

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

ALAN DOUGLAS HORNUNG

**UTILIZAÇÃO DO MÉTODO PDCA PARA DESENVOLVIMENTO DE
UM PLANO DE AÇÃO VISANDO A REDUÇÃO DO CONSUMO DE
COMBUSTÍVEL DE UMA CALDEIRA A CAVACO.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA - PR

2018

ALAN DOUGLAS HORNING

**UTILIZAÇÃO DO MÉTODO PDCA PARA DESENVOLVIMENTO DE
UM PLANO DE AÇÃO VISANDO A REDUÇÃO DO CONSUMO DE
COMBUSTÍVEL DE UMA CALDEIRA A CAVACO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de engenharia mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne.

PONTA GROSSA

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

**UTILIZAÇÃO DO MÉTODO PDCA PARA DESENVOLVIMENTO DE UM PLANO DE
AÇÃO VISANDO A REDUÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DE UMA
CALDEIRA A CAVACO**

por

ALAN DOUGLAS HORNUNG

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 7 de dezembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr.Jhon Jairo Ramirez Behainne
Orientador

Profa. Dra.Fernanda Tavares Treinta
Membro Titular

Profa. Dra.Maria Regina Parise
Membro Titular

Prof.Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho**
Coordenador do Curso

AGRADECIMENTOS

É certo que apenas palavras não são suficientes para agradecer todas as pessoas que fazem parte da minha vida e de alguma forma foram importantes para essa fase que estou concluindo.

Peço desculpas às pessoas que não estão presentes entre essas palavras, mas podem ter certeza que fazem parte dos meus pensamentos e tem minha eterna gratidão.

Agradeço aos meus pais, minha família e amigos que em todos os momentos me deram suporte e me incentivaram sempre a seguir a diante.

Agradeço a todos os professores e ao meu orientador Prof. Dr. Jhon Jairo Ramírez Behainne, pela sabedoria e ensinamentos com que me guiaram nesta trajetória.

RESUMO

HORNUNG, Alan Douglas. **Utilização do método PDCA para desenvolvimento de um plano de ação visando a redução do consumo de combustível de uma caldeira a cavaco.** 2018. 70 p. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica- Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

Este projeto teve como finalidade rodar a fase *Plan* do ciclo PDCA, a fim de desenvolver um plano de ação visando reduzir a demanda de combustível em uma caldeira mista alimentada com cavaco de madeira. Para isso foi avaliado a eficiência térmica da caldeira utilizando os métodos direto e indireto, utilizando os parâmetros operacionais levantados da caldeira em estudo, visando melhorar o seu rendimento, reduzindo as perdas térmicas e conseqüentemente economizando combustível. O gerador de vapor, que opera a uma pressão média de 12 bar e com vazão mássica média de vapor de 13.000 kg por hora, fica localizado na cidade de Paranaguá –PR. Os resultados obtidos mostram que a eficiência da caldeira é considerada boa, cerca de 77% pelo método indireto e 82% pelo método direto. O estudo mostra que o aumento do consumo de combustível é devido a alta umidade do cavaco de madeira utilizado no gerador de vapor. Como resultado obteve-se um plano de ação com 20 ações que auxiliaram na melhoria da eficiência da caldeira e na redução de consumo de combustível.

Palavras-chave: Caldeira. Eficiência térmica. Método PDCA. Cavaco de madeira. Combustíveis.

ABSTRACT

HORNUNG, Alan Douglas. **Use of the PDCA method to develop an action plan aiming at reducing the fuel consumption of a cavity boiler.** 2018. 70 p. Bachelor's Degree in Mechanical Engineering - Federal University of Technology - Paraná. Ponta Grossa, 2018.

The purpose of this project was to run the Plan phase of the PDCA, cycle in order to develop an action plan to reduce fuel demand in a mixed wood-fired boiler. For this, the thermal efficiency of the boiler was evaluated using the direct and indirect methods, using the operational parameters raised from the boiler under study, in order to improve its efficiency, reducing thermal losses and consequently saving fuel. The steam generator, which operates at an average pressure of 12 bar and with a mean mass flow rate of 13,000 kg per hour, is located in the city of Paranaguá -PR. The results show that the efficiency of the boiler is considered good, about 77% by the indirect method and 82% by the direct method. The study shows that the increase in fuel consumption is due to the high humidity of the wood chip used in the steam generator. As a result, a 20-action action plan was developed to help improve boiler efficiency and reduce fuel consumption.

Keywords: Boiler. Thermal efficiency. PDCA method. Wood chips. Fuels.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Caldeira de Newcomen.....	16
Figura 2 - Caldeira Flamotubular em corte.....	19
Figura 3 - Caldeira Vertical.....	20
Figura 4 - Caldeira aquatubular.....	21
Figura 5 - Perdas de calor Vs. excesso de ar.....	27
Figura 6 - Perdas de energia no sistema.....	31
Figura 7 – Ciclo PDCA.....	36
Figura 8- Fluxograma etapas PDCA e ferramentas utilizadas.....	43
Figura 9 - Fluxograma do sistema de geração de vapor.....	44
Figura 10 - Tempo de secagem do cavaco.....	46
Figura 11 - Vista lateral Caldeira.....	49
Figura 12 - Vistas Caldeira.....	49
Figura 13– Volume de controle para o balanço de massa e de energia.....	51
Gráfico 1 - Média de umidade do ano 2017.....	45
Gráfico 2- Umidade média meses 2018.....	46
Gráfico 3 - Temperatura média de água Junho 2018.....	47
Gráfico 4 - Temperatura média de ar - Junho 2018.....	48
Gráfico 5 – Consumo diário de combustível x umidade.....	60
Gráfico 6 - Consumo diário x Eficiência do gerador de vapor.....	60
Gráfico 7 - Consumo diário x temperatura de entrada da água.....	61
Gráfico 8 – Gráfico de Pareto - redução de consumo.....	62
Quadro 1 - Classificação dos combustíveis.....	28
Quadro 2 - Matriz de criticidade.....	41
Quadro 3 – Critérios matriz priorização.....	56
Quadro 4 – Brainstorm - identificação e priorização de causas.....	63
Quadro 5 – Matriz Teste / justificativa.....	63
Quadro 6 – Teste dos porquês.....	64
Quadro 7 – Matriz de priorização.....	65
Quadro 8 – Plano de ação, continua.....	66
Quadro 8 – Plano de ação.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise elementar de biomassas.....	28
Tabela 2 - Análise Imediata de biomassas.....	29
Tabela 3- Poder calorífico inferior em função da umidade do cavaco.....	45
Tabela 4 -Poder calorífico pela umidade do cavaco (%massa base seca)	47
Tabela 5 – Média de consumo de combustível, taxa de consumo.....	47
Tabela 6 - Vazão das descargas de fundo da caldeira.	50
Tabela 7 – Resultados de eficiência obtidos pelo método direto.....	52
Tabela 8 - Energia fornecida ao sistema de geração de vapor	52
Tabela 9 - Perdas de calor pelos gases de combustão.....	54
Tabela 10 - Perda de calor pelas cinzas	54
Tabela 11 - Perda de calor por combustão parcial.....	55
Tabela 12 - Perda de calor pelas purgas.	55
Tabela 13 – Eficiência pelo método direto.	57
Tabela 14 – Energia Fornecida ao sistema.....	58
Tabela 15 - Totalização das perdas de calor.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

\dot{q}_{gs}	Calor perdido com a umidade dos gases, (kJ/kg de cb)
\dot{q}_{gs}	Calor perdido com a umidade dos gases, (kW)
\dot{q}_{gs}	Calor perdido por combustão parcial, (kJ/kg de cb)
\dot{q}_{gs}	Calor perdido por combustão parcial, (kW)
\dot{q}_{gs}	Calor sensível perdido com as cinzas, (kJ/kg de cb)
\dot{q}_{gs}	Calor sensível perdido com as cinzas, (kW)
\dot{q}_{gs}	Calor sensível perdido com as purgas, (kJ/kg de cb)
\dot{q}_{gs}	Calor sensível perdido com as purgas, (kW)
e	Coeficiente de excesso de ar
K	Coeficiente de perda de carga
L	Comprimento equivalente do duto, (m)
d_h	Diâmetro hidráulico, (m)
η_d	Eficiência pelo método direto, (%)
η_i	Eficiência pelo método indireto, (%)
\dot{q}_{gs}	Energia fornecida pelo combustível por unidade de combustível, (kW)
E_1	Energia Total que entra no sistema, (kW)
Q_u	Energia útil produzida, (kW)
h_a	Entalpia da água de alimentação, (kJ/kg)
Δh_{co}	Entalpia da água de entrada, [kJ/kg]
Δh_{co}	Entalpia do CO, (kJ/kg)
Δh_{N_2}	Entalpia do nitrogênio, (kJ/kg)
Δh_{SO}	Entalpia do monóxido de enxofre, (kJ/kg)
Δh_{ar}	Entalpia do ar, (kJ/kg)
Δh_c	Entalpia do carbono, (kJ/kg)
h_{ls}	Entalpia do líquido saturado, (kJ/kg)
h_{vp}	Entalpia do vapor na pressão atmosférica, (kJ/kg)
Δh_{co}	Entalpia do vapor produzido, [kJ/kg]
S	Enxofre
f	Fator de atrito
H	Hidrogênio
ρ_g	Massa específica do gás, (kg/m ³)
\tilde{m}_{ar}	Massa estequiométrica de ar, (kg/kg de cb)

N	Nitrogênio
O	Oxigênio
Δp	Perda de carga, (Pa)
PCi	Poder calorífico inferior do combustível, [kJ/kg]
PCs	Poder calorífico superior do combustível, [kJ/kg]
%CO	Porcentagem de monóxido de carbono em volume
C_{nq}	Relação carbono não queimado/combustível, (kg/kg de cb)
V_n	Relação vapor de nebulização/combustível, (kg/kg de cb)
V_{sf}	Relação vapor de fuligem/combustível, (kg/kg de cb)
η	Rendimento térmico (%)
$\sum P$	Somatório das perdas
$\sum m_e$	Somatório de massas que entram no sistema
$\sum m_s$	Somatório de massas que saem do sistema
T	Temperatura dos gases, (K)
T_0	Temperatura de referência, (K)
c	Teor de carbono (kg/kg de cb)
cz	Teor de cinzas do combustível (kg/kg de cb)
s	Teor de enxofre (kg/kg de cb)
h	Teor de hidrogênio do combustível (kg/ kg de cb)
n	Teor de nitrogênio (kg/kg de cb)
w	Teor de umidade do ar
\dot{m}_{cb}	Vazão mássica de combustível, [kg/s]
\dot{m}_v	Vazão mássica de vapor, [kg/s]
v	Velocidade, (m/s)
G	Velocidade mássica, (kg/m ² s)
V_{gs}	Volume de gases na base seca, (m ³ /kg de cb)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 PROBLEMA	14
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.3 JUSTIFICATIVA.....	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 GERADORES DE VAPOR.....	17
2.1.1 Caldeiras flamotubulares	18
2.1.2 Caldeiras aquatubulares	20
2.1.3 Caldeiras Mistas	21
2.2 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UMA CALDEIRA	22
2.2.1 Câmara de combustão.....	22
2.2.2 Evaporador	22
2.2.3 Cinzeiro.....	23
2.2.4 Pré-aquecedor de ar	23
2.2.5 Economizador	23
2.2.6 Superaquecedor	24
2.2.7 Componentes para Distribuição do Vapor	24
2.2.8 Sistema de exaustão	24
2.3 COMBUSTÍVEIS E COMBUSTÃO.....	25
2.3.1 Reações de Combustão	25
2.3.2 Excesso de ar	26
2.3.3 Biomassa	27
2.3.3.1 Análise elementar e imediata	28
2.4 EFICIÊNCIA TÉRMICA DA CALDEIRA.....	29
2.4.1 Método direto	29
2.4.2 Método indireto	30
2.4.2.1 Energia que entra no Sistema.....	30
2.4.2.2 Perdas pelos gases de exaustão na chaminé.....	31
2.4.2.3 Perdas de calor pelas cinzas	32
2.4.2.4 Perda de calor por combustão parcial.....	33
2.4.2.5 Perda de calor pelas purgas	33
2.4.2.6 Perdas de calor por radiação e convecção	33
2.5 USO EFICIENTE DO VAPOR.....	34
2.6 CONCEITO HISTÓRICO DE QUALIDADE.....	34
2.7 MÉTODO PDCA	35
2.7.1 <i>Plan</i>	36
2.7.2 <i>Do</i>	38
2.7.3 <i>Check</i>	38

2.7.4 Act.....	39
2.7.5 Ferramentas de qualidade	39
3 METODOLOGIA.....	41
3.1 PLAN.....	44
3.1.1 Conhecimento do processo	44
3.1.1.1 Alimentação	45
3.1.2 Gerador de vapor.....	48
3.1.2.1 Distribuição do vapor	50
3.1.2.2 Consumo Final.....	50
3.1.2.3 Retorno de Condensado	50
3.1.3 Identificação dos problemas e metas.....	51
3.1.3.1 Identificação do volume de controle da caldeira	51
3.1.3.2 Eficiência térmica da caldeira.....	52
<i>Método direto</i>	52
<i>Método indireto</i>	52
3.1.4 Observar e priorizar problemas.....	55
3.1.5 Observar e priorizar causas.....	55
3.1.6 Identificar e priorizar soluções	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1 CONHECIMENTO DO PROCESSO.....	57
4.2 IDENTIFICAÇÃO DOS PROBLEMAS E METAS.....	57
4.3 OBSERVAR E PRIORIZAR PROBLEMAS.....	59
4.3.1 Observar e priorizar causas.....	62
4.3.2 Identificar e priorizar soluções	65
4.3.3 Elaborar plano de ação.....	66
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	68
REFERÊNCIAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

Muitos processos industriais utilizam o vapor como transportador de energia térmica ou como fluido para o acionamento mecânico de máquinas. Segundo Nogueira (2005), o vapor possui a vantagem de ser uma substância em abundância na natureza com custo de produção relativamente baixo. De acordo com Bazzo (1995), o vapor de água também possui propriedades termodinâmicas especiais, que lhe conferem alta densidade energética e boas taxas de transferência de energia.

A eficiência energética de um sistema, no qual inclui-se a dos geradores de vapor, indica o quanto a operação do equipamento real aproxima-se do comportamento ideal, no qual não existem perdas (Rocha, 2005). Assim, na busca pela redução de custos, tanto no consumo de combustíveis quanto no consumo de vapor durante os processos, deve-se conhecer os aspectos que influenciam na carga térmica disponível, a eficiência das caldeiras e as condições dos pontos consumidores de vapor, buscando reduzir o desperdício de energia.

Segundo Falconi (2009), os problemas operacionais de uma empresa são advindos da rotina, isto é, das operações do dia-a-dia, que precisam ser diagnosticados, identificando os pontos críticos e as ações que podem ser realizadas para obter uma solução. Na sequência, deve-se aplicar um método ou padrão de procedimentos para garantir que os resultados sejam alcançados. Muitas ferramentas de qualidade são utilizadas para solução destes problemas, para o alcance de metas e a manutenção ou melhorias continua dos processos. O ciclo PDCA é uma dessas ferramentas e, portanto, utilizado como base desse projeto.

Neste projeto é desenvolvido a fase “Plan” a fim de se obter um plano de ação que contribua para a redução do consumo de combustível. Este projeto é dividido em cinco capítulos, neles serão abordadas as etapas para o desenvolvimento da fase “Plan” do ciclo PDCA. As fases “DO”, “CHECK” e “ACT”, não serão abordadas nesse trabalho. Além da “Introdução”, abordam-se o “Referencial teórico”, a “Metodologia”, a “Discussão e Resultados” e as “Conclusões”. No “Referencial teórico”, é realizada uma revisão da literatura com os principais tópicos e conceitos técnicos que embasam o estudo, as definições referentes aos geradores de vapor e ao ciclo PDCA de melhoria continua.

Na seção “Metodologia” apresentam-se os procedimentos para o desenvolvimento do projeto, detalhando cada etapa da fase “PLAN” da metodologia

PDCA. Nessa seção são apresentados os dados experimentais levantados para realizar os cálculos para a determinação do rendimento da caldeira, tanto pelo método direto quanto pelo método indireto.

Na seção “Discussão e resultados” é realizada uma análise dos resultados obtidos em termos da identificação dos principais problemas encontrados no sistema e as ações que trariam um aumento no rendimento.

Por fim seção “Conclusões” inclui-se a síntese dos resultados alcançados no projeto, envolvendo também sugestões para a realização dos trabalhos futuros.

1.1 PROBLEMA

Consumo excessivo de combustível na operação de uma caldeira que opera com biomassa (cavaco) em uma empresa do setor alimentício.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é aplicar o método PDCA para desenvolver um plano de ação que vise reduzir o consumo de combustível de uma caldeira industrial que opera com biomassa (cavaco).

Constituem objetivos específicos deste estudo:

- Realizar o levantamento das informações experimentais para a avaliação do rendimento térmico da caldeira em estudo;
- Aplicar os métodos direto e indireto para o cálculo da eficiência térmica, a fim de realizar a comparação os resultados obtidos;
- Avaliar a situação das variáveis operacionais do sistema em estudo para realização de melhorias utilizando a metodologia PDCA.

1.3 JUSTIFICATIVA

Empresas competitivas procuram sempre reduzir seus custos operacionais e aumentar a eficiência dos seus processos. Em particular, o custo associado ao gasto de combustível em geradores de vapor é, na maioria das vezes, representativo no valor associado ao produto final em empresas do setor de manufatura. Portanto,

avaliações e correções na eficiência operacional de caldeiras contribui, de maneira significativa, para o logro desse objetivo.

Esta proposta envolve o estudo da eficiência de um gerador de vapor, a aplicação de um combustível renovável, como é o cavaco de madeira, e a utilização de ferramentas de melhoria contínua, o ciclo PDCA, para identificação dos problemas e metas, priorização dos problemas, priorização das causas, identificação e priorização das soluções, e ainda o desenvolvimento de um plano de ação que vise a realização de melhorias nos processos e sistemas sob avaliação.

