



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



PEDRO HENRIQUE CARVALHO SANTOS

**Estudo de caso: Readequação do sistema de geração de vapor em
uma empresa automotiva**

OURO PRETO - MG
2021

PEDRO HENRIQUE CARVALHO SANTOS

pedro_carvalho96@hotmail.com

**Estudo de caso: Readequação do sistema de geração de vapor em
uma empresa automotiva**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Ouro Preto como
requisito para a obtenção do título de
Engenheiro Mecânico

Professor orientador: Edson Alves Figueira Júnior, Dsc.

OURO PRETO – MG

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S237e Santos, Pedro Henrique Carvalho .
Estudo de caso [manuscrito]: readequação do sistema de geração de vapor em uma empresa automotiva. / Pedro Henrique Carvalho Santos. - 2021.
63 f.

Orientador: Prof. Dr. Edson Alves Figueira Júnior.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Sistema de vapor - Geração de vapor. 2. Indústria automobilística.
3. Combustível - Consumo. I. Júnior, Edson Alves Figueira. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Pedro Henrique Carvalho Santos

Estudo de caso: Readequação do sistema de geração de vapor em uma empresa automotiva

Monografia apresentada ao Curso de de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 20 de Abril de 2021

Membros da banca

[DSc] - Edson Alves Figueira Junior - Orientador (UFOP)

[DSc] - Luis Antônio Bortolaia, - (UFOP)

[DSc] - Cláudio Márcio Santana, - (UFOP)

Edson Alves Figueira Junior, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 26/04/2021



Documento assinado eletronicamente por **Edson Alves Figueira Junior, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/04/2021, às 20:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Claudio Marcio Santana, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/04/2021, às 09:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luis Antonio Bortolaia, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/04/2021, às 09:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0161871** e o código CRC **4D2C27DD**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por me acompanhar durante minha trajetória, guiando o meu caminho durante todos os momentos.

Aos meus pais, Adelson e Enoi, por nunca pouparem esforços na realização dos meus sonhos, sempre depositando confiança, incentivo e amor. À minha irmã Maíra pelo companheirismo e por ser meu exemplo.

Aos meus familiares que, mesmo de longe, sempre torceram por mim e se fizeram presentes. À UFOP, Escola de Minas e corpo docente do curso de engenharia mecânica pelo ensino de qualidade e contribuição durante minha graduação.

Ao professor Gustavo Nikolaus Pinto de Moura pela mentoria e conhecimento compartilhado.

Ao meu orientador Edson Alves Figueira Júnior pelo incentivo e contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Luiz Gustavo Mazzeu pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Às pessoas incríveis de BH, OP, Itajubá e Alemanha, que cruzaram o meu caminho e transformaram este desafio em uma trajetória mais leve.

À gloriosa República Barraca Armada pelo acolhimento e ensinamentos pra vida toda.

Por fim, sou grato por todos que contribuíram e me apoiaram de forma direta ou indireta para a realização deste sonho!

“A verdadeira medida de um homem não se vê na forma como se comporta em momentos de conforto e conveniência, mas em como se mantém em tempos de controvérsia e desafio.”

Martin Luther King Jr.

RESUMO

SANTOS, Pedro Henrique. **Estudo de caso: Readequação do sistema de geração de vapor em uma empresa automotiva.** Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 63 páginas. 2021.

A indústria automotiva apresenta atualmente alta maturidade em seus processos, com um grande foco na redução de custos e alta competitividade. Cada vez mais carros são fabricados com alta qualidade e pouquíssimo desperdício com a automatização da produção. Contudo, é necessário a adaptação a tais mudanças, buscando soluções economicamente viáveis para a instalação dos novos processos que surgem. Neste contexto, este trabalho apresenta uma análise de um estudo de caso buscando a solução que melhor atende as necessidades de uma empresa no ramo automobilístico que alterou seu processo de secagem de pintura dos automóveis, o que refletiu na redução do consumo de vapor da planta. Com isso, levanta-se o consumo de vapor na planta após a mudança do processo de secagem de pintura dos automóveis e calcula-se qual das três caldeiras existentes entregam um resultado mais econômico com a nova realidade da empresa, analisando a eficiência das caldeiras ao variar a pressão e mantendo a temperatura de saída do vapor; com estes parâmetros influenciando diretamente na vazão de vapor e no consumo de combustível do sistema. Os cálculos são realizados no *software Excel* e utiliza-se a tabela termodinâmica para definição das características do vapor estudado. O trabalho evidencia que a melhor alternativa é a utilização da caldeira 3, trabalhando com uma pressão de 20 MPa e considerando uma temperatura de entrada do vapor de 140 °C e temperatura de saída do vapor de 232,75 °C. Ainda, destaca-se a implantação de um queimador eletrônico, que aumentará a eficiência do processo e apresenta um retorno de investimento em 1,94 anos.

Palavras-chave: Geração de vapor; caldeiras; indústria automobilística; queimador; consumo de combustível

ABSTRACT

SANTOS, Pedro Henrique. Case study: Readjustment of the steam generation system in an automotive company. Thesis (Bachelor in Mechanical Engineering). School of Mining, Federal University of Ouro Preto, 63 pages. 2021.

The automotive industry is currently highly mature in its processes, with a strong focus on cost reduction and high competitiveness. More and more cars are being manufactured with high quality and very little waste through the automation of production. However, it is necessary to adapt to such changes, seeking economically feasible solutions for the installation of the new processes that emerge. In this context, this study presents an analysis of a case study seeking the solution that best meets the needs of a company in the automotive industry that changed its process of drying car paint, which reflected in the reduction of steam consumption of the plant. Therefore, the steam consumption of the plant is calculated after the change in the car painting drying process and it is calculated which of the three existing boilers provides a more economical result with the new reality of the company, analyzing the efficiency of the boilers by varying the pressure and maintaining the steam output temperature; with these parameters directly influencing the steam flow and the fuel consumption of the system. The calculations are made in Excel software and the thermodynamic table is used to define the characteristics of the steam studied. The paper shows that the best alternative is the use of boiler 3, working with a pressure of 20 MPa and considering an inlet steam temperature of 140 °C and an outlet steam temperature of 232.75 °C. Also, the implementation of an electronic burner is highlighted, which will increase the efficiency of the process and presents a return on investment in 1.94 years.

