

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

**HENRIQUE APARECIDO TEIXEIRA DE PAULO**

**CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DE UM MARCADOR DE POSIÇÃO DA TAXA DE  
ÓLEO COMBUSTÍVEL EM FUNÇÃO DO AR DE COMBUSTÃO NUMA CALDEIRA  
DE VAPOR SATURADO**

**SANTOS/SP**

**2015**

**HENRIQUE APARECIDO TEIXEIRA DE PAULO**

**CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DE UM MARCADOR DE POSIÇÃO DA TAXA DE  
ÓLEO COMBUSTÍVEL EM FUNÇÃO DO AR DE COMBUSTÃO NUMA CALDEIRA  
DE VAPOR SATURADO**

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 do Prof. Dr. Aldo Ramos Santos e coorientação do Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior.

**SANTOS/SP**

**2015**

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

Paulo, Henrique Aparecido Teixeira de.  
Construção e operação de um marcador de posição da taxa de Óleo combustível em função do ar de combustão numa caldeira de vapor saturado/ Henrique Aparecido Teixeira de Paulo.  
-- 2015. 74f.

Orientador: Prof. Dr. Aldo Ramos Santos  
Coorientador: Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior.

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

1. Caldeira. 2. Caldeira fogo tubular. 3. Eficiência global de caldeira. 4. Ajuste na taxa de óleo em função do ar. 5. Combustão.  
I. Paulo, Henrique Aparecido Teixeira de. II. Santos, Aldo Ramos. III. Moraes Júnior, Deovaldo. Construção e operação de um marcador de posição da taxa de Óleo combustível em função do ar de combustão numa caldeira de vapor saturado.

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas - Unisanta

*Dedico este trabalho ao meu filho Henrique Jr., à minha esposa Viviane e aos meus pais Geraldo (in memoriam) e Maria da Glória.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus que sempre esteve comigo em todos os momentos de minha vida e à minha esposa Viviane, ao meu filho Henrique Jr., pelo apoio e compreensão quanto à minha ausência, aos meus pais Geraldo (*in memoriam*) e Maria da Glória, ao meu irmão Eng.º José e a minha sobrinha Caroline.

Este trabalho foi escrito “a quatro mãos” e devo um agradecimento muito especial ao Prof.º Dr. Aldo Ramos Santos, que acompanhou cada passo do mesmo deste a primeira linha. Com ele aprendi como deve ser a dedicação de um profissional que ama o que faz e quero algum dia ser semelhante a ele como professor, pois me fez acreditar com seu exemplo profissional que “Quem se esforça alcança os seus objetivos” e posso retribuí-lo apenas com meu humilde e carinhoso: “Muito obrigado meu Professor”.

Aos meus professores que contribuíram com seu conhecimento e com muita dedicação, como o Prof.º Dr. Deovaldo de Moraes Júnior, a Prof.ª Dra. Karina Tamião Campos Roseno e todos os outros professores que, ao longo de minha carreira, contribuíram doando cada um deles “um tijolinho” para minha casa do conhecimento que levarei comigo até o fim de minha vida: a todos devo muito.

Aos meus colegas operadores de caldeiras Marcio e Marivaldo, que formaram a equipe que conseguiu regular uma caldeira onde outros falharam, ao Eng.º Adriano S. Teixeira por ajudar nos cálculos em planilhas eletrônicas, ao meu amigo Eng.º Caio Henrique S. Eboli, ex-gerente na ATA Combustão e atual Diretor da CONSULTHERM, que me deu a oportunidade de trabalhar com caldeiras há quase vinte anos atrás com o qual aprendi com sua vasta experiência técnica até hoje.

A todos devo muito e “Se cheguei até aqui foi porque me apoiei no ombro dos gigantes” – Isaac Newton (1727).

## RESUMO

O trabalho objetivou construir e operar um DMPTOC, (dispositivo marcador de posição da taxa de óleo combustível em função do ar de combustão) de uma caldeira de vapor saturado. O DMPTOC contribuiu para o aumento da eficiência global de uma caldeira fogo tubular ( $88\% \pm 2\%$ ). Primeiramente buscou-se reduzir os fatores não ligados à taxa de óleo combustível em função do ar de combustão que impactam diretamente nos resultados da eficiência da caldeira. Como exemplo pode-se citar o aquecimento da água de alimentação da caldeira, que foi melhorado com o aumento de retorno de condensado com reparos no isolamento térmico, vazamento em válvulas, tubos, purgadores e outras fontes de perda de energia. Após o reparo em toda instalação e na caldeira, foi instalado o DMPTOC em função da dificuldade de ajustar os parafusos do disco de comando com a caldeira em pleno funcionamento uma vez que o disco mudava de posição durante a modulação (regulagem) de chama. O DMPTOC trouxe o benefício de marcar as posições em ajustamento durante interrupções, que existem no processo normal da caldeira em operação, não perdendo as posições já ajustadas. Garantiu-se chegar na última posição do ajuste em andamento e, ao mesmo tempo, poder registrar os dados de cada posição de taxa de óleo combustível em função do ar de combustão. A caldeira alcançou os parâmetros recomendados pelo fabricante, tais como de taxas de  $O_2$  entre 3% a 5%,  $CO_2$  entre 12,5% a 14,0% e %EA (excesso de ar) entre 15% a 30%, bem como resultados de performance global de rendimento, pois nos meses seguintes, consumiu-se menos óleo combustível para produzir a mesma quantidade de vapor, ou seja houve uma economia de 10%.

**Palavras Chave:** Caldeira. Caldeira fogo tubular. Eficiência global de caldeira. Ajuste na taxa de óleo em função do ar. Combustão.

## **ABSTRACT**

This work aims the construction and operation of a marker device of fuel oil rate position (DMPTOC) in function of the combustion air in a saturated steam boiler (fire-tube). This device helped to increase the overall efficiency of a fire tube boiler. First we tried to reduce factors unrelated to the rate of fuel oil in terms of combustion air, because these factors also impact directly on boiler efficiency results, for example, heating the boiler feed water is improved with increasing condensate return, which in turn is improved with the thermal insulation repairs, repairs valves leak, leaking pipes, traps and other loses of energy sources, such as those in the installation itself of the plant and the condition of the Burner therefore had low temperature interfering with the quality of firing and consequently losing combustion efficiency. Upon installation and repair in all equipment such as a boiler body that interferes with the macro boiler was free the possibility of studying the effect of the use, to improve the oil combustion rate in relation to the combustion air, but because it is difficult to adjust the command disc bolts with the boiler in full operation because the disc change position during the flame modulation. Then brought DMPTOC the benefit of marking the adjustment positions during interruptions, that exist in the boiler normal process operation, i.e., the positions are not lost already adjusted and the adjustment process, it is guaranteed to arrive at the final position thereof in progress and at the same time, be able to register data for each position of the fuel oil rate adjustment as a function of the combustion air. The boiler has achieved the parameters recommended by the manufacturer such as rate of %O<sub>2</sub>, %CO<sub>2</sub>, %EA and global yield performance results, as in the following months, was consumed less fuel oil to produce steam.

**Keywords:** Steam boiler. Tubular boiler fire. Global boiler efficiency. Adjustment in the rate of "Fuel-air". Combustion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Valores utilizados e projetados para diversos tipos de combustíveis.....	15
Figura 2 - Conjunto DMPTOC.....	17
Figura 3 - Eolípila de Heron.....	19
Figura 4 - Máquina de Newcomen.....	21
Figura 5 - Caldeira a vapor a vapor d'água estacionária, horizontal fogo tubular.....	22
Figura 6 - Ilustração caldeira aquotubular.....	22
Figura 7 - Sistema resumido de vapor.....	24
Figura 8 - Caldeira ATA Série MP.....	25
Figura 9 - Leitura de CO <sub>2</sub> .....	28
Figura 10 - Taxa de CO <sub>2</sub> em relação ao Excesso de Ar.....	29
Figura 11 - Analisador de Gases TEC-GA12 completo.....	33
Figura 12 - Display Analisador de Gases TEC-GA12.....	33
Figura 13 - Idealização inicial do dispositivo marcador.....	35
Figura 14 - Projeto básico de fabricação do DMPTOC.....	36
Figura 15 - DMPTOC (Dispositivo de marcação de posição, fabricado).....	36
Figura 16 - Vista lateral oposta da caldeira.....	37
Figura 17 -Localização do “tubulão” e tubos de segunda e terceira passagem.....	38
Figura 18 - Queimador da caldeira MP.....	39
Figura 19 - Sistema de isolamento térmico danificado.....	40
Figura 20 - Estado interno da caldeira.....	40
Figura 21 - Refratário em recuperação lado externo.....	41
Figura 22 - Copo rotativo e difusor impregnados de borra de coque.....	42
Figura 23 - Novo aquecedor de óleo OC-1A.....	42
Figura 24 - Elevação da temperatura do óleo OC-1A.....	43
Figura 25 - Sistema de ajustes sem o DMPTOC.....	44
Figura 26 - Vista superior do sistema de came.....	44
Figura 27 - Sistema de controle da taxa de óleo em função do ar de combustão.....	45
Figura 28: Válvula de comando de fogo.....	45
Figura 29: Válvula de comando de fogo ampliada.....	45
Figura 30: Damper de controle do ar de combustão.....	46
Figura 31 - Válvula que controla a pressão do ar de primário.....	46
Figura 32 - Ajuste dos parafusos com DMPTOC em dois sentidos.....	46
Figura 33 - Montagem e ajuste do DMPTOC na base da mola.....	47



Figura 34 – Fixação e regulagem da altura do DMPTOC. ....	48
Figura 35 - Pré regulagem da aproximação do DMPTOC.....	48
Figura 36 - Pré regulagem do afastamento do DMPTOC. ....	49
Figura 37 - DMPTOC com 23 posições marcadas. ....	50
Figura 38 - Sincronismo de trabalho da equipe de regulagem da caldeira. ....	51
Figura 39 - Modulação proporcional.....	52
Figura 40 - Manômetro da pressão do vapor. ....	52
Figura 41 - Medidor de vazão de óleo combustível.....	54
Figura 42 - Medidor de vazão de alimentação de água da caldeira.....	54
Figura 43 - Medições realizadas de %O <sub>2</sub> após regulagem sem e com o auxílio do DMPTOC.....	56
Figura 44 - Medições realizadas de %CO <sub>2</sub> após regulagem sem e com o auxílio do DMPTOC.....	56
Figura 45 - Medições realizadas de %EA após regulagem sem e com o auxílio do DMPTOC.....	56
Figura 46 - Contribuição do DMPTOC na eficiência da caldeira. ....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Ajuste da combustão com o dispositivo	49
Tabela 2	Resultados mensais da energia produzida pelo óleo combustível	51
Tabela 3	Resultados mensais da energia de calor sensível da água de alimentação da caldeira	52
Tabela 4	Resultados mensais de calor latente produzido	53
Tabela 5	Resultados mensais de calor total vaporização por mês	54

## LISTA DE SIMBOLOGIA

$\Delta h_{vap}$	Diferença de entalpia do vapor em kcal/kg
$\Delta h_{vapJ}$	Diferença de entalpia do vapor em kJ/kg
BPF	Baixo ponto de fluidez
CLP	Controlador lógico programável
$C_{paa}$	Calor específico da água de alimentação (kcal/kg.°C),
DMPTOC	Dispositivo marcador de posição da taxa de óleo combustível
$D_{oc}$	Densidade do óleo combustível entrando no queimador (g/cm <sup>3</sup> )
$D_{ro}$	Densidade relativa do óleo a 20°C (em relação a água a 4°C)
EA	Percentagem de excesso de ar (%)
$\eta_E$	Rendimento energético global da caldeira em (%)
$h_l$	Entalpia do líquido (kJ/kg)
$h_v$	Entalpia do vapor na pressão da caldeira (kJ/kg)
OC	Óleo combustível
PCI	Poder calorífico inferior (kcal/kg)
PCIOC	Poder calorífico inferior do óleo combustível (kcal/kg)
$P_{mc}$	Pressão média da caldeira (bar)
PMTA	Pressão máxima de trabalho permissível (bar)
ppm	Parte por milhão
$Q_{aav}$	Calor sensível da água de alimentação até a temperatura do vapor (kcal/mês)
$Q_{liq}$	Energia de aquecimento da água líquida (kcal/mês)
$Q_{oc}$	Quantidade de energia térmica gerada da combustão do óleo (kcal/mês)
$Q_{tva}$	Energia total de vaporização da água (kcal/mês)
$Q_{vap}$	Calor latente produzido por mês pela caldeira (kcal/mês)
$R_{vo}$	Razão vapor produzido por óleo queimado
$T_{aa}$	Temperatura média da água de mistura da alimentação da caldeira (°C)
$\Delta t_{av}$	Diferença de temperatura entre vapor e água de alimentação (°C)
$T_{gc}$	Temperatura dos gases da chaminé (°C)
$T_{máX}$	Temperatura máxima (°C)
$T_{moa}$	Temperatura média do óleo aquecido no mês (°C)
$T_{mv}$	Temperatura média do vapor saturado (°C)

$T_{vap}$	Temperatura do vapor em ( $^{\circ}C$ )
$V_{aa}$	Vazão de água de mistura da alimentação da caldeira (kg/mês)
$V_{moc}$	Vazão mássica de óleo combustível (kg/mês)
%Vol.	Porcentagem em Volume
$V_{voc}$	Vazão volumétrica de óleo combustível medida (L/mês)

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	15
1.1	OBJETIVOS.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
2.1	CALDEIRAS .....	19
2.2	VAPOR SATURADO .....	25
2.3	INSTALAÇÕES E EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS DE VAPOR .....	26
2.4	MEDIDORES DE GASES.....	27
2.5	ÓLEOS COMBUSTÍVEIS .....	30
2.6	COMBUSTÃO E QUEIMADORES .....	30
3	MATERIAL E MÉTODO .....	33
3.1	MATERIAL .....	33
3.1.1	Analisador de Gases .....	33
3.1.2	Dispositivo marcador de posição .....	35
3.1.3	Caldeira MP-810 utilizada .....	37
3.1.4	Queimador da caldeira, MOD. 3-TR .....	38
3.2	MÉTODO .....	39
3.2.1	Etapas preliminares para a instalação do DMPTOC. ....	39
3.2.2	Ajuste da caldeira sem o DMPTOC .....	43
3.2.3	O funcionamento do DMPTOC .....	45
3.2.4	Marcação no disco e regulagem da agulha do DMPTOC.....	48
3.2.5	Regulagem da combustão utilizando o DMPTOC .....	50
3.2.6	Método para a verificação da eficiência do DMPTOC. ....	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
4.1	AJUSTES NO DISCO DE COMANDO.....	55
4.2	EFICIÊNCIA DA CALDEIRA E PRODUÇÃO DE VAPOR.....	57
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE TOMADA DE AÇÕES E RESULTADOS OBTIDOS DA EFICIÊNCIA DA CALDEIRA.....	61

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES.....	62
5.1 CONCLUSÃO.....	62
5.2 SUGESTÕES.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
ANEXO A - Faixa de Ajuste de CO <sub>2</sub> .....	66
ANEXO B - Densidade do Óleo OC-1A em função da temperatura.....	67
ANEXO C: Princípios de funcionamento de Detectores de gases.....	68
ANEXO D - Viscosidade em função da temperatura para os óleos combustíveis.....	69
ANEXO E - Propriedades termodinâmicas da água.....	70
ANEXO F - Propriedades de alguns combustíveis de caldeiras.....	71
ANEXO G - PCI de alguns combustíveis.....	72
ANEXO H - Gráfico de CO <sub>2</sub> em função do E.A. (excesso de ar).....	73
ANEXO I - Propriedades termodinâmicas da água.....	74

## 1 INTRODUÇÃO

A maioria das empresas que possuem geradores de vapor, ou seja, máquinas térmicas, chamados de caldeiras, sejam a óleo combustível ou a gás, de produção de vapor saturado de processo ou vapor superaquecido, preocupam-se de forma crescente com o consumo de combustível, pelo impacto que os poluentes causam ao meio ambiente, e também pelos hidrocarbonetos de sua composição. Segundo Alderetes (2011), os sistemas de geração de vapor eram considerados cada vez mais importantes para muitas indústrias, seja no aspecto operacional quanto ao impacto econômico e ambiental que estes sistemas causam. Saidur *et al.* (2011), consideram as melhorias de sistemas energéticos como um dos fatores mais importantes nos custos operacionais das indústrias.

O óleo combustível OC-1A possui 2,5% de enxofre em massa (PORTARIA ANP Nº 80, 1999) que sairá como poluente pela chaminé da caldeira. Além disso, o óleo combustível é um recurso mineral não renovável, um dos últimos derivados do petróleo, e o com elevado custo de produção.

O consumo de combustíveis fósseis vem aumentando ano após ano, e isso preocupa muito conforme Saidur *et al.* (2011). A Figura 1 ilustra pesquisa de consumo de energias combustíveis na escala mundial.

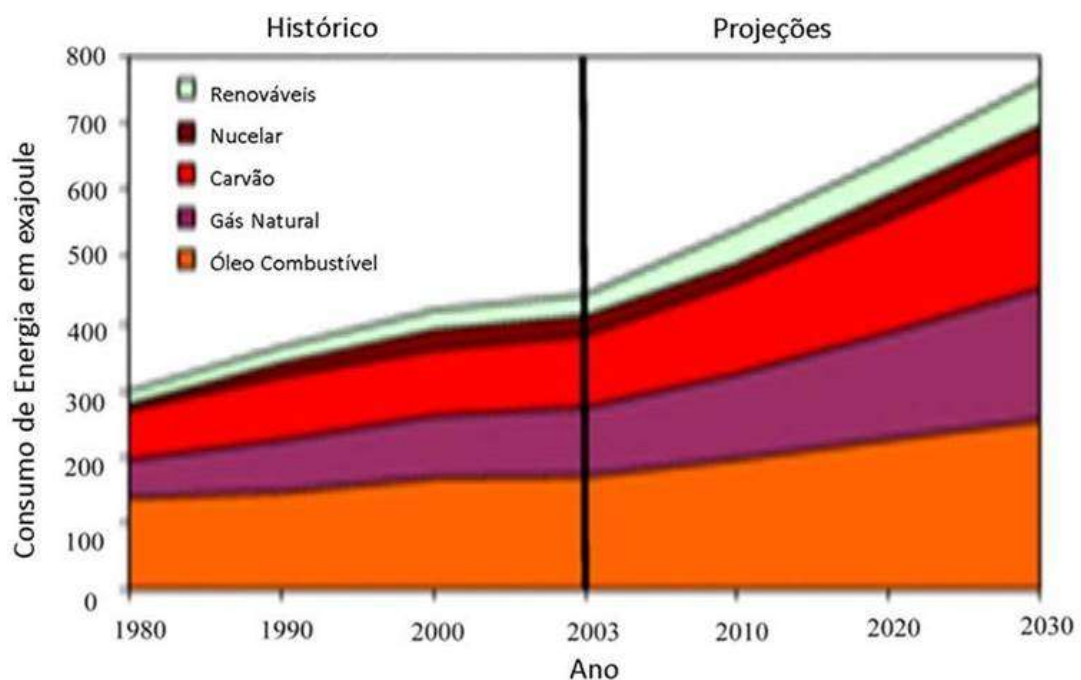


Figura 1 - Valores utilizados e projetados para diversos tipos de combustíveis.

