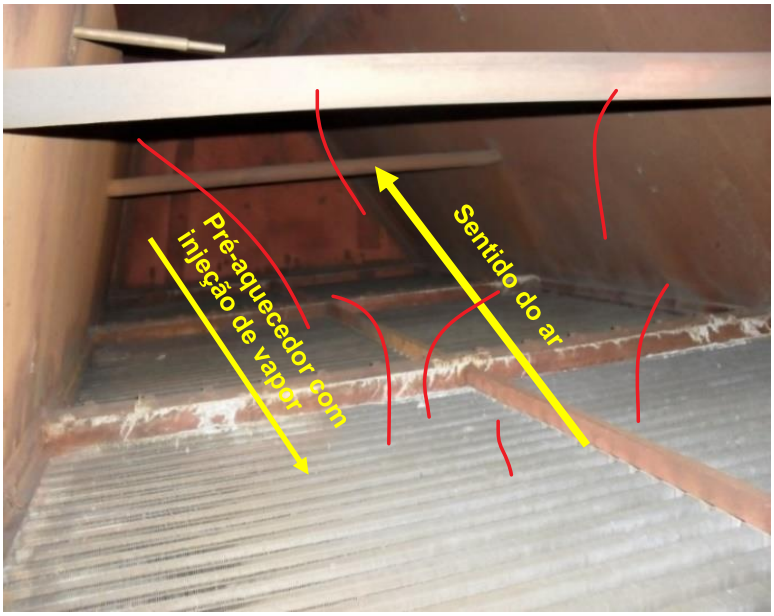

Figura 15 – Pré-aquecedor de ar/vapor em operação.

Após a estabilização da produção de vapor e aumento da temperatura dos gases de exaustão, o pré-aquecedor ar/vapor é retirado de operação e a caldeira passa a queimar gás natural em substituição do óleo combustível devido ao seu melhor rendimento.

Para que a vazão de vapor no processo seja mantida, é necessário o sistema de alimentação de água para a caldeira. O ciclo inicia-se no desaerador (figura 16), que é responsável pela redução da concentração de oxigênio da água para um valor inferior a 0,007 ppm, e também tem por função, eliminar completamente a concentração de dióxido de carbono.

Quando a água entra no desaerador, esta desce sobre as bandejas, e no contra fluxo é injetado vapor com pressão de 4 kgf/cm² para a retirada do oxigênio existente. Esse vapor tem por objetivo executar o desaeramento da água que a seguir é direcionada para um reservatório localizado na parte inferior, para que possa suprir as bombas de alimentação da caldeira.

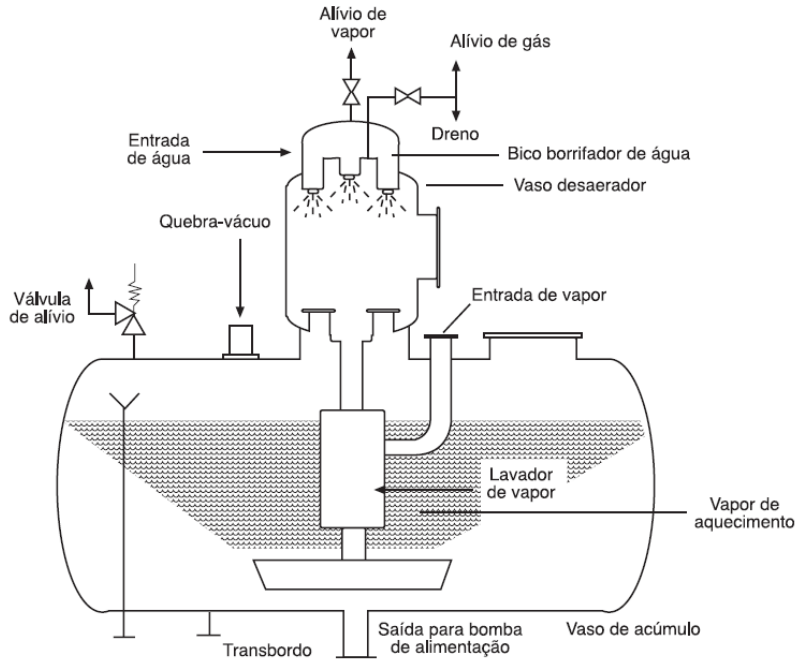

Figura 16 – Desaerador.

(Fonte: Eletrobrás, 2005a).

Após isentar-se de sais e gases dissolvidos, a água então é direcionada para a região do tubulão superior (figura 17), que tem o nível controlado em torno de 50 %, sendo este interligado com o tubulão inferior ou tambor de lama, através do feixe tubular, ou seja, um conjunto de tubos soldados em placas metálicas.

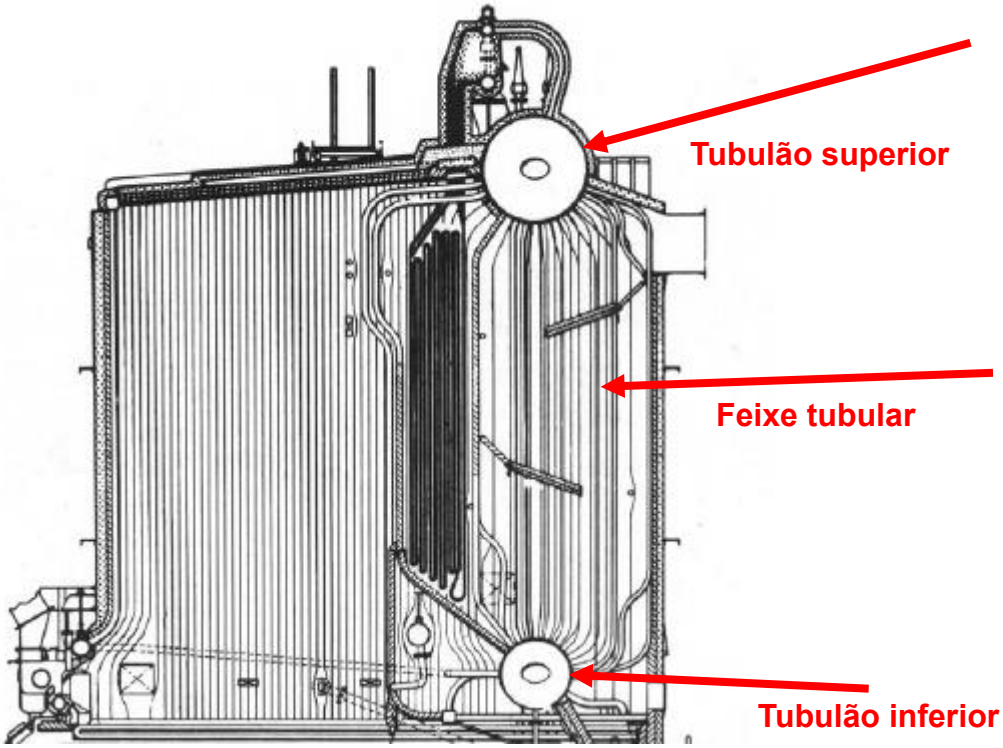

Figura 17 – Tubulões da caldeira.

(Fonte: CBC, 1998).

Tanto os tubos de água que descem do tubulão superior (*downcomers)*, quanto os tubos de vaporização que sobem para o tubulão superior (*risers)*, são fabricados em chapas de aço carbono, sendo que no tubulão inferior estão instaladas tomadas para purga ou descarga de fundo, utilizadas para remover parte da lama e resíduos sólidos originários do processo os quais podem causar corrosão.

Após o vapor deixar o tubulão superior, como mostrado na figura 18, ainda na forma de (vapor/líquido), ocorre elevação da sua temperatura para que ele se torne superaquecido, ou seja, recebe mais calor aumentando sua entalpia e sua energia interna através do superaquecedor (figura 19).

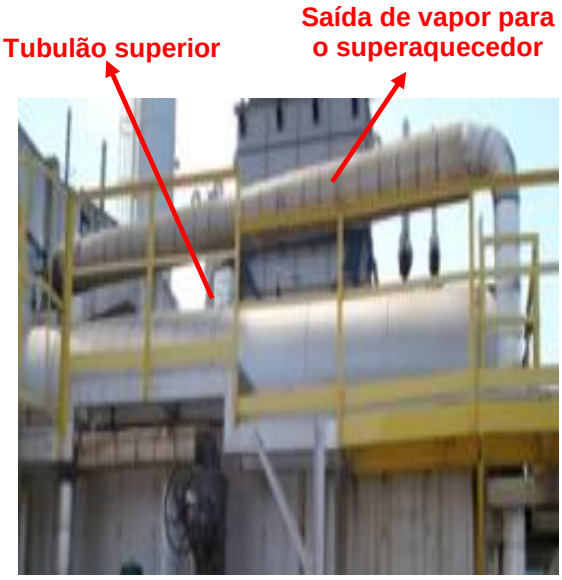

Figura 18-Saída de vapor do tubulão superior.