Keywords: *Steam generation; boilers; automotive industry; burner; fuel consumption*

LISTA DE SÍMBOLOS

ASME – *The American Society of Mechanical Engineers* – A sociedade americana de engenheiros mecânicos

DIN – *Deutsches Institut für Normung* – Instituto alemão de padronização

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

GNL – Gás Natural Liquefeito

ICMS – Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

NR – Norma Regulamentadora

STP – Sistema Toyota de Produção

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo de Carnot	8
Figura 2: Ciclo Rankine a) Esboço do ciclo e seus componentes, b) Diagrama T-s.....	9
Figura 3: Ciclo Rankine Real a) efeito das perdas de pressão no condensador e caldeira e irreversibilidades na bomba e turbina, b) aumento de entropia dos dispositivos reais (bomba e turbina).	10
Figura 4: Esquema de caldeira à lenha	11
Figura 5: Caldeira Flamotubular.....	13
Figura 6: Caldeira Aquatubular	14
Figura 7: Esquema com componentes da caldeira.....	15
Figura 8: Esquema representando o economizador	17
Figura 9: Esquema representando o pré-aquecedor.....	18
Figura 10: Queimador.....	18
Figura 11: Fluxograma das etapas deste trabalho.....	32
Figura 12 - Caldeira 2.....	33
Figura 13 – Caldeira 3	34
Figura 14 – Caldeira 4	35
Figura 15: Consumo x Eficiência nas caldeiras 3 e 4.....	45
Figura 16: Comparação entre potências nas caldeiras 3 e 4.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação segundo a ordem dos combustíveis	12
Tabela 2: Classificação dos combustíveis segundo seu estado.	12
Tabela 3: Caldeiras da planta	33
Tabela 4: Especificação da caldeira 3.....	34
Tabela 5: Especificações da caldeira 4	35
Tabela 6: Consumo de vapor na planta	36
Tabela 7: Variáveis e indicadores.....	37
Tabela 8: Dados referentes à água de alimentação.....	40
Tabela 9: Dados referentes ao vapor gerado	40
Tabela 10: Potência do vapor gerado nas caldeiras	40
Tabela 11: Média da quantidade de vapor produzida (kg) por 1m ³ de combustível	41
Tabela 12: Consumo de combustível.....	41
Tabela 13: Eficiência das caldeiras	41
Tabela 14: Visão geral do sistema atual	42
Tabela 15: Análise de redução de pressão da caldeira 3	43
Tabela 16: Análise de redução de pressão da caldeira 4	44
Tabela 17: Redução de pressão Caldeira 3	44
Tabela 18: Redução de pressão Caldeira 4.....	44
Tabela 19: Resultados analisador de gases.....	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos.....	3
1.4	Estrutura do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Conceitos importantes para estudo	5
2.2	Primeira Lei da Termodinâmica	6
2.3	Segunda Lei da Termodinâmica	6
2.4	Ciclo de Carnot.....	7
2.5	Ciclo Rankine	8
2.6	Sistema de geração de vapor	10
2.6.1	Caldeiras	12
2.6.1.1	Caldeiras Flamotubulares	13
2.6.1.2	Caldeiras Aquatubulares.....	13
2.6.1.3	Componentes	14
2.6.1.3.1	Superaquecedores	16
2.6.1.3.2	Economizador.....	16
2.6.1.3.3	Pré-aquecedor	17
2.6.1.3.4	Queimadores.....	18
2.6.2	Desareador	19
2.6.3	Manutenção da caldeira	19
2.6.4	Normas Regulamentadoras.....	20
2.6.4.1	NR 13.....	21
2.6.4.2	NBR 12177	21
2.6.4.3	NBR13203	22
2.7	Análise do rendimento energético	22
2.7.1	Método direto	22
2.7.1.1	Poder Calorífico.....	23

2.7.2	Método indireto	24
2.7.2.1	Perdas pela chaminé	24
2.7.2.2	Perdas por purga	25
2.7.2.3	Perdas associadas à temperatura das cinzas	26
2.7.2.4	Perdas associadas ao combustível não convertido presente nas cinzas	26
2.7.2.5	Perdas totais	27
2.7.3	Estratégias e melhorias de rendimento	27
2.8	Cálculo de <i>payback</i>	28
3	METODOLOGIA.....	30
3.1	Tipo de Pesquisa.....	30
3.2	Materiais e Métodos	31
3.2.1	Estudo de caso	32
3.3	Variáveis e Indicadores	37
3.4	Instrumentos de Coleta de Dados	37
3.5	Tabulação de Dados.....	38
3.6	Considerações Finais do Capítulo	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1	Visão geral das caldeiras 2, 3 e 4.....	39
4.1.1	Análise da água de alimentação.....	39
4.1.2	Análise do vapor gerado	40
4.1.3	Cálculo da potência gerada.....	40
4.1.4	Cálculo do consumo de combustível	40
4.1.5	Cálculo da eficiência	41
4.2	Análise de redução de pressão nas caldeiras 3 e 4	42
4.3	Implementação do sistema eletrônico.....	46
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	48
5.1	Conclusões.....	48
5.2	Recomendações	48
6	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	49

1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo é realizada uma introdução ao tema proposto por este trabalho, a fim de promover uma familiarização com o problema que impulsionou o mesmo. A seguir tem-se a formulação do problema, a justificativa, os objetivos e a estrutura do trabalho.

1.1 Formulação do Problema

Em 1886, Carl Benz e Gottlieb Daimler inventaram, cada um de jeito, o automóvel. Esta invenção mudou a maneira como as pessoas trabalham, como viajam e como interagem umas com as outras. Atualmente, veículos comerciais são uma parte indispensável na nossa vida, a logística de transporte de produtos é diretamente dependente de vans e caminhões e ônibus são utilizados para transportar pessoas no mundo todo (WEDENIWSKI, 2015). Mas quais são os grandes desafios da indústria automotiva?

A indústria automotiva sempre precisou se reinventar. Na virada do milênio esta indústria era caracterizada pelo excesso de capacidade de produção, fechamento de fábricas, perda de empregos, decréscimo de rentabilidade e um produto que parecia inadequado para se adaptar aos desafios ambientais na nossa sociedade. Esta situação foi agravada com a crise de 2007-2008, o que acentuou a queda da venda de novos carros e o congelamento de investimentos na indústria (NIEUWENHUIS; WELLS, 2015).

Contudo, ainda segundo Nieuwenhuis e Wells (2015), após apenas alguns anos deste acontecimento, a indústria automotiva ressurgiu graças à adoção de novas tecnologias e ao crescimento da venda de veículos no ocidente e, principalmente, na China. Algumas intervenções regulamentares, como as metas de redução de emissão de carbono sancionadas pela União Europeia, que antes eram vistas como onerosas e punitivas, ajudaram a estimular o renascimento tecnológico da indústria, juntamente com a percepção de que existem outras rotas para a rentabilidade.

Para aumentar a rentabilidade do negócio, a indústria sempre esteve preocupada com processos eficientes e redução de custos. A adaptação do Sistema Toyota de Produção (STP), com a implementação do *lean manufacturing* na indústria automotiva evidencia, por exemplo, essa necessidade destas empresas. Este sistema possibilitou a fabricação em escala de carros com qualidade, qualificando a mão de obra e reduzindo estoques, custos, desperdícios e falhas no processo (REIS, 2016).

Dentre estes processos, um que se destaca é referente à pintura dos automóveis. Um processo de secagem da pintura do automóvel bastante difundido na indústria automobilística é a utilização de vapor gerado em caldeiras para aquecimento do ar dentro de estufas de secagem. Porém, a enorme perda de carga eminente ao transporte do vapor para as estufas fez com que novos processos fossem desenvolvidos. E uma solução para minimizar tais perdas foi realizar o aquecimento das estufas de forma direta, com queimadores dedicados em cada zona de aquecimento nas estufas, sendo mais eficiente que o processo explicitado anteriormente.