Fonte: Saidur *et al.* (2011)

Este trabalho descreveu a criação e utilização de um marcador de posição desenvolvido particularmente para uma caldeira do tipo fogo tubular convencional, marcando a posição no procedimento de regulagem da taxa de óleo combustível. A criação desse dispositivo foi resultado de uma necessidade operacional. A caldeira estava desajustada e não atingia o parâmetro de rendimento de rendimento  $88\% \pm 2\%$  conforme o manual das caldeiras MP (AALBORG,1995), a planta industrial também apresentava problemas de manutenção no sistema de tubulações, conexões e isolamentos térmicos, sendo todos mapeados conforme o relatório técnico de inspeção (SPIRAX SARCO, 2008); todos estes fatores encareciam o processo de geração e transporte de vapor aos pontos de consumo, pois mais óleo combustível era consumido além de perdas com tempo de parada de máquina para manutenção corretiva.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (2015) indicou a importância dos custos relacionados ao combustível entre os diversos custos que envolvem uma instalação de vapor, o que reforçou a necessidade em buscar o menor consumo de óleo nos projetos de produção de vapor. Abaixo segue uma lista de recomendações por ordem de prioridades nos estudos de produção de vapor em relação aos custos:

- a) Combustíveis, considerando vários tipos e combinações de combustível.
- b) Energia elétrica.
- c) Água de alimentação da caldeira.
- d) Produtos químicos.
- e) Operação e manutenção de material (exceto combustível).
- f) Operação e manutenção de trabalho.
- g) Quaisquer outros relacionados com a máquina.

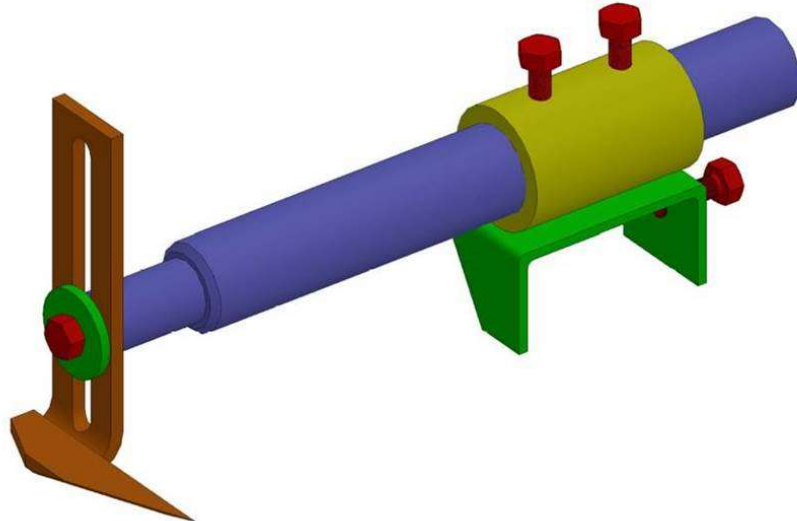
Esse dispositivo marcador de posição aqui proposto, trabalhou em conjunto com um analisador de gases medindo as quantidades de  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $CO$  em porcentagem volumétrica, e em ppm para o  $CO$ , contidos nos gases de exaustão da chaminé da caldeira, registrando os resultados obtidos para qualquer posição em que o disco de comando estivesse, permitindo retornar em qualquer ponto registrado.

O ponto ótimo de funcionamento de uma caldeira depende de diversos fatores, sendo um deles muito importante, o ponto de regulagem da mistura do ar com o combustível. É esta taxa de mistura que garantiu a estequiometria adequada com um ligeiro excesso de ar para que a combustão ocorresse devidamente (KRISTINSSON & LANG, 2010). O fabricante informou rendimento global da caldeira mais adequado



é de  $88\% \pm 2\%$ , conforme o manual de operação das caldeiras MP-810 da Aalborg (1995).

A regulagem da taxa de combustível em função do ar de combustão ofereceu melhores resultados com o dispositivo DMPTOC do que uma regulagem intuitiva pautada apenas em tonalidade de fumaça que sai da chaminé ou da chama no queimador (Figura 2).



**Figura 2 - Conjunto DMPTOC.**

O dispositivo DMPTOC (dispositivo marcador de posição da taxa de óleo combustível em função do ar de combustão) é inédito e aplicável apenas para as caldeiras Aalborg (modelos MP, AWN e eventualmente nas modernas Caldeiras Mission), que possuem projeto semelhante de comando de mistura. Apesar das caldeiras modelo Mission possuírem inversor de frequência no compressor e uma servo-válvula para controlar a vazão de óleo e o controle ser realizado por um CLP (Controlador Lógico Programável), as empresas têm uma alternativa visando baratear o custo com a automação eletrônica.

Para maximizar o rendimento da caldeira, além da regulagem auxiliada pelo DMPTOC, outras providências foram tomadas, tais como reparos necessários no sistema de isolamento térmico e na tubulação de vapor, que resultou em considerável aumento na quantidade de condensado que retornava para o desaerador, elevando a sua temperatura média. Isso impactou positivamente no rendimento da caldeira, pois diminuiu a quantidade de óleo combustível usado, de acordo com Durkin (2006).

O uso do DMPTOC foi mais efetivo com a substituição do pré aquecedor de óleo combustível, fazendo com que o mesmo elevasse a temperatura do óleo de 99°C a 115°C o que gerou uma redução da viscosidade do óleo quando este chega no copo rotativo, assim ficando no tamanho ideal das partículas de óleo para garantir uma boa eficiência de combustão (KUO, 1986).

## 1.1 OBJETIVOS

O trabalho teve como objetivo geral desenvolver, construir e operar um dispositivo que marque a posição do controle de mistura de óleo combustível em relação ao ar de alimentação.

O estudo visou como objetivos específicos:

- a) Melhorar a eficiência de combustão e global da caldeira, como meta aproximar-se dos melhores valores indicadores pelo fabricante para o modelo da caldeira, ou seja  $88\% \pm 2\%$  (AALBORG, 1995);
- b) Diminuir o consumo de óleo para uma mesma quantidade de vapor produzido;
- c) Criar condições para a geração de planilhas e curvas de controle dos parâmetros que contribuem para a determinação do ajuste da combustão e rendimento da caldeira num determinado momento.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Não é possível falar sobre regulação de caldeiras, sem mencionar o que é uma caldeira, combustível OC-1A, rendimento de combustão, rendimento global de caldeiras, instrumentos medidores de gases, funcionamento dos queimadores e instalações de vapor.

### 2.1 CALDEIRAS

No Século I da Era Cristã, Heron um matemático, engenheiro e inventor da Cidade Estado Alexandria, sob domínio romano utilizou o vapor para gerar movimentos e trabalho. Entre seus vários inventos, ele construiu um tipo de turbina a vapor que chamou Eolípila (Figura 3). Ele encheu uma esfera metálica com água que produzia vapor sob pressão e a esfera girava em torno de um eixo apoiado sobre dois mancais (GIL, 2010).



Figura 3 - Eolípila de Heron.

Fonte: Gil (2010)

No início do século 18, Denis Papin, um pesquisador francês, estudou a água fervendo numa panela totalmente fechada, a pressão do vapor acumulado bem como a temperatura da água subia simultaneamente, e o cozimento de alimentos com

temperatura e pressão mais alta era mais rápido, assim ele inventou a panela de pressão. Ele percebeu também que quando a panela esfriava, formava-se um vácuo onde antes havia ar, em 1712 foi feito um cilindro com um pistão móvel e uma haste fixa que ele denominou de êmbolo. Ao aquecer o embolo se moveu com a pressão do vapor, e ao esfriar a água observou que o pistão retornava para a posição inicial; observou também que a força gerada era muitas vezes maior que a humana; sem saber ele inventou o princípio de funcionamento da máquina a vapor (USHER, 1993).

Conforme Gil (2010), foi Thomas Savery que inventou a primeira máquina a vapor para fins comerciais com sucesso; ele baseou o seu trabalho no projeto de Edward Somerset, que foi utilizado para bombeamento de água nas minas de carvão, apesar de sua eficiência duvidosa.

Os ingleses James Watt e Thomas Newcomen estudaram o invento de Papin e fizeram funcionar um êmbolo que ia e vinha ao ser aquecido e esfriado ligado a uma bomba d'água para puxar a água das minas de carvão e também usaram na distribuição de água para a cidade. Era água mineral que apenas bastava filtrar. A máquina era lenta devido à inércia de aquecer e esfriar; James Watt inventou então a máquina de condensação externa e também a caldeira para gerar vapor. Tudo isso em baixas pressões, quase atmosféricas. (USHER, 1993).

Gil (2010) foi mais detalhista, descrevendo que o invento de Newcomen fazia com que a água condensasse no interior do cilindro e que, o vácuo produzido movimentasse o êmbolo no sentido contrário, na máquina de Savery esse movimento era gerado devido à pressão atmosférica (Figura 4). Utilizando-se o êmbolo criado por Papin, este movia-se sob ação da pressão do vapor e, assim, criou-se assimetria entre o movimento de entrada do vapor mais rápido e a influência da pressão atmosférica no retorno mais lento.

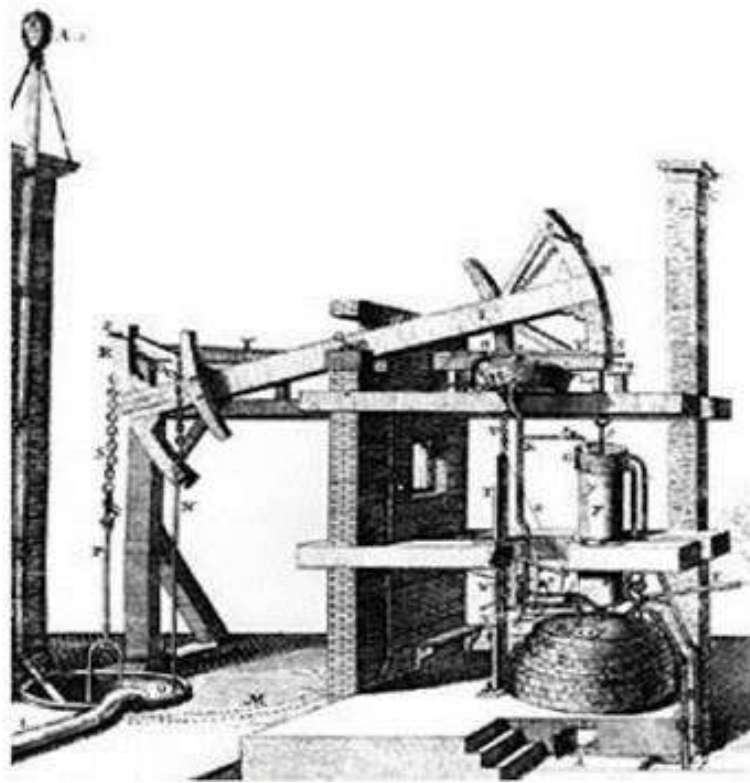


Figura 4 - Máquina de Newcomen.

Fonte: Gil (2010)

A norma regulamentadora NR-13 (2013) define:

*“Caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os refervedores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo”.*

A NR-13 classifica as caldeiras e o fabricante da caldeira segue o critério em seu manual de caldeiras de acordo com as seguintes fontes de aquecimento:

- a) Caldeiras a combustíveis convencionais;
- b) Caldeiras elétricas;
- c) Caldeiras de recuperação;
- d) Caldeiras nucleares;
- e) Caldeiras solares.

Em relação ao tipo de fluido de transferência de calor:

- a) Caldeiras a vapor d'água / Caldeiras para água quente;

b) Vaporizadores / Aquecedores para fluido térmico.

Quanto ao trocador de calor:

- a) Caldeiras flamotubulares ou fogotubulares (Figura 5);
- b) Caldeiras aquotubulares ou liquidotubulares (Figura 6).



Figura 5 - Caldeira a vapor a vapor d'água estacionária, horizontal fogo tubular.

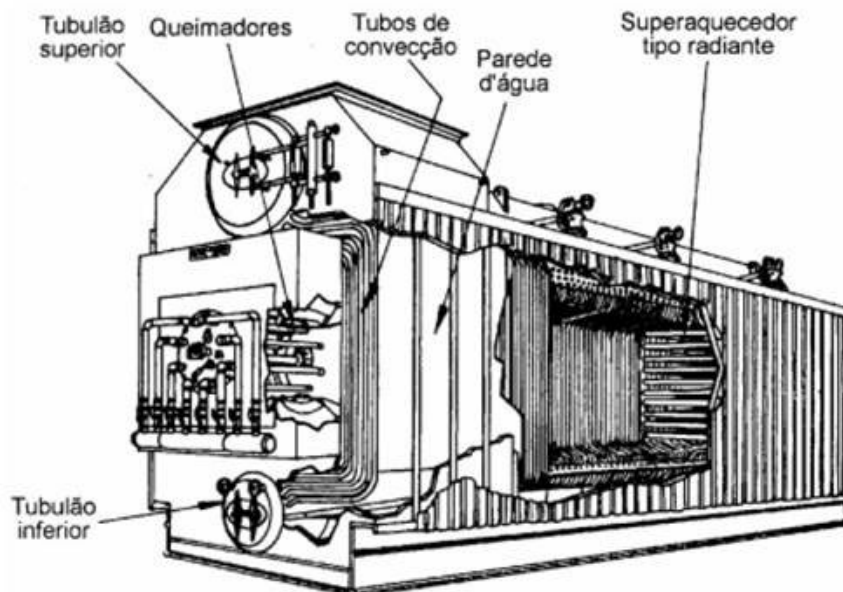


Figura 6 - Ilustração caldeira aquotubular.

Fonte: Ferreira (2008)

Conforme as condições de mobilidade das caldeiras:

- a) Caldeiras estacionárias;
- b) Caldeiras móveis, que podem ser, navais, locomóveis ou rodoviárias e de locomotiva (ferroviárias).

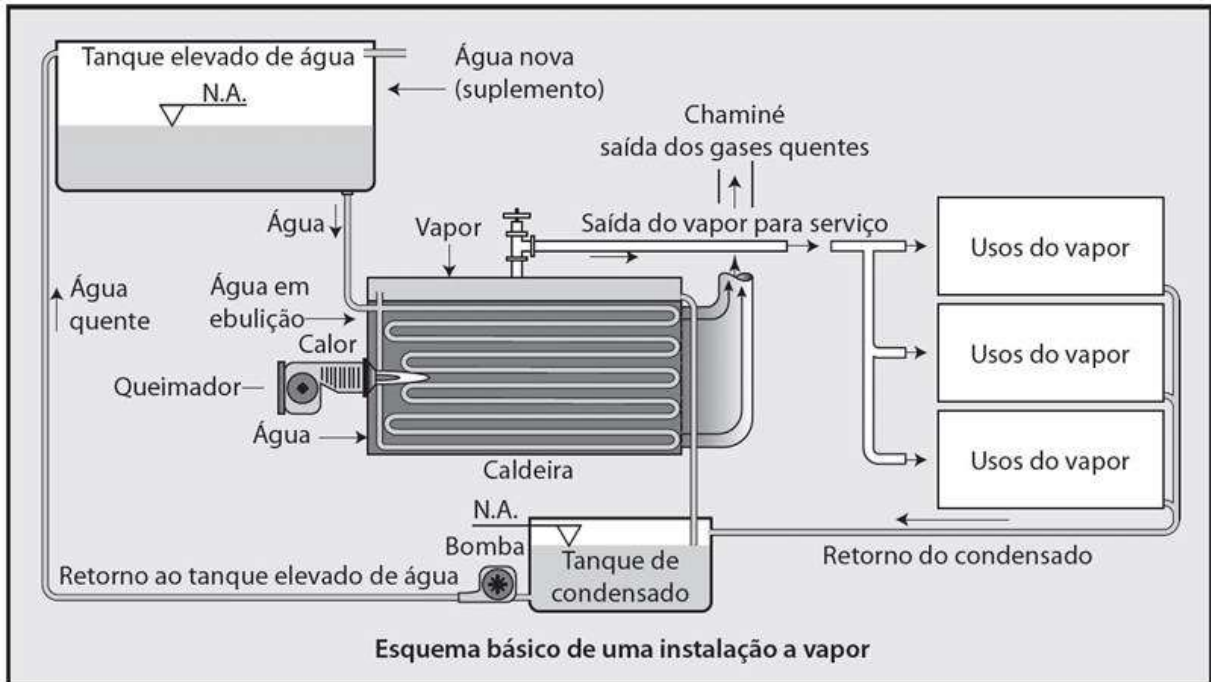
Quanto à posição do costado da caldeira:

- a) Caldeiras horizontais;
- b) Caldeiras verticais.

Existem técnicas modernas que utilizam, por exemplo, lama de combustível oriundos de bagaço de cana de açúcar que é secado e injetado em caldeiras de vapor superaquecido necessário para acionar turbinas e gerar energia elétrica, conforme Santos *et al.* (2015).

Conforme Mucciato (2012), no Brasil existem várias normas e Legislações a serem seguidas em se tratando de caldeiras tais como as NBR-12177 (ABNT, 1999) que trata de procedimentos para inspeções, e a NB-227 (ABNT, 1993), dos códigos para projeto e fabricação de caldeiras estacionárias, a NR-13 que possui similaridades com a NBR-12177, outras entidades como INMETRO, IBP e a ABIQUIM, tem contribuído com pesquisas no tocante a segurança em caldeiras. O Código internacional mais importante para caldeiras e vasos de pressão é a BPVC - Boiler & Pressure Vessel Code (ASME, 2013).

De forma resumida, Botelho & Bifano (2011), mostraram de forma simplificada os principais componentes de um sistema de vapor saturado (Figura 7).

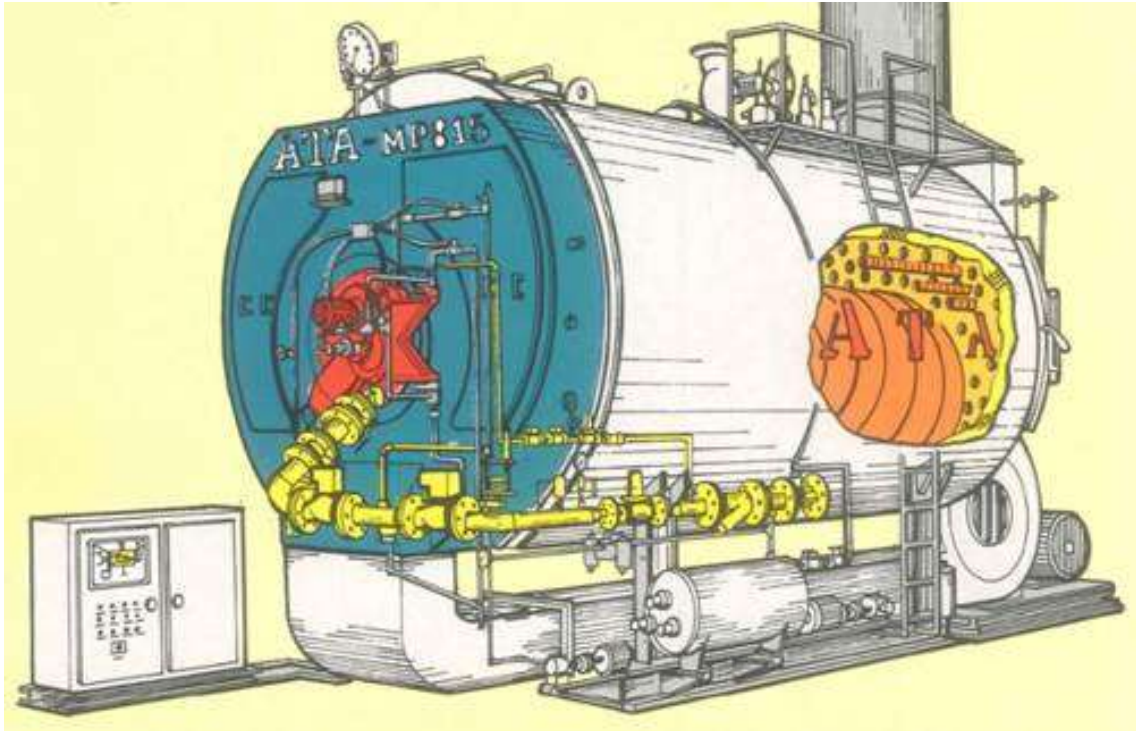


**Figura 7 - Sistema resumido de vapor.**

**Fonte: Botelho & Bifano (2011)**

A caldeira ATA MP-810, é o modelo de caldeira onde testou-se DMPTOC, trata-se de uma caldeira dotada de um controle de múltiplos pontos na regulação de seu queimador. A dosagem de combustível é realizada por uma válvula de alta precisão de tipo agulha que é atuada por uma alavanca acionada por um came que é um dispositivo que converte um movimento rotativo do disco de comando em movimento linear na alavanca acionadora, através de seus diversos parafusos de ajuste obtém-se inúmeras combinações de vazão de ar e vazão de combustível, mantendo a proporção entre eles, não se limitando simplesmente a fogo alto e fogo baixo (Figura 8).