O assunto tratado nesse trabalho engloba várias áreas de conhecimento da engenharia mecânica, como por exemplo as áreas térmicas e de fenômenos de transporte, vai englobar também áreas de produção, utilizando ferramentas de gestão da qualidade e de melhoria contínua.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Conforme Bizzo (2009), o vapor gerado em caldeiras começou a ser utilizado intensamente no início do desenvolvimento industrial, contribuindo para o impulso da economia mundial. Bazzo (1995), acrescenta que uma das vantagens da utilização do vapor radica na facilidade de distribuir energia térmica de um local a outro, fornecendo calor a processos produtivos com eficiência.

A água é um dos compostos mais abundantes da terra e isso faz com que o seu custo seja relativamente baixo. De acordo com Bizzo (2009), a água possui boa capacidade térmica, permitindo que tenha uma ampla aplicação industrial.

Segundo Altafini (2002), o primeiro registro que se tem da tentativa do homem produzir vapor é do século II a.C., quando Heron de Alexandria recebeu um aparelho que vaporizava água e movimentava uma esfera pelo impulso do vapor. No entanto, conforme Bizzo (2009), as primeiras aplicações práticas de geradores de vapor, se deram por volta de 1698, quando Thomas Savery patenteou um sistema de bombeamento utilizando vapor como força motriz. Posteriormente, Newcomen desenvolveu um gerador de vapor com geometria esférica, aquecido diretamente no fundo do recipiente, conforme Figura (1). Esta configuração era de operação instável, com alto riscos de explosões.

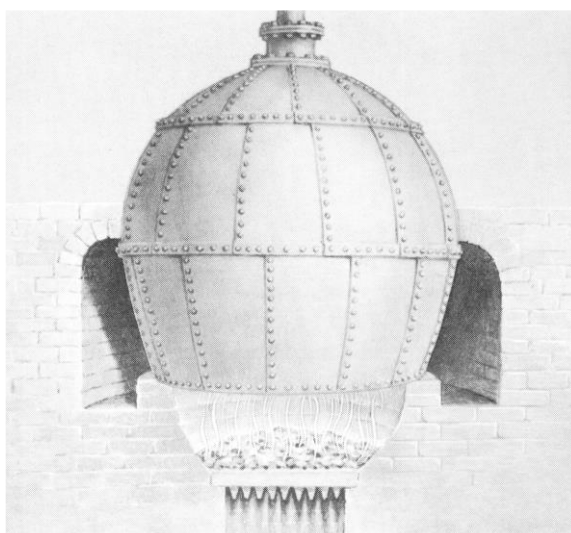


Figura 1 - Caldeira de Newcomen
Fonte: Bizzo, 2009.

Durante o período da revolução industrial, os maiores avanços nos geradores de vapor foram atribuídos a James Watt, Denis Papin e Wilcox (Altafini, 2002). No fim

do século XVIII e início do século XIX, conforme Bizzo (2009), John Stevens construiu a primeira caldeira aquatubular. Ele utilizou essa caldeira para movimentar um pequeno barco a vapor no Rio Hudson, em Nova Iorque. Depois das modificações de Wilcox e Babcock, inclinando os tubos, essas caldeiras tiveram um grande sucesso comercial. Segundo Altafini (2002) e Bizzo (2009), a aplicação na propulsão marítima e nas indústrias alavancou o desenvolvimento de equipamentos mais compactos e eficientes na produção de vapor.

2.1 GERADORES DE VAPOR

Segundo Andrade (2011), geradores de vapor podem ser considerados trocadores de calor com mudança de fase que, aproveitando uma fonte de energia térmica, produzem vapor de água sob pressões superiores à atmosférica. Uma outra definição estabelece que caldeiras a vapor são equipamentos que produzem e acumulam vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os aquecedores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo (NR-13, p.3, 2012).

Conforme Altafini (2002), uma vez que empresas e setores industriais têm suas particularidades e necessidades específicas no fornecimento de calor, os geradores de vapor não são produzidos em linha de produção. No entanto, conforme Andrade (2011), todos os geradores de vapor, são constituídos por vários dispositivos integrados, permitindo a obtenção do maior rendimento térmico possível.

Nos geradores de vapor ou caldeiras, a energia térmica é principalmente produzida mediante a queima controlada de combustíveis, podendo ser utilizado também resistências elétricas e fontes não convencionais, como a fissão nuclear e a energia solar, entre outras (Altafini, 2002).

Segundo Bizzo (2009), o vapor obtido tem uso em várias aplicações industriais, dentre as quais se destacam a geração de energia elétrica, a movimentação de equipamentos, o aquecimento direto e indireto de processos, a limpeza e esterilização de materiais em hospitais e restaurantes.

Para Nogueira (2005), as caldeiras podem ser classificadas conforme a disposição da água e dos gases de combustão, sendo as principais configurações, a

flamotubular, a aquatubular e a mista. Segundo Militão (2008) as dimensões, comprimento e diâmetro das caldeiras, estão diretamente relacionadas com os dados de trabalho, pressão e vazão do vapor produzido. Segundo Nogueira (2005), o rendimento térmico ou eficiência térmica total que pode ser obtida nas caldeiras aquatubulares são superiores aos alcançados nas caldeiras flamotubulares, sendo em torno de 80 a 85% para as aquatubulares e 75 a 78% para as flamotubulares.

2.1.1 Caldeiras flamotubulares

Também conhecidas como pirotubulares ou fogotubulares, as caldeiras flamotubulares são aquelas nas quais os gases da combustão atravessam a caldeira no interior de tubos que se encontram rodeados por água, cedendo calor à mesma. (MARTINELLI, 2003). Os gases quentes de combustão podem circular por dentro dos tubos em um ou mais passes em direção da chaminé (Bizzo, 2003).

Conforme Bizzo (2009), as caldeiras flamotubulares são uma das mais utilizadas na indústria onde não se necessitam pressões e vazões elevadas de produção de vapor (de 10 a 20 bar e na ordem de 10 ton/h). Devido a sua forma construtiva, ela se torna vulnerável a explosões, pois as áreas superficiais internas submetidas a pressão são relativamente grandes, inviabilizando a utilização de chapas com espessuras maiores (Bazzo,1995). Existem também caldeiras flamotubulares compactas, conforme Martinelli (2003), as quais são utilizadas em locais que requerem o uso de vapor saturado em vazões reduzidas e baixas pressões.

As caldeiras flamotubulares horizontais constituem-se de um vaso de pressão cilíndrico horizontal, com dois tampos planos (os espelhos) onde estão fixados os tubos e a fornalha (BIZZO, p.14, 2009). A Figura (2) ilustra uma caldeira flamotubular, onde as setas em azul representam o fluxo de vapor e, as setas amarelas, o fluxo dos gases de combustão.

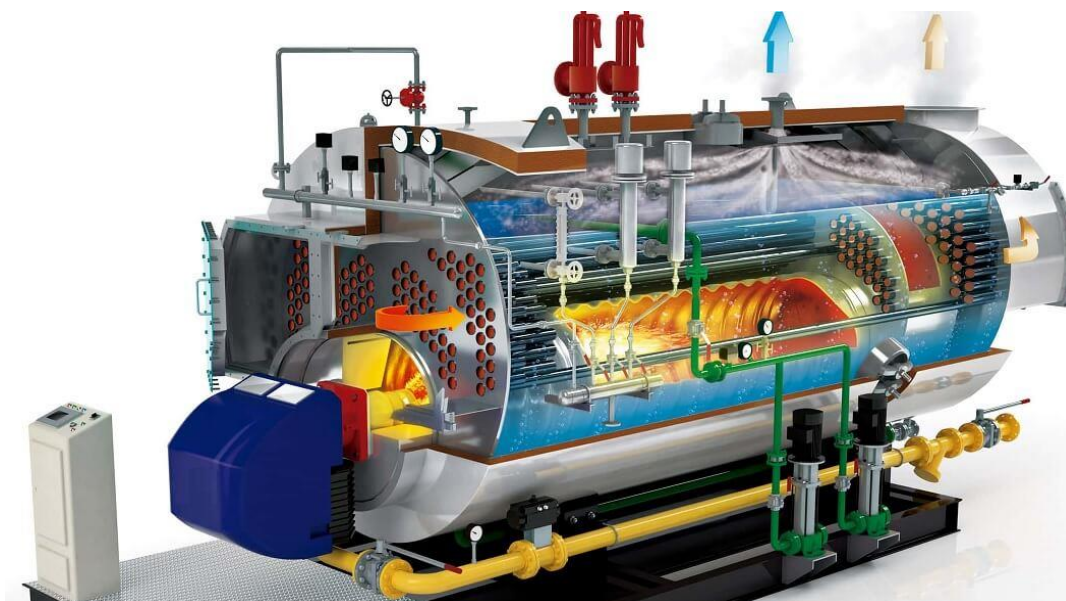


Figura 2 - Caldeira Flamotubular em corte.

Fonte: Enersol, 2018.

Os gases quentes gerados durante a queima do combustível circulam na caldeira no mínimo três vezes, aproveitando o máximo da energia gerada pela combustão. Na fornalha ocorre a primeira troca de calor, os gases de combustão passam pela própria fornalha gerando troca de calor por radiação. A segunda e terceira passagens ocorrem nos tubos, onde a troca de calor acontece por convecção e radiação (Bazzo, 1995).

De acordo com Altafini (2005), as caldeiras do formato flamotubular, devido a possuírem maiores dificuldades para a instalação de superaquecedores, economizadores e pré-aquecedores de ar, tem eficiência inferior quando comparada às das caldeiras aquatubulares.

Como indicado por Altafini (2005), caldeiras flamotubulares verticais são utilizadas quando o espaço de instalação é reduzido e não há necessidade de grandes vazões de vapor. Assim como nas caldeiras flamotubulares horizontais, nas caldeiras de tubos verticais, os tubos são colocados num corpo cilíndrico fechado nas extremidades por placas, chamadas de espelhos (Nogueira, 2005).

Na maioria das caldeiras verticais, a fornalha fica posicionada no corpo cilíndrico logo abaixo do espelho inferior - Figura (3). Os gases de combustão sobem naturalmente através dos tubos, aquecendo e vaporizando a água que está em volta deles.

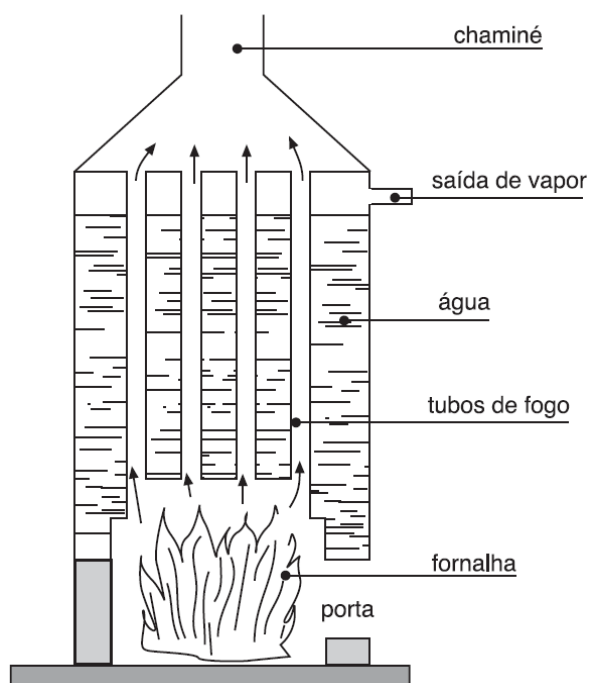


Figura 3 - Caldeira Vertical
Fonte: Nogueira, 2005.

Segundo Nogueira (2005), uma fornalha externa pode ser utilizada na caldeira flamotubular vertical quando o combustível é de baixo poder calorífico, como é o caso das biomassas residuais (por exemplo, bagaço de cana, casca de laranja, casca de arroz, etc.).

2.1.2 Caldeiras aquatubulares

Nas caldeiras aquatubulares a água a ser aquecida passa no interior dos tubos que, por sua vez, são envolvidos externamente pelos gases de combustão. Estas são utilizadas quando se necessita de altas vazões e pressões. Segundo Bizzo (2009), não há limite físico para capacidades, existindo caldeiras que produzem até 750 t/h de vapor, com pressões de até 3450 atm.

As caldeiras aquatubulares, segundo Bazzo (1995), são construídas de forma que a água circule dentro dos tubos de pequeno diâmetro e dispostos na forma de parede d'água ou de feixe tubular. Conforme Bizzo (2009), os tubos de diâmetros menores interligam dois ou mais reservatórios horizontais, chamados de tubulão superior e tubulão inferior, ambos ilustrados na Figura (4).

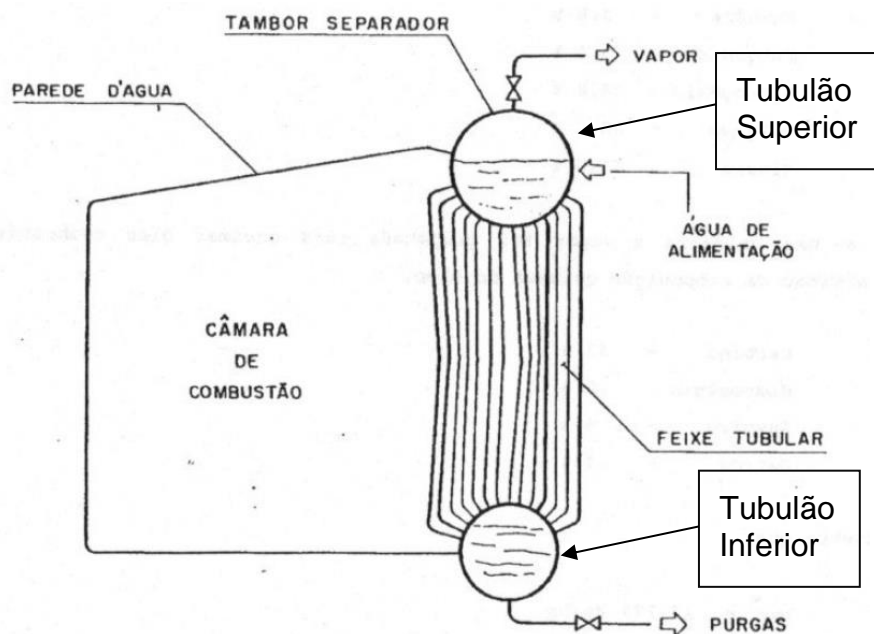


Figura 4 - Caldeira aquatubular
Fonte: Bazzo, 1995.

Segundo Bazzo (1995), no tubo superior, onde se encontra a água de alimentação, tem-se a separação da fase líquida e da fase vapor. Já, no tubo inferior, ocorre a decantação de partículas sólidas e é realizada a purga para eliminá-las.

2.1.3 Caldeiras Mistas

As caldeiras mistas possuem características das caldeiras aquatubulares e flamotubulares no mesmo sistema. Conforme Bizzo (2009), as caldeiras mistas vem da necessidade de utilização de combustíveis sólidos para caldeiras de pequena capacidade. Elas são basicamente caldeiras flamotubulares com uma antecâmara de combustão que tem as suas paredes revestidas por tubos que transportam água.

Segundo Bizzo (2009), as caldeiras mistas não possuem as vantagens das caldeiras aquatubulares, como eficiência e segurança, mas representam uma boa solução para queimar combustíveis sólidos de baixo custo, como toras e cavaco de madeira.

2.2 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UMA CALDEIRA

Os geradores de vapor são constituídos por componentes principais e auxiliares, que se tornam necessários para garantir uma operação segura e com máxima eficiência térmica. A seguir são descritos os componentes mais importantes da caldeira.

2.2.1 Câmara de combustão

É na câmara de combustão, também conhecida como fornalha, que ocorre a queima do combustível, seja sólido líquido ou gasoso. Segundo Bazzo (1995), a fornalha é o componente responsável pela conversão da energia química dos combustíveis em energia térmica. Os projetos de fornalhas variam conforme a forma como acontece a queima do combustível, sendo os principais, as fornalhas de queima em suspensão, queima em grelhas estacionária ou móveis, e queima em leito fluidizado.

Ainda conforme Bazzo (1995), as fornalhas de queima em suspensão são as que possuem mais opções de tipo de combustíveis, tendo a opção de queima de óleo, finos de carvão mineral, gás natural, e qualquer outro combustível de fácil pulverização. Já, as fornalhas de grelha ou as de queima em leito fluidizado, conforme Bazzo (1995), são exclusivas para queima de combustíveis sólidos.

2.2.2 Evaporador

Na indústria existem dois tipos de equipamentos utilizados para vaporização. Conforme Özisik (1990), o vaporizador com caldeira, o qual utiliza o calor fornecido pela queima direta de um combustível, convertendo a energia do combustível em calor latente de vaporização. E o trocador de calor de vaporização, o qual utiliza o calor sensível ou latente de condensação de um fluido como calor latente de vaporização para outro fluido (Pera, 1966).

Nas caldeiras, o evaporador é responsável por utilizar o calor fornecido na câmara de combustão e transformar a água em vapor. Segundo Bazzo (1995), o evaporador pode ter a configuração aquatubular, flamotubular ou mista, dependendo

do fluido que passa dentro dos tubos, e ainda pode ser classificado quanto à disposição dos tubos dentro da caldeira, podendo ser vertical, inclinado ou horizontal.

Os evaporadores, segundo Jackson (1980), podem ter a sua circulação de maneira natural ou forçada, dependendo da queda de pressão dentro das tubulações.

2.2.3 Cinzeiro

Segundo Bizzo (2009), o cinzeiro é um componente obrigatório em caldeiras que usam combustíveis sólidos. Ele é utilizado como local onde se depositam os resíduos da queima, com ou sem fração de combustível não queimado, para serem retirados de tempos em tempos da câmara de combustão.

2.2.4 Pré-aquecedor de ar

Os pré-aquecedores de ar promovem a troca térmica entre os gases de combustão e o ar que vai ingressar na câmara de combustão. Segundo Bizzo (2009), além de aumentar o rendimento térmico da caldeira pelo aproveitamento da entalpia dos gases de combustão, os pré-aquecedores melhoram a queima, favorecendo a estabilidade da chama e a temperatura interna da câmara.