Figura 19 - Superaquecor de vapor.

Decorrido o tempo de operação da caldeira, as superfícies de troca térmica do pré-aquecedor de ar/vapor, devem ser mantidas limpas para que haja uma elevada taxa de transferência de calor mas, devido à necessidade industrial do vapor, esse procedimento torna-se inviável, pois as paradas para a manutenção obedecendo o SPIE (Serviço Próprio de Inspeção em Equipamentos) são feitas a cada 30 meses, ocorrendo com isso o acúmulo de fuligem nas superfícies do pré-aquecedor ar/vapor, como pode ser observado na figura 20.

Figura 20 - Pré-aquecedor de ar/vapor com depósito de fuligem.

3.2. Fundamentos teóricos utilizados na verificação e solução de problemas

Com o tempo a caldeira em estudo deu início a uma queda de eficiência e produção de vapor. Para a verificação dos fatores que estavam causando os danos, foram utilizados fundamentos teóricos que são apresentados a seguir. Após a detecção dos problemas envolvidos foi realizada uma tomada de decisão para melhorar a eficiência da caldeira e produção de vapor.

3.2.1. Cálculo da eficiência da caldeira

O método direto foi o cálculo utilizado para determinar a eficiência energética da caldeira. Esse método se constitui na relação entre a massa de vapor multiplicado pelas entalpias do vapor menos a da água de alimentação e a massa de combustível multiplicado pelo seu poder calorífico, conforme a equação 2.1 apresentada no capítulo 2. Essas variáveis afetam diretamente a eficiência na geração de vapor.

Os valores de entalpia foram extraídos de tabelas termodinâmicas (SONNTAG, 2009), com referência nos valores de pressão e temperatura de projeto, ou seja, vapor superaquecido a 53 kgf/cm² e 400 ºC com entalpia de 763,26 kcal/kg e água de alimentação para a caldeira com entalpia de 125,72 kcal/kg, valor aproximado para a temperatura de 120 ºC e pressão de 1,8 kg/cm². O valor do poder calorífico do gás natural foi fornecido pelo fabricante com o valor de 13.746 kcal/kg

3.2.1.1. Medição da vazão de vapor e combustível

Para a medição da vazão de vapor, foi usado um transmissor cujo princípio de funcionamento é a tomada de pressão diferencial gerada na tubulação a partir de uma placa de orifício (figura 21). A placa é um elemento primário inserido no tubo, o qual gera uma diferença de pressão (GILES, 1962).

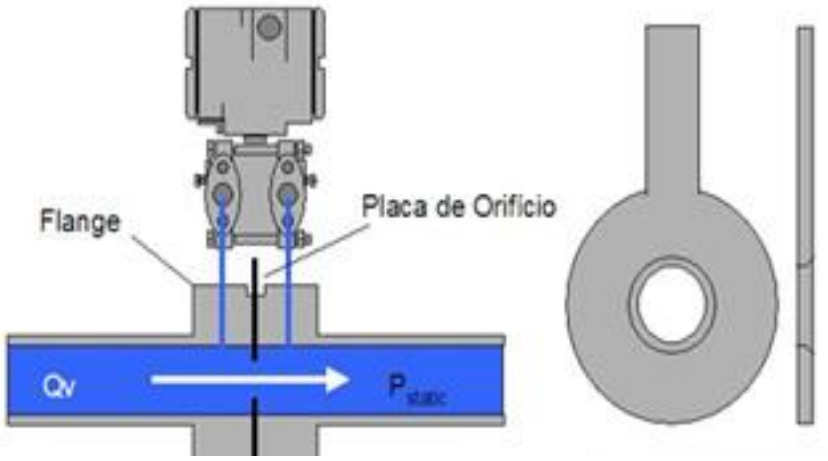

Figura 21 – Transmissor de medição de vapor.
(Fonte: SMAR, 2011)

Segundo WILSON (2005), esse dispositivo consiste basicamente de uma chapa metálica, perfurada de forma precisa e calculada, instalada perpendicularmente ao eixo da tubulação entre flanges, e sua espessura é calculada em função do diâmetro do duto e da pressão da linha, conforme a figura 22.

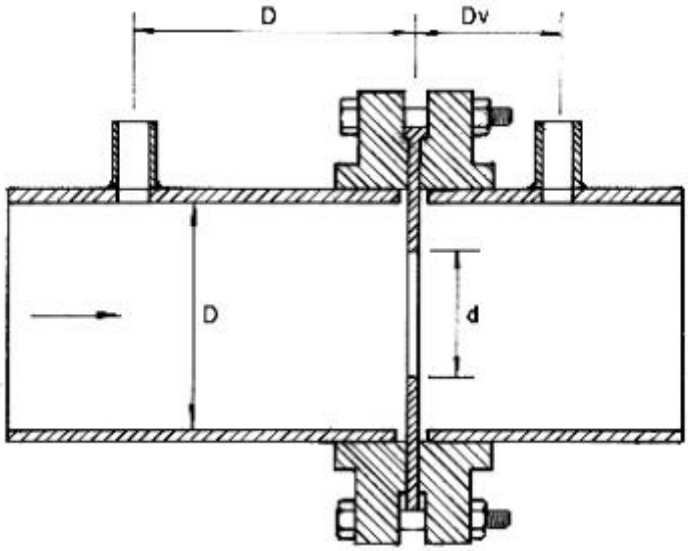

Figura 22 – Instalação da placa de orifício.
(Fonte: SENAI, 1999).

O consumo de combustível foi quantificado através de um medidor de vazão Coriolis, cujo princípio é a oscilação de um tubo interno ao medidor, que gera um sinal

proporcional à vazão e praticamente independente das propriedades do material, como demonstrado na figura 23.

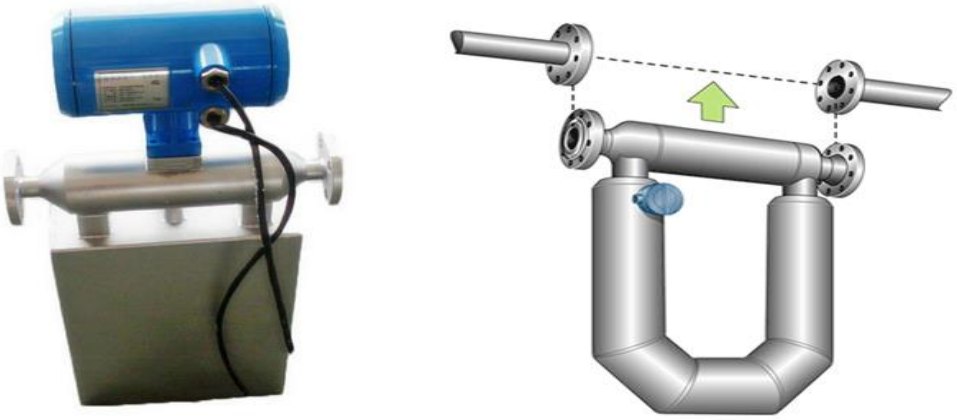

Figura 23 – Medidor de combustível Coriolis.
(Fonte: Emerson, 2012).

Os tubos dos medidores possuem um excitador ou bobina, ou seja, um dispositivo responsável por provocar uma frequência de vibração na tubulação na sua própria frequência natural à baixa amplitude. Quando o combustível percorre o tubo em vibração, surge o efeito Coriolis causando uma deformação, que é captada por meio de um sensor magnético com elevada sensibilidade, que gera um sinal proporcional à vazão mássica instantânea (figura 24).

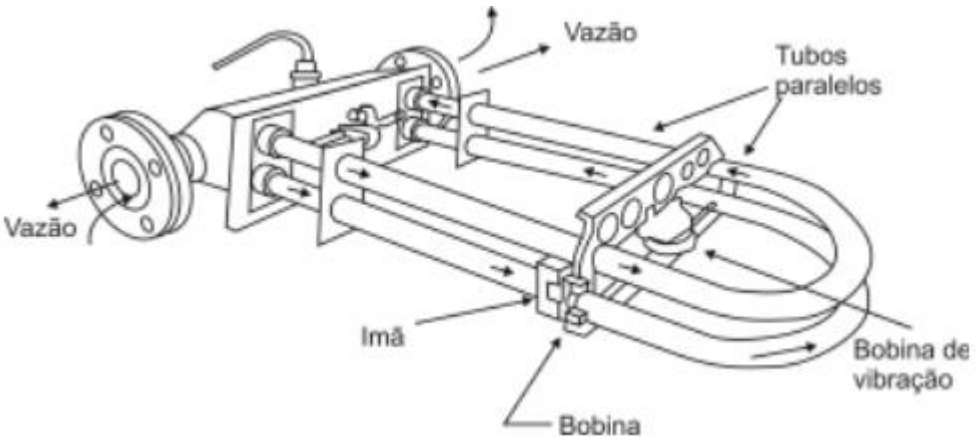

Figura 24 – Sinal gerado pelo medidor Coriolis.
(Fonte: SENAI, 1999)

O PI (*Plant Information*) é um sistema utilizado para a visualização dessas variáveis e tem por função monitorar e controlar o sistema. Esse supervisório captura e armazena em um banco de dados as informações sobre o processo e são apresentados em uma tela do sistema supervisório, como mostra a figura 25.