**Figura 8 - Caldeira ATA Série MP.**

**Fonte: ATA Combustão (1996)**

## **2.2 VAPOR SATURADO**

Powers, (2014), relata que a história do uso do vapor e da termodinâmica é muito longa e seu desenvolvimento não foi sempre assertivo, infelizmente ao longo da história houve erros nas linhas de estudos, discussões polêmicas até nos dias de hoje continuam algumas dúvidas não esclarecidas com o avanço da ciência e tecnologia.

Torreira (2001), "O vapor de água é um elemento transportador de calor. Consiste em água que, devido à elevação de temperatura, mudou de estado, adquirindo pressões superiores à atmosférica, que favorecem sua movimentação no percurso através de tubulações e equipamentos. Isto é, movimenta-se por sua própria pressão".

As vantagens da utilização do vapor são as seguintes segundo Torreira (2001);

- a) Sistema mais conhecido pelos especialistas de instalações industriais;
- b) Bastante versátil para ampliações das instalações com baixos custos;
- c) Capaz de transportar grandes quantidades de calor por unidade de peso levando-se em consideração o vapor saturado seco;
- d) É um elemento exclusivo para o aquecimento de determinadas aplicações industriais, tais como tecelagem, recuperação de solventes;

- e) Propicia a geração de energia mecânica para gerar energia elétrica em se tratando de vapor superaquecido.

### **2.3 INSTALAÇÕES E EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS DE VAPOR**

De acordo com Rodrigues (2013), o vapor saturado tem diversas finalidades e aplicações industriais diferentes, principalmente nos sistemas onde há troca térmica. É aplicado em equipamentos e processos onde se realiza o aquecimento, cocção de alimentos, esterilização, evaporação, para se conseguir vácuo, na secagem e em diversas outras aplicações de processos industriais onde se usa vapor. Os segmentos onde mais se utiliza vapor saturado são os de produtos alimentícios tais como biscoitos, açúcar, cerveja, carnes, biscoitos, laticínios, soja, sucos, extratos e molhos de tomate, farinhas diversas, indústria farmacêutica, indústria madeireira, metalúrgicas não ferrosas tais como alumínio, cobre, níquel, zinco entre outras, indústria de papel, celulose, papelão, indústrias químicas, petroquímicas e siderurgia e têxtil. A pressão de vapor saturado para uso industrial está na faixa de 7,0 a 25,0 bar com as respectivas temperaturas de saturação 169,6 °C e 225,0 °C.

Conforme manual técnico da Spirax Sarco (2008), o controle da taxa de oxigênio do ar com o combustível é de extrema importância para se atingir o máximo rendimento possível da caldeira, além do ajuste da taxa de mistura ar em função do óleo, é importante manter outras variáveis sob controle que são;

- a) Controle da temperatura do óleo, pois isso determina a viscosidade adequada no bico do queimador que proporcionará um tamanho adequado das partículas de óleo que garantirão a área específica ideal para reação química de oxidação (combustão) na fornalha;
- b) As quantidades de água de condensado que retornam causam grande impacto na quantidade de combustível utilizado bem como outros gastos indiretos, tais como custos com tratamento de água para, por exemplo, baixar a dureza da água;
- c) O estado do isolamento térmico de todo o sistema inclusive da própria caldeira impacta diretamente no rendimento das instalações, pois pode se evitar perdas desnecessárias de energia que não é consumida no processo;
- d) Existem diversos outros fatores relacionados ao rendimento global da caldeira, lembrando que uma caldeira desregulada pode aumentar os custos de

manutenção e também gerar problemas ambientais devido emissão de particulado, passível de multas;

- e) Entre os diversos fatores, estão o isolamento térmico da caldeira, a condição de manutenção da caldeira, estado de corrosão ou deposição, eficiência de combustão entre outras.

## 2.4 MEDIDORES DE GASES

Conforme Carvalho Jr. & Lacava (2003), vários são os princípios e tipos de analisadores de gases. Alguns instrumentos fazem o monitoramento automaticamente e continuamente do CO e CO<sub>2</sub> utilizando o chamado analisador tipo infravermelho, que produz radiações com células em duas fontes diferentes e por comparação das emissões determina-se as quantidades das duas substâncias gasosas existentes.

Ainda segundo a Revista Mecatrônica Industrial (2013), existem equipamentos que fazem a medição de forma contínua de gases, “on line” que são constituídos de:

- a) Sonda (inserida no ponto de amostragem);
- b) Tubo coletor (ligação sonda-analisador);
- c) Periféricos eventualmente necessários para secagem, limpeza e resfriamento da amostra;
- d) Alguns analisadores de gases não necessitam necessariamente estar ao lado da caldeira, apenas uma sonda deve ser inserida dentro da chaminé e uma comunicação pode ser levada para o medidor, que pode ser operado remotamente. No Brasil utilizam-se os analisadores de O<sub>2</sub> com sensores de óxido de zircônia ou paramagnéticos.

As variações na composição do combustível podem alterar os valores de leitura do instrumento, mas o erro é desprezível e valem as regras abaixo, conforme a Revista Mecatrônica Industrial (2013), observa-se que:

- a) Quanto maior o CO<sub>2</sub>, menor será o excesso de ar;
- b) Quanto menor o CO<sub>2</sub>, maior será o excesso de ar;
- c) Quanto maior o O<sub>2</sub>, maior será o excesso de ar;
- d) Quanto menor o O<sub>2</sub>, menor será o excesso de ar.

Os instrumentos medidores de gases de combustão obedecem suas limitações características (Anexo A), e possuem diversos princípios de funcionamento (Anexo C).

Não se pode utilizar apenas as leituras de CO<sub>2</sub>, pois induzem a cálculos de excesso de ar errados. A emissão de fumaça da chaminé e a observação do brilho e cor da chama também são indicadores embora não determinísticos para uma ótima combustão conforme a Revista Mecatrônica Industrial (2013).

A Figura 9 ilustra facilmente a medição de excesso de O<sub>2</sub> adicional a medição de CO<sub>2</sub>, existem dois pontos onde a leitura de CO<sub>2</sub> se repete para diferentes valores de O<sub>2</sub> do ar, com valores para mais e para menos ar. Portanto outros indicadores como teor de EA (excesso de ar) e temperatura dos gases da chaminé também devem ser levados em consideração.

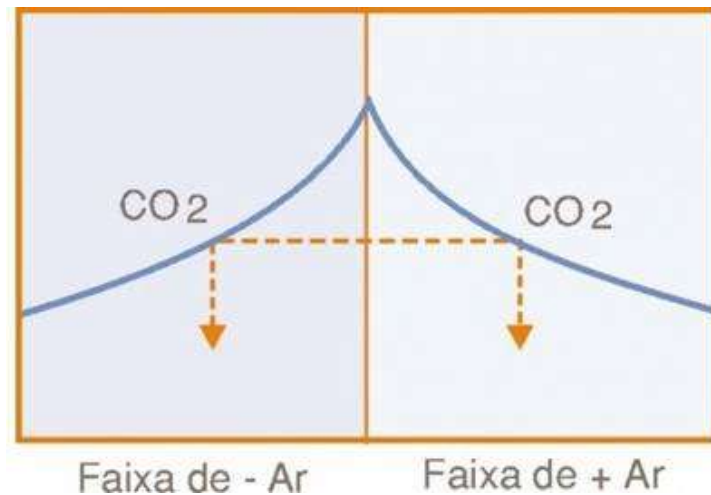


Figura 9 - Leitura de CO<sub>2</sub>.

Fonte: Revista Mecatrônica Industrial (2013)

É possível calcular o CO<sub>2</sub> através da Equação 2 da Revista Mecatrônica Industrial (2013);

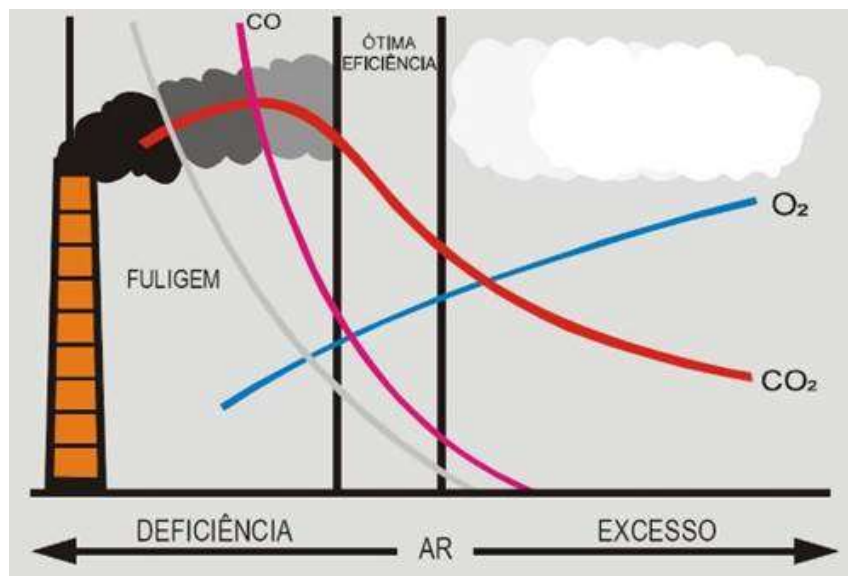
$$CO_2 = \frac{CO_2 \text{ máximo}(21,0 - \text{oxigênio obtido})}{21,0} \quad (2)$$

As razões de leituras de CO<sub>2</sub> baixas ocorrem devido a;

- a) Tiragem excessiva;
- b) Excesso de ar na queima;
- c) Entrada de ar falso na fornalha;
- d) Atomização / mistura imperfeita entre ar / combustível.

Conforme manual do medidor de gases Madur (2006) e Pinheiro & Cerqueira (1995), há uma faixa ideal que fica entre um ligeiro excesso de ar e a taxa de reação estequiométrica (Figura 10), onde no eixo horizontal representa a eficiência de combustão e o eixo vertical representa a percentagem (%) dos gases, que é medido através de um detector de gases com uma sonda na chaminé, a esquerda da faixa “ótima eficiência” fumaça sai escura, este conceito está de acordo com Pera (1990), Kuo (1986) e outros autores clássicos. Pera (1990), sugere uma relação entre os valores teóricos e estequiométricos para óleos combustíveis em queimadores de caldeira com sistema de pulverização mecânica no valor entre 20% e 25%,  $n=1,20$  a 1,25, Equação 3 (PERA, 1990) como ideais, porém; a referência de base de cálculo escolhida foi a de percentagem de  $\text{CO}_2$ , conforme recomendação do fabricante da caldeira e do fabricante do medidor de gases (Anexo H).

$$n = \frac{V_{ar}^t}{V_{ar}^r} \quad (3)$$



**Figura 10 - Taxa de  $\text{CO}_2$  em relação ao Excesso de Ar.**  
**Fonte: Manual medidores de gases Madur (2006)**

## 2.5 ÓLEOS COMBUSTÍVEIS

Pera (1990), informou que “Combustível é toda substância, natural ou artificial, no estado sólido, líquido ou gasoso, capaz de reagir com o oxigênio do ar, mediante escorvamento, liberando energia calorífica e luminosa”, e o óleo OC-1A é sem dúvidas um dos mais utilizados para caldeiras (CAETANO & JÚNIOR, 2004).

Conforme Gonçalves (2010), os óleos combustíveis que são produzidos a partir do refino do petróleo, têm se tornado cada vez mais importantes para a geração de calor, devido a facilidade de transportes e manuseio, em 2010 existiam mais de 200 distribuidores de óleo combustível em todo Brasil autorizados pela ANP (Agência Nacional de Petróleo), porém; é um mercado que sofre muitas variações. Em 2000 o consumo era de 10.000 mil m<sup>3</sup> anuais e durante os dez anos seguintes caiu para quase a metade (50,39%) em função de variações do mercado causadas pela oferta de gás natural na ocasião. O comportamento de consumo é desigual em todo País.

Ohijeagbon (2013), informou que são diversos os tipos de combustíveis utilizados em caldeiras, sejam combustíveis sólidos, líquidos e gasosos. Algumas vezes são queimadas combinações de combustíveis para reduzir as emissões ou melhorar o desempenho da caldeira. Os combustíveis mais comuns queimados em caldeiras são do tipo fósseis e de biomassa, bem como outros tipos de combustíveis e combinações de combustível.

De acordo com Apeaning (2012), a queima de óleos combustíveis que são fósseis em equipamentos industriais com caldeiras de vapor saturado e fornos e na geração de energia elétrica com vapor superaquecido, produz grande quantidade de poluentes no ar, tais como o dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e partículas em suspensão, todos com consequências prejudiciais para a saúde humana e para o ambiente. Ao aplicar a tecnologia apropriada de regulação na combustão, o consumo de combustível fóssil industrial e os efeitos negativos relacionados pode ser reduzido.

## 2.6 COMBUSTÃO E QUEIMADORES

Segundo Stamatoglou (2014), a combustão é o resultado de uma reação química exotérmica e pode ser classificada conforme abaixo, dependendo de como o combustível e o oxidante estão misturados, e das suas características:

- a) Pré-misturado, quando o combustível ainda não queimado e o oxidante são misturados antes de atingir a zona de reação, e misturados quando a mistura ocorre na zona de reação;
- b) Combustão em regime laminar e em regime turbulento, o regime turbulento é melhor para transmissão de calor;
- c) Combustão em ondas de detonação e ondas de deflagração, nas ondas de detonação a velocidade das ondas são supersônicas.

Os sistemas de combustão com dispositivos mecânicos automatizados foram um grande avanço sobre o processo de combustão no passado, e foram citados por alguns autores como Kuo (1986), que diziam que nos primórdios da combustão de caldeiras, os óleos combustíveis para poderem ser utilizados nos queimadores deviam ser aquecidos para gerarem vapores que seriam queimados.

Segundo Vosough (2012), a proporção de ar em excesso em relação ao óleo combustível é uma das variáveis operacionais que mais afetam a performance térmica de uma caldeira quanto a performance ambiental nas emissões. A diminuição da proporção de ar em excesso favorece as emissões de particulado e de CO para a atmosfera, provocando as chuvas ácidas e riscos de saúde às pessoas, mesmo assim a demanda no uso de combustíveis fósseis continua aumentando em todo o mundo. A eficiência térmica da caldeira é prejudicada com o aumento da proporção de ar de excesso em função da quantidade de óleo combustível. Portanto, as técnicas para conseguir a melhor eficiência de combustão com a menor quantidade de emissões poluentes são necessárias. A variável de processo que pesquisadores e engenheiros mais se dedicam é o controle do excesso de ar.

Existem outras técnicas para melhorar a eficiência de caldeiras, uma delas é substituir “dampers” de controle de vazão de ar por compressores acionados por motores comuns, por acionamento de servo motores (SALUM, 2011).

Pinheiro & Cerqueira (1995), também afirmam que a quantidade de O<sub>2</sub> em excesso deve ser o mínimo, para não formar CO e não pode passar de um valor máximo, pois implicaria em aquecimento de ar desnecessário, consumindo energia e combustível.

Existem também outras técnicas para medição de performance de combustão que pode utilizada separada ou em conjunto com a técnica da análise da composição dos gases da chaminé após combustão, trata-se de análise com modelagem virtual

que avalia a qualidade da combustão, que reúnem modelos matemáticos e visualização gráfica chamadas, como por exemplo, o desenvolvimento de “Foucault” para combustão em regime turbulento pré-misturado, que gera banco de dados de fatores que determinam as características das chamas (VEYNANTE, 2012).

Alguns países possuem metas de redução de emissões de carbono indesejado, como por exemplo o Reino Unido, que tem meta de redução em 20% das emissões de carbono para 2020 e 80% das emissões em 2050, conforme Mohamed (2012), portanto, manter um queimador de caldeira bem regulado é também primordial.

Conforme Madsen & Olsson (2012), estrategicamente, análises de custo em relação aos benefícios e custos em relação a afetividade devem ser tomados quando se desenvolvem trabalhos que visam a redução de emissões. O dispositivo que ajuda a manter a caldeira regulada (DMPTOC), foi construído com material aproveitado de sucata, seu custo foi mínimo e não houve impacto ambiental significativo para sua fabricação.

A combustão fornece gradientes de energia que dependem do tipo de combustível e condições estequiométricas e também do projeto do queimador que atomiza ou vaporiza o combustível Turns, (2000).

Durante o funcionamento da caldeira, todo o processo de combustão, ou seja, todo o parâmetro de processo deve ser controlado, com instrumentação apropriada para cada sistema de controle com manutenções e verificação de calibrações regulares (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, (2015).

As caldeiras AALBORG MP são equipadas com combustor (queimador) tipo 3T, que em função do tipo de combustível, são denominados de forma diferente:

- a) O modelo 3TC serve para queimar combustível líquido e gasoso;
- b) O modelo 3TG queima somente gás combustível;
- c) O modelo 3TR, o qual foi utilizado neste trabalho, queima apenas combustíveis líquidos.

Neste trabalho queimou-se apenas o óleo BPF (OC-1A) e eventualmente no combustor piloto queimou-se óleo diesel (ou querosene), normalmente utilizava-se apenas óleo BPF (OC-1A), pois seu custo é reduzido, os outros combustíveis mencionados utilizavam-se apenas para acender a caldeira.



### 3 MATERIAL E MÉTODO

#### 3.1 MATERIAL

##### 3.1.1 Analisador de Gases

O instrumento utilizado para medir os gases de combustão proveniente da chaminé foi o Analisador de Gases Modelo TEC-GA12 MADUR (2006) (Figuras 11 e 12).



Figura 11 - Analisador de Gases TEC-GA12 completo.  
Fonte Folheto da MADUR (2006)

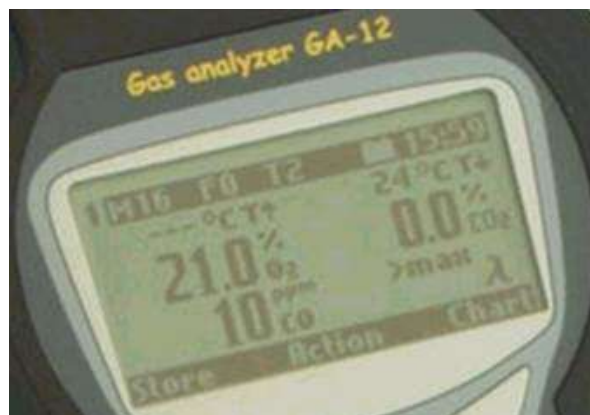


Figura 12 - Display Analisador de Gases TEC-GA12

Dados Técnicos do Instrumento conforme manual (MADUR, 2006):

- a) Tipos de Gases: O<sub>2</sub> (oxigênio mensurado); CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono calculado); CO (monóxido de carbono mensurado).
- b) Faixa de medição dos gases: O<sub>2</sub> (oxigênio) de 0 a 25%(Vol.); CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) de 0 a 25%(Vol.); CO (monóxido de carbono) de 0 a 20.000 ppm.
- c) Princípios de Medição: Os gases são mensurados em função do princípio eletroquímico.
- d) Exatidão: O<sub>2</sub> (oxigênio) de 0,01% (Vol.); CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) de 0,01% (Vol.); CO (monóxido de carbono) de 1 ppm.
- e) Display: Tela de cristal líquido LCD.
- f) Função de Registro: Possui função de registro, permitindo armazenar até 32 medições.
- g) Alimentação: Uso de quatro baterias internas AA.
- h) Duração das Baterias: Um set de baterias dura até 75 horas contínuas de uso do equipamento.
- i) Função Relógio / Calendário: Inclusos no equipamento.
- j) Interface PC: Equipamento possui interface RS-232, para conexão a um PC.
- k) Dimensões: 228 x 116 x 45 mm.
- l) Peso: 600 gramas.
- m) Sonda de Amostragem: Inclusa sonda de Amostragem (T<sub>máx</sub> = 800°C) em Aço Inox e mangueira de conexão ao Instrumento. Possui filtro contra condensação.