2.2.5 Economizador

De acordo com Bizzo (2009), os economizadores se destinam a aquecer a água de alimentação antes de ser introduzida no interior do gerador de vapor. Assim como nos pré-aquecedores, os economizadores utilizam o calor dos gases quentes proveniente da combustão antes de saírem pela chaminé.

Conforme Bizzo (2009), os economizadores são trocadores de calor do tipo gás-líquido, e devido ao baixo coeficiente convectivo no lado do escoamento gasoso, os trocadores de calor costumam ser compostos por tubos aletados nesse lado. Geralmente, este dispositivo é utilizado apenas em grandes unidades geradoras de vapor, devido ao custo da instalação comparado com o ganho na eficiência térmica.

2.2.6 Superaquecedor

Segundo Bazzo (1995), a função dos superaquecedores é aumentar a temperatura do vapor saturado que sai da caldeira e levá-la até o estado termodinâmico de vapor superaquecido.

De acordo com Bizzo (2009), os superaquecedores podem ser de natureza apenas convectiva, ou seja, projetados para aproveitar principalmente calor por convecção térmica, ou radiante, que se localizam próximo da própria câmara de combustão, a fim de aproveitarem melhor o calor por radiação gerado na fornalha.

Os superaquecedores são normalmente usados em sistemas com produção de potência mecânica/elétrica, mediante uso de turbinas a vapor acopladas no ciclo Rankine, ou em processos industriais específicos, onde se faz necessária uma troca de calor a altas temperaturas (Bazzo, 1995).

2.2.7 Componentes para Distribuição do Vapor

Bizzo (2005) afirma que os componentes para a distribuição de vapor têm a função de transportar o fluido vaporizado do interior da caldeira até os pontos de consumo final, com pressão, temperatura e vazão adequadas. Esses componentes são constituídos por tubulações e acessórios, tais como válvulas reguladoras de pressão e de vazão, válvulas de bloqueio, filtros e purgadores de condensado, entre outros.

Para uma melhor eficiência na distribuição de vapor, conforme Bizzo (2009), é necessário que a instalação possua uma correta regulação de pressão nas linhas de distribuição, uma drenagem eficiente de condensado, perfeita estanqueidade a vazamentos e adequado isolamento térmico para o meio ambiente.

2.2.8 Sistema de exaustão

A chaminé é o componente responsável por retirar os gases de combustão produzidos durante a queima do combustível na fornalha, com velocidade e na altura apropriada para redução de impactos sobre o ambiente. A chaminé promove uma depressão no local de saída, movimentando os gases quentes através do sistema de exaustão pelo efeito de tiragem (Bazzo, 1995).

Existem basicamente duas maneiras de realizar a tiragem dos gases nas caldeiras: de maneira natural, pela ação isolada da força de empuxo criada entre os gases quentes de exaustão em relação ao ar ambiente no campo gravitacional, ou de maneira assistida, utilizando também ventiladores e exaustores. A utilização da tiragem natural é aplicada, segundo Bazzo (1995), quando as perdas de carga nos dutos de tiragem não são significativas, caso contrário, torna-se necessário a utilização de máquinas de fluxo para ajudar na evacuação dos gases de exaustão.

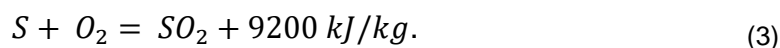
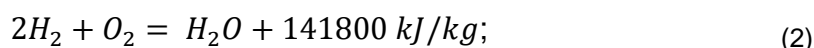
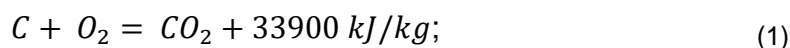
2.3 COMBUSTÍVEIS E COMBUSTÃO

Segundo Bazzo (1995), toda substância capaz de reagir com o oxigênio e liberar energia térmica (reação exotérmica) em intensidade suficiente para seu uso industrial, é considerado combustível. De acordo com Cortez (2008), os combustíveis são classificados em naturais e artificiais, podendo ser divididos em sólidos, líquidos e gasosos.

Conforme Sánchez (2010), na queima de combustíveis, a energia térmica liberada é consequência de reações químicas de oxidação com o carbono, hidrogênio, e o enxofre. Segundo Bazzo (1995), a quantidade de energia liberada por unidade de massa é definida pelo poder calorífico superior e depende da composição de cada combustível.

2.3.1 Reações de Combustão

Na queima de um combustível, os compostos produzidos pelas reações de combustão e a energia térmica liberada podem ser representados pelos balanços estequiométricos indicados nas equações (1) a (3) (Bizzo, 2009):



sendo: C = Carbono; O = Oxigênio; CO_2 = Dióxido de Carbono; H = Hidrogênio; SO_2 = Dióxido de Enxofre; H_2O = Água.

Os valores do lado direito das equações (1) a (3) estão relacionados ao poder calorífico dos elementos combustíveis, podendo ser superior (PCS) ou inferior (PCI). Conforme Bizzo (2009), a diferença entre os valores do PCS e do PCI está na entalpia de vaporização da água presente no combustível na forma de umidade e da água formada na oxidação do hidrogênio. A relação matemática entre o PCS e o PCI é dada pela equação (4) (Bazzo, 1995):

$$PCI = PCS - 2440 * (9h + w) \quad (4)$$

onde: PCI = Poder calorífico inferior (kJ/kg); PCS = Poder calorífico superior (kJ/kg); h = teor de hidrogênio constituinte do combustível (kg/kg); w = teor de umidade no combustível (kgH₂O / kg de combustível).

O cálculo do poder calorífico superior pode ser realizado a partir da equação (5), apresentada por Bazzo (1995):

$$Pcs = 33900 \cdot c + 141800 \cdot \left(h - \frac{o}{8} \right) + 9200 \cdot s \quad (5)$$

na qual, c = Teor de carbono (kg carbono / kg combustível); h = Teor de hidrogênio (kg hidrogênio / kg combustível); s = Teor de enxofre (kg enxofre / kg combustível); e o = Teor de oxigênio (kg oxigênio / kg combustível).

2.3.2 Excesso de ar

De acordo com Nogueira (2002), a eficiência da interação combustível-oxidante está sujeita às condições operacionais na qual é efetuada a queima. Normalmente, para garantir que todos os componentes do combustível oxidem completamente, é necessário introduzir um excesso de ar no processo de combustão. Isso é importante para aproveitar melhor a energia disponível no combustível e diminuir o impacto ambiental.

Conforme Bazzo (1995), a maioria dos processos industriais utilizam o ar atmosférico como fonte de oxigênio. Porém, como o ar ambiente possui grande quantidade de nitrogênio, ele contribui para a diminuição da temperatura dos gases de exaustão que saem pela chaminé. Portanto, é necessário dimensionar corretamente a quantidade de excesso de ar que estará presente na queima do combustível, a fim de garantir eficiência no processo. A Figura (5), apresentada por Nogueira (2002), ilustra as perdas envolvidas em função do excesso de ar utilizado na queima do combustível.

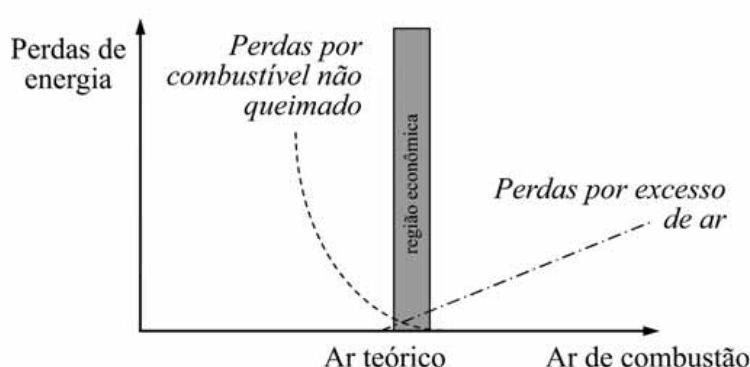


Figura 5 - Perdas de calor Vs. excesso de ar
Fonte: Nogueira, 2002.

O excesso de ar varia com a natureza do combustível e com o tipo de fornalha adotada. Nogueira (2002) relata que o excesso de ar pode mudar de 5 a 10% para combustíveis gasosos, de 10 a 30% para combustíveis líquidos e de 60 a 120% para combustíveis sólidos.

Normalmente, o excesso de ar empregado nas câmaras de combustão é determinado a partir da análise dos gases de combustão que saem pela chaminé, quantificando-se os teores de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) e oxigênio (O_2) com instrumentos adequados.

2.3.3 Biomassa

Bizzo (2005), classifica os combustíveis conforme a origem, podendo ser fóssil (não renovável) ou lignocelulósico (renovável). O Quadro (1) mostra a classificação.

Origem	Combustível Básico	Derivado
Fósseis	Petróleo	GLP
		Gasolina
		Óleo Diesel
		Óleo Combustível
		Óleos Residuais
	Gás Natural	Gases manufaturados
Xisto Betuminoso		
Carvões Minerais		
Lignocelulósicos (Biomassa)	Cana-de-açúcar	Bagaço de cana
	Lenha	Álcool Etílico
		Carvão Vegetal
		Gases manufaturados
		Metanol
Resíduos Vegetais	Biogás	

Quadro 1 - Classificação dos combustíveis.

Fonte: Bizzo, 2005.

Segundo Schürhaus (2007), o termo biomassa engloba toda a matéria vegetal que transforma a energia térmica provinda da radiação solar em energia química, e seus derivados como resíduos florestais e agrícolas, resíduos animais e a matéria orgânica contida em resíduos industriais e domésticos.

2.3.3.1 Análise elementar e imediata

A análise elementar de um combustível representa o percentual de um elemento químico específico de interesse em função da massa ou do volume total do combustível. Segundo Lora (2002), para as biomassas, normalmente os elementos são o carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O) e nitrogênio (N). A Tabela (1) mostra análises elementares de algumas biomassas do beneficiamento agroindustrial.

Tabela 1 - Análise elementar de biomassas.

Biomassa	Composição base seca						Cinzas
	C	H	O	N	S	Cl	
<i>Casca de arroz</i>	41,0	4,3	35,9	0,5			18,3
<i>Borra de Café</i>	57,9	7,1	29,9	2,4			2,7
<i>Bagaço de cana</i>	44,8	5,4	39,5	0,4		0,1	9,8
<i>Serragem</i>	48,9	5,8	43,3	0,3	0,1		1,6

Fonte: Sanchez, 2010.

Por outro lado, segundo Sanchez (2010), a análise imediata determina o teor, por massa do combustível, de umidade (W), material volátil (MV), carbono fixo (CF) e cinzas (A).

A Tabela (2) mostra resultados de análises imediatas de algumas biomassas envolvidas no beneficiamento agroindustrial.

Tabela 2 - Análise Imediata de biomassas.

Biomassa	Composição base seca (%massa)		
	A	MV	CF
Pinheiro	0,29	82,54	17,7
Eucalipto	0,79	81,42	17,82
Casca de arroz	17,89	65,47	16,67
Bagaço de cana	11,27	73,78	14,95

Fonte: Lora, 2008.

2.4 EFICIÊNCIA TÉRMICA DA CALDEIRA

A eficiência térmica dos geradores de vapor, relaciona a quantidade de calor útil na caldeira e a quantidade de calor disponibilizado pelo combustível, conforme a equação (6).

$$\eta = \frac{\text{Energia Útil}}{\text{Energia Fornecida}} \quad (6)$$

Existem dois procedimentos para se obter a eficiência térmica de uma caldeira, correspondendo aos dos métodos direto e indireto.

2.4.1 Método direto

A eficiência é encontrada pelo método direto relaciona a energia térmica produzida na forma de vapor e o consumo de energia do combustível, conforme a equação (7).

$$\eta = \frac{\dot{m}_a \cdot (h_v - h_a)}{\dot{m}_c \cdot P_{ci}} \quad (7)$$

onde, do cálculo da eficiência pelo método direto tem-se \dot{m}_a =Vazão mássica de água [kg/s], h_v =Entalpia do vapor saturado [kJ/kg]; \dot{m}_c =Vazão mássica do combustível [kg/s]; h_a = Entalpia da água de alimentação [kJ/kg]; P_{ci} =Poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg].

O método direto tem a vantagem de permitir um cálculo mais rápido. Porém, possui maiores erros devido às mudanças temporárias que podem acontecer na vazão mássica de vapor, tornando o método menos confiável.

2.4.2 Método indireto

Segundo Bizzo (2005), aplicando um balanço de energia através da primeira lei da termodinâmica em um sistema em regime permanente, a energia útil produzida pode ser expressa conforme a equação (8):

$$Qu = \sum E_1 - \sum P \quad (8)$$

Onde da equação (8) temos Qu =Energia útil produzida, $\sum E_1$ =Energia fornecida ao sistema, $\sum P$ =Soma de todas as perdas de calor do sistema.

E a eficiência térmica pode ser dada pela equação (9):

$$\eta = \frac{\sum E_1 - \sum P}{\sum E_1} \quad (9)$$

2.4.2.1 Energia que entra no Sistema

A energia total que entra no sistema é encontrada pela equação (10).

$$\sum E_1 = \dot{m}c \cdot (PC_i) + \dot{m}_{ar} \cdot (\Delta h_{ar} + War \cdot \Delta h_{vp}) \quad (10)$$

onde, da equação (10) tem-se: Δh_{ar} = Entalpia do ar (kJ/kg), War =Teor de umidade do ar (kg/kg ar seco), Δh_{vp} =Entalpia do vapor na pressão atmosférica (kJ/kg).

No somatório de perdas são contabilizadas todas as perdas de energia do sistema. Sistemas de geração de vapor industriais apresentam, em média, os valores os valores ilustrados na Figura (6).

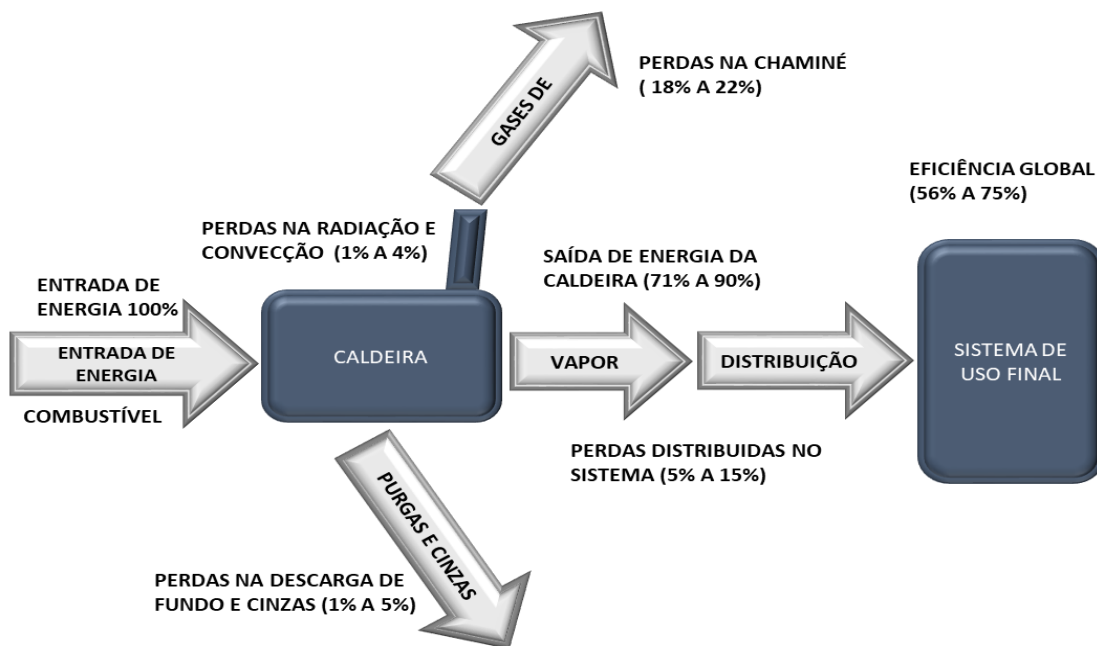


Figura 6 - Perdas de energia no sistema.

Fonte: Próprio autor.

As maiores perdas de calor são normalmente registradas nos gases de combustão. As principais perdas serão apresentadas seguindo a metodologia proposta por Bazzo (1995).

2.4.2.2 Perdas pelos gases de exaustão na chaminé

Conforme Nogueira (2002), as perdas de energia pela chaminé correspondem à maior parcela de perda de calor do sistema de geração de vapor.

As perdas de calor pela chaminé podem ser divididas conforme Bazzo (1995), em perdas atribuídas aos gases secos formados na combustão, que é a parcela de calor sensível, e ao vapor de água presente na chaminé, proveniente da reação do hidrogênio e da umidade do combustível.

A perda de calor sensível, calculada levando em consideração a energia associada aos gases CO_2 , SO_2 , N_2 e O_2 , é representada pela equação (11): (Bazzo, 1995):

$$\dot{q}_{gs} = \frac{44}{12} \cdot c \cdot \Delta h_{co} + 2 \cdot s \cdot \Delta h_{so2} + [0,7685 \cdot \tilde{m}_{ar} + n] \cdot \Delta h_{N2} + \dots$$

$$\dots + (e - 1) \cdot \tilde{m}_{ar} \cdot \Delta h_{ar} \quad (11)$$

onde, da equação (11) tem-se: c = teor de carbono (kg C/kg cb); s = Teor de enxofre (kg S/kg cb); n = Teor de nitrogênio (kg N/kg cb); e = Coeficiente de excesso de ar;

\tilde{m}_{ar} = Massa estequiométrica de ar (kg/kg cb); Δh_{co} = Entalpia do CO₂ (kJ/kg); Δh_{so2} = Entalpia do SO₂ (kJ/kg); Δh_{N2} = Entalpia do N₂ (kJ/kg);

A parcela da perda de calor pelo vapor de água contido no gás de combustão é dada pela equação (12), conforme Bazzo (1995):

$$\begin{aligned} \dot{q}_v = [9 \cdot h + w + Vn + War \cdot e \cdot Mar * + Vsf] \cdot \Delta h_{vp} + 2440 \cdot [Vn + Vsf] + \dots \\ \dots + 2440 \cdot [9 \cdot h + w] \end{aligned} \quad (12)$$

onde: h = Teor de hidrogênio do combustível (kg/ kg cb); w = Teor de umidade do combustível (kg/kg cb); Vn = Relação vapor de nebulização/combustível (kg/kg cb); Vsf = Relação vapor sopradores de fuligem/ combustível (kg/kg cb).