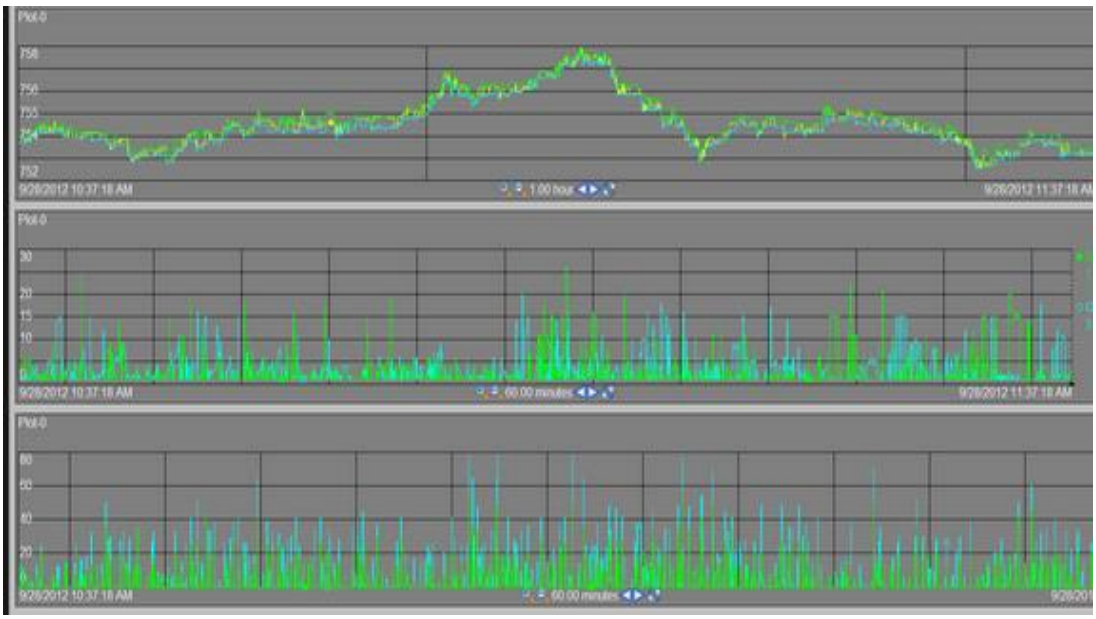

Figura 25 – Monitoramento da vazão de vapor e combustível.

Para controlar de forma mais eficiente o rendimento da caldeira, utilizou-se um aplicativo no sistema supervisório, que possibilita ao operador de painel fazer alterações das variáveis, que influenciam diretamente na equação de cálculo do rendimento da caldeira e no balanço de vapor, se estiverem fora dos parâmetros de controle.

As medições da vazão de vapor e combustível foram realizadas no período de Janeiro de 2010 e Dezembro de 2011.

3.2.2. Método para controle das vazões de vapor e combustível

3.2.2.1 Controle da vazão de vapor pelo método de três elementos

Com o propósito de eliminar as variações de pressão da água de alimentação para a caldeira devido as oscilações de carga de vapor, utilizou-se o controle de nível a três elementos. Esse sistema de controle utiliza um antecipatório com realimentação e um controle do tipo cascata, ou seja, ocorre a correção antecipada do nível pela vazão de vapor (BEGA, 2003).

Quando o nível permanece estável, a saída do somador fica em função do sinal recebido do transmissor de vazão de vapor e, caso o nível saia do ponto de ajuste, haverá variação na saída do controlador de nível (LRC), logo, a saída do somador passará a ser função dos sinais recebidos pelo transmissor de vazão de vapor (FT) e do LRC; até que o sistema volte para o *set point,* como mostrado na figura 26.

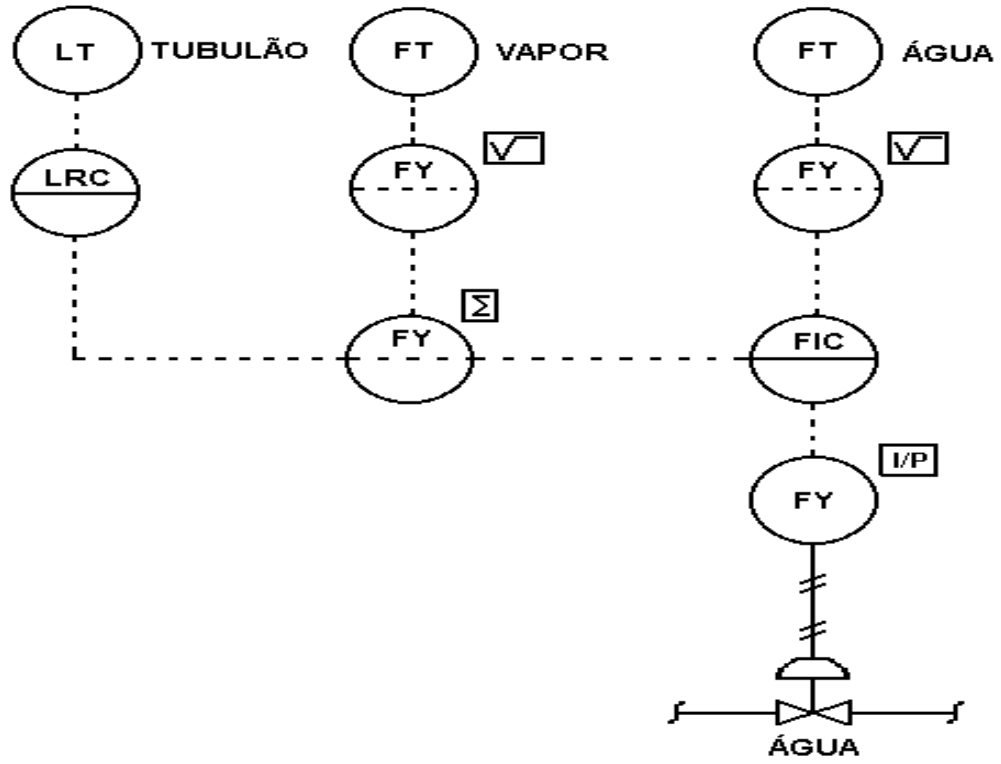

Figura 26 – Malha de controle a três elementos. LT-Transmissor de nível; LRC-Controlador registrador de nível; FT-Transmissor de vazão ; FY-Conversor do sinal de vazão; FIC-Controlador Indicador de vazão.

(Fonte: BEGA, 2003).

Para que não ocorra problemas no controle de nível da caldeira, esse sistema possui dois controladores que são selecionados de acordo com a pedida do operador de painel, ou seja, caso um dos transmissores sofra algum tipo de manutenção, tanto corretiva como preventiva, este será setado através de uma chave de comando via sistema supervisório. Além do descrito, o controle possui em seu tubulão superior duas micro chaves ou *micro-switch* que estão interligadas ao CLP (Controlador Lógico Programável) com o objetivo de intertravar a caldeira, e interromper imediatamente a sua produção caso o nível esteja acima de 75 % ou abaixo de 25 % (figura 27).