- n) Comprimento da sonda: 150 mm (outros comprimentos opcionais).
- o) Comprimento da mangueira: 3 metros.
- p) Material do invólucro: Plástico ABS.
- q) Visualização Gráfica: O equipamento possui a função de visualização dos dados em forma gráfica, no próprio display do equipamento.

### 3.1.2 Dispositivo marcador de posição

O dispositivo DMPTOC foi idealizado inicialmente como uma agulha e regulagem para altura e distância em relação ao disco de comando da caldeira, ele é fixado sem nenhuma solda, sobre a caixa de mola de comando do came de controle de chama (Figura 13).

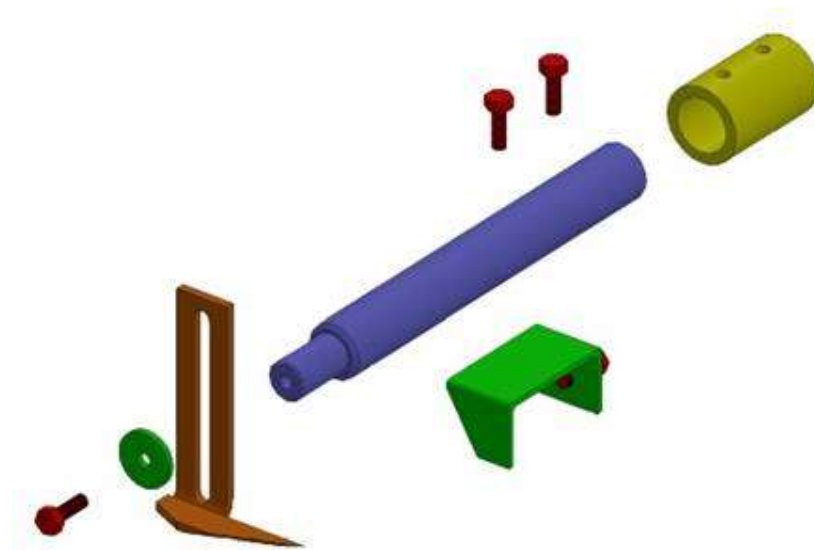


Figura 13 - Idealização inicial do dispositivo marcador.

O DMPTOC adaptou-se às peças da caldeira modelo ATA-MP-810, sem descaracterizá-la, ou seja, sem soldagem ou furação (Figura 14), cotas em mm.

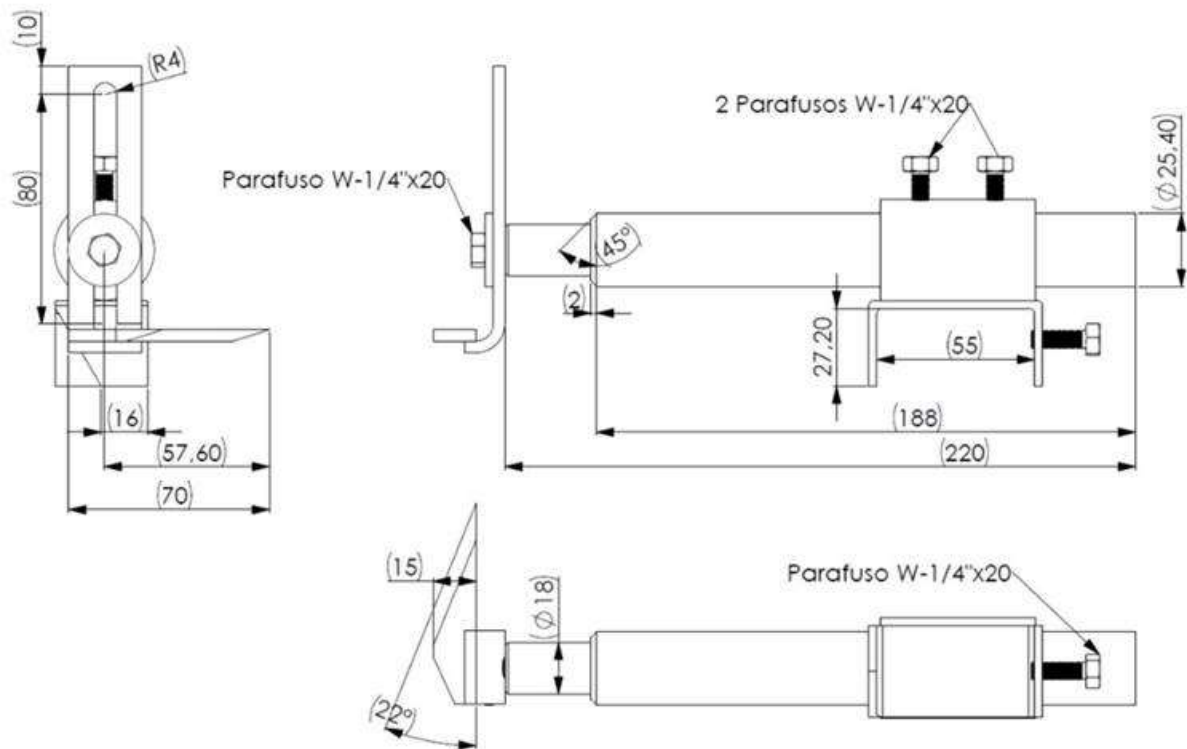


Figura 14 - Projeto básico de fabricação do DMPTOC.

O DMPTOC é foi ajustado de forma que a ponta da agulha ficasse sobre o disco dos parafusos de ajustes do came (Figura 15).



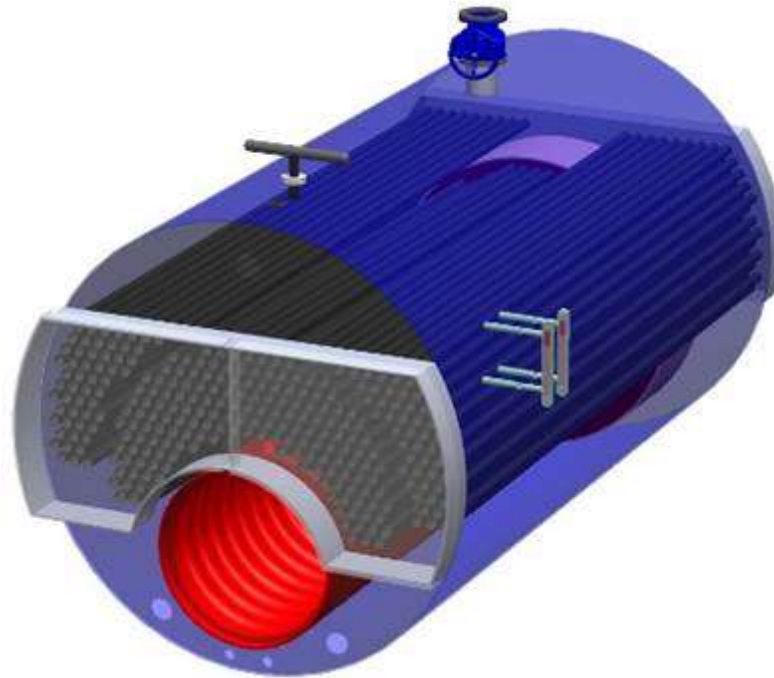
Figura 15 - DMPTOC (Dispositivo de marcação de posição, fabricado).

### 3.1.3 Caldeira MP-810 utilizada

A caldeira onde o DMPTOC foi instalado é do tipo horizontal, estacionária, fogo tubular de vapor saturado (Figura 16), trabalhava com óleo OC-1A. Não tinha refratários no fundo (tipo “Wet Back”), a modulação (regulagem) da chama era do tipo “ponto a ponto”. A sua fornalha era corrugada que aumenta a sua área de troca térmica. Era totalmente isolada termicamente, que diminui suas perdas de calor para o meio ambiente. A fornalha possuía um sistema de reversão de chamas, seus tubos secundários eram em espirais, que produziam mais turbulência, e como consequência uma melhor troca térmica e baixa retenção de fuligem (Figura 17). O combustor era do tipo copo-rotativo mod. 3TR. Esta caldeira possui algumas algumas características como a superfície de aquecimento de 74,8 m<sup>2</sup> e produção de vapor máxima com água a 20°C, de 6000 kg/h.



Figura 16 - Vista lateral oposta da caldeira.



**Figura 17 -Localização do “tubulão” e tubos de segunda e terceira passagem.**

**Fonte GrabCAD (2011)**

As condições operacionais da caldeira estão discutidas a seguir:

- a) Pressão média da caldeira = 7,5 Bar;
- b) Temperatura média do vapor = 175,26 °C;
- c) Temperatura de entrada da água de “make-up” = 23 °C;
- d) Temperatura de chegada do condensado no desaerador = 100 °C;
- e) PCI do óleo OC-1A = 9.750 kcal/kg (Anexos F e G).

#### **3.1.4 Queimador da caldeira, MOD. 3-TR**

O modelo de queimador para combustíveis líquidos, do tipo 3TR (Figura 18), foi empregado no presente trabalho, era constituído de um copo metálico rotativo que girava em alta velocidade ao receber o óleo do bico injetor. O óleo era pulverizado ao deixar o copo de parede cônica quando encontra o ar primário em alta velocidade girando em sentido de rotação oposto (KUO & ACHARYA, 2012 e PERRY, 1999).

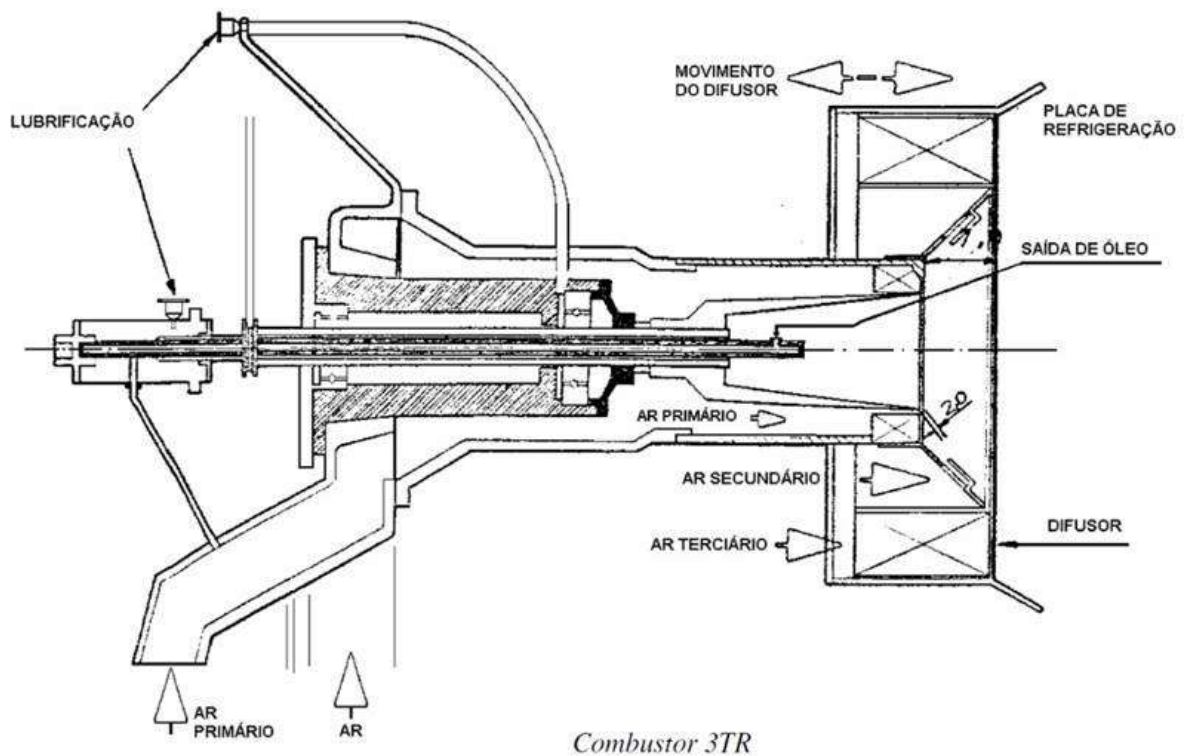


Figura 18 - Queimador da caldeira MP.

Fonte AALBORG (1995)

## 3.2 MÉTODO

### 3.2.1 Etapas preliminares para a instalação do DMPTOC.

Para ter certeza da contribuição do DMPTOC na máxima eficiência da caldeira, buscou-se diminuir as influências causadas por problemas na caldeira e instalações, essas influências podem mascarar os resultados. Realizou-se inspeção nas instalações de vapor e na caldeira a fim de minimizar as falhas e tornar os resultados de rendimento de combustão mais independentes de fatores externos:

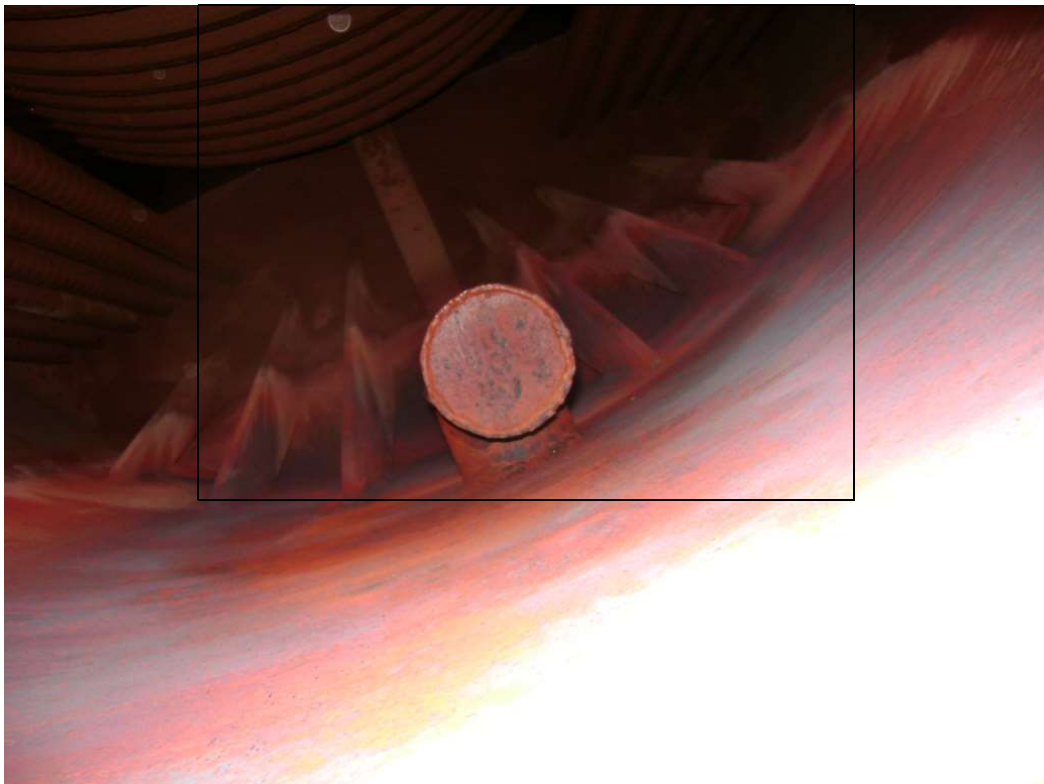
- a) Deficiência de isolamento térmico nas tubulações de vapor;  
Detectou-se em inspeções anteriores, várias deficiências no sistema de isolamento térmico das tubulações de vapor (Figura 19), dessa forma, o isolamento térmico foi substituído.



**Figura 19 - Sistema de isolamento térmico danificado.**

b) Incrustações nos tubos e costado da caldeira;

As incrustações nos tubos e costado da caldeira lado água vapor foram removidas por limpeza química (Figura 20).



**Figura 20 - Estado interno da caldeira.**



c) Rachaduras em tijolos e revestimentos refratários;

Uma reforma foi realizada nos refratários em função das rachaduras observadas nos tijolos e revestimentos (Figura: 21).



**Figura 21 - Refratário em recuperação lado externo.**

d) Baixa temperatura do óleo combustível

Desmontou-se o queimador a fim de detectar as causas das vibrações excessivas que prejudicaram a parede de refratários, e rolamentos do queimador. Com essa inspeção, detectou-se grande acúmulo de material coqueificado na região do copo que gira à alta rotação (Figura 22), assim foi providenciada a limpeza do queimador. Outro ponto observado foi que a temperatura do óleo era muito baixa e por isso causava formação de depósitos de coque no copo rotativo, gerando vibrações excessivas e por sua vez danos na parede de refratários e também danos nos rolamentos. O fabricante da caldeira recomenda que o óleo combustível deve entrar no queimador com aproximadamente 115°C, para alcançar a viscosidade ideal, pois varia com a temperatura (Anexo D), porém, a mesma não passava de 95°C.



**Figura 22 - Copo rotativo e difusor impregnados de borra de coque.**

Determinou-se que a causa na falha de aquecimento do óleo combustível foi ocasionada por uma das 3 resistências do aquecedor de óleo que estava queimada, e também havia material coqueificado dentro do equipamento, (Figura 23). A solução foi substituir o aquecedor de óleo, com isto a temperatura do óleo foi corrigida (Figura 24).



**Figura 23 - Novo aquecedor de óleo OC-1A.**



Figura 24 - Elevação da temperatura do óleo OC-1A.

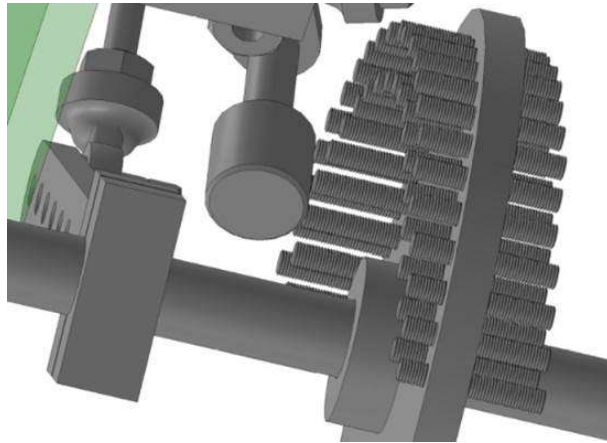
### 3.2.2 Ajuste da caldeira sem o DMPTOC

A ideia da criação do DMPTOC não era concebida, até a tentativa de regulagem da taxa de óleo combustível em função do ar de combustão, pois acreditava-se que a maioria dos fatores externos estavam sob controle (isolamento térmico, incrustação na caldeira, falhas no refratário, acúmulo de material no queimador, e baixa temperatura do óleo), restando então apenas ajustar a quantidade de ar para a demanda de óleo.

A primeira tentativa de regular a taxa de óleo combustível em função do ar de combustão sem o DMPTOC foi um fracasso. Ao ajustar os parafusos do came que acionam a alavanca da abertura da válvula de controle de chama e, simultaneamente, que aciona o damper de ar secundário, perdeu-se as referências e o consumo de óleo aumentou, isto se justifica, pois é difícil saber em qual parafuso foi ajustado pela última vez depois que a caldeira modulou (regulou) a chama automaticamente. O fabricante recomenda que seja ajustado em modo manual, mas a demanda de vapor pela fábrica obriga a abandonar sucessivamente os ajustes e voltar para o modo automático, pois a prioridade é não prejudicar a produção da fábrica, (Figuras 25 e 26).