Com a implementação desta nova solução na indústria automobilística, faz-se necessário adequar o sistema de geração de vapor para atender a nova demanda. Na empresa em questão além das estufas responsáveis pela secagem de pintura, o vapor também é utilizado em casas de ar para controle de ambiente climatizado, para aquecer o banho de fosfato responsável pelo pré-tratamento do veículo para receber a pintura, para manter constante a temperatura das tintas, no desareador da caldeira, tratamento de ar comprimido e em serviços não relacionados com a produção, como os vestiários e restaurantes da planta.

O estudo de caso contempla a descrição atual do processo, demandas dos setores e equipamentos disponíveis, redução da demanda do processo de secagem da pintura, cálculo da demanda após a modernização do processo de pintura e análise dos equipamentos disponíveis e a conclusão se é possível utilizar os equipamentos disponíveis para a demanda de vapor atual.

Diante desse contexto, tem-se a seguinte pergunta problema:

Quais os parâmetros de um sistema de geração de vapor apresentam melhor custo benefício em uma indústria automotiva após a redução da demanda de vapor devido a alteração no processo de secagem de pintura do automóvel?

1.2 Justificativa

O desenvolvimento tecnológico afetou a indústria automotiva de diversas formas. Os diferentes fatores incluem a pesquisa e o resultado de novos produtos e processos. As possibilidades tecnológicas e suas facilidades estão ganhando cada vez mais importância e influência em quase todas as indústrias. (WEDENIWSKI, 2005)

Estes novos processos procuram um aumento de eficiência e, conseqüentemente, a redução de custos. Quando implementados na indústria, substituem outros que outrora eram difundidos, impactando diretamente nos diversos setores que integram a indústria. Como por exemplo, pode-se citar o caso particular da indústria automotiva com as transformações que

ocorreram na década de 90, em que as empresas do setor passaram por um intenso processo de reestruturação, conseguindo atingir uma maior produtividade através das inovações na área da gestão e do aumento da automação das linhas de produção, causando conseqüentemente a redução dos postos de trabalho (BOTELHO, 2011).

Porém, como adaptar a empresa à implementação de um novo processo? Como maximizar o investimento realizado e quais as conseqüências que tal implementação causará diretamente no processo antigo? Estas perguntas são muito amplas, com diversas variáveis e estão presentes no dia-a-dia dos engenheiros. Através destes questionamentos viabilizou o estudo de caso para analisar a alternativa mais econômica para a geração de vapor através das caldeiras de uma empresa do ramo automobilístico após a mudança do processo de secagem da pintura de um automóvel.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Determinar os parâmetros mais econômicos de geração de vapor após a redução de demanda para o processo de secagem de pintura do automóvel em uma indústria automobilística.

1.3.2 Específicos

- Realizar revisão bibliográfica acerca da primeira e segunda leis da termodinâmica; ciclos Carnot e Rankine; geradores de vapor e análise do rendimento energético do sistema;
- Determinar o *payback* do investimento para automatizar o sistema de alimentação da caldeira;
- Especificar o consumo de vapor proveniente das caldeiras em indústria automotiva após a mudança do processo de secagem da pintura dos automóveis;
- Seleção do equipamento mais adequado.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em capítulos como forma de organizar a abordagem de todo o conteúdo a ser explorado. O primeiro consiste na apresentação do tema proposto e da

perspectiva da análise a ser realizada, através da formulação do problema, da justificativa da realização do trabalho e dos objetivos gerais e específicos.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica de cada objeto de estudo envolvido na análise técnica, como a primeira e segunda leis da termodinâmica, alguns conceitos importantes para a compreensão do trabalho, a caldeira e seus equipamentos, o ciclo de Carnot, o ciclo Rankine e a norma de segurança que regulamentada a utilização deste equipamento. Esta etapa é fundamental para a aplicação de conceitos técnicos no trabalho proposto e para a coleta de informações pertinentes e de interesse no desenvolvimento do presente trabalho, usando como referência a literatura e trabalhos já concluídos.

No terceiro capítulo descreve-se toda a metodologia empregada para o desenvolvimento do estudo de caso, com a elaboração das teorias, o levantamento das variáveis e indicadores e a comparação realizada para determinar a solução mais assertiva.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos através dos cálculos realizados e a comparação das teorias.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões referentes à análise realizada e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma revisão da literatura a respeito da primeira e segunda leis da termodinâmica, conceitos importantes para o estudo, o ciclo de Carnot, ciclo Rankine, caldeiras e seus equipamentos e as normas regulamentadoras de caldeiras NR 13, NBR 12177-1 1999, NBR 12177-2 1999, NBR 13203 que discorrem sobre as boas práticas para uso dos equipamentos de geração de vapor.

2.1 Conceitos importantes para estudo

Çengel e Boles (2007, pg. 10) definem sistemas como “quantidade de matéria ou região no espaço selecionada para estudo”. A vizinhança é a massa ou região que não está localizada neste espaço. E a superfície que separa a vizinhança do sistema é denominada fronteira, podendo esta ser fixa ou móvel.

O sistema pode ser fechado ou aberto. O sistema fechado, também conhecido como massa de controle, não permite que a massa atravesse a fronteira, porém energia em forma de calor e trabalho pode cruzar a fronteira, fazendo com que o volume do sistema não seja fixo. Já o sistema aberto, ou volume de controle, é uma região selecionada no espaço em que massa e energia podem cruzar a sua fronteira. Geralmente esta região apresenta um dispositivo que envolve fluxo de massa, como por exemplo um compressor ou turbina (ÇENGEL e BOLES, 2002).

Para Sonntag, Borgnakke e Van Wylen (1997), energia é a capacidade de produzir um efeito. Ela pode existir em diversas formas, como mecânica, elétrica, química, térmica, cinética, potencial, química e nuclear e a soma dessas energias constitui a energia total de um sistema. E as únicas formas de transferência de energia em um sistema fechado são através de calor e trabalho.

Calor é a energia transferida entre dois sistemas (ou entre sistema e vizinhança) através da diferença de temperaturas. Um processo em que não há transferência de calor é denominado processo adiabático. O trabalho é toda a energia que cruza a fronteira do sistema fechado que não é calor; ou melhor, a transferência de energia que está associada a uma força agindo ao longo de uma distância (ÇENGEL e BOLES, 2002).

2.2 Primeira Lei da Termodinâmica

Segundo Çengel e Boles (2005), uma das principais leis da natureza refere-se ao princípio de conservação de energia, em que a energia não é criada e nem destruída, podendo apenas mudar de forma. A Primeira Lei da Termodinâmica é apenas uma expressão deste conceito e afirma que a energia é uma propriedade termodinâmica.

Assim, um conceito fundamental é que a energia é sempre conservada. A variação da quantidade de energia em um sistema durante um intervalo de tempo é igual a quantidade líquida de energia transferida para dentro da fronteira por calor neste intervalo menos a quantidade líquida de energia transferida para fora da fronteira do sistema por trabalho, também neste intervalo (MORAN e SHAPIRO, 2013).