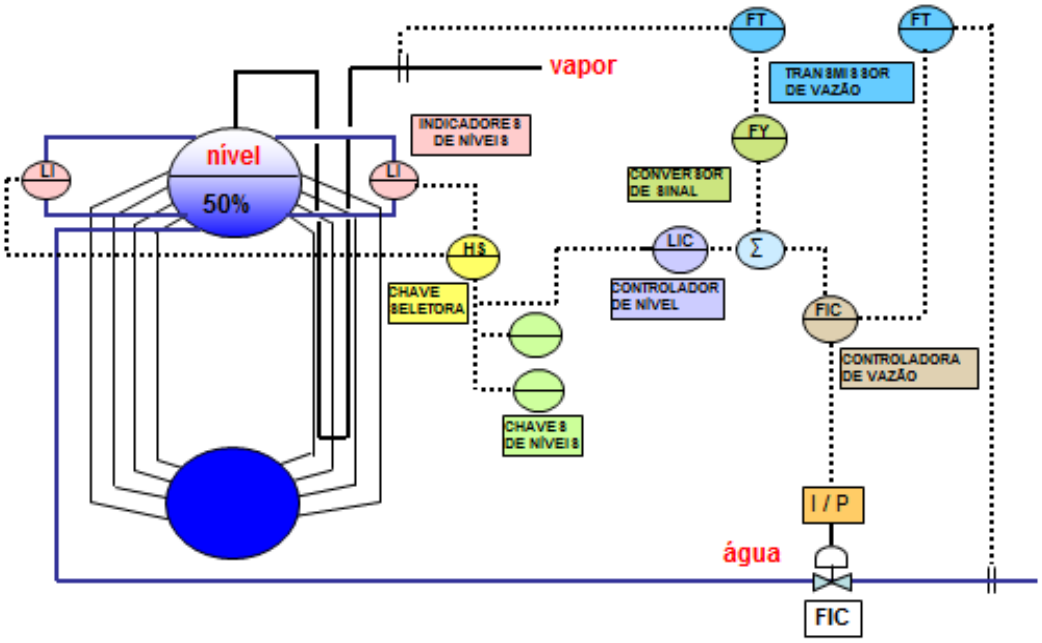

Figura 27 – Monitoramento do controle de nível. FT-Transmissor de vazão; LI-Indicador de nível; FY-Conversor do sinal de vazão; HS-Chave seletora;FIC-Controlador Indicador de Vazão.

3.2.2.2. Controle de combustível pelo método de limites cruzados

Caso haja uma diminuição da pressão do *header* devido a um aumento no consumo de vapor, haverá consequentemente um aumento do sinal de saída da PRC, que não é percebido pelo controlador de vazão do combustível. De forma inversa o controlador de vazão do ar de combustão responderá imediatamente este aumento,

com isto, haverá um acréscimo de sinal imediato da vazão do ar de combustão até que o sistema volte a se equilibrar, ou seja, neste tipo de controle caso ocorra um aumento de consumo de vapor, haverá inicialmente um aumento da vazão de ar de combustão e, a seguir, de combustível, ou seja, a vazão de combustível só será aumentada após o aumento da vazão de ar.

De forma inversa a situação anterior, se ocorrer um aumento na pressão do *header* devido a diminuição no consumo de vapor, o sinal de saída do controlador PRC diminui, sendo que este sinal não é sentido pelo controlador de vazão do ar de combustão, e sim pelo controlador de vazão de combustível, causando com isso uma diminuição na vazão de combustível. Em consequência deste controle pode-se observar que, quando ocorre uma diminuição no consumo do vapor, haverá primeiramente uma diminuição da vazão de combustível e a seguir, de ar, ou seja, a vazão do ar de combustão só será diminuída após a diminuição da vazão de combustível, como pode ser verificado na figura 28 (BEGA, 2003).

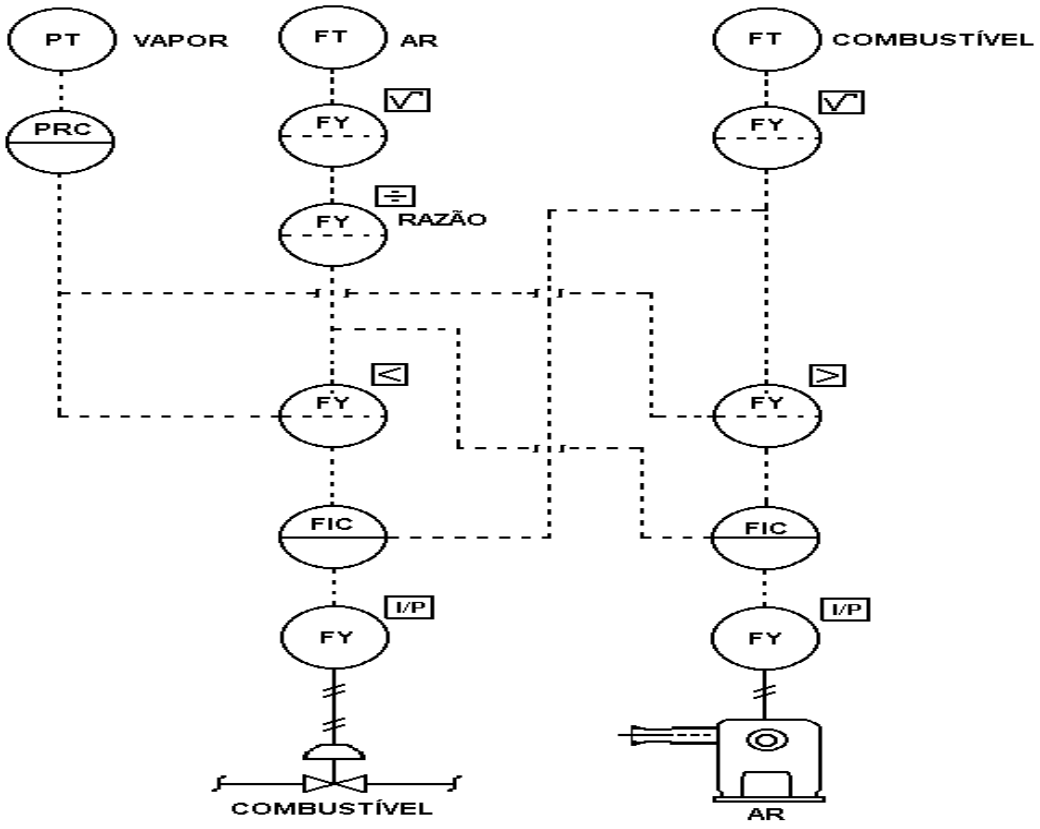

Figura 28 - Controle da vazão de combustível por limites cruzados. PT-Transmissor da pressão; FT-Transmissor de vazão; PRC-Controlador registrador de pressão; FY-Conversor de vazão; FIC-Controlador Indicador de vazão.

(Fonte: BEGA, 2003)

3.2.3. Método de simulação do sistema de vapor

O método usado para a simulação dos ganhos de vapor no processo é um sistema dedicado de distribuição que foi baseado no modelo genérico apresentado no item 2.5, dessa dissertação, que relaciona a produção e consumo de vapor de todo o processo industrial, ou seja, é a comparação entre essas duas variáveis considerando os equipamentos envolvidos. Neste processo os valores dividem-se em quatro níveis de pressão como mostra a tabela 3.

Tabela 3 - Distribuição de pressão no *header* de vapor.

Nível de vapor	Pressão (kgf/cm²)	Temperatura (ºC)
1	114	515
2	53	400
3	21	290
4	4	190

Estes níveis de pressão se distribuem em 4 *headers,* que são distribuídos por todo o processo industrial e tem por finalidade levar o vapor para alimentação dos equipamentos, como pode ser visualizado na figura 29.

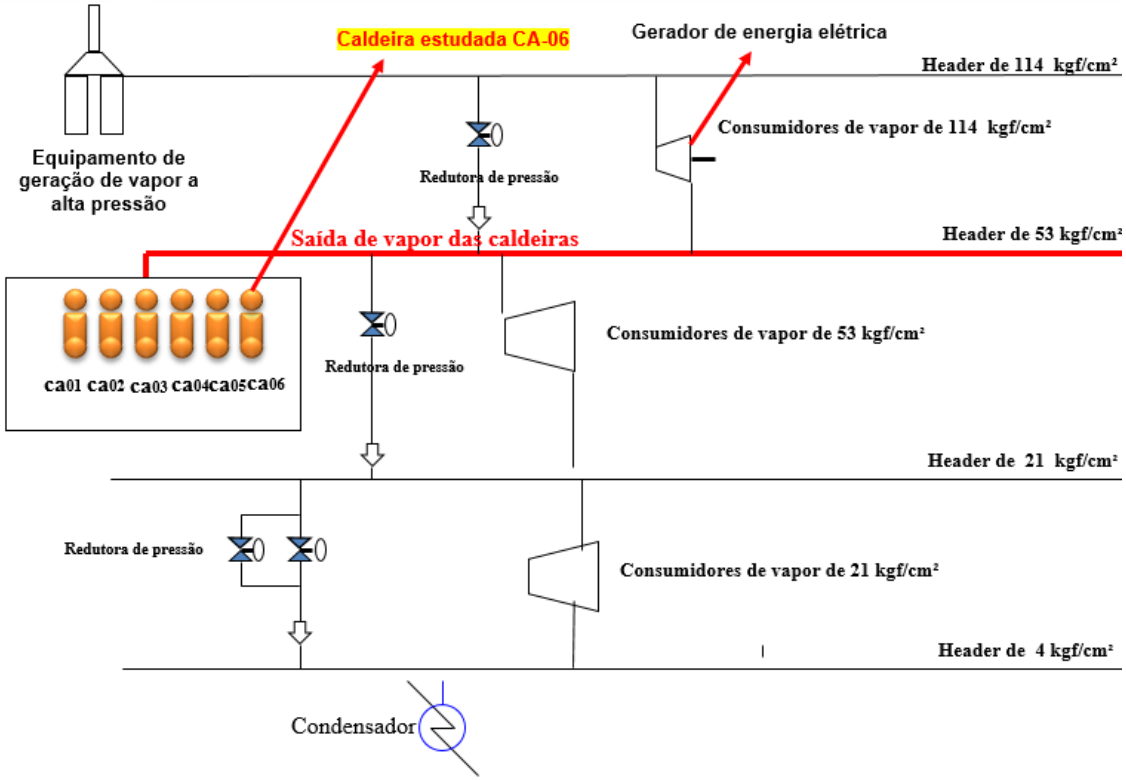

Figura 29 – Simulador de vapor.