**Figura 25 - Sistema de ajustes sem o DMPTOC.**



**Figura 26 - Vista superior do sistema de came.**

O ajuste nos parafusos do came controla simultaneamente a entrada de ar secundário e primário e também a entrada de óleo. Sempre existem dois parafusos que tocam a alavanca do acionador da válvula de chama, são 43 parafusos quando a caldeira está modulando (regulando) a chama, a passagem por um parafuso é muito rápida. Figura 27

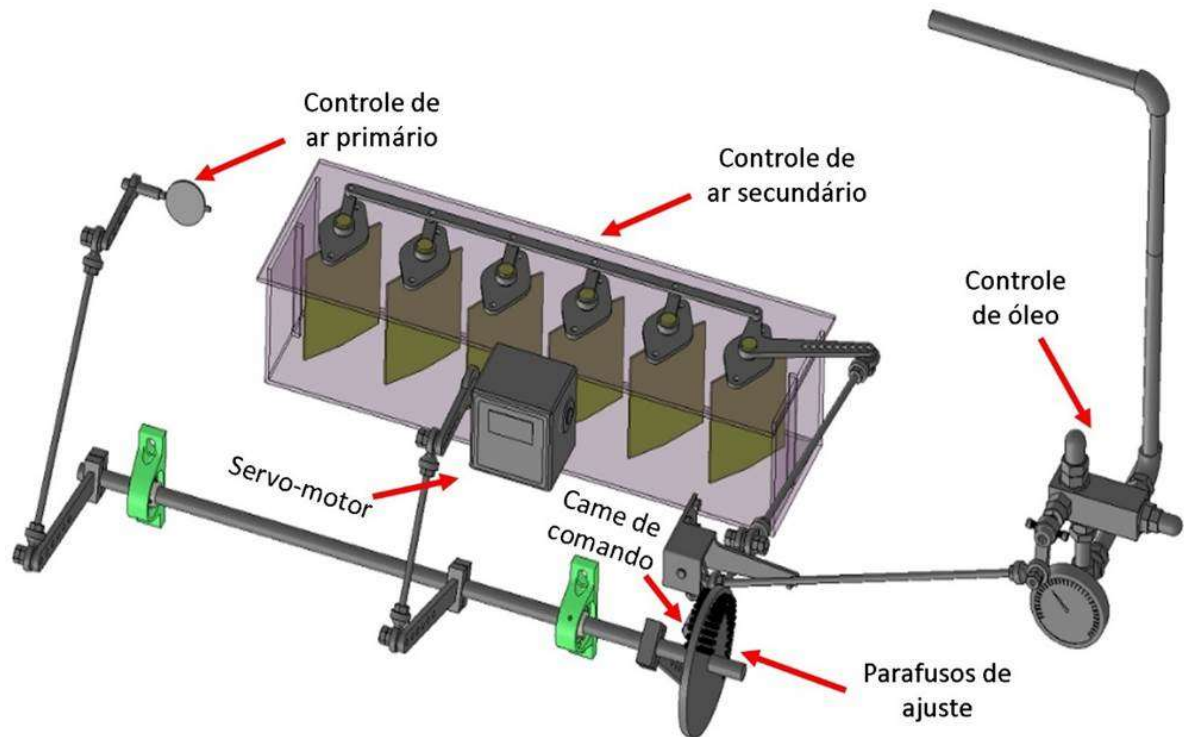


Figura 27 - Sistema de controle da taxa de óleo em função do ar de combustão.

### 3.2.3 O funcionamento do DMPTOC

Para ajustar-se de forma eficiente à caldeira foi necessário construir um dispositivo que marcasse a posição (DMPTOC) em que estavam os parafusos de ajuste que acionam o came.

O came acionado pelos parafusos empurra gradativamente a alavanca da válvula de chama abrindo a passagem de mais óleo (Figuras 28 e 29), ou seja, a válvula que abre a passagem de óleo combustível para o queimador.

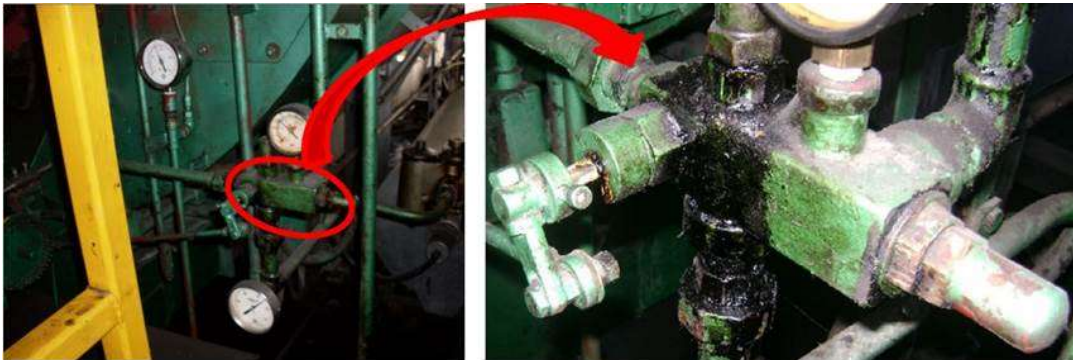


Figura 28: Válvula de comando de fogo.

Figura 29: Válvula de comando de fogo ampliada.

Simultaneamente, enquanto o disco com parafusos gira, a mesma barra (eixo de acionamento) onde este disco solidário gira, acionando também as alavancas que abrem o damper da caixa de ar que fica por baixo da caldeira, Figura 30, e a válvula de ar primário do queimador, Figura 31.

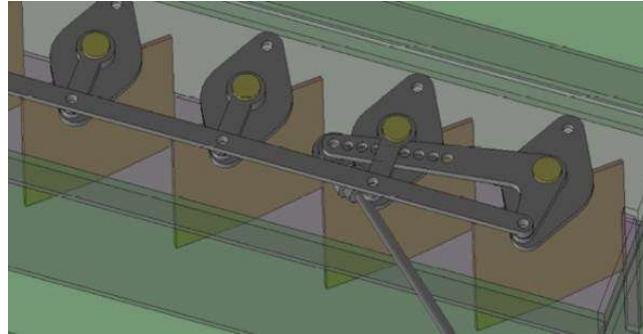


Figura 30: Damper de controle do ar de combustão.

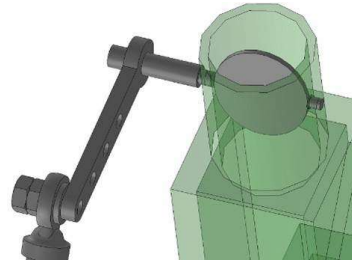


Figura 31 - Válvula que controla a pressão do ar de primário.

Quando a direção de giro é contrária, uma mola faz o came retornar e obriga o mesmo a pressionar os parafusos, portanto, sempre há o contato entre o came e os parafusos de ajuste simultaneamente (Figura 32)

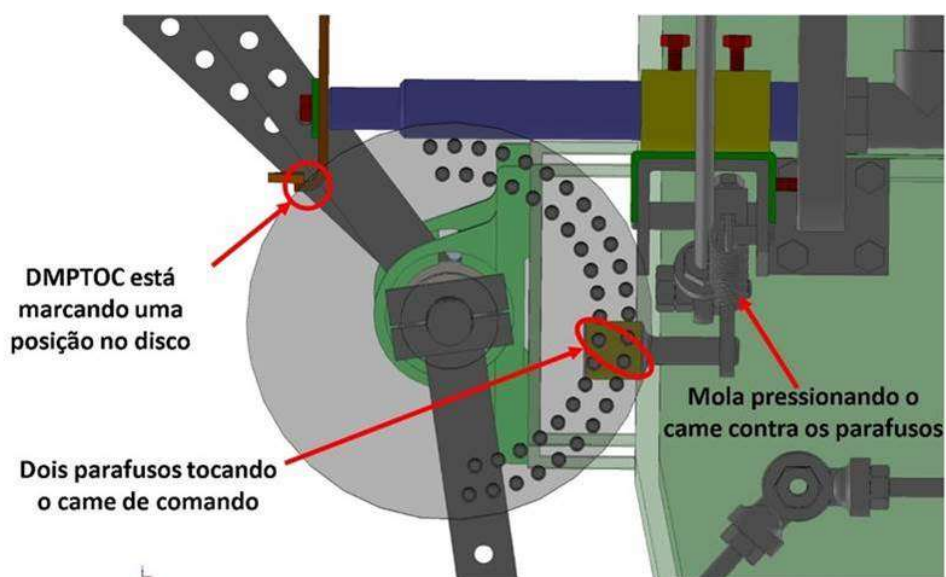


Figura 32 - Ajuste dos parafusos com DMPTOC em dois sentidos.

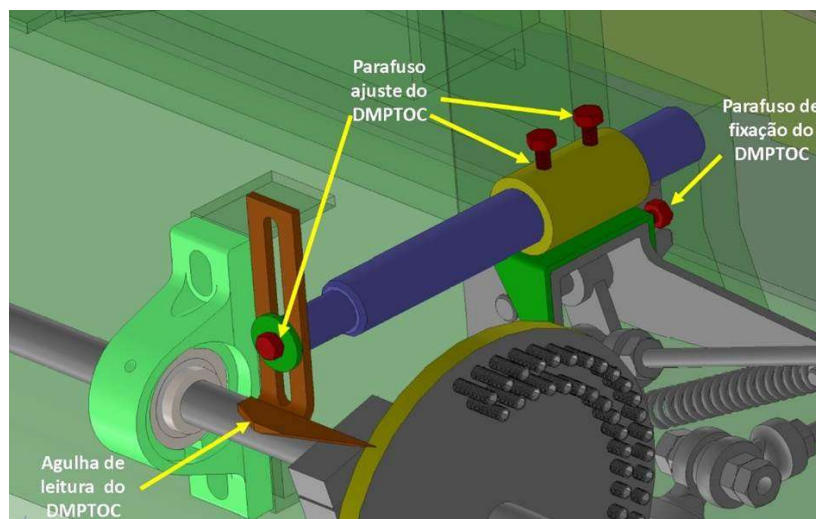
O servo motor foi responsável pelo movimento da barra acionadora, e existem duas formas de operar: em movimento comandado automaticamente ou através de um potenciômetro (comando manual).

Para realizar os ajustes na taxa de combustão de óleo em função de ar o fabricante do equipamento recomendou que seja apenas em modo manual.

O DMPTOC foi uma ferramenta auxiliar e não dispensou o uso do analisador (medidor) de gases, que realizou as leituras de temperatura dos gases da chaminé, e das quantidades volumétricas de  $O_2$ ,  $CO_2$  e em ppm de CO contidas na fumaça na base da chaminé via sonda inserida num furo a 1,5 m de altura sobre um piso instalado na parte superior externa da caldeira.

O fabricante da caldeira indica como um dos parâmetros de referência para o ajuste da combustão os seguintes valores: Teor de  $CO_2$  entre 12,5% a 14,0%; Teor de  $O_2$  entre 3% a 5%; EA (Excesso de Ar) entre 15 a 30%.

O DMPTOC foi fabricado com sobras de material (sucata), e em seu projeto foi excluída qualquer possibilidade de furar qualquer parte da caldeira ou mesmo utilizar solda em suas peças, além da questão de segurança buscou-se praticidade e evitar alterar as características originais do equipamento, ou seja, o DMPTOC é desmontável simplesmente soltando-se o parafuso posterior que prende na base de retorno da mola que aciona o came de comando (Figura 33).



**Figura 33 - Montagem e ajuste do DMPTOC na base da mola.**

### 3.2.4 Marcação no disco e regulagem da agulha do DMPTOC

Antes de iniciar o trabalho, o disco de comando teve a sua superfície cilíndrica pintada de amarelo e aguardou-se secar (foi escolhido o amarelo pois oferece um bom destaque da cor predominante da máquina que é verde). Posicionou-se o DMPTOC, de forma que a agulha ficasse a, aproximadamente, 3 mm de distância do disco de comando, a ponta da agulha, a aproximadamente 45° do centro do disco e em relação ao plano horizontal (Figura 34).

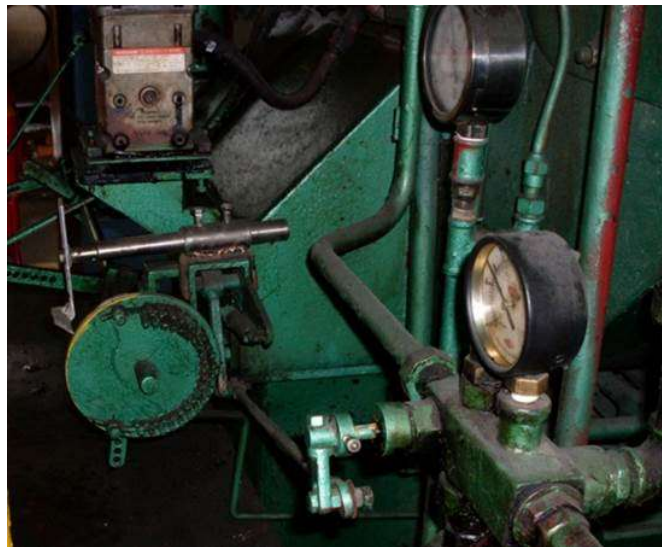


Figura 34 – Fixação e regulagem da altura do DMPTOC.

O DMPTOC oferece ajuste da altura da agulha soltando-se o parafuso frontal, e reapertando após reposicionar sua agulha na altura desejada (Figura 35).

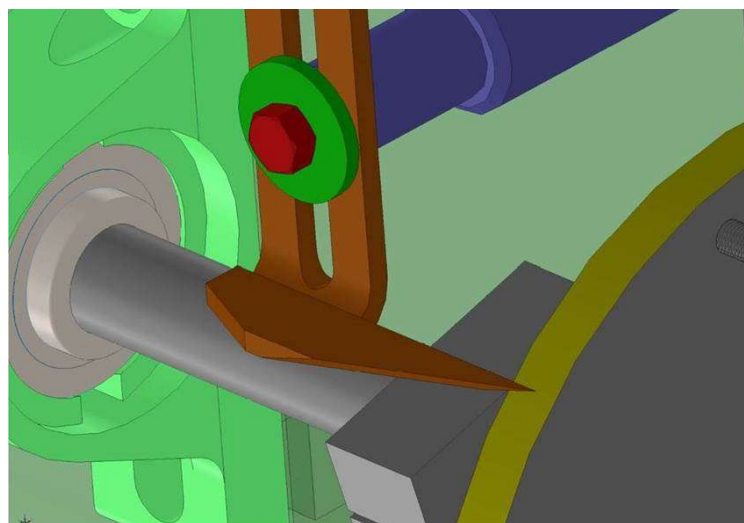
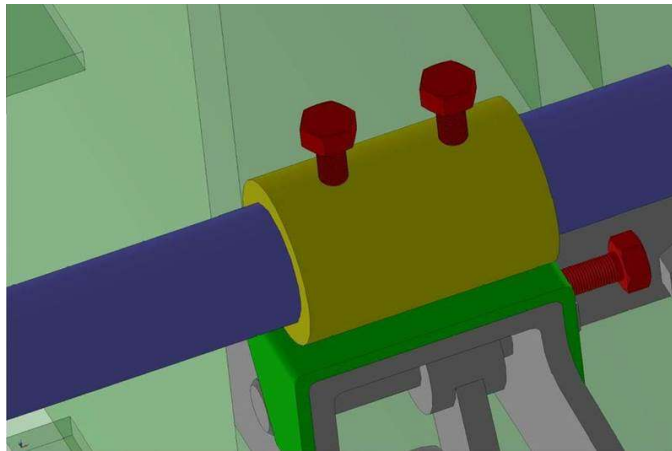


Figura 35 - Pré regulagem da aproximação do DMPTOC.



Para fazer o afastamento da agulha, utilizam-se os dois parafusos superiores soltando o parafuso, posicionando a agulha e reapertando o parafuso (Figura 36)



**Figura 36 - Pré regulagem do afastamento do DMPTOC.**

Para fazer o posicionamento da agulha no disco de comando, colocou-se a chave seletora em modo manual e girando-se lentamente o potenciômetro que controla o servo-motor, o disco de comando girou até a posição mais extrema tendendo a fechar o ar e a válvula de chama, marcou-se o ponto extremo na faixa amarela do disco, foi observado que nem todos os parafusos são percorridos pelo came. Em seguida inverteu-se o giro no potenciômetro na direção oposta fazendo com que o disco girasse em posição oposta mais extrema e marcando-se o ponto extremo na faixa amarela. Novamente alguns parafusos de ajuste não foram percorridos pelo came. Com os dois pontos extremos marcados através da agulha do DMTOC, definiu-se o perímetro útil no disco de comando, então, foram marcados mais 21 pontos, com auxílio de uma trena, totalizando 23 pontos de marcação, aproximadamente equidistantes (Figura 37).