Este conceito pode ser expresso na equação 1 de balanço de energia:

$$\Delta E = Q - W; \quad (1)$$

Em que ΔE é a variação de energia, Q é quantidade de calor que entra no sistema e W é a quantidade de trabalho que sai do sistema.

A equação do balanço de energia ou primeira lei aplicada a um volume de controle com escoamento em regime permanente explica o funcionamento da caldeira, e é explicada pela equação 2.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{sai} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_{ent} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \quad (2)$$

Em que \dot{Q} é a taxa de calor, \dot{W} é a taxa de trabalho, \dot{m} é a vazão mássica do fluido (kg/h), “V” é a velocidade do fluido (m/s), “g” é referente a aceleração da gravidade (m/s²) e “z” é a elevação (m).

2.3 Segunda Lei da Termodinâmica

Como já apresentado anteriormente, a primeira lei destaca a conservação de energia. No entanto, não existe na primeira lei alguma restrição em relação às direções do fluxo de calor e trabalho. Assim sendo, caso um sistema ceda uma determinada quantidade de calor e receba esta mesma quantidade em trabalho, a primeira lei será satisfeita, da mesma forma que em um

ciclo com tais transferências em sentidos opostos (SONNTAG; BORGNAKKE; VAN WYLEN, 1997).

Na termodinâmica existem dois enunciados clássicos que explicam a Segunda Lei; o enunciado de Clausius e o enunciado de Kelvin-Planck. O enunciado de Clausius informa que é impossível que qualquer sistema opere de forma que não produza qualquer outro efeito que não seja a transferência de calor de um corpo com temperatura mais baixa para um corpo com temperatura mais alta (MORAN e SHAPIRO, 2013).

É importante destacar que este enunciado não impossibilita a construção de um ciclo em que ocorra a transferência de um meio frio para um meio mais quente. Porém, quando ocorre tal transferência, deve haver algum outro efeito dentro do sistema realizando a transferência de calor; como no caso do motor elétrico no refrigerador (MORAN e SHAPIRO, 2013).

Já o enunciado de Kelvin-Planck afirma que é impossível para qualquer dispositivo que opera em um ciclo receber calor de um reservatório e produzir uma quantidade líquida de trabalho. Em outras palavras, nenhuma máquina térmica pode converter em trabalho útil todo o calor que recebe, impossibilitando atingir uma eficiência térmica de 100%, pois existe a necessidade de rejeitar uma certa quantidade de calor para um reservatório a baixa temperatura. Por fim, todo dispositivo que viola o enunciado de Kelvin-Planck também violará o enunciado de Clausius, e vice-versa (ÇENGEL e BOLES, 2002).

2.4 Ciclo de Carnot

Para introduzir o ciclo de Carnot, é necessário compreender o conceito de máquinas térmicas primeiramente. Segundo Çengel e Boles, (2005) máquinas térmicas são dispositivos cíclicos e sempre que um ciclo termina, o fluido de trabalho desta máquina volta ao seu estado inicial. Em parte deste ciclo o fluido recebe trabalho e na outra parte o fluido é responsável por realizar trabalho. O trabalho líquido realizado por esta máquina é justamente a diferença entre estas duas partes. E ele pode ser maximizado juntamente com a eficiência do ciclo utilizando processos reversíveis.

Dentre estes ciclos reversíveis, o mais conhecido é o ciclo de Carnot. Neste ciclo existem quatro processos internos reversíveis: dois processos adiabáticos alternados com dois processos isotérmicos. A figura 1 ilustra melhor o funcionamento deste ciclo e acompanha o diagrama $p-v$ da água que circula por uma série de quatro componentes interconectados que tem características em comum com uma usina de vapor simples.

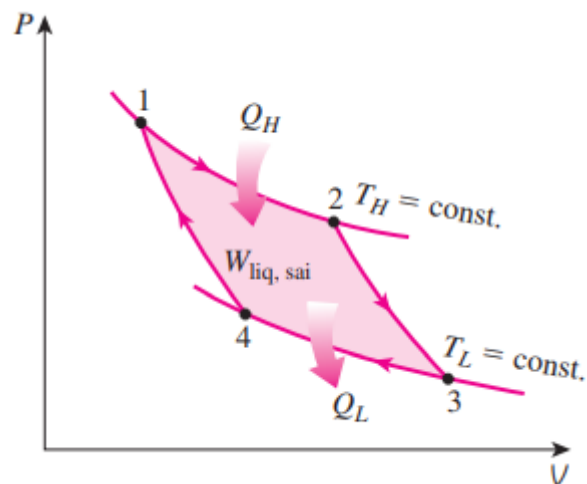


Figura 1: Ciclo de Carnot

Fonte: Çengel e Boles, 2005

Quando a água passa pela caldeira ocorre a mudança de fase de líquido para vapor à uma temperatura constante T_H devido a transferência de calor do reservatório quente. Como a temperatura se mantém constante, a pressão também está constante nesta mudança de fase. O vapor que sai da caldeira é expandido de forma adiabática na turbina e produz trabalho. Neste processo, a temperatura diminui até atingir a temperatura do reservatório frio T_C e a pressão também é reduzida. Ao passar no condensador, o vapor perde calor para o reservatório frio e é condensado a temperatura constante T_C . A pressão também é constante dentro do condensador. O quarto e último processo ocorre na bomba ou compressor, que recebe a mistura líquido-vapor em duas fases proveniente do condensador e retorna esta mistura de maneira adiabática até o estado de entrada na caldeira. Durante este processo, que requer trabalho para aumentar a pressão, a temperatura aumenta de T_C até T_H (MORAN e SHAPIRO, 2013).

2.5 Ciclo Rankine

Segundo Çengel e Boles, (2005), o ciclo ideal das usinas de potência a vapor é o ciclo Rankine. Isso porque ocorre um superaquecimento do vapor de água na caldeira e a condensação completa no condensador. Este ciclo ideal não envolve nenhuma irreversibilidade interna e consiste nos seguintes processos, conforme figura 2:

1-2 Compressão isentrópica na bomba;

Nesta etapa a água entra na bomba como líquido saturado e depois é comprimida de maneira isentrópica até atingir a pressão de funcionamento da caldeira.

2-3 Fornecimento de calor a pressão constante na caldeira;

A água entra como líquido comprimido na caldeira e é aquecida até se transformar em vapor superaquecido.

3-4 Expansão isentrópica na turbina;

O vapor de água superaquecido entra na turbina, onde é expandido de forma isentrópica, produzindo trabalho. Pressão e temperatura caem durante este processo.

4-1 Rejeição de calor a pressão constante no condensador.