Para encontrar a perda de calor pela chaminé é necessário determinar as entalpias dos gases utilizando as equações (13) a (16), propostas por Bazzo (1995), e as proporções químicas sugeridas por Klock (2005), com a umidade encontrada para o combustível utilizado na caldeira em análise.

$$\Delta h_{co2} = 0,983 \cdot (T - To) + 1,302 \cdot 10^{-3} \cdot (T^2 - To^2) + 1,864 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{To}\right); \quad (13)$$

$$\Delta h_{N2} = 0,971 \cdot (T - To) + 0,746 \cdot 10^{-4} \cdot (T^2 - To^2); \quad (14)$$

$$\Delta h_{ar} = 0,948 \cdot (T - To) + 0,765 \cdot 10^{-4} \cdot (T^2 - To^2); \quad (15)$$

$$\Delta h_{vp} = 1,910 \cdot (T - To) + 0,702 \cdot 10^{-4} \cdot (T^2 - To^2) + 0,104 \cdot 10^{-6} \cdot (T^3 - To^3). \quad (16)$$

Nas equações anteriores, T = temperatura dos gases, em Kelvin; To = Temperatura de referência, em Kelvin.

A vazão mássica de ar estequiométrico pode ser determinada utilizando a equação estequiométrica, conforme a equação (17).

$$\begin{aligned} 4,167 \cdot C + 2,813 \cdot O + 6H + 0,071 \cdot N + x(O2 + 3,76 N2) \\ \rightarrow a \cdot CO2 + b \cdot H2O + c \cdot N2 + d \cdot O2 \end{aligned} \quad (17)$$

2.4.2.3 Perdas de calor pelas cinzas

As perdas de energia com as cinzas, segundo Bazzo (1995), são calculadas com a temperatura medida no local de extração, e são dadas pela equação (18):

$$\dot{q}_{cz} = z \cdot m_{cb} \cdot \Delta hcz \quad (18)$$

onde: \dot{q}_{cz} = Calor sensível perdido com as cinzas (kW); q_{cz} = Calor sensível perdido com as cinzas (kJ/kg cb); z =Teor de cinzas do combustível (kg/kg cb); Δhcz = Entalpia das cinzas (kJ/kg).

2.4.2.4 Perda de calor por combustão parcial

A perda de calor por combustão parcial será encontrada pela equação (19), apresentada por Bazzo (1995).

$$q_{cp} = c_{nq} \cdot [33900 + \Delta hc] + 126 \cdot Vgs \cdot \%CO \quad (19)$$

onde: \dot{q}_{cp} =Calor perdido por combustão parcial (kW); q_{cp} =Calor perdido por combustão parcial (kJ/kg cb); c_{nq} = Relação carbono não queimado/combustível (kg/kg cb); Δhc = Entalpia do carbono (kJ/kg); $\%CO$ =Porcentagem de monóxido de carbono em volume; Vgs =Volume de gases na base seca (m³/kg cb).

2.4.2.5 Perda de calor pelas purgas

Conforme Bazzo, as perdas de calor pelas purgas de condensado representam uma parcela relativamente pequena.

A equação (20) apresentada por Bazzo (1995), permite estimar a perda de calor devido às purgas.

$$\dot{q}_{pg} = \dot{m}_{pg} \cdot [h_{ls} - h_a] \quad (20)$$

onde: \dot{q}_{pg} =Calor sensível perdido com as purgas (kW); \dot{m}_{pg} =Vazão mássica de água purgada (kg/s); q_{pg} =Calor sensível perdido com as purgas (kJ/kg cb); h_{ls} =Entalpia do líquido saturado (kJ/kg); h_a =Entalpia da água de alimentação (kJ/kg).

2.4.2.6 Perdas de calor por radiação e convecção

Segundo Bazzo (1995), as perdas provenientes as trocas de calor por radiação são pequenas comparadas às outras perdas, e podem assumidas valendo entre 0,5 a 1% do calor total que ingressa na caldeira.

2.5 USO EFICIENTE DO VAPOR

Conforme Nogueira (2005), para melhorar a eficiência energética no uso de vapor, é necessário identificar e acompanhar todos os processos relacionados à sua produção, desde o recebimento dos combustíveis, passando pela transformação de energia química em térmica na queima do combustível e a distribuição de vapor, até a sua utilização nos processos produtivos. Ainda, deverá ser considerado o tratamento do condensado.

2.6 CONCEITO HISTÓRICO DE QUALIDADE

A sobrevivência e permanência das organizações segundo Falconi (2009), está relacionada a sua capacidade de atingir e superar resultados que atendam às necessidades dos clientes e das partes interessadas, e que garantam a competitividade.

Essa capacidade de atingir e superar resultados é, segundo Falconi (2009), uma definição de qualidade dentre tantas outras existentes. De acordo com Juran (1991), a qualidade é adequação ao uso através da percepção das necessidades dos clientes.

É possível notar historicamente as empresas que adotaram ferramentas de qualidade e melhorias em suas produções tiveram sucesso e se destacaram no mercado.

No período da revolução Industrial, a qualidade estava relacionada a padronização da produção de bens em massa, e pouco a pouco, a produção começou a ser dividida em etapas. Conforme Paladini (2004), com o tempo adotaram-se padrões de qualidade no desenvolvimento de produtos.

Durante a Segunda Guerra Mundial segundo Paladini (2004), o controle da qualidade foi muito utilizado, mas somente no pós-guerra, durante o período de reconstrução, o conceito de gestão foi difundido. Foram surgindo novos e revolucionários elementos na gestão da qualidade, que auxiliaram o crescimento e desenvolvimento das empresas.

Muitas ferramentas de qualidade foram utilizadas desde a década de 30 para o alcance de metas e a manutenção ou melhoria contínua dos processos. O conceito PDCA é uma dessas ferramentas e será utilizado como base desse projeto.

2.7 MÉTODO PDCA

O ciclo PDCA, é uma ferramenta de gestão que visa melhorar e controlar os processos e produtos de forma contínua. É também conhecido como ciclo de Shewhart ou ciclo de Deming. Segundo Oribe (2009), este método foi apresentado na década de 30 por Walther Shewhart como um ciclo aplicável sobre a administração da qualidade, e mais tarde foi difundido por William Edward Deming em seus trabalhos e palestras no Japão.

O método PDCA emprega uma sequência de procedimentos lógicos, baseada em fatos e dados, que objetiva localizar a causa fundamental ou causa raiz dos problemas. O método não possui um fim pré-determinado, pois segundo Aguiar (2006), esse conceito está fundamentado em um ciclo, com foco em melhorar ou atingir os resultados e metas estipuladas com atividades planejadas. Ele envolve 4 etapas: “Plan”, “Do”, “Check” e “Act” como ilustrado na Figura (7) (em português Planejar, Executar, Checar e Agir).

Na etapa, “Plan” (planejar) segundo Aguiar (2006), são definidos os objetivos ou meta de interesse, e estabelecidos os caminhos e meios para atingir a meta pré-estabelecida. É na etapa “Plan” que, segundo Mariani (2005), define-se o cronograma a ser utilizado e os planos de ações a serem seguidos.

A etapa “Do” (executar) representa o período onde os envolvidos são treinados para cumprir o plano de ação e o cronograma da etapa anterior. Nessa fase ainda, segundo Aguiar (2006), as ações planejadas são executadas a fim de obter dados e informações necessárias para atingir a meta pré-definida.

A terceira fase do ciclo é o “Check” (checar ou verificar). Nessa etapa, conforme Oribe (2011), são realizadas análises criteriosas sobre os dados obtidos anteriormente. Também, nessa fase são encontradas possíveis falhas e erros que não foram previstos no planejamento do projeto.



Figura 7 – Ciclo PDCA.
Fonte: Próprio autor.

A última fase do ciclo é a etapa “Act” (agir). As ações desta fase dependem dos resultados obtidos que foram avaliados anteriormente. Se a meta for alcançada, são propostos meios para manter os bons resultados. Caso contrário, inicia-se um novo ciclo do PDCA com novas metas ou novas ações a serem tomadas.

2.7.1 Plan

Este é considerado o módulo principal e o que demanda mais tempo. Neste define-se o problema que será estudado e realiza-se a estratificação do mesmo, estabelecendo-se as metas e a forma como elas serão alcançadas (BOND, 2012).

A etapa de planejamento (“Plan”), segundo Campos (2004), é subdividida em 6 fases: “Conhecimento do processo”, “identificação dos problemas e metas”, “Observar e priorizar problemas”, “Observar e priorizar causas”, “Identificar e priorizar soluções” e “elaboração de plano de ação”.

A fase de Identificação do problema, segundo Campos (2004), é realizada todas as vezes que a empresa se deparar com um resultado (efeito) indesejado, provindo de um processo (conjunto de causas).

O mapeamento poderá ser realizado através do estudo de indicadores, funcionograma, diagrama de processo ou o estudo de normas e procedimentos da empresa. Além disso, a visita ao local, a conversa com operadores e pessoas

integradas ao sistema são maneiras eficientes de se mapear e entender o cenário em estudo (FALCONI,1992).

Após conhecer a fundo o processo que requer melhoria, segundo Aguiar (2006), é preciso definir claramente o problema. Para identificá-lo conforme Campos (2004), é necessário utilizar fatos e dados, buscando entender quais as perdas e ganhos no processo e qual é o desempenho atual.

A segunda fase é a etapa de estabelecer metas. Toda meta a ser definida deverá, conforme Campos (2004), sempre ser constituída de três partes: objetivo (o que se pretende), prazo (data ou período para validação) e valor (referência utilizada com base nos dados).

Devem-se utilizar fatos e dados para a definição da meta. Recomenda-se o uso de dados históricos, podendo assim comparar resultados já alcançados pela organização em períodos diferentes (OLIVEIRA,2018).

A terceira fase é a análise do fenômeno. Essa etapa consiste, conforme Aguiar (2006), na análise mais detalhada do problema detectado e suas características específicas, por meio de fatos e dados coletados. Nessa etapa serão observados e estratificados os problemas com pontos prioritários.

Com a priorização do problema, entende-se a aproximação da causa fundamental do problema macro. Dessa maneira, é necessário levantar essas possíveis causas, testando as hipóteses e identificando as fundamentais (OLIVEIRA,2018).

A quarta fase é a análise do processo ou análise de causas, que conforme Aguiar (2006), consiste em buscar as causas mais importantes que provocam o problema, através da análise das características importantes. Nessa etapa se buscarão os porquês da ocorrência dos problemas.

A quinta etapa é a identificação e priorização de soluções. Alguns aspectos devem ser levados em consideração nesta etapa, tais como a garantia de que as propostas não irão gerar efeitos colaterais e a análise da viabilidade das ações (OLIVEIRA,2018).

A entrega da etapa de planejamento representa um plano de ação, ou seja, as soluções, incluindo as ações que tendem a bloquear os problemas potenciais, são colocados em forma de ação em um formato 5W2H1E (BOND, 2012).

O plano de ação é, segundo Aguiar (2006), a última fase da etapa PLAN, a qual define em detalhes, todas as ações que deverão ser tomadas para se atingir a meta proposta inicialmente.

2.7.2 Do

A etapa “Do”, constitui o momento crucial do processo. Falconi (1996) estabelece que reuniões de acompanhamento podem ser necessárias ao curso da execução, a fim de garantir que cada ação seja executada da forma e no momento certo.

O plano de ação deve ser revisto e atualizado à medida que for sendo executado, preferencialmente no local em que as ações estão sendo efetuadas.

As pessoas responsáveis por executar cada uma das ações, devem ser treinadas e possuir o completo entendimento do que deverá ser realizado e do motivo pelo qual existe determinada ação (OLIVEIRA, 2018).

2.7.3 Check

Segundo Falconi (1996), nesta etapa deve-se comparar os dados relativos ao problema coletado antes e depois da execução da ação. Além da comparação dos indicadores, deve-se também identificar os benefícios gerais e financeiros de cada solução proposta. Isso, conforme Aguiar (2006), inclui quantificar os ganhos, sejam eles de capacidade, qualidade ou de produtividade. E também devem-se listar os efeitos secundários positivos ou negativos, caso eles existam.

Depois de confirmada a efetividade das ações, conforme Aguiar (2006) deve-se revisar ou criar procedimentos de acordo com o padrão estabelecido juntamente com a área competente para garantir controle sobre o processo.

Algumas ferramentas podem auxiliar durante o módulo de verificação, tais como: gráficos, tabelas, Pareto, cartas de controle e até mesmo histogramas (WERKEMA, 1992).

2.7.4 Act

Na última etapa do ciclo, conforme Aguiar (2006), adotam-se os procedimentos como “padrão” a ser executado; caso contrário, é nessa etapa que se corrigem os erros para alcançar as metas estabelecidas previamente.

Conforme Falconi (1996), nessa etapa deve-se relacionar os problemas remanescentes e os resultados logrados acima do esperado, mostrando-os mediante gráficos com indicadores.

A partir do momento que se tem uma padronização das ações propostas vistas como efetivas, o ciclo passa a ser denominado SDCA, que em inglês corresponde ao inglês: *Standart; Do; Check e Action*, traduzindo para o português são respectivamente: Padrão, Execução, Verificação e Ação. Finalmente, vale a pena ressaltar que o PDCA é conhecido como um ciclo da qualidade, pois ele deve ser contínuo, sempre em busca de melhorias (OLIVEIRA, 2018).

2.7.5 Ferramentas de qualidade

Nessa seção são apresentadas algumas das principais ferramentas utilizadas no desenvolvimento deste projeto.

Fluxograma é a representação gráfica da sequência operacional do desenvolvimento de um processo, o qual pode representar o fluxo do trabalho realizado, quem está realizando o trabalho, o tempo necessário para sua realização entre outras informações (FALCONI, 1996).

O princípio de Pareto, também conhecido como regra do 80/20 diz que em muitos eventos, aproximadamente 80% dos efeitos vêm de 20% das causas. O diagrama de Pareto é representação do Princípio de Pareto no qual é utilizado um gráfico de colunas para ordenar os efeitos mais impactantes, em ordem decrescente, permitindo uma fácil visualização e identificação das causas ou problemas mais importantes, permitindo a concentração de esforços sobre a resolução desses problemas (OLIVEIRA, 2018).

Brainstorming é uma dinâmica realizada em grupo, usada para solucionar problemas específicos, vem de uma expressão inglesa e é formada pela união de duas palavras "*brain*" e "*storm*", que significam respectivamente cérebro ou intelecto e tempestade, ou seja, uma tempestade de ideias. É utilizado uma tabela para anotar

todas as ideias percorridas sobre o processo, para depois evoluir até uma solução final (FALCONI,1996).

Conforme Falconi (1996), 5W2H é uma ferramenta utilizada para criar, acompanhar e gerir um plano de ação na gestão de projetos, planejamentos estratégicos, financeiros e etc. Vem da abreviação das palavras inglesas “*what*”, “*why*”, “*who*”, “*when*”, “*where*”, “*how*”, e “*how much*”. Onde os seus significados são segundo Falconi (1996):

WHAT: O que será feito? (Objetivo, meta).

WHY: Por que será feito? (Motivo, benefício).

WHEN: Quando Será feito? (Data, cronograma).

WHO: Quem fará? (Responsável, equipe).

WHERE: Onde será feito? (Local, setor).

HOW: Como será feito? (Atividade, processo).

HOW MUCH: Quanto custará? (Custo, quantidade)

A matriz e priorização serve para classificar as soluções para cada problema que você julga pertinente para a sua empresa pela ótica dos benefícios que a ação terá, do investimento necessário e pela operacionalidade de executar as ações propostas a fim de analisar a viabilidade de execução dessas soluções (OLIVEIRA, 2018).

A técnica dos “5 Porquês” nada mais é que uma análise utilizada para encontrar a causa raiz de um problema. É uma técnica baseada na premissa que ao perguntar 5 vezes o porquê de um problema está acontecendo, sempre relacionando com a causa anterior, será encontrado a causa raiz. O número 5 é uma premissa, nada impede que mais ou menos do que 5 perguntas sejam feitas (OLIVEIRA, 2018).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas as etapas e as ferramentas da metodologia PDCA utilizadas no desenvolvimento da fase *PLAN* abordada nesse trabalho.

Uma premissa desse projeto é que todas as informações colhidas no sistema são confiáveis e que a empresa irá cumprir todas as ações levantadas para a solução dos problemas. Assim, será realizada uma análise dos principais riscos envolvidos no projeto, mediante o levantamento da matriz de criticidade.

Alguns dos resultados preliminares dessa análise de riscos são apresentados no Quadro (2), através da matriz de criticidade.

Descrição do Risco	Consequências	Probabilidade de Acontecer	Impacto Se Ocorrer	Clas.	Ação
Falta De Informações Importantes	Será Difícil Apontar Possíveis Problemas e Soluções	3	5	15	Constante Comunicação Com a Equipe Responsável
Investimento Da Empresa	Não Será Possível Concluir O Projeto.	3	5	15	Realizar Orçamentos e Colocar Na Torre de Investimento.
Entregas Das Outras Áreas Fora Do Prazo.	Atraso Ou Interrupção Completa Do Projeto	3	4	12	Reuniões Com os Coordenadores das Equipes; Ter Acesso ao Cronograma das Outras Áreas.
Sobrecarga Nas Funções De Rotina	O Projeto Não Se Desenvolverá	3	4	12	Reunião com o Meu Superior e Apresentação do Cronograma.
Não Definições Dos Prazos Realistas	Descumprimento Do Cronograma Proposto.	3	3	9	Reunião Com os Responsáveis do Prazo Geral do Projeto;
Não Apoio Com Relação As Tratativas	Atraso Ou Interrupção Completa Do Projeto	2	4	8	Reunir Com o supervisor Buscando Apoio.
Falta De Comprometimento Da Equipe	Atraso Ou Não Cumprimento Da Atividade	2	4	8	Acompanhamento Da Equipe com Relação ao Cronograma Proposto; Constante Comunicação Dos Membros do Setor.