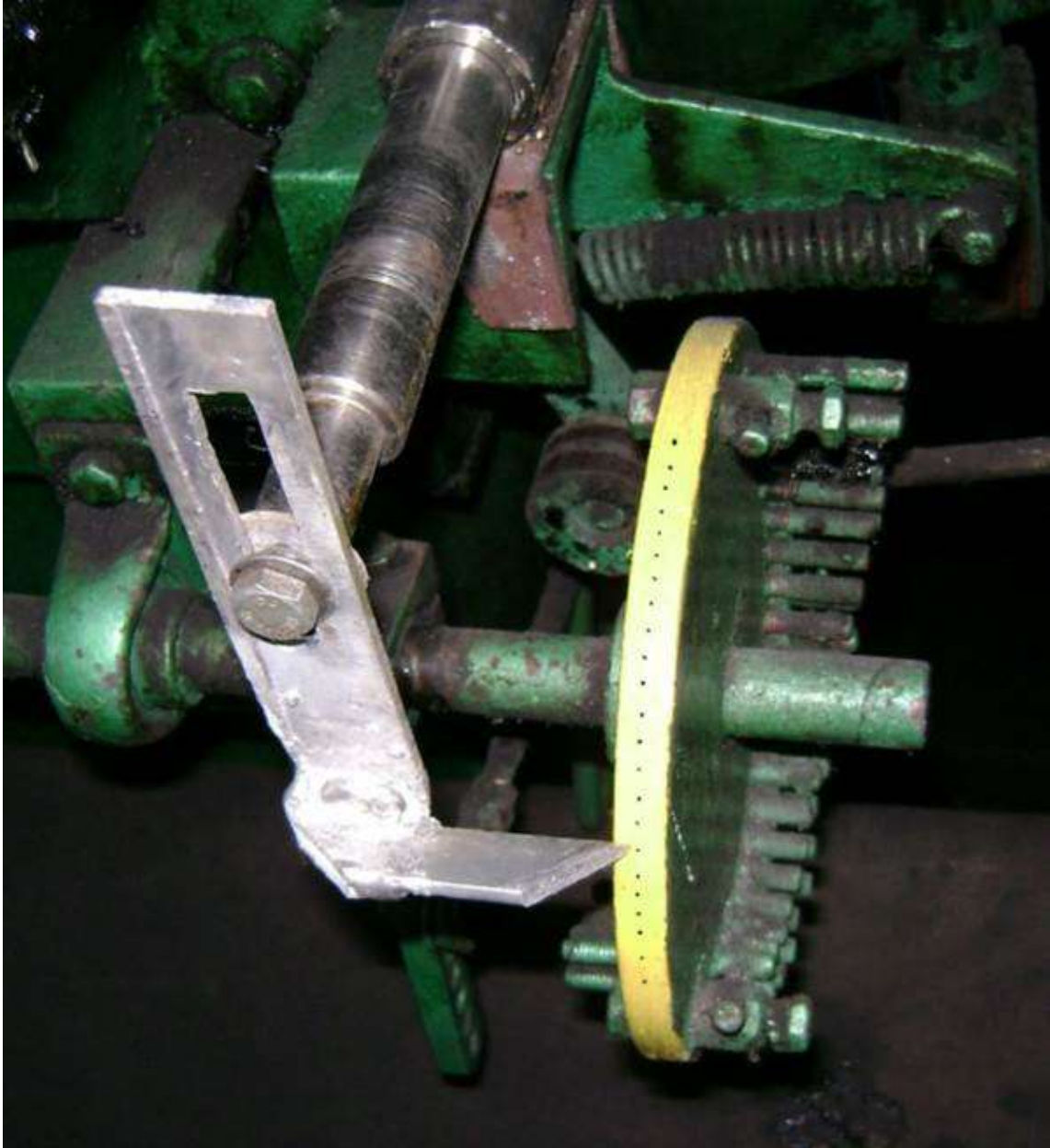
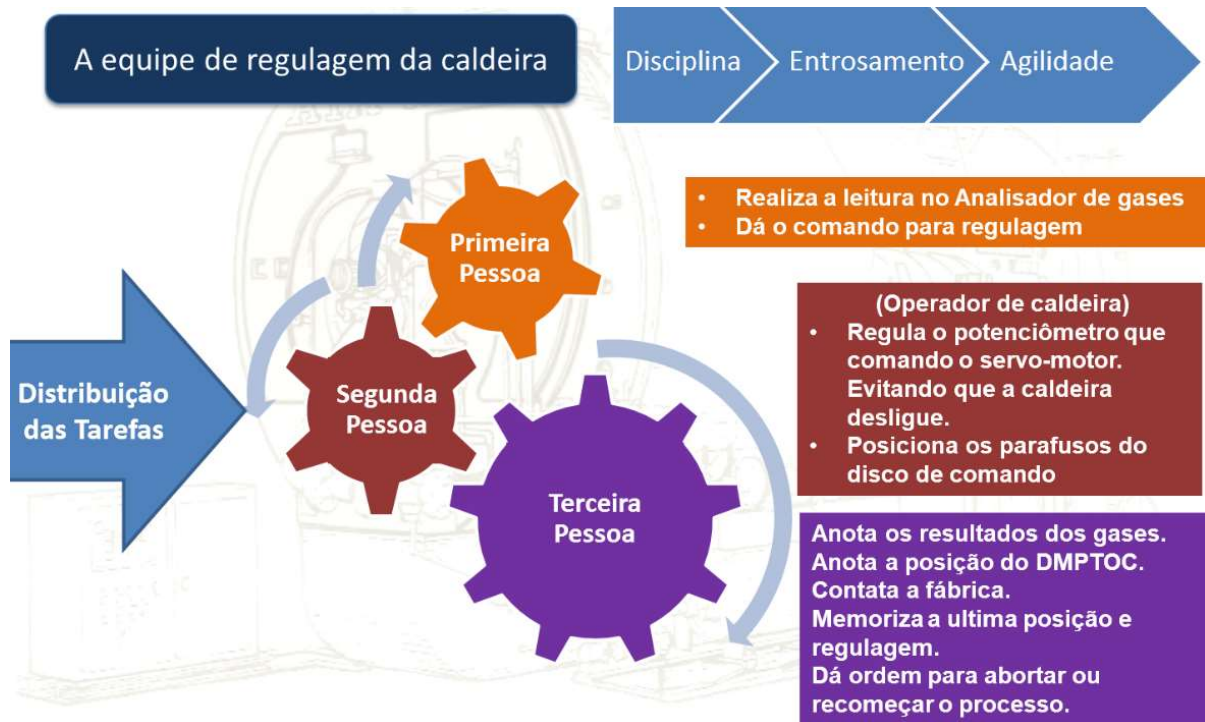


Figura 37 - DMPTOC com 23 posições marcadas.

### 3.2.5 Regulagem da combustão utilizando o DMPTOC

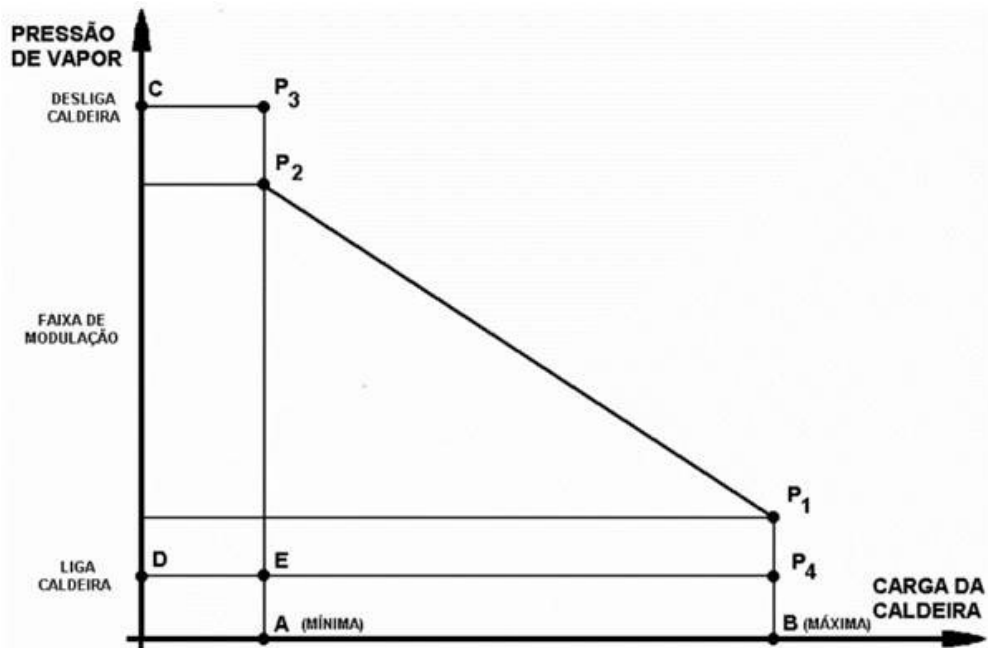
Realizou-se a regulagem com anotações de resultados em 02/10/2008 com três pessoas trabalhando sincronizados, de forma que houve planejamento prévio e distribuição de funções e responsabilidade (Figura 38):



**Figura 38 - Sincronismo de trabalho da equipe de regulagem da caldeira.**

- A primeira pessoa operou o aparelho medidor de gases sobre a caldeira, inserindo a sonda no orifício na base da chaminé ordenou a segunda pessoa para que girasse o potenciômetro para a direita ou para a esquerda a fim de obter o melhor ajuste de composição de gases em cada posição do disco, sempre focando o resultado recomendado pelo fabricante conforme informado pelo fabricante em referência aos teores de CO<sub>2</sub> (12,5% a 14%), O<sub>2</sub> (3% a 5%), EA (15% a 30%) e a temperatura dos gases da chaminé.
- A segunda pessoa um operador de caldeiras, regulou o potenciômetro, comandando a combustão da caldeira em modo manual, e posicionando os parafusos de ajuste no disco de comando. O ajuste do potenciômetro acionou também o pressostato limite assim como o pressostato de modulação (regulagem de chama), que é responsável pelo corte da combustão. O operador deve atentar para modular manualmente apenas na região de modulação, evitando que a pressão suba até P<sub>2</sub>, o que levaria ao desligamento da caldeira que entraria em ciclagem, ou seja, ausência de chama por 2 minutos, realizando purga e todo o processo necessário para religar, atrapalhando a regulagem da caldeira e a produção, devido ao tempo

necessário para atingir a inércia de produção, pois todo o processo seria interrompido (Figura 39).



**Figura 39 - Modulação proporcional.**

**Fonte: Manual da caldeira MP (1995)**

Onde os pontos ilustrados representam;

P<sub>1</sub>: Pressão ajustada no pressostato proporcionalizador (mínima de 7,5 bar);

P<sub>2</sub>: P<sub>1</sub> + diferencial ajustado no pressostato proporcionalizador (seja 8,0 bar);

P<sub>3</sub>: Pressão máxima de operação (cerca de 0,9 x PMTA) - (9 bar);

P<sub>4</sub>: P<sub>3</sub> - diferencial ajustado no pressostato limite (7,0 bar).

Em modo manual, a menor pressão de operação da caldeira é de 7 bar, conforme Figura 40



**Figura 40 - Manômetro da pressão do vapor.**

- c) A terceira pessoa anotou os resultados informados e fez a leitura da posição do disco comando utilizando o DMPTOC. Foi também de responsabilidade da terceira pessoa manter contato com pessoal de fábrica e informar se a atividade deveria ser momentaneamente abortada em função da demanda de vapor da fábrica.

O ar que tem a taxa marcada pelo DMPTOC é o ar secundário dentro da caixa de ar, porém, este ar também alimenta o ar primário tendo um segundo ajuste em uma válvula borboleta. Este ar, além de participar da combustão, também tem ainda a função secundária de resfriar toda a parte externa do combustor exposta ao calor irradiado da fornalha.

Em modo automático, quando a caldeira está totalmente fria, a sua partida inicia do zero, ponto A da Figura 38 (zero de pressão e carga mínima da Figura 38). Após alguns segundos, o sistema de modulação (regulagem de chama) começará a atuar levando-a para o ponto B (zero de pressão e carga máxima) e a pressão começará a subir, passando pelo ponto  $P_4$  e ao atingir o ponto  $P_1$ , o sistema de modulação voltará a atuar, diminuindo a carga em proporção à pressão do vapor. Enquanto o consumo de vapor se mantiver dentro dos limites do controle proporcional, a caldeira atuará entre os pontos  $P_1$  e  $P_2$ .

Caso o consumo venha a cair demasiadamente, a caldeira passará a funcionar no ponto  $P_2$  e a partir daí se manterá em carga mínima e a pressão, ao continuar a subir, atingirá o ponto  $P_3$ , sendo então desligado o queimador, indo até o ponto C.

Durante o período em que permanecer parada, o vapor sendo consumido, fará com que a pressão caia até o ponto D, quando então se dará nova partida no ponto E, repetindo-se a partir daí o ciclo de funcionamento.

### **3.2.6 Método para a verificação da eficiência do DMPTOC.**

A verificação da eficiência do DMPTOC pode ser obtida através das leituras realizadas e anotadas em planilhas, pois o propósito foi controlar a taxa adequada de óleo combustível em função do ar de combustão, os quais geraram na chaminé as quantidades de gases e temperaturas esperados na chaminé.

Porém, a eficácia do dispositivo foi demonstrada através da melhoria do rendimento da caldeira, pois se a caldeira estiver bem regulada, consumirá menores quantidades de óleo por quantidade de vapor gerado. Para poder comparar estes resultados foi necessário levantar com outros resultados ao longo do tempo, sendo

que os dados necessários foram as quantidades de óleo combustível lidas no medidor de vazão da caldeira, Figura 41, e a vazão de água de alimentação da caldeira (Figura 42), em determinado tempo.



**Figura 41 - Medidor de vazão de óleo combustível.**



**Figura 42 - Medidor de vazão de alimentação de água da caldeira.**

Existem outros métodos para verificar a eficácia da combustão, como por exemplo, observar a cor e tonalidade da chama e da fumaça que sai pela chaminé, porém, estes são qualitativos e não dão a mesma base quantitativa e a precisão para se obter o ajuste da eficiência da combustão da caldeira utilizando o DMPTOC.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O uso do DMPTOC (em 02/10/2008) possibilitou anotar em planilhas as medições de gases nas 23 posições do disco de comando e comparar ponto a ponto.

### 4.1 AJUSTES NO DISCO DE COMANDO

Medições de EA, %O<sub>2</sub>, %CO<sub>2</sub>, T<sub>gc</sub> em cada posição, (Tabela 1).

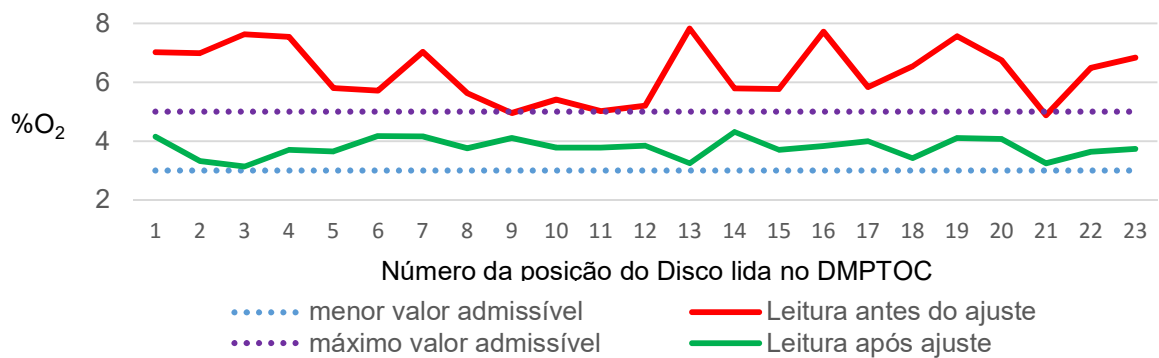
Tabela 1 - Ajuste da combustão com o dispositivo (conforme 3.2.5 item a).

Medições dos gases com ajustes nas 23 divisões do dispositivo DMPTOC								
Posição	Antes do ajuste nos parafusos				Após ajuste nos parafusos			
	(%)EA	%O <sub>2</sub>	%CO <sub>2</sub>	T <sub>gc</sub>	EA (%)	%O <sub>2</sub>	%CO <sub>2</sub>	T <sub>gc</sub>
1	52,09	7,02	10,32	265	25,20	4,15	12,48	276
2	51,79	6,99	10,34	268	19,08	3,33	13,12	268
3	59,14	7,63	9,87	264	17,66	3,14	13,28	255
4	58,01	7,54	9,94	259	21,76	3,70	12,83	266
5	39,59	5,80	11,22	280	21,38	3,65	12,87	254
6	38,70	5,71	11,29	282	25,40	4,17	12,46	256
7	52,24	7,03	10,31	270	25,30	4,16	12,47	261
8	37,95	5,63	11,35	285	22,24	3,76	12,78	253
9	31,87	4,95	11,86	299	24,90	4,11	12,51	267
10	35,98	5,41	11,51	289	22,33	3,78	12,77	260
11	32,44	5,02	11,81	297	22,33	3,78	12,77	266
12	34,07	5,20	11,67	300	22,91	3,85	12,71	277
13	61,46	7,82	9,73	280	18,46	3,25	13,19	259
14	39,46	5,79	11,23	284	26,53	4,31	12,35	256
15	39,34	5,77	11,24	278	21,76	3,70	12,83	270
16	60,13	7,71	9,81	282	22,82	3,84	12,72	259
17	39,98	5,84	11,19	284	24,09	4,00	12,59	264
18	46,99	6,54	10,67	270	19,71	3,42	13,05	241
19	58,33	7,56	9,92	286	24,90	4,11	12,51	266
20	49,13	6,75	10,52	289	24,69	4,08	12,53	273
21	31,30	4,88	11,91	283	18,46	3,25	13,19	274
22	46,42	6,49	10,71	276	21,29	3,64	12,88	263
23	50,01	6,83	10,46	276	22,05	3,74	12,80	279

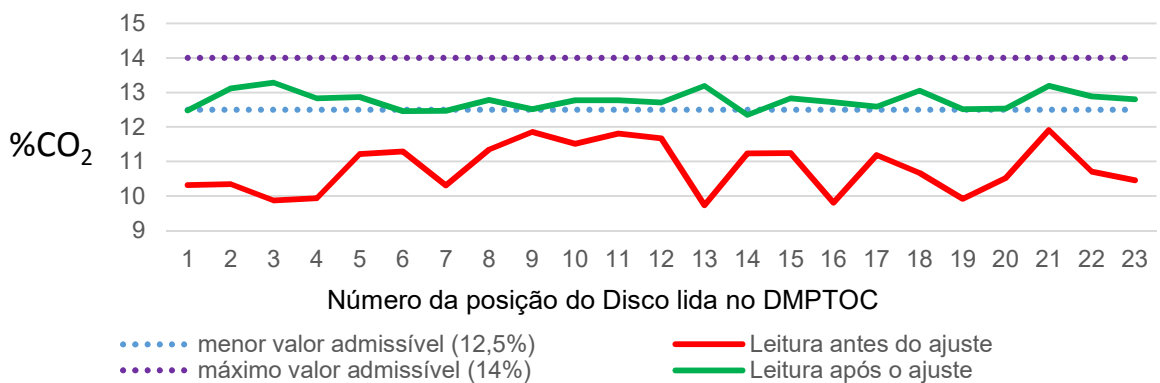
Onde: EA = Excesso de ar (%); T<sub>gc</sub> = Temperatura dos gases da chaminé (°C).

Houve uma dificuldade maior de ajuste nos parafusos iniciais e finais pois, como a regulagem da caldeira foi realizada totalmente com a fábrica trabalhando, não havia muito tempo para fazer os ajustes em cada ponto.

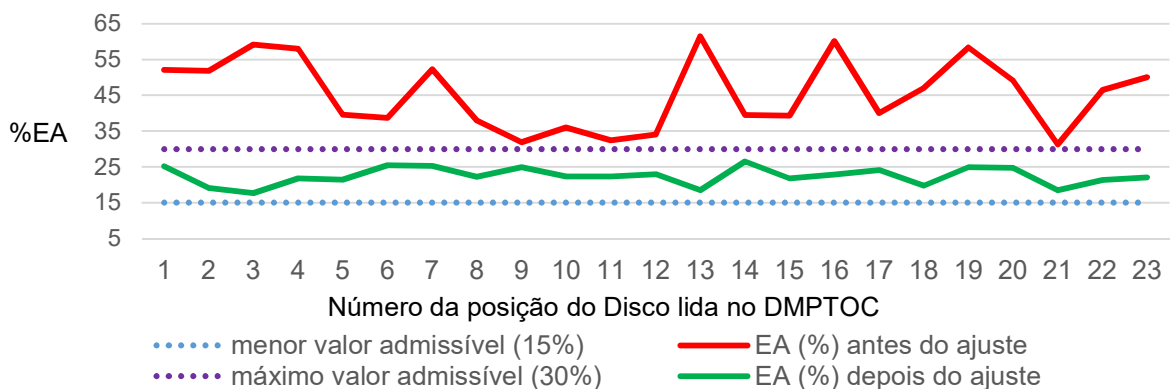
As Figuras 43, 44 e 45 ilustram respectivamente os resultados obtidos da regulagem da combustão antes e depois da utilização do DMPTOC, para %O<sub>2</sub>, %CO<sub>2</sub> e %EA.



**Figura 43 - Medições realizadas de %O<sub>2</sub> após regulagem sem e com o auxílio do DMPTOC.**



**Figura 44 - Medições realizadas de %CO<sub>2</sub> após regulagem sem e com o auxílio do DMPTOC.**



**Figura 45 - Medições realizadas de %EA após regulagem sem e com o auxílio do DMPTOC.**



## 4.2 EFICIÊNCIA DA CALDEIRA E PRODUÇÃO DE VAPOR

A Tabela 2 apresenta os resultados da energia produzida pelo óleo combustível queimado mensalmente de janeiro/2008 a abril/2009.