Os *headers* operam em situações distintas, sendo que o primeiro nível de pressão de 114 kgf/cm², é fornecido por equipamentos de "craqueamento" de produto, e devido ao rápido resfriamento faz com que o vapor gerado nessa pressão forneça um total de 200.000 kg/h de vapor superaquecido que irá alimentar o gerador de energia elétrica, que tem por função fornecer energia para os equipamentos elétricos prioritários para manter a parte mais crítica da planta em operação, caso haja uma falta de energia elétrica.

A quantidade de vapor gerada à pressão de 114 kgf/cm² passa pela turbina do gerador, e pelo fato de ser uma turbina de contra pressão, a pressão é reduzida para o patamar para 53 kgf/cm², portanto, o mesmo nível de pressão produzido nas caldeiras.

O sistema representado possui seis caldeiras denominadas pelo *TAG* CA, sendo que quatro caldeiras tem uma produção de 80.000 kg/h (CA-01, CA-02, CA-03, CA-04) e duas caldeiras com uma produção de 150.000 kg/h (CA-05, CA-06), e a CA-06 é a caldeira considerada como o estudo de caso no presente trabalho. A soma da geração total de vapor das caldeiras é de 620.000 kg/h somado aos 200.000 kg/h produzida na contrapressão do gerador de energia elétrica perfaz um total de 820.000 kg/h de produção como mostra a tabela 4.

Tabela 4 – Geração de vapor do processo industrial.

TAG	Geração (kg/h)
Gerador de energia (GE-01)	200.000
Caldeira (CA-01)	80.000
Caldeira (CA-02)	80.000
Caldeira (CA-03)	80.000
Caldeira (CA-04)	80.000
Caldeira (CA-05)	150.000
CA-06 (Caldeira estudada)	**150.000**
Total	820.000

Além da produção de vapor, o simulador contabiliza o consumo total nas áreas industriais de processos, como mostrado na tabela 5.

Tabela 5 - Consumo de vapor no processo industrial.

Área	Consumo de vapor (kg/h)
01	420.000
02	220.000
03	60.000
04	120.000
Total	820.000

3.2.4. Determinaçao do custo do vapor

Segundo a ELETROBRÁS (2005b), para a determinação dos valores, é utilizado o índice de referência do custo de geração de vapor, que é o modo mais efetivo de avaliar a eficiência do sistema como mostrado na equação 3.1.

$$\text{Custo do Vapor} = \frac{\text{Custo}_{\text{comb.}} * \text{H}_{\text{vapor}}}{\text{PCI} * \eta} \quad \text{(R\$/ton.)} \qquad (3.1)$$

Em que:

$\text{Custo}_{\text{comb.}}$: Custo do combustível (R$/kg)

H_{vapor}: Entalpia do vapor (kcal/kg);

PCI: Poder Calorifico Inferior (kcal/kg);

η : Rendimento da caldeira (%).

3.2.5. Determinaçao da produção de vapor

Para designar o impacto no rendimento da planta industrial, com a redução da produção de vapor na caldeira antes da retirada do pré-aquecedor, é utilizado como referência de cômputo a produção total de vapor, considerando que a planta esteja com 100% de produção calculada através da equação (3.2).

$$\eta = \frac{\text{Produção total de vapor}}{Consumo\ de\ vapor\ total\ da\ planta} \tag{3.2}$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Cálculo da eficiência pelo método direto

O cálculo de eficiência da caldeira foi acompanhado durante dois períodos para efeito do presente estudo de caso, os quais são denominados por situação 1 e situação 2 descritos a seguir.

- Situação 1 (Ano de 2010): Período referência considerado em que o sistema começa a apresentar a perda de carga e a redução da eficiência da caldeira.
- Situação 2 (Ano de 2011): Período referência pós solução, a qual foi a remoção do pré-aquecedor ar/vapor.

4.1.1 Situação 1: Produção de vapor e consumo de combustível em 2010

O estudo foi baseado na média anual de produção de vapor em relação ao consumo de combustível, no ano de 2010, coletados pelo sistema PI de dados do processo com uma atualização *on-line* de aproximadamente de 1ms.

Neste período, a caldeira mostrou uma produção de 1.045.934,42 kg de vapor com uma média de produção diária de aproximadamente 119.390 kg/h conforme mostrado no gráfico da figura 30.

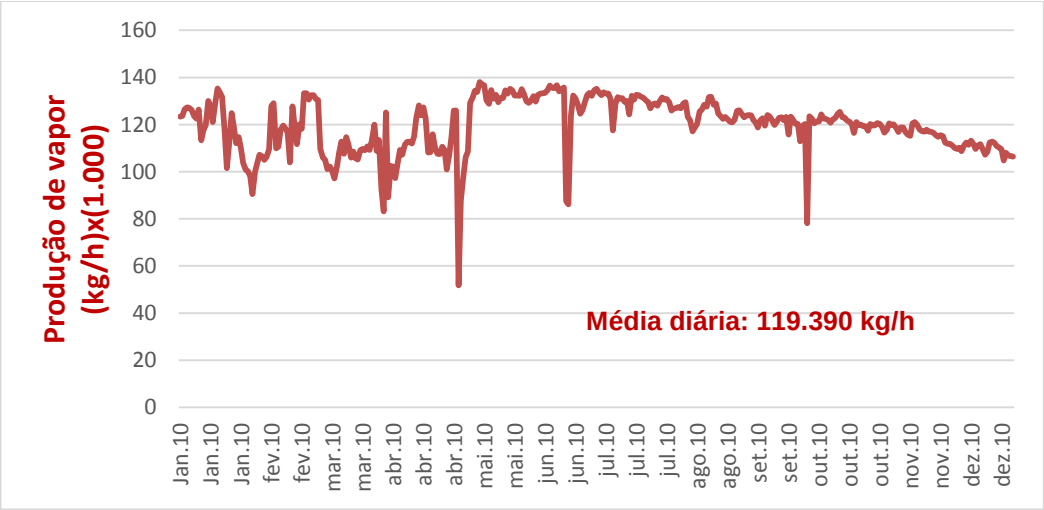

Figura 30 – Produção de vapor em 2010.

No gráfico verifica-se que a produção de vapor diminui consideravelmente no período analisado, fato este preponderante também para a diminuição da eficiência

energética da caldeira por esta trabalhar abaixo de sua produção máxima, pois este equipamento é projetado para produzir vapor com a melhor ponto de eficiência na ordem de 150.000 kg/h.

Neste panorama a quantidade de consumo de combustível neste mesmo período, chegou a um consumo anual na ordem de 65.336 kg com média diária de 7.562 kg/h, como mostra o gráfico da figura 31.