Quadro 2 - Matriz de criticidade.

Fonte: Próprio autor.

O sistema de geração de vapor objeto de análise está instalado em uma empresa localizada no litoral do estado do Paraná. A atividade comercial desta

empresa é produção alimentícia com produtos derivados de óleos e gorduras vegetais.

A etapa “*Plan*” foi dividida em 6 fases, conforme apresentado na Figura (6). Na primeira fase foi mapeado o processo em estudo, a fim de conhecer as variáveis do sistema. Na segunda fase, foi realizado um cronograma com as principais datas impactantes do projeto, sendo coletados os dados do gerador de vapor e apresentado o procedimento com os cálculos para a determinação do seu rendimento térmico. Ainda foi feita uma análise dos principais indicadores que podem ser relacionados com o consumo do combustível e também uma análise de risco que pode interferir no desenvolvimento do projeto.

Na terceira fase foram avaliados os problemas que mais impactam no consumo final de combustível. Após determinar os principais impactos, a quarta fase teve o propósito de encontrar as possíveis causas raízes que afetam o sistema. Na quinta fase foi realizado um estudo voltado à proposta de possíveis ações que bloqueiem ou minimizem as causas raízes do problema. A última fase da etapa “*Plan*” define os responsáveis pela execução das ações determinadas na fase anterior e as datas para que isso ocorra.

A Figura (8) mostra o fluxograma das etapas e ferramentas utilizadas.

METODOLOGIA DE MELHORIA CONTINUA – PDCA - FERRAMENTAS UTILIZADAS					
PDCA	FLUXO	FASE	DESCRIÇÃO DA FASE	FERRAMENTAS E PROCEDIMENTOS	OBJETIVOS
P	1	Conhecimento do processo	Mapear todo o processo, conhecendo todas as variáveis que compõem o sistema.	Fluxograma e Diagrama de processo	Visualizar o fluxo do processo, conhecendo as entradas e saídas, e ainda os recursos existentes no processo.
				Análise dos procedimentos operacionais	Identificar a coerência das atividades realizadas com as ações documentadas.
				Visita no local	Buscar dados e fatos de maneira visível.
	2	Identificar os problemas e metas	Definir claramente o problema e a meta.	Análise de risco	Descobrir quais serão as maiores dificuldade para atingir o objetivo proposto.
				Gráficos, tabelas	Mostrar perdas atuais e ganhos viáveis
				Indicadores e diretrizes gerais da área	Ponto de referência para definir a meta.
	3	Observar e priorizar Problemas	Investigar as características específicas e redefinir o problema.	Análise de Pareto.	Priorizar o estudo nos maiores problemas ou os que trarão os maiores efeitos.
				Tabela de dados.	Estratificação e organização dos dados.
				Análise no local da ocorrência do problema	Identificação de possíveis falhas de procedimentos e de equipamentos.
	4	Observar e priorizar causas	Levantar as possíveis causas e testar as hipóteses levantadas, identificando as causas raízes	Brainstorming	Levantar possíveis causas de falhas.
Matriz de priorização de causa				Utilizar para selecionar os problemas ou causas que apresentam maior prioridade.	
Teste de hipótese				Levantar as possíveis hipóteses de causas dos problemas.	
Método dos Porquês				determinar a causa raiz de um problema.	
5	Identificar e priorizar soluções	Levantar, analisar e priorizar ações para bloqueio das causas raízes	Brainstorming	Levantar possíveis soluções de falhas.	
			Diagrama de Causa e Efeito	Identificar quais são as soluções para um efeito ou problema.	
			Matriz de priorização de causas.	Utilizar para selecionar os problemas ou causas que apresentam maior prioridade.	
			Teste de viabilidade	Analisar a viabilidade de executar as ações	
D	7	Implantar soluções	Executar as ações do plano.	Treinamento e padronização	Treinar a equipe para executar corretamente as ações previstas.
				Check list.	Garantir a execução das ações da maneira correta.
				Folha de dados	Registrar os dados obtidos.
C	8	Comparar com o planejado	Verificar se o bloqueio foi efetivo com a evolução do indicador	Tabelas de dados.	Estratificar e organizar dados.
				Gráfico sequencial.	Comparar perdas e ganhos com valores antigos.
A	9	Padronizar	Elaborar padrão para manutenção do resultado	Padronização operacional e treinamentos	Manutenção do resultado
	10	Concluir	Recapitular todo o processo de solução do problema.	Reflexão cuidadosa sobre o método utilizado	Concluir o ciclo.

Figura 8- Fluxograma etapas PDCA e ferramentas utilizadas.

Fonte: Próprio autor.

3.1 PLAN

As fases da etapa “Plan” são subdivididas em: conhecimento do processo, Identificação dos problemas e metas, observação e priorização dos problemas, observação e priorização das causas, identificação e priorização das soluções e elaboração do plano de ação. A seguir são apresentadas estas fases juntamente com as ferramentas utilizadas nelas.

3.1.1 Conhecimento do processo

Para facilitar a identificação do problema foi criado um fluxograma (mapa de raciocínio), representado na Figura (9), com as principais divisões do processo e os parâmetros a serem avaliados.

As etapas de produção de vapor foram subdivididas em 5 principais subgrupos, sendo eles “Alimentação”, “produção de vapor” na caldeira, “distribuição”, “consumo final” e “retorno de condensado”.

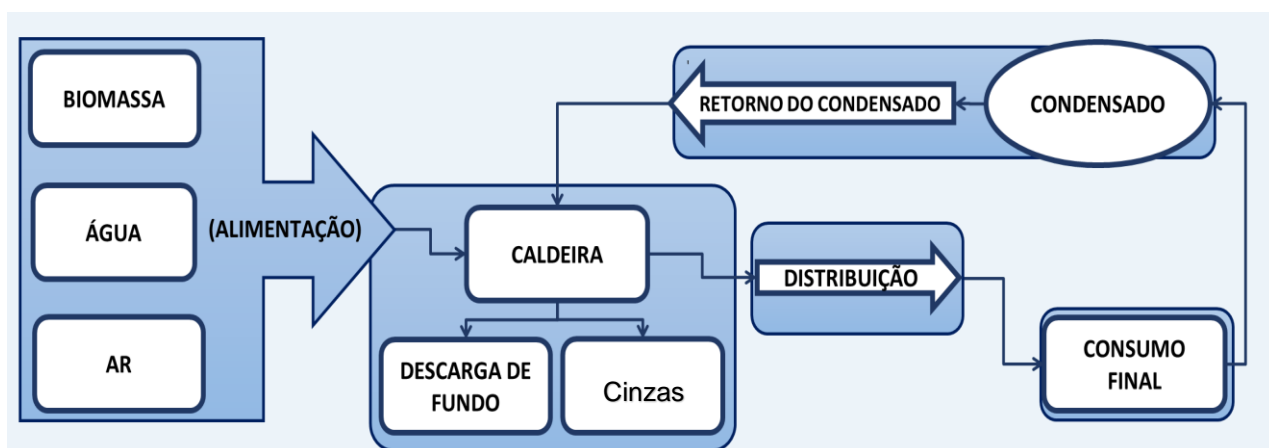


Figura 9 - Fluxograma do sistema de geração de vapor.

Fonte: Próprio autor.

Cada subgrupo será estudado a fim de identificar o impacto no consumo de combustível. Posteriormente será aprofundado os estudos nos maiores contribuintes desse consumo, buscando eliminar ou reduzir possíveis problemas e/ ou falhas de operação. Não será aprofundado o estudo no consumo final de vapor, já que seria necessário um estudo mais prolongado nos métodos de produção.

3.1.1.1 Alimentação

O combustível utilizado na produção de vapor é o cavaco de madeira de *pinus*. A Tabela (3) mostra a porcentagem de umidade e o poder calorífico inferior do combustível correspondente, este último determinado a partir da equação (4) com uso dos valores da tabela (Klock, 2005). Como esperado, o poder calorífico do combustível diminui com o incremento no teor de água.

Tabela 3- Poder calorífico inferior em função da umidade do cavaco

Biomassa - Cavaco <i>Pinus</i>		
Umidade % massa	PCI	
	kcal/kg	kJ/kg
0	3863,30	16164,0
15	3196,59	13374,5
25	2751,70	11513,1
35	2307,06	9652,7
45	1862,41	7792,3
55	1417,76	5931,9
65	973,11	4071,5

Fonte: Klock, 2005.

Os dados de umidade média mensal do combustível recebido em 2017 e 2018 são mostrados nos Gráfico (1) e (2), respectivamente.

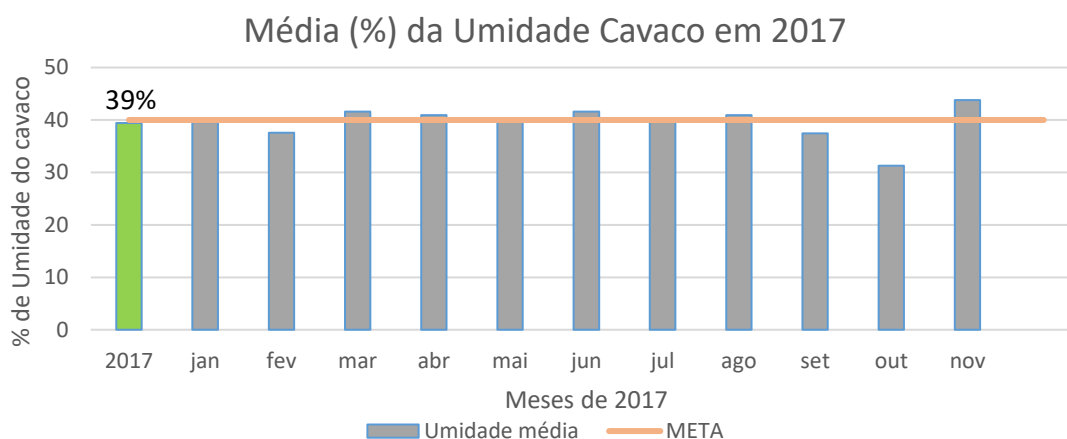


Gráfico 1 - Média de umidade do ano 2017.

Fonte: Próprio autor.

A média registrada no ano de 2017 foi de 39% para a umidade e de 8907,93 kJ/kg para o PCI do combustível. No mês de março de 2018 não teve recebimento de cavaco, devido à parada por férias coletivas na empresa.

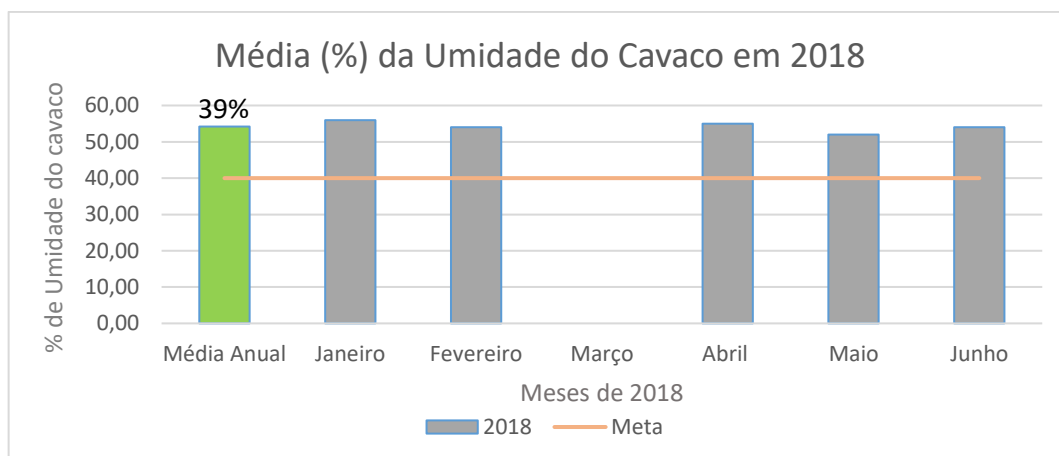


Gráfico 2- Umidade média meses 2018.

Fonte: Próprio autor.

No ano de 2018 a média de umidade no cavaco foi de 54,2% na sua composição mássica e o PCI médio encontrado foi de 5973,8 kJ/kg. Observa-se que a média de umidade em 2018 é superior aos mesmos períodos de 2017.

A empresa tem capacidade de armazenamento de combustível para 4 a 5 dias, o que conforme a curva do comportamento da umidade em relação aos dias de armazenamento faz com que o cavaco perca entorno de 15 a 20% da sua umidade.

Nos vinte primeiros dias ocorre a maior queda da porcentagem da umidade e, a partir de sessenta dias, a umidade se mantém próxima a 20% conforme Figura (10).

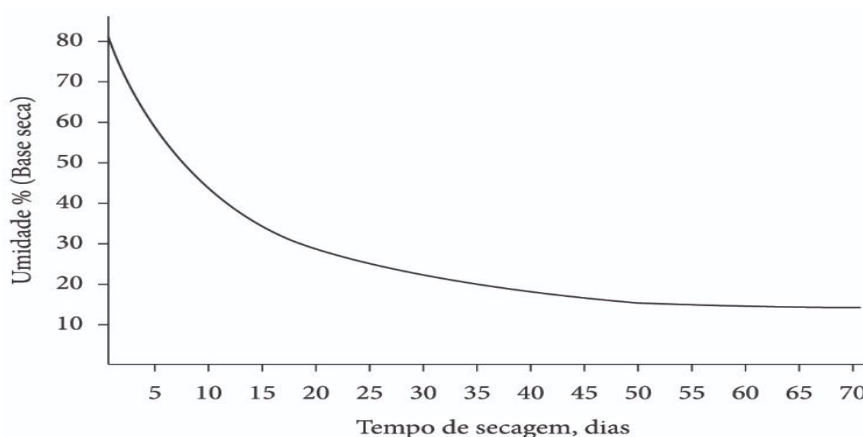


Figura 10 - Tempo de secagem do cavaco.

Fonte: Ponce & Watai, 1985.

Por outro lado, segundo Klock (2005), as análises da composição química elementar do cavaco de madeira em relação à sua massa seca, indicam a composição percentual resumida na Tabela (4).

Tabela 4 -Poder calorífico pela umidade do cavaco (%massa base seca)

Elemento	Porcentagem
C	49 – 50
H	6
O	44 – 45
N	0,1 – 1

Fonte: Klock – 2005.

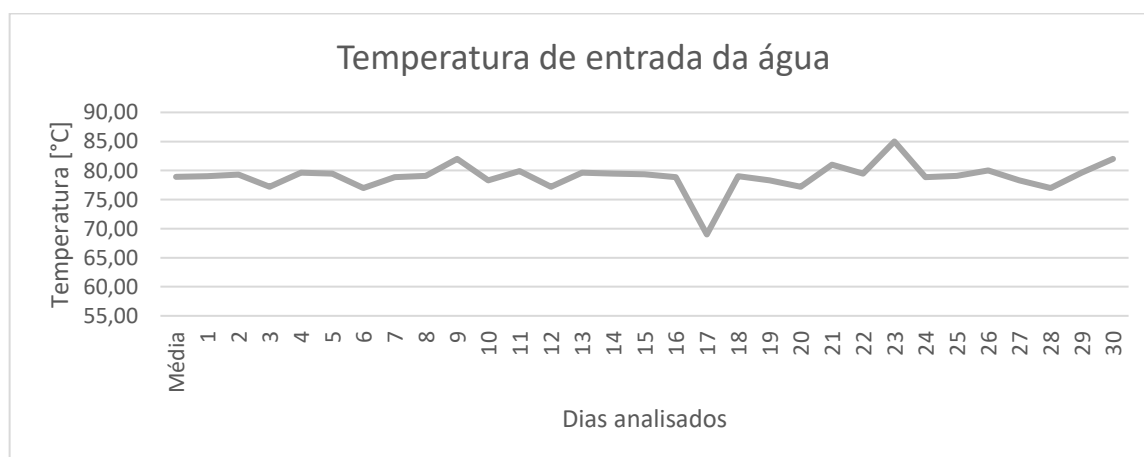
Como o consumo médio de combustível depende da quantidade de vapor produzido é apresentado na Tabela (5), a taxa de consumo de combustível em kg pela quantidade de vapor produzido também em kg.

Tabela 5 – Média de consumo de combustível, taxa de consumo.

Valores médios – 2018			
Mês	Consumo de Cavaco	Produção de Vapor	Taxa de Consumo
Janeiro	118666,00	256250,00	0,463
Fevereiro	117037,00	249629,00	0,469
Março	138800,00	289912,00	0,479
Abril	128600,00	279066,00	0,461
Mai	100845,00	214181,00	0,471
Junho	98879,00	214204,00	0,462
Experimento	127200,00	276480,00	0,461

Fonte: Próprio autor.

Os dados de temperatura média referente ao mês de junho da água previamente tratada alimentada na caldeira e do ar utilizado na combustão são mostrados nos Gráficos (3) e (4).

**Gráfico 3** - Temperatura média de água Junho 2018.

Fonte: Próprio autor.

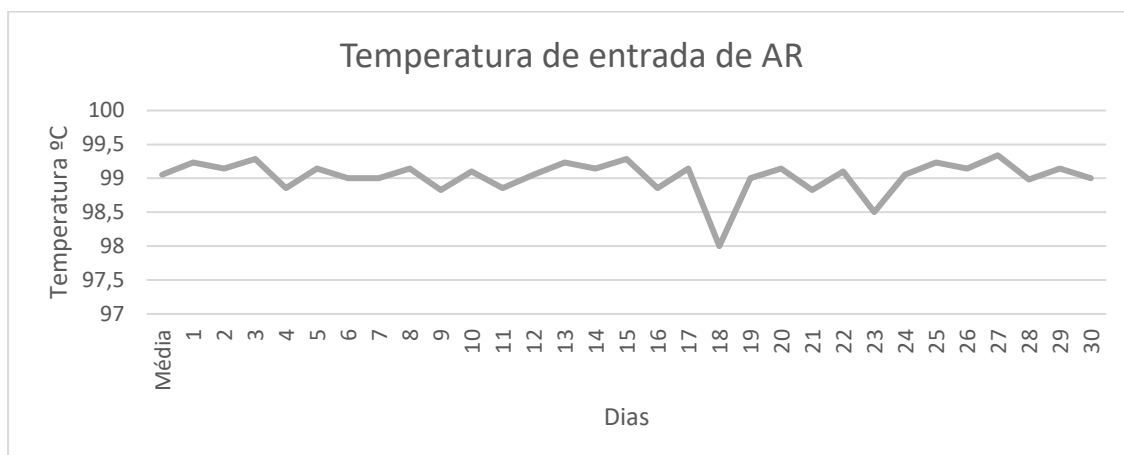


Gráfico 4 - Temperatura média de ar - Junho 2018.