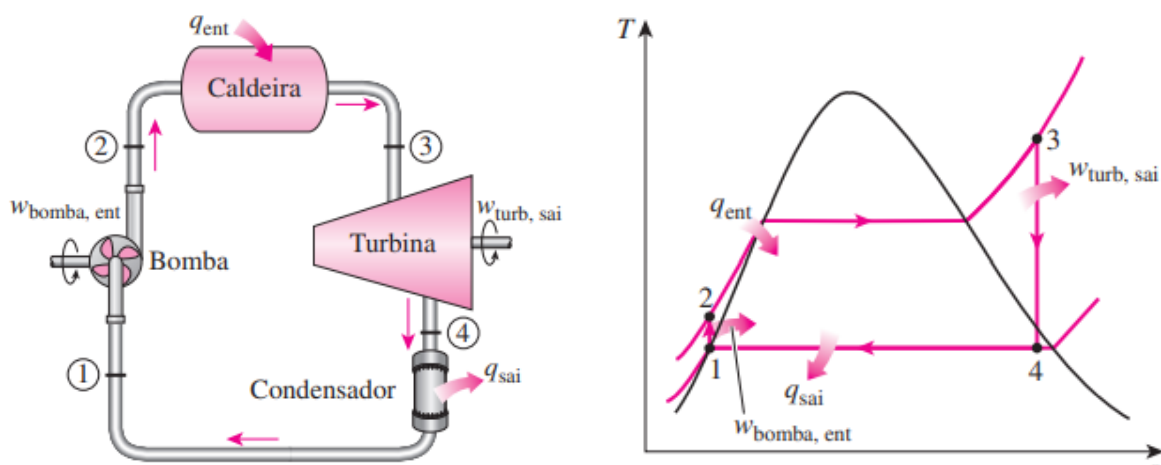


Figura 2: Ciclo Rankine a) Esboço do ciclo e seus componentes, b) Diagrama T-s.

Fonte: Çengel e Boles, 2005

No condensador, existe uma mistura de vapor e líquido saturados, com título elevado (maior quantidade de vapor saturado). O vapor é então condensado à pressão constante e deixa o condensador como líquido comprimido; retornando ao processo para o abastecimento da bomba.

Contudo, as irreversibilidades dos vários componentes que compõem o ciclo Rankine diferem do ciclo ideal com relação ao ciclo real, demonstrado na Figura 3. Dentre estas irreversibilidades tem-se o atrito no fluido, que causa queda de pressão na caldeira, tubulações e no condensador, necessitando um bombeamento de água com uma pressão suficientemente mais alta do que em relação ao ciclo ideal, a fim de compensar esta queda. Outra fonte de irreversibilidade é a perda de calor do vapor para a vizinhança à medida que este percorre o ciclo, sendo que para manter o mesmo valor de potência líquida produzida, é necessário transferir mais calor para a caldeira para compensar tais perdas (ÇENGEL e BOLES, 2002).

Ainda existem as irreversibilidades na bomba, que exigirá maior consumo de trabalho, e na turbina, que produz menos trabalho devido justamente a essas irreversibilidades. Também é importante considerar nos ciclos reais o sub-resfriamento do líquido no condensador para evitar a cavitação na bomba; o vapor que vaza durante o ciclo e o ar externo que infiltra dentro do condensador; e finalmente a potência consumida por equipamentos auxiliares, como ventiladores que alimentam a fornalha com ar (ÇENGEL e BOLES, 2002).

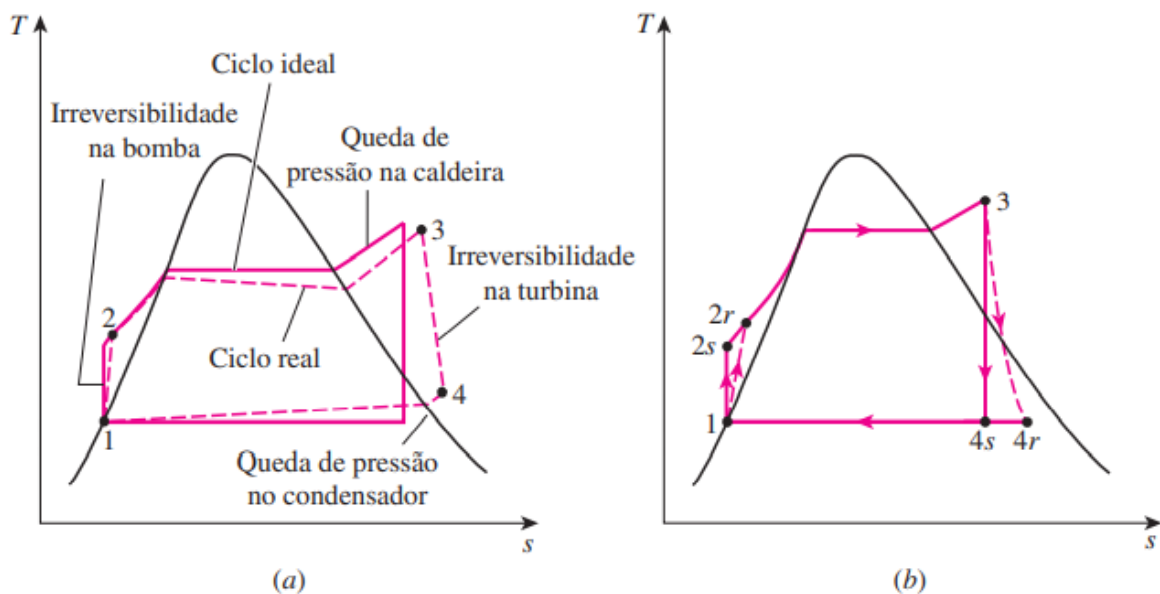


Figura 3: Ciclo Rankine Real a) efeito das perdas de pressão no condensador e caldeira e irreversibilidades na bomba e turbina, b) aumento de entropia dos dispositivos reais (bomba e turbina).
Fonte: Çengel e Boles, 2005

2.6 Sistema de geração de vapor

O sistema de geração de vapor, figura 4, é composto por um sistema de tratamento de água, sistema de alimentação de água na caldeira (tanque de condensado, desareador, bombas de água), equipamentos referentes ao combustível (tanques de armazenamento, cavaletes de redução de pressão, válvulas e atuadores), caldeiras (geradores de vapor), entre outros, dependendo da aplicação do sistema (CARDOSO, 2018).