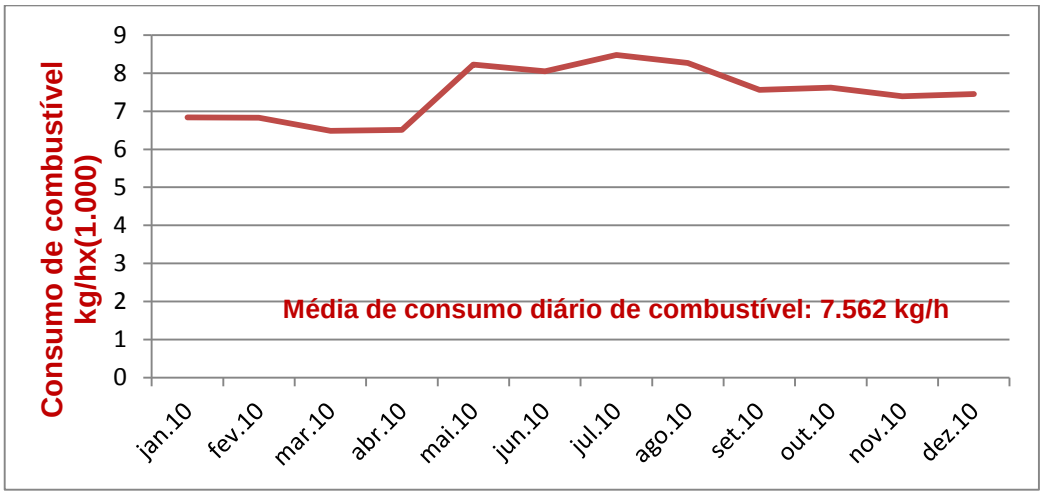

Figura 31 – Consumo de combustível em 2010.

Utilizando-se da tabela de propriedades termodinâmicas (Sonntag, 2009), para a obtenção das entalpias e o valor do poder calorífico do gás natural, (como dito anteriormente, após a partida da caldeira com óleo combustível, esta passava a operar com gás natural) apresenta-se a tabela 6.

Tabela 6 – Produção de vapor e consumo de combustível de 2010.

Produção de vapor	**119.390 kg/h**
Pressão do vapor produzido	53 kgf/cm²
Temperatura do vapor produzido	400 º C
Temperatura da água de alimentação	120 º C
Consumo médio de comb.	**7.562 kg/h**
Entalpia do vapor 400 ºC	763,26 kcal/kg
Entalpia da água 120 ºC	125,72 kcal/kg
Poder Calorífico Inferior	13.746 kcal/kg

Com os valores mostrados na tabela 6 e com a utilização da equação 2.1 calcula-se a eficiência da caldeira chegando-se ao valor de **73,22 %.**

O valor da eficiência apresentado pela caldeira em estudo esta inferior do que se espera para esse tipo de equipamento industrial que varia na faixa de 80 % à 90 % para diferentes combustíveis. Além disso foi possível verificar na figura 30 que a produção de vapor vinha sofrendo uma queda ao longo do tempo. Em uma indústria a perda de pequena porcentagem da eficiência gera grandes perdas econômicas.

Diversos estudos mostram a importância de se saber as variáveis que interferem na eficiência do processo, uma vez que o conhecimento das mesmas permite a manipulação do mesmo para a obtenção dos melhores resultados.

No caso em estudo, após uma análise detalhada realizada em cada uma das variáveis do processo que interferem na eficiência da caldeira, chegou-se a conclusão de que o problema estava no pré-aquecedor de ar/vapor. Não fez parte do escopo deste trabalho apresentar o estudo detalhado de cada variável que poderia estar causando tal redução na eficiência e sim, o impacto negativo (nesse estudo de caso em particular), que este equipamento estava influenciando no processo industrial, além de comprovar também a decisão acertada da retirada do pré-aquecedor ar/vapor.

A remoção do pré-aquecedor ar/vapor foi decidida após uma verificação do aumento da perda de carga que este vinha gerando devido ao acúmulo de fuligem, e além do aumento da eficiência e produção de vapor da caldeira, outros aspectos foram levados em consideração na retirada desse equipamento. Entre esses aspectos salienta-se os aspectos ambientais, operacionais e de segurança devido à limitação do *header* de vapor ocasionado pela perda de carga na caldeira.

No entanto com a retirada do pré-aquecedor ar/vapor, houve a alteração do combustível utilizado na partida da caldeira, pois agora seria somente utilizado o gás combustível, que não apresenta enxofre em sua composição, minimizando os problemas de corrosão e ambientais.

4.1.2 Situação 2: Produção de vapor e consumo de combustível em 2011, Pós retirada do pré-aquecedor ar/vapor

Neste período com a retirada do pré-aquecedor de ar/vapor, a caldeira apresentou uma produção anual de vapor na ordem de 1.084.048,20 kg com uma produção diária de 123.850 kg/h como mostrada na figura 32.

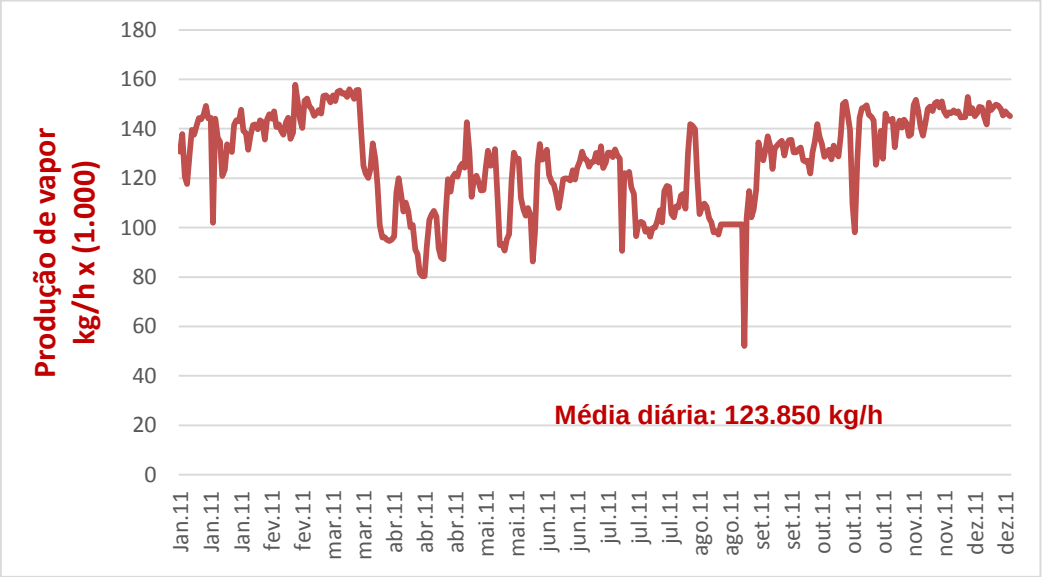

Figura 32 - Produção de vapor em 2011.

Como representado no gráfico, apesar do período de Março de 2011 a Agosto de 2011 ter reduzido a produção de vapor, mas por problemas operacionais não relativos a esta caldeira, observa-se no início do período Janeiro de 2011, logo após a retirada do pré-aquecedor ar/vapor, e em condições normais de operação, que a carga da caldeira culmine até a sua capacidade máxima de 150.000 kg/h, fato este observado também após o período de Agosto de 2011, depois da normalização do processo, que mesmo com a redução operacional de carga no período citado, pode-se verificar que a produção de vapor no ano de 2011 foi maior que a do mesmo período de 2010.

Somando-se todo o consumo de combustível no ano chega-se a um valor na ordem de 64.450 kg e consumo diário de 7.458 kg/h (figura 33).

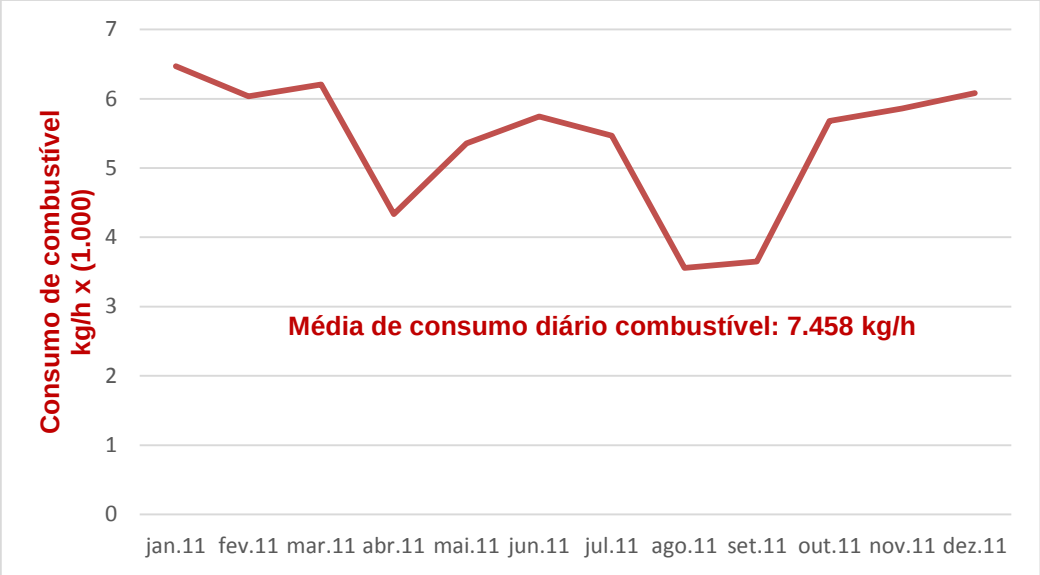

Figura 33 - Consumo de combustível em 2011.