Fonte: Próprio autor.

As temperaturas médias registradas para o mês de julho foi 98°C para o ar de entrada e de 80°C para água de entrada.

3.1.2 Gerador de vapor

O gerador de vapor em estudo possui as características técnicas listada a seguir:

- Combustível: Cavaco de madeira *in natura*.
- Capacidade de produção de vapor com água de alimentação a 20°C: 20.000 kg/h;
- Pressão máxima de trabalho permitida: 17 kgf/cm²;
- Pressão mínima de trabalho 5 kgf/cm²;
- Pressão de teste hidrostático: 26 kgf/cm²;
- Superfície de aquecimento da caldeira e fornalha: 870 m²;
- Capacidade térmica (*output*): 12.942.000 kcal/h;

As Figuras (11) e (12) mostram vistas de desenhos referentes ao modelo da caldeira sob análise.

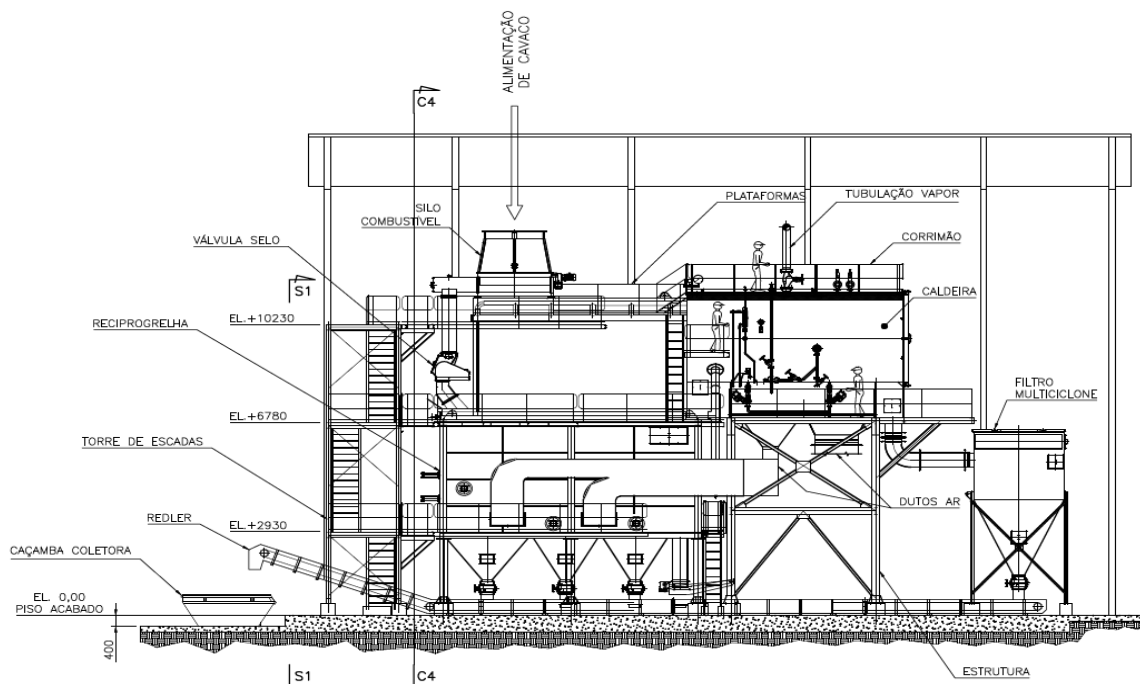


Figura 11 - Vista lateral Caldeira.
Fonte: Manual da caldeira Steam Master.

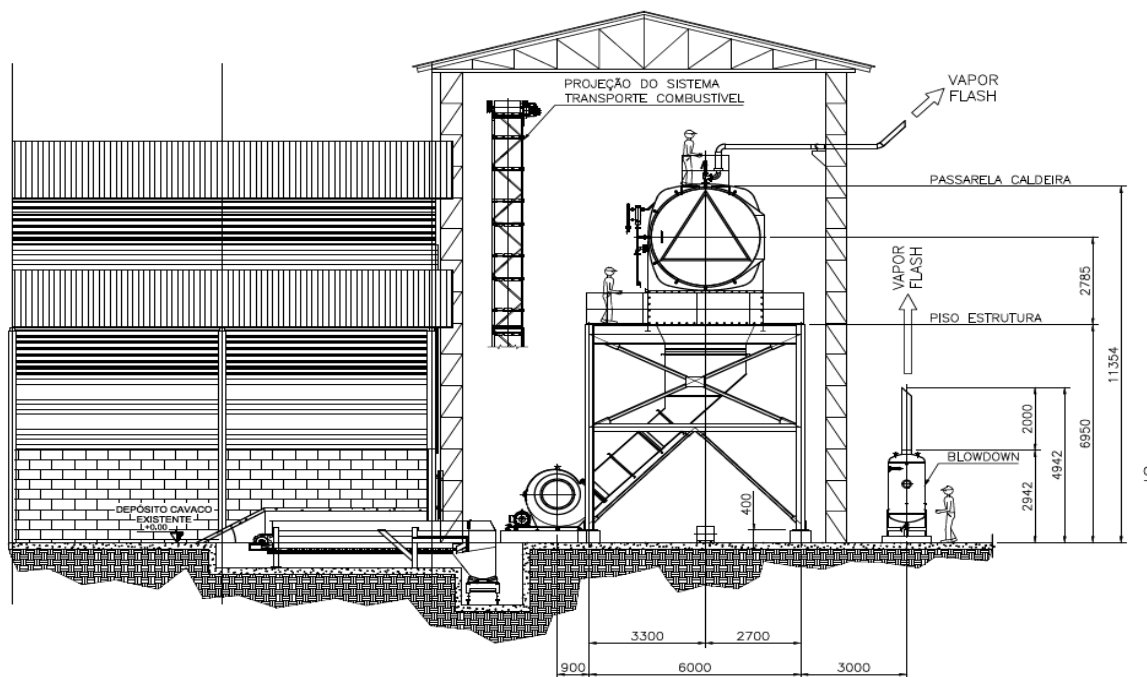


Figura 12 - Vistas Caldeira
Fonte: Manual da caldeira Steam Master.

O gerador de vapor possui cinco descargas de fundo, porém com apenas três delas em funcionamento. Os dados referentes a estas descargas estão mostrados na Tabela (6).

Tabela 6 - Vazão das descargas de fundo da caldeira.

Descrição	Valor
Pressão utilizada [kgf/cm ²]	12
Vazão utilizada [L/s]	42,29
Litros por hora [L/h]	2537,4
Número de Descargas por hora	4
Quantidade de descargas de fundo	3
Tempo de descarga [s]	5

Fonte: Próprio autor.

3.1.2.1 Distribuição do vapor

A distribuição de vapor se dá por tubulações com diâmetros variando entre 1,1/2" a 3", dependendo da demanda dos processos na empresa. Existem filtros e purgadores a cada 120 m. Atualmente não existe um plano de manutenção ativo sobre a linha de distribuição do vapor.

Os isolamentos térmicos dos tubos são feitos com manta térmica de lã de vidro, coberta por uma capa de alumínio, porém existem pontos sem isolamentos.

3.1.2.2 Consumo Final

O vapor é utilizado como gerador de vácuo, nos processos produtivos, e é utilizado aplicando diretamente sobre o produto final durante o refino do óleo vegetal. O vapor é ainda utilizado para limpar as linhas de óleo e gordura. Não existe histórico do consumo de vapor pelos setores da empresa. O histórico é gerado pela saída total de vapor na caldeira.

3.1.2.3 Retorno de Condensado

Existe um tanque para o armazenamento do vapor condensado proveniente dos processos da empresa. Esse condensado é armazenado sobre pressão ambiente e na temperatura média de 95°C. A vazão máxima de condensado é de 5m³/h, com capacidade de armazenamento de 95 mil litros.

3.1.3 Identificação dos problemas e metas

Para identificar os possíveis problemas no sistema de produção de vapor, neste trabalho adota-se o parâmetro de rendimento ou eficiência térmica da caldeira, avaliado pelos métodos direto e indireto.

3.1.3.1 Identificação do volume de controle da caldeira

Para realizar os cálculos do rendimento térmico de um gerador de vapor, é preciso inicialmente delimitar as suas fronteiras. O balanço de massa e de energia a ser realizado nesse volume de controle escolhido requer a identificação de todas as entradas e saídas das correntes, sendo elas: fornecimento do combustível, ar de combustão, água de alimentação, vapor produzido, gases de exaustão e purgas de condensado.

A Figura (13) representa o volume de controle utilizado no balanço de massa e de energia do gerador de vapor que será utilizado para cálculos posteriores.

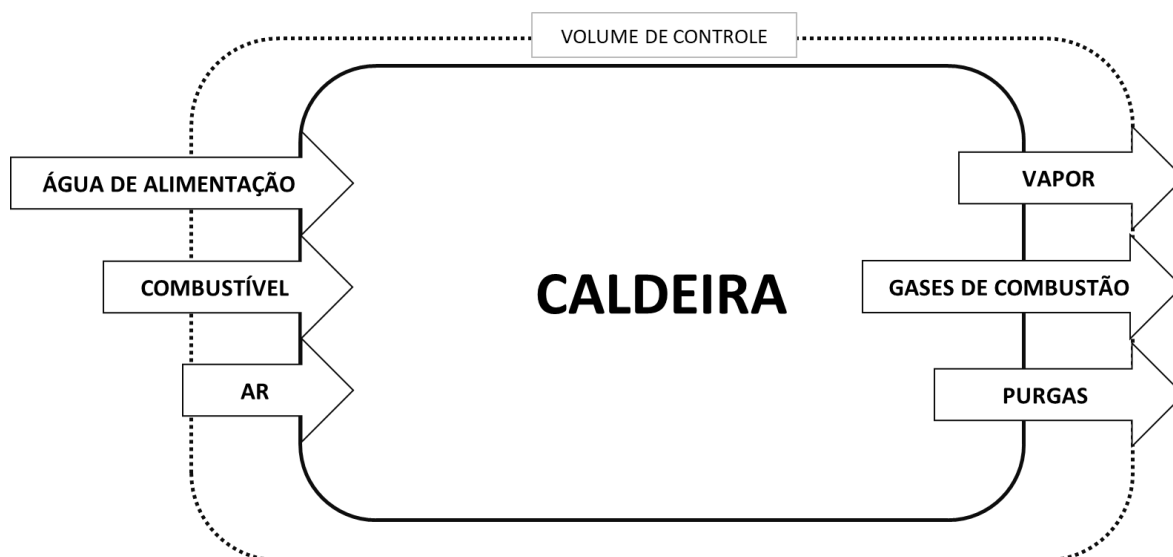


Figura 13– Volume de controle para o balanço de massa e de energia.

Fonte: Próprio autor.

Como não há mistura entre os fluídos, o balanço de massa de água na caldeira seguindo o balanço proposto é dado pela equação (21).

$$\sum me = \sum ms \quad (21)$$

Onde da equação (21) temos $\sum me =$ vazão mássica de *água de alimentação* e $\sum ms =$ vazão mássica (*Vapor condensado + água retirada na purga*)

3.1.3.2 Eficiência térmica da caldeira

Segundo Bazzo (1995), a análise da eficiência térmica de um gerador de vapor requer dados coletados em locais específicos, contabilizando todas as taxas mássicas das correntes e de energia envolvidas no processo.

Método direto

Para tornar o método direto mais confiável foram realizados vários experimentos e utilizados os valores médios encontrados. A Tabela (7) mostra os dados utilizados para a obtenção da eficiência pelo método direto.

Tabela 7 – Resultados de eficiência obtidos pelo método direto

Descrição	Variável	Valor	Unidade
Entalpia do vapor	h_v	2.784,82	kJ/kg
Entalpia do água a 80°C	h_a	334,88	kJ/kg
Massa de água que entra	\dot{m}_a	3,90	kg/s
Massa de combustível	\dot{m}_c	1,47	kg/s
Poder calorífico	P_{ci}	7.946,55	kJ/kg

Fonte: Próprio autor.

Método indireto

Para avaliar o rendimento térmico pelo método indireto é necessário conhecer a energia fornecida ao sistema gerador de vapor. A Tabela 8) mostra os dados obtidos para quantificação da energia que entra no sistema.

Tabela 8 - Energia fornecida ao sistema de geração de vapor

Descrição	Variável	Valor	Unidade
Teor de umidade do ar	W_{ar}	0,012	kg/kg ar seco
Massa de ar	\dot{m}_{ar}	15,90	kg/s
Entalpia do ar	Δh_{ar}	195,88	kJ/kg

Fonte: Próprio autor.

Para encontrar a perda de calor pela chaminé é necessário determinar as entalpias dos gases utilizando as equações (13) a (16). A temperatura dos gases de combustão utilizadas nos cálculos das entalpias é encontrada utilizando um analisador de gases de combustão, disponível na empresa conforme imagem (1). Os dados contidos na imagem (1) são ilustrativos. A temperatura encontrada para os gases foi de 120°C.



Imagem 1- Analisador dos gases.
Fonte: Próprio autor.

Para o cálculo da vazão de ar estequiométrico é utilizado a equação (17), as concentrações de CO₂, O₂ serão encontradas através do analisador de gases. Vale ressaltar que a caldeira em estudo não possui sopradores de fuligem e nem nebulização na injeção do combustível, o que faz com que as variáveis V_n e V_{sf} sejam nulas.

Para calcular as parcelas de perda de calor pelos gases de combustão são utilizados os dados de entrada estão mostradas na Tabela (9).

Tabela 9 - Perdas de calor pelos gases de combustão

Descrição	Variável	Valor	Unidade
Porcentagem de carbono	c	22,05	%
Porcentagem de nitrogênio	N	0,45	%
Coeficiente de excesso de ar	<i>e</i>	1,56	-
Entalpia do dióxido de carbono	Δh_{co}	172,83	kJ/kg
Entalpia do nitrogênio	Δh_{N_2}	164,27	kJ/kg
Entalpia do ar	Δh_{ar}	160,81	kJ/kg
Umidade do combustível	<i>w</i>	0,55	kg/kg cb
Relação vapor de nebulização do combustível	<i>Vn</i>	0	kg/kg cb
Teor de umidade do ar	<i>War</i>	0,01	kg/kg ar seco
Entalpia do vapor na pressão atm.	Δh_{vp}	195,88	kJ/kg
Relação vapor sopradores de fuligem/combustível	<i>Vsf</i>	0	kg/kg cb

Fonte: Próprio autor.

Para encontrar a perda de calor pelas cinzas é necessário determinar o teor delas, em kg (cinzas) / kg (combustível). Para isso, são coletadas as cinzas provenientes da queima do combustível utilizado uma caçamba com a sua massa conhecida, em um intervalo de tempo pré-definido.

A Tabela (10) apresenta os valores coletados para determinar a perda de calor pelas cinzas.

Tabela 10 - Perda de calor pelas cinzas

Descrição	Variável	Valor	Unidade
Vazão mássica combustível	<i>m_{cb}</i>	1,47	kg/s
Porcentagem (massa)	<i>z</i>	0,02	%
Entalpia das cinzas	Δh_{cz}	1170	kJ/kg

Fonte: Próprio autor.

Conforme Bazzo (1995), é importante contabilizar as perdas por inqueimados no balanço de energia. Isso é feito medindo-se o teor de CO nos gases da chaminé e o conteúdo de carbono não queimado arrastado para o cinzeiro. Para este projeto, a perda de calor por combustão parcial é determinada conhecendo-se a proporção de carbono nas cinzas.

A Tabela (11) mostra os valores encontrados para os dados de entrada que auxiliaram no cálculo da perda de calor por combustão parcial.

Tabela 11 - Perda de calor por combustão parcial

Descrição	Variável	Valor	Unidade
Porcentagem de monóxido de carbono em volume;	%CO	12,00	%
Entalpia do carbono	Δhc	-	(kJ/kg);
Volume de gases na base seca	V_{gs}	12	(m ³ /kg cb).
Relação carbono não queimado/combustível	c_{nq}	0,005	(kg/kg cb);

Fonte: Próprio autor.

Neste trabalho, a perda de calor pelas purgas é calculada com base na equação (23), onde a vazão mássica do condensado esvaziado é contabilizada utilizando os valores fornecidos pelas curvas dos purgadores. A entalpia da água foi encontrada utilizando o *software* CAT3.

A Tabela (12) mostra o valor utilizados para o cálculo da perda de calor referente às purgas.

Tabela 12 - Perda de calor pelas purgas.

Descrição	Variável	Valor	Unidade
Vazão mássica de água purgada	\dot{m}_{pg}	0,70	(kg/s);
Entalpia do líquido saturado	h_{ls}	798,47	(kJ/kg);
Entalpia da água de alimentação	h_a	251,92	(kJ/kg).

Fonte: Próprio autor.

Para determinar a perda de calor por radiação e convecção é considerado o pior caso proposto por Bazzo, que corresponde a 1% do calor total que entra na caldeira.