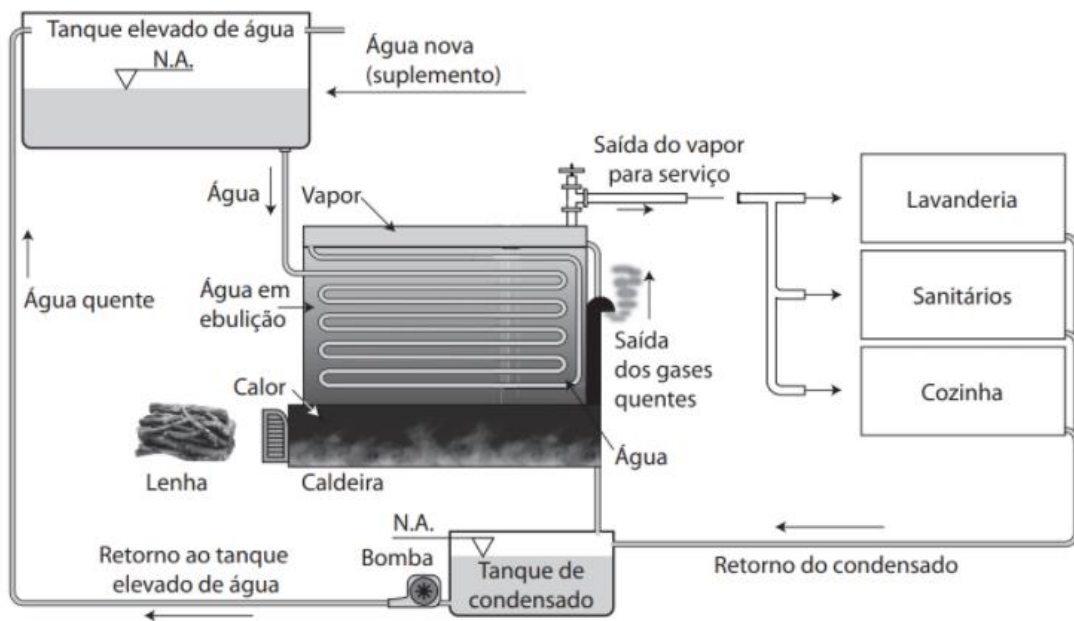


Figura 4: Esquema de caldeira à lenha
 Fonte: Botelho e Bifanol, 2015

O vapor de água é usado na indústria de três maneiras principais: geração, transporte e utilização de energia. Sua grande utilização decorre de diversos fatores, como o fato de a água ser o composto mais abundante da Terra, de fácil obtenção e baixo custo; tem-se também que o vapor possui alto conteúdo de energia por unidade de massa e volume. Ainda, as relações entre temperatura e pressão de saturação permitem que o vapor seja uma fonte de calor à temperaturas médias, corroborando para grande utilização industrial com pressões de trabalho totalmente toleráveis pela tecnologia disponível há um bom tempo. Uma classificação muito usada na indústria para classificação de geradores de vapor é referente à pressão de trabalho, conforme a seguir (BIZZO, 2003):

- Baixa pressão: até 10 kgf/cm² (0,98 MPa);
- Média pressão: de 11 até 40 kgf/cm²; (1,08 MPa até 3,92 MPa);
- Alta pressão: maior que 40 kgf/cm² (3,92 MPa)

2.6.1 Caldeiras

A definição de caldeira para Botelho e Bifano (2015, pág. 15) é:

Chama-se caldeira o equipamento que ferve a água gerando o vapor num ambiente fechado (com pressão, portanto) e envia esse vapor (temperatura por volta de 150 °C) por linhas de tubulações de vapor para os vários pontos de consumo.

A água entra na caldeira através de um vaso de pressão e o enche até um certo nível. Um combustível é queimado e libera calor, esquentando a água e a transformando em vapor, aumentando a pressão dentro do vaso. Existem diversas opções de combustível, como lenha, bagaço de cana, carvão, gás GLP, gás natural, óleo combustível, diesel e até eletricidade, conforme apresentado nas tabelas 1 e 2. A partir de tubos de vapor o calor gerado é transportado através deste vapor. A caldeira é constituída de chapas de aço e tem camadas de lã de vidro para isolamento térmico do ambiente interno com alta temperatura. Os tubos de vapor também são revestidos para evitar a perda de carga do vapor (BOTELHO; BIFANO, 2015).

Tabela 1: Classificação segundo a ordem dos combustíveis

Origem	Combustível Natural	Combustíveis derivados
Fósseis	Petróleo	Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), gasolina, óleos diesel, combustíveis e residuais
	Carvão Mineral	Gases manufacturados e coque
	Gás Natural	Gás Natural Liquefeito (GNL)
Naturais	Resíduos agroindustriais	Bagaço de cana, lixívia negra, casca de arroz e casca da castanha de caju
	Lenha	Carvão vegetal, gases manufacturados e metanol
	Resíduos animais	Biogás
Nucleares	Urânio	U-235 e U-238
	Tório	Th-232

Fonte: Teixeira e Lora, 2004

Tabela 2: Classificação dos combustíveis segundo seu estado.

Estado Físico	Combustíveis
Sólidos	Carvão mineral, carvão vegetal, xisto, turfa e biomassa sólida
Líquidos	Gasolina, querosene, diesel e óleos combustíveis
Gasosos	Gás natural, GLP e biogás

Fonte: Teixeira e Lora, 2004

2.6.1.1 Caldeiras Flamotubulares

A caldeira é diferenciada por dois sistemas básicos. Um destes sistemas é referente a caldeira flamotubular (também chamada de fogotubular), figura 5, em que os produtos de combustão circulam pelo interior dos tubos, imersos na água que será vaporizada. As entradas deste sistema são o combustível e o ar para queimar o combustível. As saídas são referentes aos gases de combustão e as cinzas (GILMAN, 2005).

Este tipo apresenta as caldeiras de aquecimento mais utilizadas, sendo que, segundo alguns fabricantes, representam mais de 90% da fabricação de caldeiras no país e servem hospitais, lavanderias, hotéis, indústria alimentícia, etc. (BOTELHO; BIFANO, 2015).

As caldeiras flamotubulares são geralmente utilizadas para pequenas capacidades de produção de vapor (até 10 ton/h) e baixas pressões (até 10 bar), chegando algumas vezes até 20 bar (BIZZO, 2003).

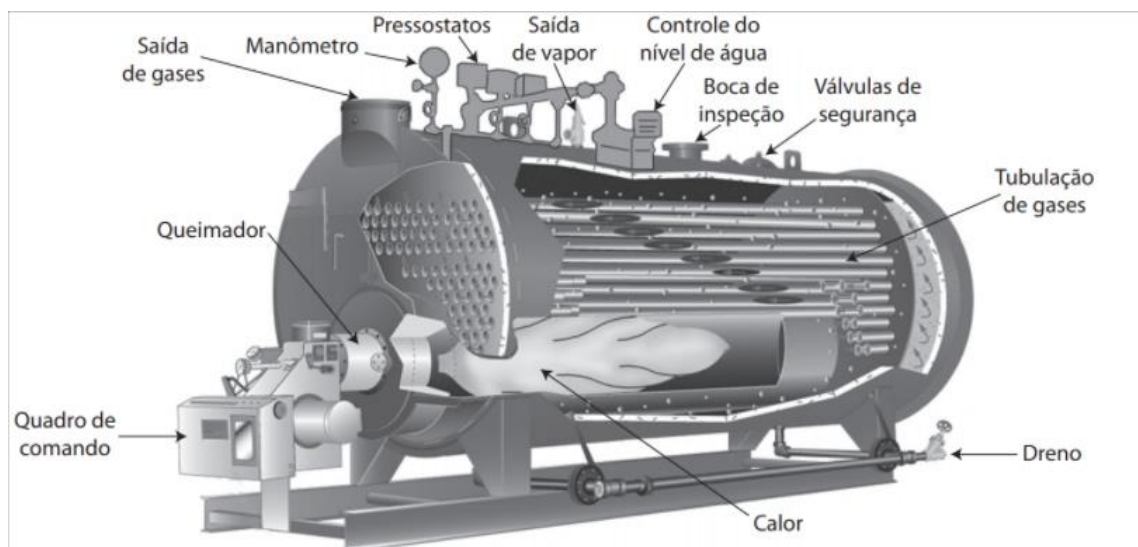


Figura 5: Caldeira Flamotubular
Fonte: Botelho e Bifanol, 2015

2.6.1.2 Caldeiras Aquatubulares

O outro sistema é referente à caldeira aquatubular, em que a água é introduzida e aquecida nos tubos de água pela transferência de calor dos produtos de combustão que circulam externamente, convertendo-a em vapor (GILMAN, 2005).