**Tabela 2 - Resultados mensais da energia produzida pelo óleo combustível.**

( $D_{ro} = 9780 \text{ g/cm}^3$ , e  $PCI_{oc} = 9750 \text{ kcal/kg}$ )

Mês	$V_{voc}$ (l / mês)	$T_{moa}$ (°C)	$D_{oc}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$V_{moc}$ (kg/mês)	$Q_{oc}$ kcal/mês
Jan./08	19075.5	99	0.9198	17545.67	965250
Fev./08	18475.3	99	0.9198	16993.62	965250
Mar./08	18380.9	99	0.9198	16906.77	965250
Abr./08	15419.8	99	0.9198	14183.09	965250
Mai./08	16106.7	99	0.9198	14814.97	965250
Jun./08	17615.2	106	0.9155	16126.74	1033500
Jul./08	15187.7	115	0.9099	13819.32	1121250
Ago./08	17722.4	115	0.9099	16125.62	1121250
Set./08	16315.7	115	0.9099	14845.65	1121250
Out./08	15336.8	115	0.9099	13954.93	1121250
Nov./08	12828.5	115	0.9099	11672.61	1121250
Dez./08	0.0	-	-	0.00	0
Jan./09	14866.3	115	0.9099	13526.82	1121250
Fev./09	17377.7	115	0.9099	15811.97	1121250
Mar./09	16898.8	115	0.9099	15376.23	1121250
Abr./09	14623.2	115	0.9099	13305.69	1121250

Onde:

$V_{moc}$  = A vazão mássica de óleo combustível (calculada);

$V_{voc}$  = A vazão volumétrica de óleo combustível medida (Figura 40);

$D_{oc}$  = A densidade do óleo combustível entrando no queimador (Anexo B);

$D_{ro}$  = A densidade relativa do óleo a 20°C, em relação a água a 4°C (Nota Fiscal);

$PCI_{oc}$  = O poder calorífico inferior do óleo combustível (Anexo F);

$T_{moa}$  = A temperatura média do óleo aquecido no mês (leitura no termômetro);

$Q_{oc}$  = A quantidade de energia térmica gerada da combustão do óleo.

A equação 4, representa a vazão mássica de óleo;

$$V_{moc} = V_{voc} \cdot D_{oc} \quad (4)$$

A equação 5 representa a quantidade de energia fornecida pelo óleo combustível (cuja mudança de unidade foi executada);

$$Q_{oc} = V_{moc} \cdot PCI_{oc} \quad (5)$$

A Tabela 3 apresenta os resultados da energia consumida para aquecer a água líquida da temperatura de entrada na caldeira até a temperatura de equilíbrio com a temperatura de ebulição, mensalmente de janeiro/2008 a abril/2009.

**Tabela 3: Resultados mensais da energia de calor sensível da água de alimentação da caldeira ( $T_{mv} = 172,9 \text{ }^\circ\text{C}$ ).**

Mês	$T_{aa}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$V_{aa}$ (kg/mês)	$Cp_{aa}$ (kcal/kg. $^\circ\text{C}$ )	$\Delta T_{av}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$Q_{liq}$ (kcal)
Jan./08	51,8	223200	1,0131	121,1	27385585,3
Fev./08	52,2	216700	1,0132	120,7	26491421,2
Mar./08	65,4	224400	1,0157	107,5	24507710,4
Abr./08	72,8	194500	1,0171	100,1	19799862,6
Mai./08	85,6	209900	1,0196	87,3	18678959,9
Jun./08	86,2	234800	1,0197	86,7	20755230,0
Jul./08	86,7	201600	1,0198	86,2	17712564,4
Ago./08	86,4	235100	1,0198	86,5	20730364,0
Set./08	87,8	216200	1,0200	85,0	18755495,4
Out./08	88,1	212500	1,0201	84,7	18368857,0
Nov./08	87,2	177000	1,0199	85,7	15475239,5
Dez./08	-	-	-	-	-
Jan./09	88,8	205800	1,0202	84,1	17648657,2
Fev./09	88,6	240400	1,0202	84,3	20670106,1
Mar./09	88,0	233500	1,0201	84,9	20217397,2
Abr./09	87,4	202900	1,0200	85,4	17680069,5

Onde:

$T_{aa}$  = A temperatura média da água de mistura da alimentação da caldeira ( $^\circ\text{C}$ );

$V_{aa}$  = A vazão de água de mistura da alimentação da caldeira (kg/mês) as leituras foram realizadas no medidor de vazão de água (Figura 41);

$Cp_{aa}$  = O calor específico da água de alimentação (kcal/kg. $^\circ\text{C}$ ), Fonte: Trevisan, Anexos I e E;

$T_{mv}$  = A temperatura média do vapor saturado ( $^\circ\text{C}$ );

$\Delta T_{av}$  = A diferença de temperatura entre vapor e água de alimentação ( $^\circ\text{C}$ );

$Q_{liq}$  = O calor sensível da água de alimentação até a temperatura do vapor (kcal/mês).

A equação 6 representa a diferença de temperatura da água de alimentação até a temperatura de equilíbrio do vapor;

$$\Delta T_{av} = T_{mv} - T_{aa} \quad (6)$$

A equação 7 representa o calor sensível da água de alimentação;

$$Q_{liq} = V_{aa} \cdot Cp_{aa} \cdot \Delta T_{av} \quad (7)$$

A Tabela 4 apresenta os resultados da energia consumida para mudar o estado da água já aquecida à temperatura de equilíbrio que é 172,88 °C e que foi pressurizada a 7,5 bar para a caldeira, transformando-se em vapor saturado seco, mensalmente de janeiro/2008 a abril/2009.

**Tabela 4 - Resultados mensais de calor latente produzido ( $h_v = 2770,022$  kJ/kg;  $h_i = 732,067$  kJ/kg;  $\Delta h_{vapJ} = 2037,955$  e  $\Delta h_{vap} 486,757$  kcal/kg).**

Mês	$V_{aa}$ (kg/mês)	$Q_{vap}$ (kcal/mês)
Jan./08	223200	108644188
Fev./08	216700	105480267
Mar./08	224400	109228297
Abr./08	194500	94674259
Mai./08	209900	102170319
Jun./08	234800	114290571
Jul./08	201600	98130235
Ago./08	235100	114436598
Set./08	216200	105236889
Out./08	212500	103435887
Nov./08	177000	86156010
Dez./08	-	0
Jan./09	205800	100174615
Fev./09	240400	117016411
Mar./09	233500	113657787
Abr./09	202900	98763019

Onde:

$P_{mc}$  = A pressão média da caldeira em bar;

$V_{aa}$  = A vazão de água de mistura da alimentação da caldeira (kg/mês) Figura 41;

$T_{vap}$  = A temperatura do vapor em °C;

$h_v$  = A entalpia do vapor na pressão da caldeira (kJ/kg);

$h_i$  = A entalpia do líquido (kJ/kg);

$\Delta h_{vapJ}$  = A diferença de entalpia (kJ/kg);

$\Delta h_{vap}$  = A diferença de entalpia (kcal/kg);

$Q_{vap}$  = O calor latente produzido por mês pela caldeira (kcal/mês).

A equação 8, representa o Calor Latente;

$$Q_{vap} = V_{aa} \cdot \Delta h_{vap}$$

(8)

A Tabela 5 apresenta a razão de vapor produzido por óleo consumido, e o rendimento global da caldeira, mensalmente de janeiro/2008 a abril/2009.

**Tabela 5 - Resultados mensais de calor total vaporização por mês.**

mês	$V_{moc}$ (kg/mês)	$Q_{oc}$ (kcal/mês)	$V_{aa}$ (kg/mês)	$R_{vo}$	Calor transformação da água/vapor			$\eta_E$ (%)
					$Q_{liq}$ (kcal/mês)	$Q_{vap}$ (kcal/mês)	$Q_{tva}$ (kcal/mês)	
Jan./08	17545,67	171070283	223200	12,72	27385585	108644188	136029774	79,52%
Fev./08	16993,62	165687795	216700	12,75	26491421	105480267	131971688	79,65%
Mar./08	16906,77	164841008	224400	13,27	24507710	109228297	133736007	81,13%
Abr./08	14183,09	138285128	194500	13,71	19799863	94674259	114474122	82,78%
Mai./08	14814,97	144445958	209900	14,17	18678960	102170319	120849279	83,66%
Jun./08	16126,74	157235715	234800	14,56	20755230	114290571	135045801	85,89%
Jul./08	13819,32	134738370	201600	14,59	17712564	98130235	115842799	85,98%
Ago./08	16125,62	157224795	235100	14,58	20730364	114436598	135166962	85,97%
Set./08	14845,65	144745088	216200	14,56	18755495	105236889	123992384	85,66%
Out./08	13954,93	136060568	212500	15,23	18368857	103435887	121804744	89,52%
Nov./08	11672,61	113807948	177000	15,16	15475239	86156010	101631249	89,30%
Dez./08	-	-	-	-	-	-	-	-
Jan./09	13526,82	131886495	205800	15,21	17648657	100174615	117823272	89,34%
Fev./09	15811,97	154166708	240400	15,20	20670106	117016411	137686517	89,31%
Mar./09	15376,23	149918243	233500	15,19	20217397	113657787	133875184	89,30%
Abr./09	13305,69	129730478	202900	15,25	17680069	98763019	116443088	89,76%

Onde:

$V_{moc}$  = A vazão mássica de óleo combustível (kg/mês), as leituras de vazão de óleo foram lidas no medidor de vazão de óleo combustível (Figura 40);

$V_{aa}$  = A vazão de água de mistura da alimentação da caldeira (kg/mês);

$Q_{oc}$  = A energia térmica gerada da combustão do óleo (kcal/mês) Tabela 2;

$Q_{tva}$  = A energia total de vaporização da água (kcal/mês);

$Q_{vap}$  = A energia latente de vaporização da água (kcal/mês); Tabela 4

$Q_{liq}$  = A energia de aquecimento da água líquida (kcal/mês) Tabela 3;

$R_{vo}$  = A razão vapor produzido por óleo queimado;

$\eta_E$  = O rendimento energético global da caldeira em (%).

A equação 9 representa o calor total para evaporar a água de entrada da caldeira em vapor na pressão de saída da caldeira por mês;

$$Q_{tva} = Q_{vap} + Q_{liq} \quad (9)$$

A equação 10 representa a razão entre a quantidade de vapor produzido por óleo consumido;

$$R_{vo} = \frac{V_{aa}}{V_{moc}} \quad (10)$$

A equação 11 representa o rendimento global da caldeira;

$$\eta_E = \frac{Q_{oc}}{Q_{tva}} \cdot 100\% \quad (11)$$

### 4.3 COMPARAÇÃO ENTRE TOMADA DE AÇÕES E RESULTADOS OBTIDOS DA EFICIÊNCIA DA CALDEIRA.

A Figura 46 compara todas as ações tomadas para melhorar os resultados de eficiência da caldeira e a contribuição do DMPTOC recuperou 3,85% de eficiência com o controle da taxa de combustível em função do ar de combustão quando foi instalado em 02/10/2008.



Figura 46 - Contribuição do DMPTOC na eficiência da caldeira.

## **5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES**

### **5.1 CONCLUSÃO**

A eficiência de combustão da caldeira melhorou 3,85% quando ocorreu o ajuste com a utilização do DMPTOC, com todas as ações tomadas cumpriu a meta com o valor de 89,52%, dentro do estipulado pelo fabricante que é  $88\% \pm 2\%$ , e aumentou a razão de vapor produzido por óleo queimado, que é o inverso do consumo de óleo para uma mesma quantidade de vapor.

Os outros ganhos de eficiência na caldeira foram possíveis com os reparos nos isolamentos térmicos que ocorreram de 04/03/2008 a 25/04/2008, e com a troca do aquecedor de óleo que ocorreu em 15/05/2008. As intervenções de manutenção também diminuiriam bem como a possibilidade de acumulação de coque no queimador e vibrações do copo rotativo, aumentando a vida útil dos rolamentos.

### **5.2 SUGESTÕES**

Visando a continuidade do estudo sugere-se;

- a) Estudar a possibilidade de utilização para as modernas caldeiras modelo Mission (Aalborg) do mesmo fabricante.
- b) Quantificar o custo benefício da utilização do dispositivo mecânico de marcação de posição da taxa de combustão em relação a utilização de sensor de posição ótico acoplado a um CLP. (Controlador Lógico Programável) e acionamento do compressor com inversor de frequência.
- c) Comparar a eficiência da regulagem da caldeira através de comando mecânico com marcador de posição, contra a eficiência da regulagem da caldeira por meio de inversor de frequência no compressor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AALBORG, **Manual da caldeira mod. ATA MP-810**, Petrópolis, RJ, Brasil, 1995.
- ABNT, NBR-12177, **Caldeiras estacionárias a vapor - Inspeção de segurança**, Brasil, 1999.
- ABNT, NB-227, **Caldeiras estacionarias - Código para projeto e construção**, Brasil, 1993
- ALDERETES, C. O., **Análisis energético y exergético de calderas industriales**, 3º Congreso de la Sección ASME Bolivia, 2011
- APEANING, R. W. **Energy Efficiency and Management in Industries: A case study of Ghana's largest industrial area**. Ghana, 2012
- ASME, **BPVC - Boiler & Pressure Vessel Code**, USA, 2013
- ATA Combustão (Aalborg), **Folhetos de propaganda de caldeiras**, Petrópolis, RJ, Brasil, 1996.
- BOTELHO, M. H. C. & BIFANO, H. M. **Operação de caldeiras. Gerenciamento, Controle e Manutenção**, 1ª edição - Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo - SP - Brasil 2011
- CAETANO, L & DUARTE JR., L.A. - **Estudo Comparativo da Queima de Óleo B.P.F. e de Lenha em Caldeiras** – Estudo de Caso, 2004.
- CARVALHO JR., J.A. & LACAVA, P. T. **Emissões em Processos de Combustão**, Ed. UNESP, SP, 2003
- DURKIN, T. H. **Boiler System Efficiency. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.** Published in ASHRAE Journal (Vol. 48, July 2006).
- FERREIRA, F. O., **Estudo do Sistema de Controle de Caldeiras de Centrais Termelétricas**, Vitória, ES, 2008
- GIL, E. F., **Segunda lei da termodinâmica: Algumas relações com o cotidiano, Cadernos PDE, Versão Online** ISBN 978-85-8015-053-7, O Professor PDE e os Desafios da Escola Pública Paranaense, Paraná, Brasil, 2010
- GONÇALVES, F. S. **Petróleo e Combustíveis Industriais: Mercado e aplicações**, Porto Alegre, RS, Brasil, 2010
- GRABCAD, **Steam boiler 10 t/h, 2011**, Disponível em: <https://grabcad.com/libray/steam-boiler-10-t-slash-h> Acesso em 06 mar. 2015.

KRISTINSSON, H. & LANG, S. **Boiler Control. Improving efficiency of boiler systems**, Landskrona, Sweden, 2010

KUO K. K. **Principles of combustion**. New York, Wiley-Interscience: 1986

KUO, K. K. & ACHARYA, R. **Fundamentals of turbulent and multiphase combustion**. Wiley and Sons, New Jersey, USA, 2012, ISBN 9780470226223

MADSEN, S. & OLSSON, T. C. **Cost-Efficient Emission Control Area Compliancy, Norwegian**, 2012

MADUR, **Manual do analisador de gases modelo GA-12**, 2006

MINISTÉRIO DO TRABALHO, NR-13 – **Norma Regulamentadora Segurança e Operação de Caldeiras e Vasos de Pressão, atualizada conforme Portaria MTE n.º 594**, de 28 de abril de 2014

MOHAMED, O. R. I. **Study of Energy Efficient Supercritical Coal-Fired Power Plant Dynamic Responses and Control Strategies**, Birmingham, UK, 2012

MUCCIACITO, J. C. **Caldeiras de Alta Pressão, Revista Meio Filtrante. Ano XI – Edição n.º 57**, 2012

NR-13, **Norma regulamentadora - Segurança e operação de Caldeiras e Vasos de Pressão e Tubulações**, Brasil,

OHIJEAGBON, I. O., WAHEED, M. A., JEKAYINFA, S. O., OPADOKUN, O. E. **Developmental Design of a Laboratory Fire-Tube Steam Boiler**, Hunedoara, Romania, 2013

PÊRA, H. **Geradores de vapor: Um compêndio sobre a conversão de energia com vistas à preservação da ecologia**, Fama, São Paulo SP Brasil, 1990

PERRY, R. H. **Chemical engineers' handbook**. 7th ed. Oklahoma, USA -1999, ISBN 0-07-049841-5

PINHEIRO, P. C. C. & CERQUEIRA, S. A. A. G., **Método de cálculo do balanço térmico de caldeiras**, Volta Redonda, RJ, 1995.

POLING, B. E., PRAUSNITZ, J. M. & O'CONNELL, J. P. **The Properties of Gases and Liquids**, The McGraw-Hill Companies, USA, 2001

PORTARIA ANP N° 80, 1999, **Regulamento Técnico que especifica os óleos combustíveis de origem nacional ou importados a serem comercializados em todo o território nacional, 1999**

POWERS, J. M. **Lecture Notes on Thermodynamics, Department of Aerospace and Mechanical Engineering University of Notre Dame**. Notre Dame, Indiana, USA, 2014.



REVISTA MECATRÔNICA ATUAL, N.º 1126 - **Analisadores-de-gases**, 2013, Disponível em: <http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/1126-analisadores-de-gases> Acesso em 06 mar. 2015.

RODRIGUES, M. L. M., MONTEIRO, M. A. G. **A Geração de Energia Elétrica Utilizando o Vapor Saturado de Processo, 34º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 28º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais**, Vitória, ES. 2013,

SALUM, A. D. **Eficiência Energética em sistema de Combustão de Caldeira**, Salvador. Brasil. 2011

SAIDUR, R. A., DEMIRBAS, E.A. HOSSA, M.S. MEKHILEF, S. **A review on biomass as a fuel for boilers, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier Kuala Lumpur, Malaysia, 2011**

SANTOS, M. L. S., BERNAL, A. F.B., TORRES, A. F. R., **New Developments on Fuel-Slurry Integrated Gasifier/Gas Turbine (FSIG/GT)**, Campinas, Sp, Brasil, 2015.

STAMATOGLOU, P. **Spectral Analysis of Flame Emission for Optimization of Combustion Devices on Marine Vessels**. Malmö (Sweden), 2014

SPIRAX SARCO, **Manual Técnico** (2008)

SPIRAX SARCO, **Relatório Técnico de Inspeção** (2008)

TORREIRA, R. P. **Fluídos Térmicos: Água, Vapor, Óleos Térmicos**. - 3ª edição; HEMUS – RJ-Brasil 2001

TREVISAN, W., **Manual Termo Técnico**, IBLC Instituto Brasileiro do Livro Técnico Ltda., São Paulo, SP, 1988

URNS, S. R. **An Introduction to Combustion: Concepts and Applications**, Mc Graw Hill, 2nd Ed., Boston, USA, 2000

USHER, A. P. **Uma História das Invenções Mecânicas**. São Paulo: Papyrus, 1993.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, **Manual**, USA, 2015

VEYNANTE, D. **Analysis of dynamic models for turbulent premixed combustion**, France, 2012

VOSOUGH, A. **Boiler thermodynamic analyzing**, Mahshahr, Iran, 2012

**ANEXO A**Tabela A1 - Faixa de Ajuste de CO<sub>2</sub>

Faixa de ajuste de CO <sub>2</sub> .		
Combustível	Faixa de ajuste de CO <sub>2</sub>	Valor Máximo de CO <sub>2</sub>
Óleos Pesados	11,5 a 14,5 %	15,8
Óleos Leves	11,0 a 13,5%	15,5
Gás Natural	9,0 a 11,0 %	12,1
Gás de Nafta	10,0 a 12,0 %	13,8
Lenha	12,0 a 17,0 %	20,1
Bagaço de Cana	12,0 a 17,0 %	-

Fonte: Revista Mecatrônica Industrial (2013).

## ANEXO B

Tabela B1 - Densidade do Óleo OC-1A em função da temperatura.