3.1.4 Observar e priorizar problemas

Para priorizar os problemas no estudo, foi avaliado o impacto no consumo de combustível que seria gerado pelos subgrupos “Alimentação”, “produção de vapor” na caldeira, “distribuição” de vapor, “consumo final” e “retorno de condensado”, apresentados no fluxograma da Figura 9 - **Fluxograma do sistema de geração de vapor.**

3.1.5 Observar e priorizar causas.

Para identificar as causas raízes primeiramente foi realizado o *Brainstorm*, representado no Quadro (3), juntamente com os operadores, técnicos e supervisores

da área operacional do sistema gerador de vapor. O *Brainstorm* realizado foi dividido em setores, conforme os subgrupos criados. As possíveis causas levantadas pelo método do *Brainstorm* foram validadas pela matriz de teste. Após o teste para ver se as causas são prováveis ou não, é realizado o teste dos “Por quês”, para identificar a causa raiz do problema.

Após levantar as causas raízes é preciso identificar e priorizar as soluções mais eficientes para cada problema.

3.1.6 Identificar e priorizar soluções

Para identificar as melhores soluções foi utilizada uma matriz de priorização de soluções, que avalia três parâmetros, benefício, investimento necessário e operacionalidade, a fim de analisar a viabilidade de execução das soluções propostas, conforme Quadro (3).

CRITÉRIO	1	2	3
BENEFÍCIO	Poucos benefícios para o processo	Médios benefícios para o processo	Altos benefícios para o processo
INVESTIMENTO NECESSÁRIO	Necessita entrar no orçamento anual (diretoria)	Necessidade de algum investimento (gerencial)	Não depende de investimento
OPERACIONALIDADE	Existe dificuldade (aprovação depende da alta administração e requer mudança cultural)	Média facilidade para colocar em prática / requer nova tecnologia e mudança de hábitos	Grande facilidade para colocar em prática / aplicação imediata no processo

Quadro 3 – Critérios matriz priorização.

Fonte: Próprio autor.

Com os critérios apresentados no Quadro (3), são avaliadas as soluções apresentadas para eliminar ou inibir as causas fundamentais dos problemas, após isso é realizado o plano de ação utilizando a matriz 5W2H.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção os resultados obtidos são apresentados e discutidos. Além disso se faz uma análise das ações tomadas e das dificuldades encontradas no desenvolvimento da fase “PLAN” do projeto, conforme as etapas utilizadas nessa fase.

4.1 CONHECIMENTO DO PROCESSO

No estudo de cada subgrupo criado na etapa conhecimento do processo, foram observados vários aspectos que necessitavam de melhorias, envolvendo desde ações de manutenção até a adequação do sistema, como a insuficiência no número de purgadores e de isolamento térmico, e umidade inadequada do cavaco de madeira.

Destaca-se a alta umidade do combustível utilizado no gerador de vapor (cerca de 55%). Bizzo (2003), considera valores de umidade adequados abaixo de 40%, fazendo com que o poder calorífico do cavaco de madeira não caia muito, e dessa forma, aumente excessivamente o consumo de combustível na caldeira durante a produção de vapor.

4.2 IDENTIFICAÇÃO DOS PROBLEMAS E METAS

Para identificar os possíveis problemas no sistema de produção de vapor, neste trabalho adota-se o parâmetro de rendimento ou eficiência térmica da caldeira, avaliado pelos métodos direto e indireto.

Para tornar os valores encontrados no cálculo da eficiência pelo método direto mais confiáveis, fez-se várias medidas utilizando para os cálculos os valores médios. A eficiência encontrada pelo método direto está representada na Tabela (13).

Tabela 13 – Eficiência pelo método direto.

Descrição	Variável	Valor	Unidade
Eficiência pelo método direto	η	82	%

Fonte: Próprio autor.

Nota-se que a temperatura da água de entrada na caldeira está com um valor abaixo do ideal e disponível no sistema de geração de vapor, o que faz com que a entalpia utilizada no cálculo de eficiência pelo método direto seja menor e o consumo de combustível aumente.

O rendimento térmico pelo método indireto é encontrado avaliando as perdas de calor envolvidas no sistema. Utilizando também a energia fornecida ao sistema.

A energia fornecida ao sistema gerador de vapor é mostrada na Tabela (14).

Tabela 14 – Energia Fornecida ao sistema.

Descrição	Variável	Valor	Unidade
Energia que entra no Sistema	E_1	11990	kW

Fonte: Próprio autor.

Utilizando os valores obtidos de perdas de calor e com o auxílio da equação (9) obteve-se uma eficiência térmica de 77%, sendo esta inferior à calculada pelo método direto. A Tabela (15) apresenta a totalização das perdas de calor e a eficiência encontrada.

Tabela 15 - Totalização das perdas de calor.

Descrição	Variável	Valor	Unidade
Eficiência	η	77	%
Perda de calor pelos Gases secos	q_{gs}	1.556,01	kW
Perda de calor pela umidade dos gases	\dot{q}_v	219,65	kW
Perdas de calor pelas cinzas	\dot{q}_{cz}	34,45	kW
A perda de calor por combustão parcial	\dot{q}_{cp}	448,92	kW
Calor sensível perdido com as purgas	\dot{q}_{pg}	385,23	kW
Perdas de calor pela radiação	\dot{q}_{cp}	117,79	kW
Total de perdas	\dot{q}_{TOTAL}	2.762,04	kW

Fonte: Próprio autor.

Os resultados dos cálculos de rendimento térmico do gerador de vapor pelo método direto (82%) e pelo método indireto (77%) apresentaram-se levemente abaixo do valor médio (85%) indicado na literatura (Bazzo, 1995).

Devido à umidade alta no combustível, o poder calorífico encontrado está muito abaixo do ideal, fazendo com que o consumo de cavaco aumente consideravelmente.

O gerador de vapor necessita de algumas manutenções e reparos, o que levará à diminuição de calor, contribuindo para o aumento da eficiência térmica. Com o baixo rendimento do gerador de vapor, os custos de produção e operação se

elevam, pois, para produzir a mesma quantidade de vapor, deverá ser utilizada uma maior quantidade de combustível.

Como a caldeira possui economizador e pré-aquecedor de ar, a caldeira já aproveita a energia dos gases de combustão.

O cavaco de madeira que entra na fornalha não tem uma granulometria padrão, apresentando uma grande variação na geometria e tamanho do combustível. Ao diminuir o tamanho do cavaco, aumenta-se a área de contato com o ar de combustão, fazendo com que a queima ocorra mais rápida e mais uniforme.

Analisando-se a granulometria das cinzas, nota-se um tamanho excessivo de partícula, evidenciando uma queima incompleta. Isto pode ser causado pela falta de regulagem do excesso de ar que entra na câmara de combustão.

A regulagem de excesso de ar é extremamente importante para garantir uma combustão estável e completa. O valor encontrado para o excesso de ar utilizando o medidor de gases foi de 14,1% de oxigênio, representando 56% de excesso de ar inflado na câmara de combustão. Este valor está dentro da faixa sugerida por Bazzo (1995).

Bazzo (1995) estima que as perdas de calor pelas purgas normalmente representam uma parcela pequena em comparação ao total das perdas. Porém, como o número de purgas realizadas na caldeira em estudo é elevado, essa perda torna-se considerável, e impactante no total das perdas de calor do sistema.

4.3 OBSERVAR E PRIORIZAR PROBLEMAS.

O impacto causado pela umidade do combustível no consumo final foi analisado utilizando a equação (7), variando o poder calorífico do combustível conforme a equação (5) e utilizando a eficiência de 82%, conforme valor encontrado pelo método direto para a caldeira em estudo.

O Gráfico (5) mostra a variação do consumo com a variação da umidade do combustível.

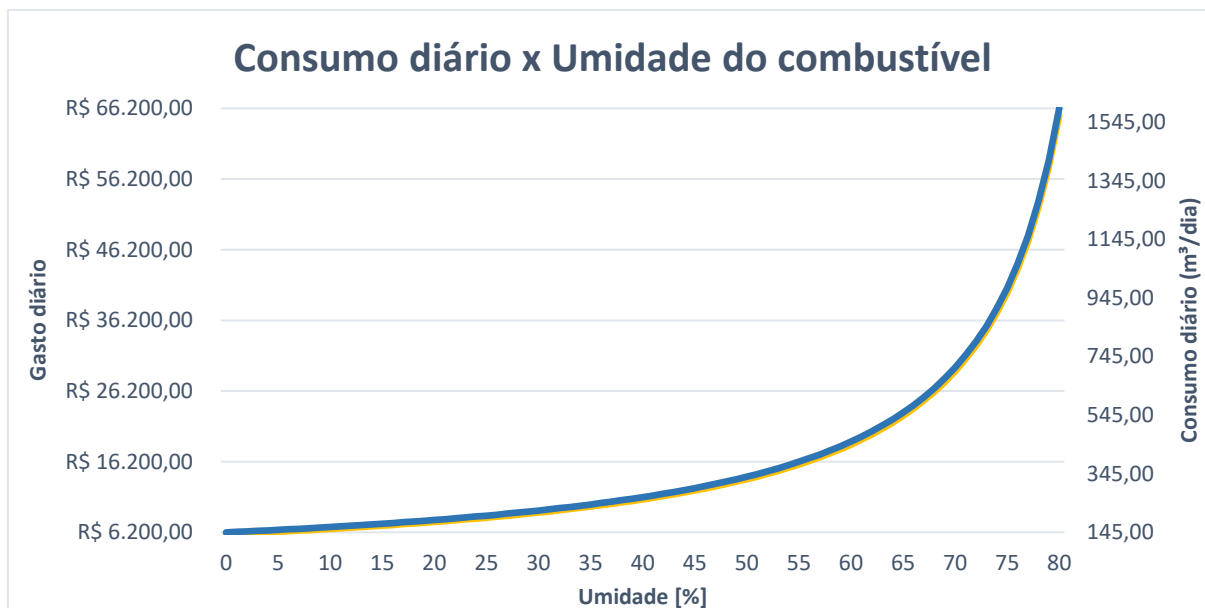


Gráfico 5 – Consumo diário de combustível x umidade

Fonte: Próprio autor.

No Gráfico (5) é possível notar que, com o aumento da umidade, o consumo e os gastos com combustível incrementam-se mais intensamente a partir do valor de 40% de umidade, e que, a partir de 55% de umidade, torna-se inviável a utilização desse combustível na caldeira.

O Gráfico (6) - mostra a variação do consumo de combustível com a variação da eficiência do gerador de vapor.

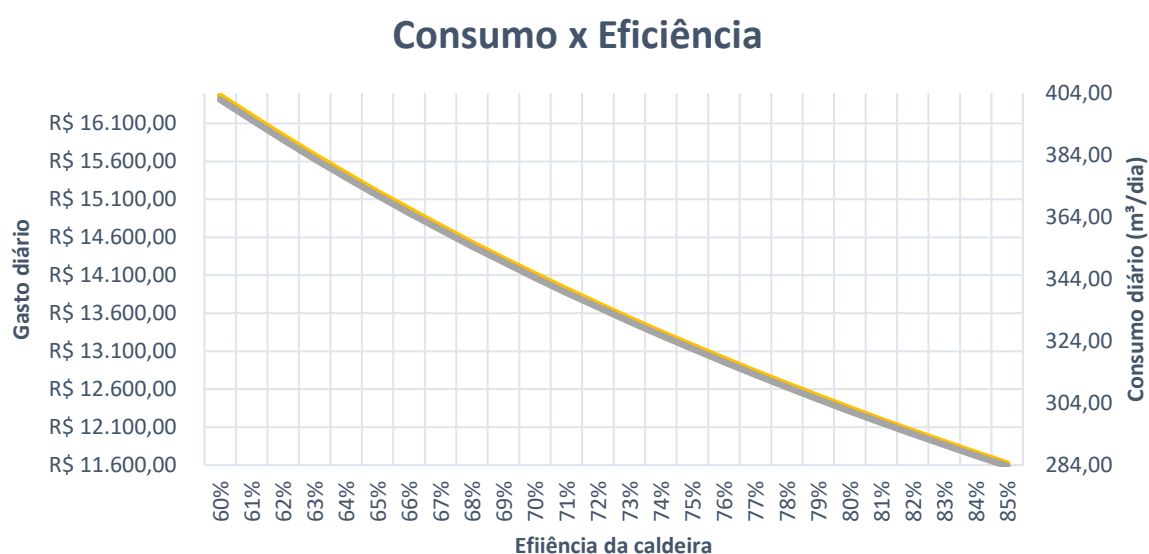


Gráfico 6 - Consumo diário x Eficiência do gerador de vapor

Fonte: Próprio autor.

Tendo a empresa o objetivo de diminuir o consumo de cavaco para menos de 300 metros cúbicos por dia, conforme analisado no Gráfico (6), o rendimento térmico da caldeira deverá estar sempre acima de 82%.

A influência da eficiência no consumo de combustível é avaliada utilizando a Equação (7), com os dados de vazão de vapor e entalpia do vapor e da água da caldeira em estudo.

A variação do consumo de combustível devido a variação da temperatura de entrada de água é mostrada no Gráfico (7).

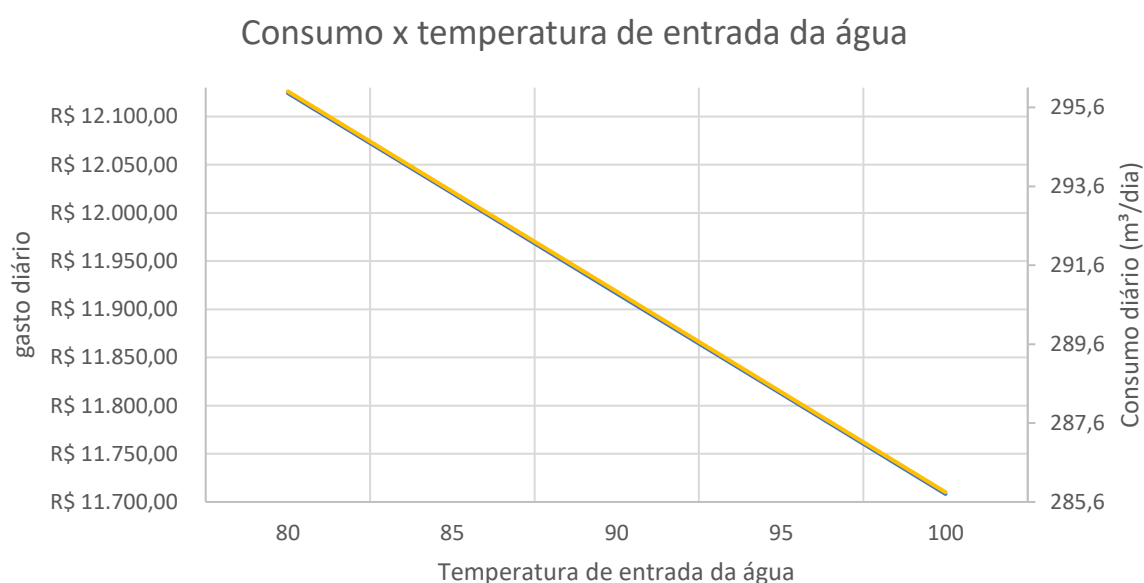


Gráfico 7 - Consumo diário x temperatura de entrada da água.

Fonte: Próprio autor.

O impacto que a temperatura de entrada da água na caldeira produz é ilustrado no Gráfico (7), quanto maior for a sua temperatura, maior será a entalpia da água e menor será o consumo de combustível. Esse comportamento se molda de maneira linear.

Com o cenário atual e, comparando com o que seria considerado ideal, é possível levantar o impacto no consumo de cada subgrupo. Utilizando o Gráfico (8) (Gráfico de Pareto), apresenta-se um comparativo entre os valores possíveis de redução do consumo, a fim de priorizar os problemas a serem resolvidos.

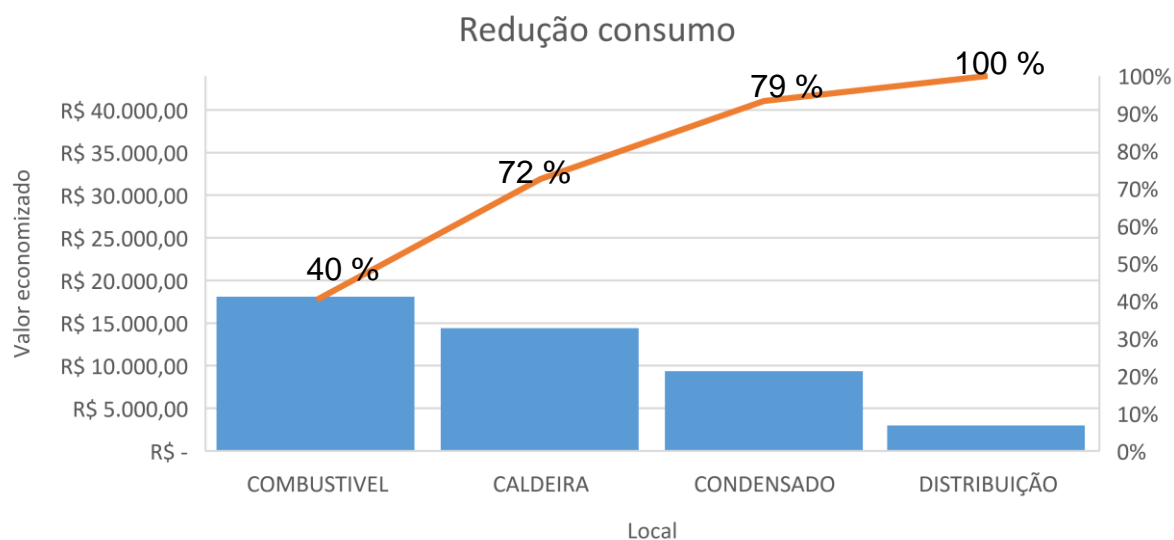


Gráfico 8 – Gráfico de Pareto - redução de consumo.
Fonte: Próprio autor.

Utilizando o princípio de Pareto onde 80% das consequências advêm de 20% das causas será priorizado as três primeiras colunas do Gráfico (8), sendo Combustíveis, Caldeira e Condensado.

Nota-se que a unidade contida no combustível é responsável pela maior influência no custo operacional, já que ela atua diretamente na redução do poder calorífico do combustível e contribui para a redução da eficiência da caldeira através da perda excessiva de calor pela chaminé.