Estas caldeiras geralmente apresentam grande quantidade de tubos, com pequenos diâmetros e são utilizadas em usinas termelétricas e no acionamento de turbinas propulsoras marítimas (navios) (BOTELHO; BIFANO, 2015).

Explicando melhor seu funcionamento, a produção de vapor ocorre dentro da grande quantidade de tubos pequenos que interligam dois ou mais reservatórios horizontais, conforme a figura 6:

- O tubulão superior, onde ocorre a separação da fase líquida e do vapor, e;
- O tubulão inferior, onde ocorre a decantação e purga dos sólidos que estão suspensos.

Em aplicação industrial, as capacidades variam entre 15 até 150 ton/h, podendo atingir pressões de até 100 bar (BIZZO, 2003).

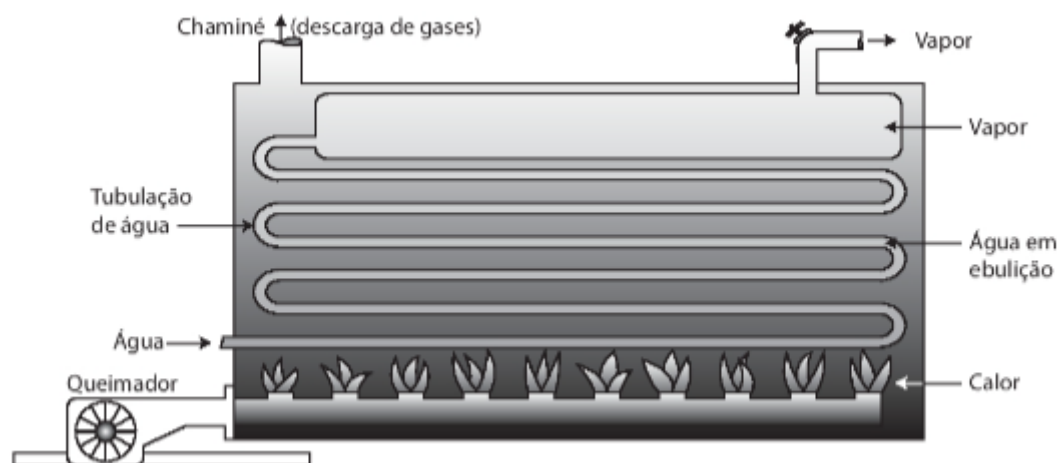


Figura 6: Caldeira Aquatubular
Fonte: Botelho e Bifanol, 2015

2.6.1.3 Componentes

Segundo Botelho e Bifano (2015), a caldeira é composta essencialmente por:

- Corpo de caldeira de aço, constituindo-se de um reservatório dentro do qual a água alimentada vira vapor;
- Tubos internos, normalmente de aço, por onde passam os gases muito quentes, provenientes da combustão (flamotubular), ou passa água que sofre o aquecimento, envolvida pelos gases que circundam os tubos cheios de água (aquatubular);

- Alimentador de combustível (manual ou automático);
- Queimador de combustível ou fornalha com grelha;
- Tubulação de saída de vapor, para a saída do vapor produzido para os pontos de utilização;
- Tubulação de saída de gases queimados, em que estes são dispostos para atmosfera;
- Válvulas de descarga (extração) de fundo, para esvaziamento, tirar resíduo e dispor o lodo criado pelo tratamento de água;
- Válvulas de segurança contra excesso de pressão, para assegurar que a pressão não se eleve acima do desejado;
- Dispositivos de controle, para controlar a entrada de gases combustíveis, a ligação do acendedor da queima dos gases e o acionamento do motor da bomba de água que alimenta a caldeira;
- Entre outros.

Existem ainda alguns dispositivos que podem ser integrados na caldeira a fim de aumentar a eficiência, como o superaquecedor, economizador e pré-aquecedor. A figura 7 demonstra um sistema com estes três dispositivos instalados.

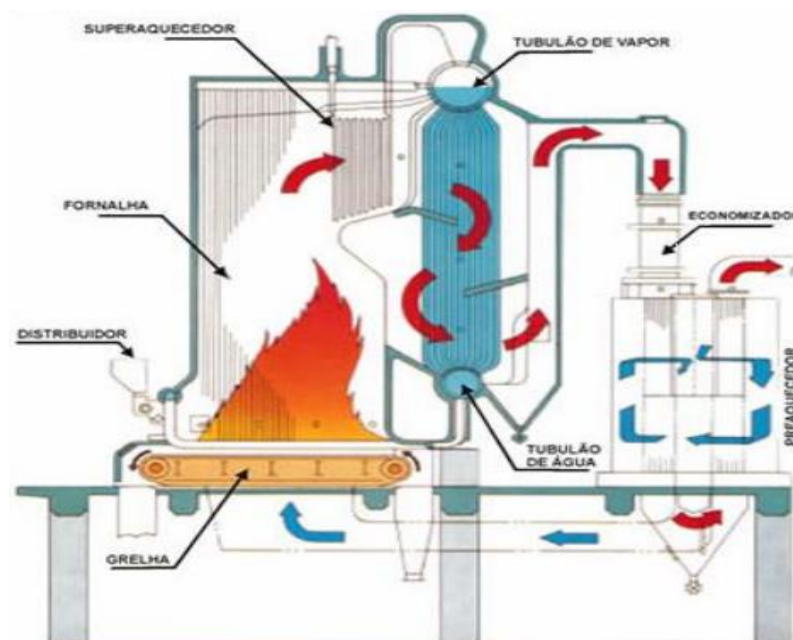


Figura 7: Esquema com componentes da caldeira
Fonte: Oliveira, 2014

2.6.1.3.1 Superaquecedores

O superaquecedor é um trocador de calor que aquece o vapor saturado para transformá-lo em vapor superaquecido. Este processo ocorre através da extração do vapor saturado no tubulão superior e inserção no trocador de calor. Estes dispositivos podem ser de natureza apenas convectiva, recebendo calor somente por convecção térmica, ou de irradiação, de maneira que receba calor por radiação da chama ou da grelha. A carga da caldeira influencia diretamente na temperatura de superaquecimento, já que não ocorre mudança de fase na troca de calor, como na vaporização. Por fim, a troca de calor dentro do superaquecedor varia conforme a velocidade do vapor dentro dos tubos e da velocidade dos gases na zona de convecção (BIZZO, 2003).