A tabela 7 apresenta um panorama dos valores de produção de vapor, consumo de combustível e propriedades físicas utilizadas no cálculo para este período de 2011.

Tabela 7 - Produção de vapor e consumo de combustível de 2011.

Média diária de produção de vapor	**123.850 kg/h**
Pressão do vapor produzido	53 kgf/cm²
Temperatura do vapor produzido	400 º C
Temperatura da água de alimentação	120 º C
Consumo médio de comb.	**7.458 kg/h**
Entalpia do vapor 400 ºC	763,26 kcal/kg
Entalpia da água 120 ºC	125,72 kcal/kg
Poder Calorífico Inferior	13.746 kcal/kg

Com base nos dados apresentados na tabela 7, aplicando também a equação 2.1 de eficiência chega-se a valor de eficiência de **77,02 %.**

Após a determinação dos resultados, observou-se que o rendimento da eficiência da caldeira antes e após a retirada do pré-aquecedor de ar/vapor aumentou

aproximadamente 3,80%, ocorrendo também uma diminuição no consumo de combustível em relação à situação inicial no ano de 2010.

4.2. Ganho financeiro com a redução do consumo de combustível

Quantificando o ganho financeiro com um menor consumo de combustível devido à maior eficiência da caldeira sem o pré-aquecedor ar/vapor, obtém-se um ganho mássico de combustível de 104 kg/h que relacionado com o preço do combustível de R$ 1,1/kg, obtém-se os valores observados na tabela 8.

Tabela 8 – Ganhos financeiros com o aumento da eficiência.

Tempo	Ganho financeiro (R$)
Dia	2.745,60
Mês	82.368,00
Ano	988.416,00

4.3. Melhora do balanço de vapor pós a retirada do pré-aquecedor ar/vapor

O segundo benefício com a retirada do pré-aquecedor foi o incremento da produção de vapor da caldeira resultado de uma melhor *performance* na produção industrial. Para otimizar os cálculos do rendimento da planta industrial foi feito o emprego da equação (3.2), em cinco casos pontuais de perda da produção de vapor como citadas a seguir.

4.3.1. Caso 1: Produção da caldeira com 110.000 kg/h

Antes da retirada do pré-aquecedor ar/vapor, no final do período do ano de 2010, a caldeira CA-06 (estudo de caso) apresentava uma produção na ordem de 110.000 kg/h de vapor, ou seja, uma redução de 40.000 kg/h em relação ao seu projeto que é de 150.000 kg/h.

A tabela 9 apresenta um balanço de massa para a produção da caldeira de 110.000 kg/h.

Tabela 9 - Produção da caldeira de 110.000 kg/h.

Balanço de massa (kg/h)	
Produção total de vapor	780.000
Consumo total de vapor	820.000
Total de falta de vapor	**- 40.000**

Pode-se então calcular o valor de rendimento (equação 3.2) da planta obtendo-se assim **95,12 %.**

Conforme observado houve uma redução de aproximadamente 5% da capacidade total de produção da fábrica, ou seja, verifica-se que a limitação de vapor influência diretamente na produção.

4.3.2. Caso 2: Produção da caldeira com 120.000 kg/h

No segundo caso pontual, é observado um aumento de carga de vapor na ordem de 10.000 kg/h como visualizado na tabela 10.

Tabela 10 – Produção da caldeira de 120.000 kg/h.

Balanço de massa (kg/h)	
Produção total de vapor	790.000
Consumo total de vapor	820.000
Total de falta de vapor	**- 30.000**

Com esse aumento de carga o rendimento passa a ser de **96,34 %.**

4.3.3. Caso 3: Produção da caldeira com 130.000 kg/h

Utilizando o mesmo procedimento da situação anterior analisa-se agora um aumento na produção de vapor em 20.000 kg/h, ou seja, mais um incremento na produção da caldeira como observado na tabela 11.

Tabela 11 – Produção da caldeira de 130.000 kg/h.

Balanço de massa (kg/h)	
Produção	800.000
Consumo	820.000
Total de falta de vapor	**- 20.000**

Com esse aumento de carga verifica-se mais uma elevação da produção analisada pelo rendimento que passa a ser de **97,56 %.**

4.3.4. Caso 4: Produção da caldeira com 140.000 kg/h

Na tabela 12 visualiza-se a produção da caldeira de 140.000 kg/h de vapor.

Tabela 12 – Produção da caldeira de 140.000 kg/h.

Balanço de massa (Kg/h)	
Produção	810.000
Consumo	820.000
Total de falta de vapor	**- 10.000**

Assim como nas outras situações foi analisado pontualmente o valor do rendimento obtendo-se **98,78 %.**

4.3.5. Caso 5: Produção da caldeira com 150.000 kg/h

Tem-se agora o último caso situação pontual com a produção da caldeira (CA-06) em carga nominal como verificado na tabela 13.

Tabela 13 – Produção da caldeira de 150.000 kg/h.

Balanço de massa (kg/h)	
Produção	820.000
Consumo	820.000
Total de falta de vapor	**0,000**

Com a carga total de vapor produzido pela caldeira chega-se a um rendimento máximo da planta industrial na ordem de **100 %.**

4.4. Ganho financeiro com o aumento de produção da planta

4.4.1.Ganho com o custo do vapor produzido

Considerado o grande porte da caldeira, relacionada ao consumo de combustível, pode-se então calcular o ganho financeiro obtido com a melhora da eficiência.

Para a determinação dos valores, utilizou-se o preço e o PCI do gás natural, da eficiência da caldeira e da entalpia do vapor mostrado na tabela 14. Os cálculos foram efetuados com o emprego da equação (3.1).

Tabela 14 – Valores para a determinação do custo de vapor produzido no ano de 2010.

Custo do combustível	R$ 1,1/kg
Entalpia do vapor	763,26 kcal/kg
PCI do combustível	13.746 kcal/kg
Rendimento da caldeira	73,22 %

Utilizando os valores fornecidos na tabela, obtém-se um custo do vapor produzido no ano de 2010 (antes da retirada do pré-aquecedor ar/vapor) de **R$ 83,41/ton.**

Da mesma forma com os dados fornecidos da tabela 15 e a aplicação da equação (3.1), o custo do vapor de pós retirada do pré-aquecedor ar/vapor é na ordem de **R$ 79,30/ton**.

Tabela 15 – Valores para a determinação do custo do vapor produzido no ano de 2011.

Custo do combustível	R$ 1,1/kg
Entalpia do vapor	763,26 kcal/Kg
PCI do combustível	13.746 kcal/Kg
Rendimento da caldeira	77,02 %

Com isso a diferença entre o custo antes e depois da retirada do pré-aquecedor de ar/vapor foi de **R$ 4,11/ton.** que relacionado pela produção de 150.000 kg/h da caldeira, chega-se aos valores observados na tabela 16.

Tabela 16 – Ganhos financeiros com a redução do custo do vapor produzido.

Tempo	Ganho financeiro (R$)
Dia	14.796,00
Mês	443.880,00
Ano	5.326.560,00

Conclui-se, portanto, que com a melhora da eficiência da caldeira de 73,22 % no ano de 2010, para 77,02 % em 2011, além do ganho mássico de combustível de 104 kg/h, obteve-se também os ganhos com a redução do preço do vapor e isto é indicado na tabela 16, que mostra o ganho financeiro da empresa.

Como verificou-se nesse trabalho o custo de cada unidade de vapor é muito importante, pois nos indica a viabilidade de implantação desse projeto.

4.4.2. Ganho com o aumento de produção da planta

Para calcular o ganho financeiro com o aumento de produção na planta baseado na elevação da produção de vapor, tomou-se como base de cálculo uma empresa hipotética com faturamento de R$ 1.000.000,00 diário que através da tabela 17, pode-se verificar os ganhos com o maior rendimento da planta industrial.

Tabela 17 – Ganhos financeiros com o aumento da produção da planta.

Rendimento (%)	Diário (R$)	Mensal (R$)	Anual (R$)
95,12	951.200,00	28.536.000,00	342.432.000,00
96,34	963.400,00	28.902.000,00	346.824.000,00
97,56	976.600,00	29.298.000,00	351.576.000,00
98,78	987.800,00	29.634.000,00	355.608.000,00
100	1.000.000,00	30.000.000,00	360.000.000,00

4.5. Aumento da confiabilidade do processo devido a decisão da retirada do pré-aquecedor ar/vapor

Uma tomada de decisão em um processo industrial pondera todos os parâmetros para tentar diminuir a possibilidade consequências negativas, tanto para a empresa como para a integridade das pessoas e equipamentos.