4.3.1 Observar e priorizar causas

As causas apontadas no *Brainstorm* foram enumeradas e elas serão referenciadas posteriormente através desses números nos testes de hipótese e pelo método dos “Porquês” conforme representado no Quadro (4).

Identificar e Priorizar as Causas – <i>Brainstorm</i>		
Nº	<i>Brainstorm</i>	Setor
1	Chuva;	Cavaco
2	Condições do cavaco;	
3	Enlonação incorreto dos caminhões;	
4	Estocagem no pátio dos fornecedores;	
5	Pouco tempo de estocagem no pátio da empresa;	
6	Incrustação nos tubos do gerador de vapor;	Eficiência
7	Umidade do cavaco	
8	Queima incompleta;	
9	Queima irregular;	
10	Temperatura da água de alimentação;	
11	Temperatura do ar de combustão;	
12	Tempo de descarga de fundo;	Condensado
13	Perda de calor em tubulações do condensado;	
14	Mistura água fria e água quente;	
15	Vazão baixa do condensado para a caldeira;	
16	Temperatura baixa do condensado.	

Quadro 4 – Brainstorm - identificação e priorização de causas.

Fonte: Próprio autor.

As possíveis causas levantadas pelo método do *Brainstorm* foram validadas pelo Matriz de teste e justificativa, conforme ilustrado no Quadro (5).

Nº	Provável?	Teste / justificativa
1	Sim	O cavaco absorve rapidamente a umidade ambiente, e está armazenado ao ar livre,
2	Sim	Empresas cortam as árvores em campo e trazem direto, sem realizar secagem.
3	Sim	Empresas utilizam lona telada.
4	Sim	Algumas empresas não estocam
5	Sim	Barracão não está apto
6	Não	Visualização
7	Sim	A umidade está acima do ideal. Banco de dados. Teste laboratório
8	Sim	Análise das cinzas, possui grande granulometria. Grande perda de calor pela chaminé
9	Sim	Medido com o aparelho
10	Sim	Histórico supervisorio
11	Não	Há uma boa troca de calor entre os gases de combustão e o ar de entrada.
12	Sim	Calcular o tempo ideal.
13	Sim	Tubulações antigas, sem isolamento, e possivelmente furadas
14	Sim	Tubulações antigas, sem isolamento, e possivelmente furadas
15	Sim	Em alguns momentos a vazão não é suficiente.
16	Não	Medido com o aparelho, e verificado a temperatura de 96°C

Quadro 5 – Matriz Teste / justificativa.

Fonte: Próprio autor.

Após o teste para ver se as causas são prováveis ou não, é realizado o teste dos “Porquês”, para identificar a causa raiz do problema, conforme Quadro (6).

Nº	1º Por Quê	2º Por Quê	3º Por Quê	4º Por Quê	5º Por Quê
1	O cavaco absorve a umidade	Fica exposto ao tempo	Ausência da estrutura do barracão	O barracão está interditado	Falta de recursos.
2	As empresas cortam as madeiras e logo trazem o cavaco para a unidade	Logística da empresa	Poucas empresas fornecem cavaco.		
3	Utilizam rede ao invés de lona	Nunca foi cobrado a utilização da lona	Falta de padrão.		
4	As empresas cortam as madeiras e logo trazem o cavaco para a unidade	Não tem estrutura para armazenar.	Empresas pequenas.		
5	Não temos espaço suficiente para 10 dias.	Falta recurso.			
7	Armazenamento incorreto	Falta de controle.	Não há padrão.		
8	Cinzas com granulometria grande.	Regulagem ar combustível e tempo de queima irregular	Controle dos parâmetros.	Falta de padrão.	
9	Excesso de oxigênio e co2 na chaminé	Regulagem ar combustível e tempo de queima irregular	Controle dos parâmetros.	Falta de padrão.	
10	Água entra abaixo da temperatura ideal	Não utilização do retorno de condensado.	Perda de calor nas tubulações ou não utilização.		
12	Qualidade da água.	Falta capacidade nos poços.	Meta outorga.		
13	Tubulações furadas e sem isolamento térmico	Falta projeto de melhoria.			
14	Falta de procedimento				
15	Não utilização da capacidade total do tanque	Água jogada fora	Falta projeto de melhoria.		

Quadro 6 – Teste dos porquês.

Fonte: Próprio autor.

Nota-se que dentre as causas identificadas, três delas se destacam: a falta de padrão operacional, a falta de recursos para solucionar problemas de manutenção e infraestrutura, e o fato de ter poucas opções de fornecedores de cavaco na região.

4.3.2 Identificar e priorizar soluções

Com as causas raízes levantadas é preciso identificar e priorizar as soluções mais eficientes para cada problema. O Quadro (7) apresenta a ordem que as ações devem ser realizadas.

Nº	CAUSA FUNDAMENTAL	SOLUÇÃO	BENEFÍCIO	INVESTIMENTO	OPERACIONALIDADE	SOMA	PRIORIZAR?
8	Queima incompleta	Avaliar, e definir padrão.	3	3	3	9	Sim
14	Mistura água fria e água quente	Realizar um padrão	3	3	3	9	Sim
3	Enlonação incorreto	Alinhar com os fornecedores	2	3	3	8	Sim
4	Estocagem no pátio dos fornecedores	Alinhar com os fornecedores	2	3	2	7	Sim
6	Incrustação dos tubos	Limpeza da tubulação	2	3	2	7	Sim
2	Cavaco verde	Alinhar com os fornecedores e melhorias no barracão	3	1	2	6	Sim
9	Queima irregular	Realizar um padrão	1	3	2	6	Sim
16	Temperatura baixa do condensado	Realizar um projeto de melhoria	3	1	2	6	Sim
5	Estocagem no pátio da BRF	Melhorias no barracão	3	1	1	5	Sim
7	Cavaco úmido	Melhorias no barracão e alinhar com os fornecedores	3	1	1	5	Sim
1	Chuva	Melhorias no barracão	3	1	1	5	Sim
13	Perda de Calor tubulações do condensado	Realizar um projeto de melhoria	1	1	3	5	Sim
15	Vazão baixa do condensado para a caldeira	Realizar um projeto de melhoria	2	1	2	5	Sim
10	Temperatura da água	Utilizar a água do 14b	1	1	2	4	Sim
12	Tempo de descarga de fundo alta	Melhorar a qualidade da água	1	1	2	4	Não
11	Temperatura do ar	Instalar um novo pré-aquecedor de ar	1	1	1	3	Não

Quadro 7 – Matriz de priorização.

Fonte: Próprio autor.

As soluções levantadas devem ser todas atendidas, mas a ordem de execução foi ordenada comparando a facilidade de executar a ação e o benefício que a ação proposta trará ao sistema gerador de vapor.

4.3.3 Elaborar plano de ação

Com a matriz de priorização definida é realizado o “Plano de ação”, conforme o Quadro (8). Utilizando a ferramenta de qualidade 5w2h foram propostas possíveis ações a realizar e que auxiliaram na melhoria da eficiência da caldeira e na redução do consumo.

O que?	Por que?	Onde?	Como?	Quem?	Quando?	Quanto?
Definir um padrão com vazões mássicas de combustível e ar.	Reduzir perda de calor por queima incompleta	Caldeira	Variando as vazões mássicas e analisando resultado as cinzas.	Operadores	01/08/2018	R\$ -
Definir um padrão para utilização do condensado.	Reduzir Consumo de combustível para aquecer água.	Caldeira	Utilizando sempre maior quantidade possível do condensado	Operadores	01/08/2018	R\$ -
Enlonamento correto	Reduzir umidade do combustível	Fornecedores	Solicitar aos fornecedores um Enlonamento correto	Supervisor	01/08/2018	R\$ -
Armazenar cavaco com os fornecedores	Reduzir umidade do combustível	Fornecedores	Solicitar aos fornecedores	Supervisor	01/08/2018	R\$ -
Realizar limpeza nas tubulações	Melhorar a troca térmica	Caldeira	solicitar parada na caldeira e chamar empresa com hidro jato	Operadores	01/08/2018	R\$ 2.500,00
Aumentar tempo de estocagem	Secar cavaco verde	Caldeira	aumentando tempo de estocagem	Operadores	01/08/2018	R\$ -
Definir um padrão com vazões mássicas de combustível e ar.	Reduzir perda de calor por queima irregular	Caldeira	Variando as vazões mássicas e analisando resultado dos medidores de gases.	Operadores	01/08/2018	R\$ -
Aumentar barracão de estocagem	Reduzir umidade do combustível	Caldeira	Projeto de investimento	Supervisor	01/04/2019	R\$ 150.000,00
Reformar tubulações de condensado	Reduzir Consumo de combustível para aquecer água.	Caldeira	Realizar projeto de investimento.	Supervisor	01/08/2018	R\$ 35.000,00
Reduzir o excesso de ar na combustão.	Reduzir ao máximo perda de calor pela chaminé.	Fornalha	Controlando a queima e verificando a emissão de gases na chaminé com o analisador de gases.	Alan E Operadores	01/08/2018	R\$ -
Fazer uma limpeza nas superfícies de transferência de calor da caldeira.	Permitir uma transferência de calor mais efetiva dos gases de combustão para a água.	Tubulações caldeira.	Montar um cronograma de limpeza. Programar um dia de parada e para realizar a limpeza.	Operadores	01/08/2018	R\$ 1500,00
Instalar um trocador de calor, pra recuperar energia térmica.	Reduzir a perda de energia.	Descarga de fundo da caldeira	Instalar um trocador de calor para aproveitar a energia térmica disponível nas descargas de fundo da caldeira.	Alan, Diego E Douglas	01/08/2018	R\$ 13.000,00
Minimizar as descargas de fundo aperfeiçoando o tratamento de água.	Reduzir as descargas de fundo e consequentemente, reduzir a perda de energia.	ETA	Reduzir a quantidade total de sólidos dissolvidos na água da caldeira.	Alan E Malaquias	01/08/2018	R\$ -

Quadro 8 – Plano de ação, continua.

Fonte: Próprio autor.

O que?	Porque?	Onde?	Como?	Quem?	Quando?	Quanto?
Otimizar a recuperação de condensado.	Economizar energia térmica e produtos químicos utilizados no tratamento da água.	Tanque de condensado	Reduzir a quantidade de água de alimentação adicionada ao sistema utilizando o retorno do condensado.	Alan, Diego, Malaquias E Douglas.	01/08/2018	R\$ -
Utilizar o condensado de alta pressão nas linhas para produzir vapor de baixa pressão.	Economizar energia térmica.	Linhas de condensado	Utilizar a energia disponível no condensado.	Alan, Thiago E Douglas	01/08/2018	R\$ -
Implementar a rota de eficiência.	Checar pontos cruciais das linhas de vapor.	Caldeira, linha de Vapor.	Treinando a equipe.	Alan e Operadores	01/08/2018	R\$ -
Eliminar vazamentos de vapor.	Minimizar as perdas de calor	Linhas de vapor e condensado	Realizar a rota de eficiência	Alan, Operadores E Douglas	01/08/2018	R\$ -
Verificar isolamentos das linhas de vapor.	Minimizar as perdas de calor	Linhas de vapor e condensado	Realizar a rota de eficiência	Alan Operadores E Douglas	01/08/2018	R\$ -
Implementar programa de manutenção dos filtros e purgadores.	Permitir uma operação eficiente de transferência de calor nos equipamentos de uso final do vapor.	Linhas de vapor e condensado	Realizar a rota de eficiência	Alan E Operadores	01/08/2018	R\$ -
Controlar os indicadores técnicos da geração de vapor.	Evitar desperdícios.	Supervisão da caldeira	Gerar históricos no supervisão para controle mais preciso dos indicadores.	Operadores e automação	01/08/2018	R\$ -

Quadro 9 – Plano de ação.

Fonte: Próprio autor

Destaca-se as ações que serão realizadas pela operação, que não dependem de investimento, essas ações devem ser priorizadas e concluídas no menor tempo possível.

Na realização do plano de ação é importante que as datas das ações não entrem em conflito com as de outras atividades já programadas.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi levantado foi desenvolvido a primeira fase do método PDCA, a fase “PLAN” com o objetivo de reduzir o consumo de combustível durante a produção de vapor em uma caldeira situada em uma empresa alimentícia na cidade de Paranaguá – PR. A caldeira é do modelo mista da empresa *Steam Master*, opera com capacidade de produção de 12.000 kg/h, sendo sua pressão de trabalho de 12 bar.

A caldeira em estudo apresentou uma eficiência de 82% com método direto e 77% com o método indireto. As diferenças encontradas nos valores são justificadas pelo fato de que a eficiência pelo método direto está sujeita a variações operacionais temporais que afetam os cálculos.

Independentemente do método de cálculo usado, a eficiência térmica apresentada é considerada boa, já que a eficiência média para caldeiras desse tipo é de aproximadamente 85%.

O maior contribuinte para um aumento no consumo do combustível é a umidade do cavaco de madeira, pois ela está ligada diretamente com a diminuição do poder calorífico do combustível e com a perda excessiva de energia térmica pelos gases de combustão.

Com alguns ajustes operacionais e pequenas manutenções é possível melhorar a eficiência da caldeira, e assim economizar mais combustível.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se realizar uma análise química do combustível e melhorar a precisão das medidas para uma melhor aproximação das eficiências calculadas. Recomenda-se concluir as fases “Do” “Check” e “Act” afim de avaliar a efetividade real das ações sugeridas no plano de ação desenvolvidas na fase *Plan*.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Silvio, **Integração das Ferramentas da Qualidade ao PDCA e ao Programa Seis Sigmas**. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços Ltda., 2006.

ALTAFINI, Carlos R. **Curso de engenharia mecânica – disciplina de máquinas térmicas – apostila sobre caldeiras** – Universidade de Caxias do Sul, 2002.

ANDRADE, Alan Sulato. **Máquinas Térmicas**. Curitiba, 2011. 40 slides, color. Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasalan/>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

BAZZO, E. **Geração de vapor**. 2 ed. Florianópolis: UFSC, 1995.

BIZZO, W.A. **Apostila Geração, Distribuição e Utilização de vapor**. Unicamp, 2003.

BOND, Maria Thereza. **Qualidade total: o que é e como alcançar**. Edição 1. Curitiba: Inter-saberes, 2012.

CORTEZ, L.A.B.; Lora, E.E.S.; Gómez, **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

FALCONI, Vicente C. - **Gerenciamento da Rotina do Trabalho do Dia-a-Dia**. Belo Horizonte. Editora de Desenvolvimento Gerencial. 2002.

FALCONI, Vicente, **TQC – Controle da Qualidade Total**, Fundação Cristiano Otoni/Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2009.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 3a edição, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., R. J. 1990.

JACKSON, Janes J.: **Steam Boiler Operation – principles and practice**. Prentice-Hall, Inc., EnglewoodsCliffs, N.J., 1980.

JURAN, Joseph M. **Controle de qualidade: componentes básicos da função qualidade**. São Paulo: Editora Mcgraw-Hill/Makron, 1991.

KLOCK, U. Muniz, G.I.B.; Andrade, A S.; Anzaldo, J. H. **Química da Madeira**. 3ª. Ed. Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná - Fupef , 2005. 86p.

LORA, Eduardo Silva, **Biomassa para Energia, Front Cover**. Unicamp, 732 pg. 2008.

MARIANI, C. A. **Gestão pela Qualidade e Produtividade**; Curso de Graduação em Administração. Apucarana: FAP- Faculdade de Apucarana, 2005.

MARIANI, C.A; Pizzinatto, N.K. ; Farah, O.E. **Método Pdca e Ferramentas da Qualidade no Gerenciamento de Processos Industriais**: Um estudo de caso. Artigo: XII SIMPEP - Bauru, SP, Brasil, novembro de 2005.

MARTINELLI JR, Luiz C. **Geradores de vapor**. UNIJU: Campus Panambi, 2002. Disponível em <<http://www.saudeetrabalho.com.br/download/gera-vapor.pdf>>. Acesso 15/08/2013

MILITÃO, Nilson R., Renato de A. **Tipos e aplicações de caldeiras. Fabricação e Montagem de Caldeiras e Trocadores de Calor**. Escola Politécnica – Deptº de Engenharia Mecânica EPUSP-PROMIMP, 2008.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. **Eficiência Energética no uso do vapor**. Eletrobrás, Rio de Janeiro, 2005.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. **Manual prático - Eficiência Energética no uso do vapor**. Eletrobrás, Rio de Janeiro, 2002.

NR-13, Norma Regulamentadora: **Caldeiras e Vasos de Pressão**. Disponível em: <http://portal.mte.gov.br/data/files/FF8080812BE914E6012BEF2695817E43/nr_13.pdf>. Acesso em 12/04/2018.

OLIVEIRA, Michel, Maria R. S. O. **Análise do gerenciamento de riscos de um sistema de caldeira e vaso de pressão** - estudo de caso. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 31., 2011, Belo Horizonte.

ORIBE, C. Y. **PDCA: Origem, conceitos e variantes dessa ideia de 70 anos.** Disponível em <http://www.ubq.org.br/conteudos/detalhes.aspx?IdConteudo=399>. Acesso em 18 abril. 2018.

Özisik, M. N.: **Transferência de Calor.** Editora Guanabara Koogan S.A., 1990.

PERA, H., **Geradores de Vapor de Água.** EPUSP, 1966.

PINHEIRO, Paulo Cesar C. **Caldeiras.** UFMG, 2012. Disponível em <<http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/eng033b/Apresentacoes/7-Caldeira.pdf> >. Acesso em 12 de abril de 2018.

PALADINI, Edson P. **Gestão da qualidade: teoria e prática.** São Paulo: Editora Atlas, 2004.

PONCE, R.H. & WATAI, L.T. **Manual de secagem da madeira.** São Paulo, IPT/STI, 1985. 72p.

SCHÜRHAUS; Patric, **Produtos E Propriedades Energéticas Da Madeira,** Centro Universitário De União Da Vitória; Engenharia Industrial Da Madeira – 2007.

WERKEMA, M. C. C. **As ferramentas da qualidade no gerenciamento de processos,** Belo Horizonte, Fundação Christiano Ottoni, 1995a, 108p. v.1.