Temp. °C	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Temp. °C	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Temp. °C	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Temp. °C	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Temp. °C	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Temp. °C	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
0	0,9812	31	0,9620	62	0,9428	93	0,9235	124	0,9043	155	0,8851
1	0,9806	32	0,9614	63	0,9421	94	0,9229	125	0,9037	156	0,8845
2	0,9800	33	0,9607	64	0,9415	95	0,9223	126	0,9031	157	0,8839
3	0,9793	34	0,9601	65	0,9409	96	0,9217	127	0,9025	158	0,8832
4	0,9787	35	0,9595	66	0,9403	97	0,9211	128	0,9018	159	0,8826
5	0,9781	36	0,9589	67	0,9397	98	0,9204	129	0,9012	160	0,8820
6	0,9775	37	0,9583	68	0,9390	99	0,9198	130	0,9006	161	0,8814
7	0,9769	38	0,9576	69	0,9384	100	0,9192	131	0,9000	162	0,8808
8	0,9762	39	0,9570	70	0,9378	101	0,9186	132	0,8994	163	0,8801
9	0,9756	40	0,9564	71	0,9372	102	0,9180	133	0,8987	164	0,8795
10	0,9750	41	0,9558	72	0,9366	103	0,9173	134	0,8981	165	0,8789
11	0,9744	42	0,9552	73	0,9359	104	0,9167	135	0,8975	166	0,8783
12	0,9738	43	0,9545	74	0,9353	105	0,9161	136	0,8969	167	0,8777
13	0,9731	44	0,9539	75	0,9347	106	0,9155	137	0,8963	168	0,8770
14	0,9725	45	0,9533	76	0,9341	107	0,9149	138	0,8956	169	0,8764
15	0,9719	46	0,9527	77	0,9335	108	0,9142	139	0,8950	170	0,8758
16	0,9713	47	0,9521	78	0,9328	109	0,9136	140	0,8944	171	0,8752
17	0,9707	48	0,9514	79	0,9322	110	0,9130	141	0,8938	172	0,8746
18	0,9700	49	0,9508	80	0,9316	111	0,9124	142	0,8932	173	0,8739
19	0,9694	50	0,9502	81	0,9310	112	0,9118	143	0,8925	174	0,8733
20	0,9688	51	0,9496	82	0,9304	113	0,9111	144	0,8919	175	0,8727
21	0,9682	52	0,9490	83	0,9297	114	0,9105	145	0,8913	176	0,8721
22	0,9676	53	0,9483	84	0,9291	115	0,9099	146	0,8907	177	0,8715
23	0,9669	54	0,9477	85	0,9285	116	0,9093	147	0,8901	178	0,8708
24	0,9663	55	0,9471	86	0,9279	117	0,9087	148	0,8894	179	0,8702
25	0,9657	56	0,9465	87	0,9273	118	0,9080	149	0,8888	180	0,8696
26	0,9651	57	0,9459	88	0,9266	119	0,9074	150	0,8882	181	0,8690
27	0,9645	58	0,9452	89	0,9260	120	0,9068	151	0,8876	182	0,8684
28	0,9638	59	0,9446	90	0,9254	121	0,9062	152	0,8870	183	0,8677
29	0,9632	60	0,9440	91	0,9248	122	0,9056	153	0,8863		
30	0,9626	61	0,9434	92	0,9242	123	0,9049	154	0,8857		

Fonte: Catálogo Shell (2008).

## ANEXO C

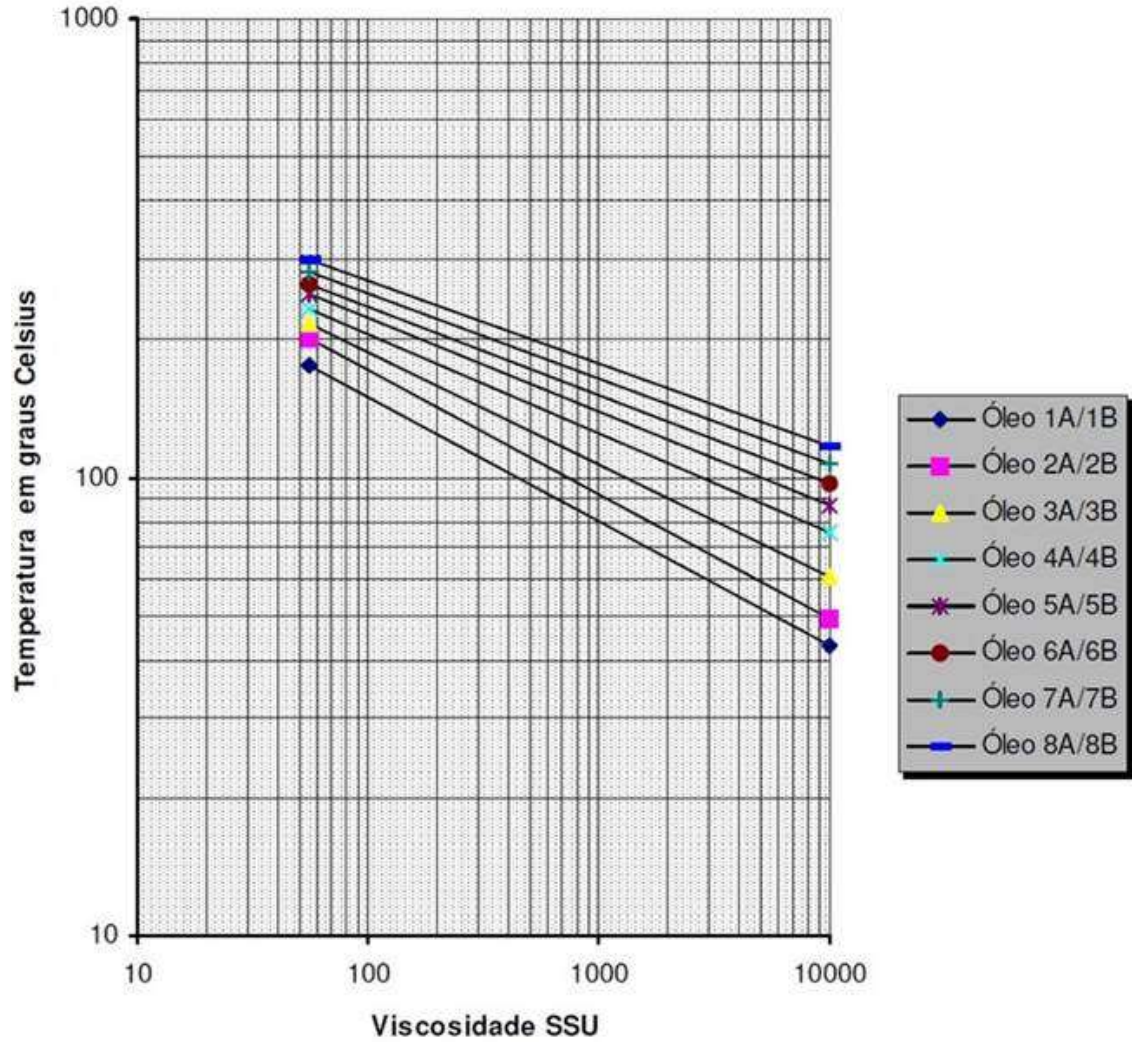
Tabela C1 - Princípios de funcionamento de Detectores de gases.

PRINCÍPIO DE DETECÇÃO	GASES ANALISADOS
Infravermelho	CO <sub>2</sub> , CO , CH <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NO
Paramagnético	O <sub>2</sub>
Zircônio	O <sub>2</sub>
Quiluminescência	NO / NO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> / H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Eletroquímico	O <sub>2</sub> , CO, SO <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> C <sub>x</sub> H <sub>x</sub>

Fonte: Revista Mecatrônica Industrial (2013).

## ANEXO D

Figura D1 - Viscosidade em função da temperatura para os óleos combustíveis.



Fonte: Manual da caldeira MP-810 (1995).

## ANEXO E

Tabela E1 - Propriedades termodinâmicas da água.

Water Properties

	Temp	Pressure	Specific Volume	Internal Energy	Specific Enthalpy	Specific Entropy	Quality	Phase
	C	MPa	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg/K		
1.	80	1	0.001029	334.6	335.6	1.075		Compressed Liquid
2.	175	1	0.001121	740.1	741.2	2.091		Compressed Liquid
3.	175	8	0.001115	736	744.9	2.082		Compressed Liquid
	C	MPa	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg/K		
4.	293.3	7.8	0.001378	1296	1307	3.19	0	Saturated Liquid
5.	293.3	7.8	0.02421	2572	2761	5.757	1	Saturated Vapor

Fonte: The Properties of Gases and Liquids (2001).

**ANEXO F****Tabela F1 - Propriedades de alguns combustíveis de caldeiras.**

Tipo de Combustível	Poder Calorífico Inferior
Óleo BPF	9.750 kcal/kg
Gás Natural	9.065 kcal/Nm <sup>3</sup>
Gás de Rua	4.220 kcal/Nm <sup>3</sup>
Lenha	2.700 kcal/kg
Carvão Mineral	4.200 kcal/kg

Fonte: Extraído e resumido da tabela de combustíveis da Aalborg Industries (1995).

## ANEXO G

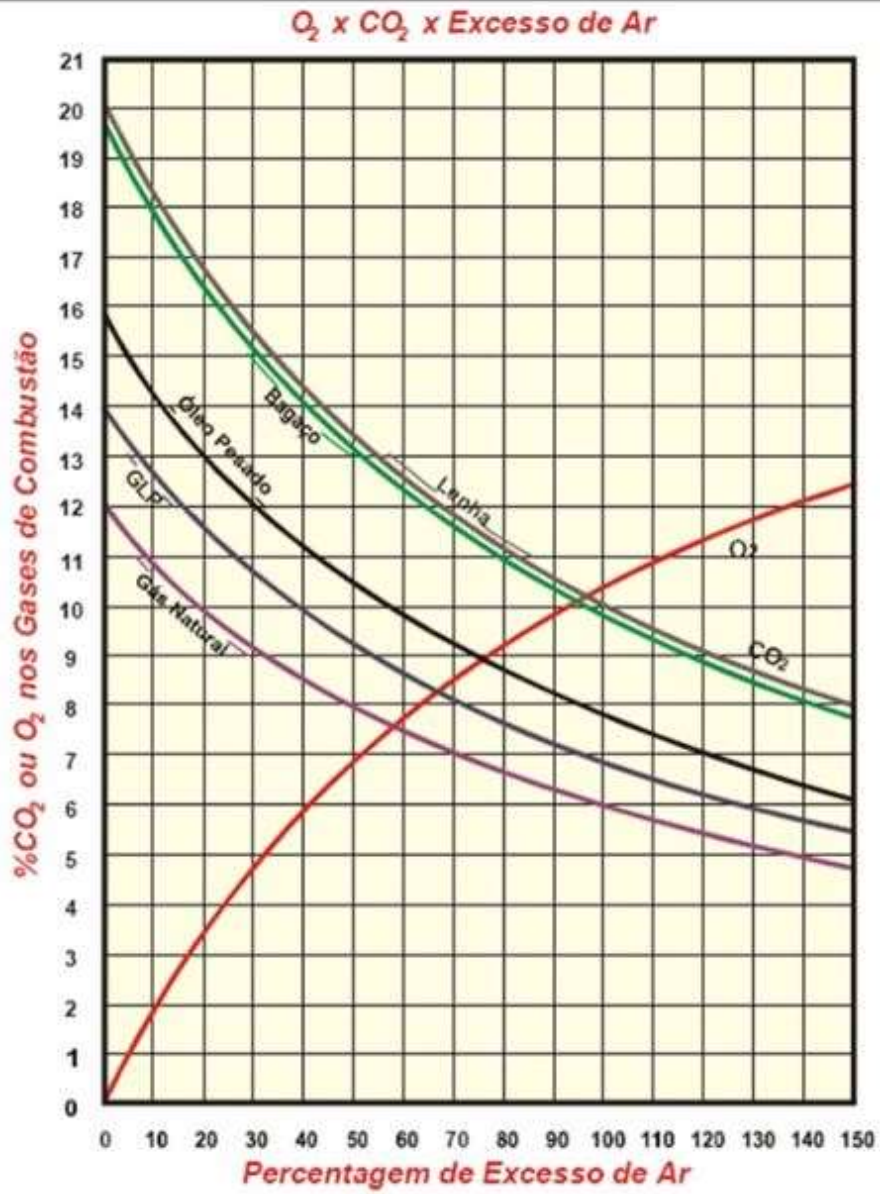
Tabela G1 - PCI de alguns combustíveis.

COMBUSTIVEL		COMBUSTIVEL		COMBUSTIVEL	
	PCI		PCI		PCI
Alcool de cana	5.500 kcal/l	Coque de lenha	7.600 kcal/kg	Óleo de algodão	8.050 kcal/l
Aparas vinilo	6.300 kcal/kg	Coque metalúrgico	7.200 kcal/kg	Óleo de amendoim	8.000 kcal/l
Bagaco de cana (20% ÁGUA)	3.200 kcal/kg	Fibras de palmeira (48% de água)	2.000 kcal/kg	Óleo de babaçú	7.770 kcal/l
Bagaco de cana (50% ÁGUA)	1.800 kcal/kg	Fibras de palmito	3.800 kcal/kg	Óleo de soja	8.125 kcal/l
Bambú (10% água)	3.700 kcal/kg	Filme polietileno	5.600 kcal/kg	Óleo diesel	8.620 kcal/l
Borra de café	1.570 kcal/kg	Gás de água	4.000 kcal/Nm³	Palha de amendoim (12% água)	3.100 kcal/kg
Carvão de babaçú	7.000 kcal/kg	Gás de água carburetado	6.000 kcal/Nm³	Palha de trigo (20% ÁGUA)	3.200 kcal/kg
Carvão mineral - Cambuí/PR	6.200 kcal/kg	Gás de alto forno	700 kcal/Nm³	Papel	4.200 kcal/kg
Carvão mineral - Charqueadas/ RS	3.100 kcal/kg	Gás de biodigestor (biogás)	5.000 kcal/Nm³	Piche alicatão	8.600 kcal/kg
Carvão mineral - Mina do leão/ RS	4.200 kcal/kg	Gás de coqueira	4.300 kcal/Nm³	Pó de linho	4.000 kcal/kg
Carvão mineral - Tubarão/ SC	4.500 kcal/kg	Gás de gasogênio	1.260 kcal/Nm³	Pó de madeira fino (seco)	4.000 kcal/kg
Carvão vegetal	7.500 kcal/kg	Gás de nafta	4.220 kcal/Nm³	Pó de madeira grosso (seco)	4.200 kcal/kg
Casca de árvore	2.200 kcal/kg	Gás GLP (50%)	11.025 kcal/kg	Pó de tabaco	2.300 kcal/kg
Casca de algodão	3.000 kcal/kg	Gás natural	9.065 kcal/Nm³	Querosene	8.300 kcal/l
Casca de amêndoa dende	4.800 kcal/kg	Lascas de madeira	3.300 kcal/kg	Recortes de couro (14% ÁGUA)	4.400 kcal/kg
Casca de arroz (12% água)	3.300 kcal/kg	Lenha (40% água)	2.400 kcal/kg	Resíduos de juta	3.800 kcal/kg
Casca de babaçu	4.000 kcal/kg	Lenha (seca) (12% água)	3.680 kcal/kg	Restos de borracha	4.000 kcal/kg
Casca de cacau (8% água)	3.900 kcal/kg	Madeira de caixotes	3.800 kcal/kg	Sementes de girassol (9,5% água)	4.300 kcal/kg
Casca de café	3.800 kcal/kg	Madeira muito seca	4.800 kcal/kg	Serragem de pinho (40% água)	2.000 kcal/kg
Casca de cajú	4.700 kcal/kg	Madeira pinho (seca ao ar)	3.500 kcal/kg	Serragem seca (20% água)	3.500 kcal/kg
Casca de côco	4.000 kcal/kg	Madeira verde	2.500 kcal/kg	Serragem + Cepilho (seco)	4.600 kcal/kg
Casca de eucalipto	3.750 kcal/kg	Óleo combustível 1A	9.750 kcal/kg	Sisal (11% água)	3.400 kcal/kg
Casca de tanino úmido (68% água)	800 kcal/kg	Óleo combustível 1B	9.940 kcal/kg	Sobra de serraria (pinho)	4.160 kcal/kg
Casca de soja	3.300 kcal/kg	Óleo combustível 2A	9.550 kcal/kg	Tecido nailon	7.300 kcal/kg
Cavaco (eucalipto)	4.300 kcal/kg	Óleo combustível 2B	9.920 kcal/kg	Trapos de pano	4.200 kcal/kg
Cavacos de pinho	2.500 kcal/kg	Óleo combustível 3A	9.500 kcal/kg	Turfa (seca ao ar) (25 à 6% água)	3000 - 5000 kcal/kg
Coque de gás	5.400 kcal/kg	Óleo combustível 3B	9.870 kcal/kg		

Fonte: Aalborg Industries (1995).



## ANEXO H

Figura H1 - Gráfico de CO<sub>2</sub> em função do E.A. (excesso de ar).

Fonte: Manual do Instrumento GA-12 Madur.

## ANEXO I

Tabela I1 - Propriedades termodinâmicas da água.

## VAPOR SATURADO SECO

Steam Table

PRESSÃO MANOMÉTRICA		TEMPERATURA	VOLUME ESPECÍFICO	PESO ESPECÍFICO	CALOR SENSÍVEL	CALOR LATENTE	CALOR TOTAL
psig	kgf/cm <sup>2</sup>	°C	m <sup>3</sup> /kg	kg/m <sup>3</sup>	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg
0	0	100	1,6731	0,5977	100,1	539,1	639,2
5	0,35	106	1,2721	0,7861	108,6	533,7	642,2
10	0,70	115	1,0294	0,9714	115,5	529,2	644,7
15	1,05	121	0,8662	1,1544	121,3	525,3	646,7
20	1,41	126	0,7487	1,3356	126,4	521,9	648,3
25	1,76	130	0,6600	1,5152	130,9	518,9	649,8
30	2,11	134	0,5905	1,6935	135,0	516,0	651,1
35	2,46	138	0,5346	1,8707	138,6	513,4	652,2
40	2,81	142	0,4885	2,0469	142,3	511,0	653,3
45	3,16	145	0,4500	2,2223	145,5	508,7	654,2
50	3,52	148	0,4172	2,3970	148,5	506,5	655,0
55	3,87	150	0,3890	2,5710	151,4	504,5	655,8
60	4,22	153	0,3644	2,7444	154,0	502,5	656,6
65	4,57	155	0,3428	2,9173	156,6	500,6	657,2
70	4,92	158	0,3237	3,0897	159,0	498,8	657,9
75	5,27	160	0,3066	3,2617	161,4	497,1	658,5
80	5,62	162	0,2913	3,4334	163,6	495,4	659,0
85	5,98	164	0,2774	3,6047	165,7	493,8	659,5
90	6,33	166	0,2649	3,7756	167,8	492,2	660,0
95	6,68	168	0,2534	3,9463	169,8	490,7	660,5
100	7,03	170	0,2429	4,1168	171,7	489,2	660,9
110	7,73	173	0,2244	4,4570	175,3	486,3	661,7
120	8,44	177	0,2085	4,7964	178,8	483,6	662,4
130	9,14	180	0,1947	5,1353	182,0	481,0	663,1
140	9,84	183	0,1827	5,4737	185,1	478,5	663,7
150	10,5	185	0,1721	5,8117	188,1	476,1	664,2
160	11,2	188	0,1626	6,1494	190,9	473,8	664,7
170	12,0	191	0,1542	6,4869	193,6	471,6	665,1
180	12,7	193	0,1465	6,8244	196,2	469,4	665,5
190	13,4	195	0,1396	7,1617	198,7	467,3	665,9
200	14,1	198	0,1334	7,4990	201,1	465,2	666,3
250	17,6	208	0,1088	9,1675	212,0	455,6	667,6
300	21,1	217	0,0919	10,882	221,6	446,9	668,5
350	24,6	224	0,0794	12,587	230,1	438,9	669,0
400	28,1	231	0,0699	14,304	237,9	431,4	669,3
450	31,6	238	0,0624	16,036	245,0	424,3	669,3
500	35,2	243	0,0562	17,784	251,6	417,6	669,2

Fonte: Aalborg Industries (1995).