Com a retirada do pré-aquecedor ar/vapor, além dos ganhos já salientados, considera-se também outras parcelas como ganhos ambientais de segurança e confiabilidade, pois na ocorrência de um distúrbio operacional há uma maior flexibilidade do uso de vapor e consequentemente melhor estabilidade do sistema de controle, contribuindo assim diretamente para a continuidade do processo produtivo.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

Verificou-se que para atender a demanda do processo, o sistema necessita de grande quantidade de vapor assim como de combustível, e um dado relevante desse balanço é que quaisquer quantidade desses insumos podem gerar grandes perdas financeiras. A implementação de técnicas que demonstram a identificação e quantificação de entrada e saída do sistema, foram determinantes para a melhoria de *performance* da caldeira assim como do processo compreendida em cada etapa do ciclo de geração.

Com base no estudo do período de 2011, ano que foi retirado o pré-aquecedor de ar/vapor, percebe-se claramente a diminuição do consumo de combustível, e em contrapartida, o aumento da produção de vapor. Comprovou-se assim que o pré-aquecedor ar/vapor proporcionava uma perda de carga devido ao acumulo de fuligem ao longo do tempo, tendo como consequência uma queda no rendimento e produção de vapor da caldeira.

A pesquisa com a análise dos dados nesse período permitiu apresentar três ganhos relevantes:

1. Disponibilidade maior de vapor para os equipamentos industriais;
2. Melhor desempenho da caldeira influenciando diretamente nos custos de manutenção do equipamento;
3. Ganho financeiro obtido através da redução do consumo de combustível e do preço de vapor, devido ao aumento de eficiência e aumento da produção de produtos do processo.

Após a análise das diversas etapas do processo dois importantes pontos foram verificados:

1) Eficiência energética – Aumento considerável dos valores desta variável já que antes da retirada do pré-aquecedor de ar/vapor este valor era de 73,22 % e após este valor passou a ser de 77,02%. Este aumento de 3,8 % representa um ganho muito

significativo quando se aborda rendimento em caldeira ocorrendo, concomitantemente a redução da queima de combustível e assim maior ganho.

2) Quantidade de vapor – Depois de analisado o balanço de vapor pode-se, claramente, verificar que a retirada do equipamento em estudo aumentou sensivelmente os ganhos mássicos de vapor, importante para a produção dos produtos industriais assim como a economia de energia elétrica.

5.2. SUGESTÕES

Com base nos dados apresentados sugere-se abordar outras técnicas como:

1) Melhorar a eficiência analisando o isolamento térmico da caldeira;
2) Evidenciar perdas energéticas em purgadores;
3) Estudar a otimização no uso da energia existente nos gases de combustão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

AGUIAR, W.; **Eficiência energética de um gerador de vapor, através do método indireto**. Acta Iguazu, Cascavel, v.3, n.4, p.124-144, 2014.

ANDRADE, L.P.,**Petro&química**. Ed. 359, 2014.

ASME PTC 4, 2008.

BEGA, E.A., **Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras**. Rio de Janeiro, RJ, 2003. 179 p.

BOTELHO, M.H.C.; BIFANO,H.M.- **Operação de caldeira.** São Paulo, SP, 2011.

CBC.; **Manual do equipamento**. revisão 1, São Paulo, SP, 1998

CEFET, **Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia,** 1993

DOE,F.H.;**Thermodynamics, heat transfer, and fluid flow.** Washington, D.C.,Jun.92,138 p.

ELETROBRÁS CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRA.; **Eficiência Energética no uso de Vapor.** São Paulo, SP, 2005 a, 196 p.

ELETROBRÁS CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRA.; **Manual no uso de Vapor.** São Paulo, SP, 2005 b, 95 p.

ELETROPAULO.; **Manual de Energia.** São Paulo, SP, 2004.

EMERSON; **Manual do equipamento.** Revisão e, São Paulo, SP, 2012.

FOGLIATTO.F.S.; RIBEIRO,J.L.D.; **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro, RJ, 2009.

GARY,J.G**.; STOICHIOMETRY.** Golden, CO, 2004, 21 p.

GILES;,R.V.;**Fenomenos de transporte e Mecânica dos Fluidos**. New York, USA, 1962, 40 p.

NHAMBIU,J.; **Perdas de Calor nos geradores de vapor**, 2013 ,34 p.

OLIVEIRA, F.F., **Estudo do sistema de controle de caldeiras em centrais termoelétricas, Vitória, E.S.,** 2008, Projeto de Graduação do Departamento do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo,

PERA, H., **Geradores de vapor**. Ed. FAMA, São Paulo, 1990

PEREIRA.C.A.A.;SANTÉRIO,E.L.;LAGEMANN.V.;(*1993),***Caldeiras aquatubulares em refinaria.** Curitiba,PR, 2002, 47 p.

PERRY.; Gas-Solid Operations and Equipment, 2008, 63 p.

PROMINP/PETROBRÁS, **Tipos e aplicações de caldeiras.** Escola Politécnica 2008, 112 p.

SENAI**, Instrumemntação básica II**, 1999.

SMAR, **Aspectos de instrumentação & controle automático de processos,** 2011, 141 p.

SONNTAG,V.W.; **Fundamentos da termodinâmica**, 2009, 5º Ed., 607 p.

TELLES,P.C.S., **Tubulações Industriais.** 9º Ed. Editora LTC ,2001,Rio de Janeiro-RJ,176 p.

VEGA,0.; **Curso de tratamento de água**, 1989, Ed.Unicamp, p.9-71.

VIANA, U.B.; **Instrumentação II,** 1999, 242 p.

WILSON,J.S.;**Sensor Technology Handbook,** USA, 2005, 708 p.

APÊNDICE A – Fotos detalhada da caldeira

Para que houvesse mais riqueza de detalhes nesta dissertação, tem-se disponibilizada as fotos (figuras A1 à A13) que fazem parte integrante da caldeira.

Figura A1 - Compartimentos de entrada de ar na caldeira.

Figura A2 - Detalhe de uma lança do maçarico de gás.

Figura A3 - Piloto de acendimento da caldeira.

Figura A4 – Qualidade da chama no acendimento da caldeira.

Figura A5 – Qualidade da chama em carga nominal da caldeira.

Figura A6 - Registro de entrada de ar para controle da chama.

Figura A7 - Saída dos gases de combustão da fornalha.

Figura A8 - Duto de captação dos gases de combustão da caldeira.

Figura A9 – Interior do tubulão superior.

Figura A10 – Interior de tubulão inferior com resíduo de lama.

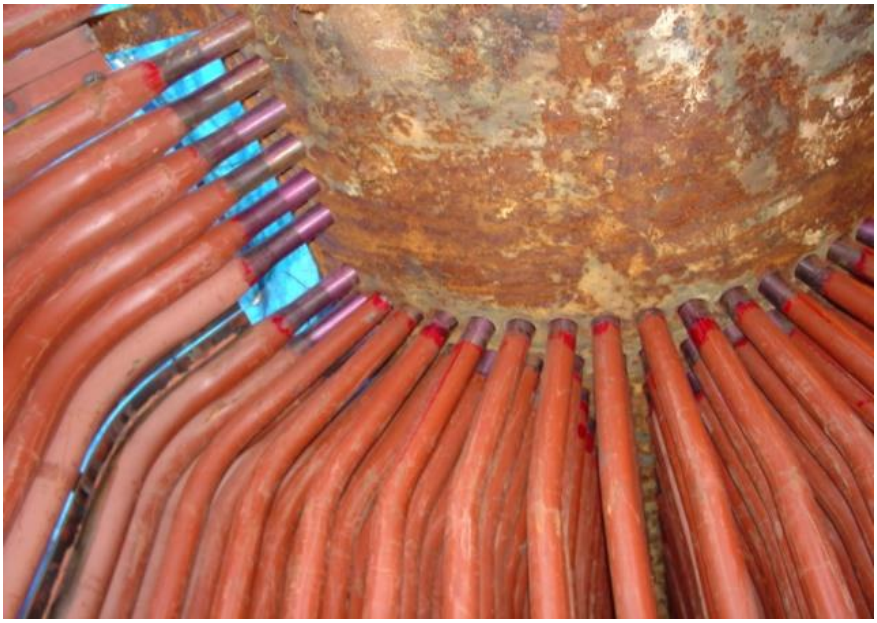

Figura A11 - Feixes tubulares de interligação com os tubulões.

Figura A12 - Pré-aquecedor de ar/vapor com resíduo de fuligem.

Figura A13 - Isolamento térmico instalado nos tubos da caldeira.