2.6.1.3.2 Economizador

O economizador (Figura 8) é um trocador de calor que utiliza calor sensível dos gases de combustão saindo da caldeira para aquecer a água de alimentação. Este processo gera um aumento da eficiência térmica do equipamento. Este disposto é geralmente composto por tubos aletados devido ao baixo coeficiente de troca de calor por convecção no lado dos gases. Devem estar localizados após a última superfície de convecção do gerador de vapor e podem ser fabricados integralmente à caldeira, ou ser adicionados na parte exterior da mesma, após a saída dos gases de combustão. Em relação a sua viabilidade financeira, sua utilização se justifica em médias e grandes instalações, tendo em vista o custo adicional em comparação com o ganho de rendimento térmico (BIZZO, 2003).

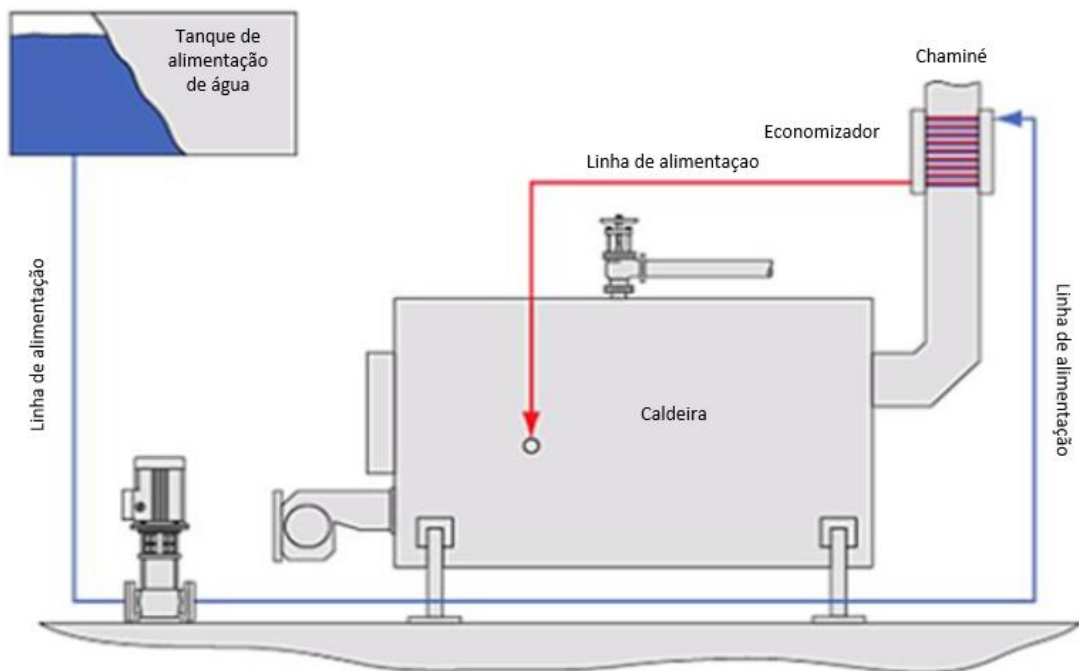


Figura 8: Esquema representando o economizador
 Fonte: Adaptado de Togawa, 2017

2.6.1.3.3 Pré-aquecedor

O pré-aquecedor (Figura 9) é também um trocador de calor, porém ele aquece o ar de combustão antes da entrada nos queimadores ou fornalha, através dos gases de exaustão da caldeira. Este aquecimento gera um maior rendimento dos queimadores ou fornalha e também um maior rendimento térmico do sistema, reduzindo as perdas presentes nos gases de exaustão. O fato de se utilizar também o calor sensível dos gases de combustão não impede seu uso conjunto com o economizador. Contudo, o economizador deve ser instalado antes do pré-aquecedor devido às limitações quanto a temperatura máxima do ar de combustão conforme o tipo de queimador e combustível utilizado (BIZZO, 2003).

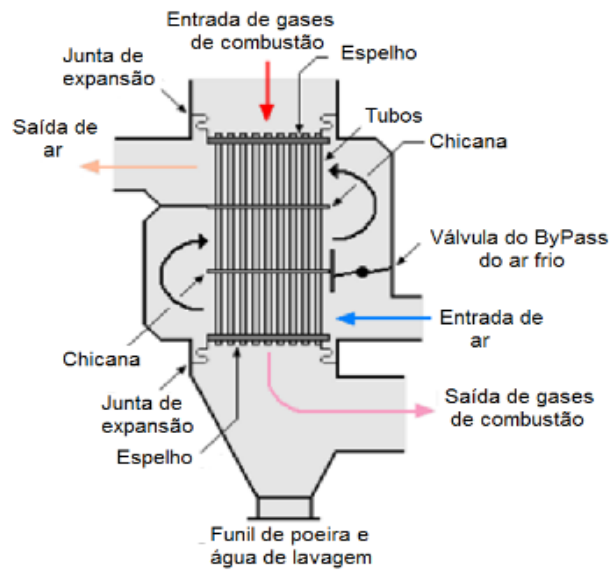


Figura 9: Esquema representando o pré-aquecedor
Fonte: Nhambiu, 2016

2.6.1.3.4 Queimadores

O vapor de água é gerado na caldeira através do calor liberado na queima de combustível. A única caldeira que não utiliza combustível é a elétrica, que usa a passagem de corrente elétrica para aquecer a água (BOTELHO; BIFANO, 2015).

O equipamento utilizado para queimar os combustíveis é o queimador, apresentado na Figura 10:

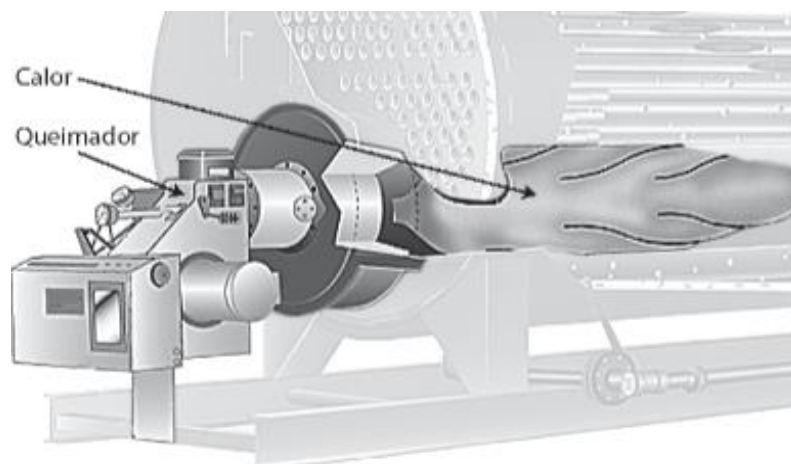


Figura 10: Queimador
Fonte: Botelho e Bifanol, 2015

Para verificar se a combustão está ocorrendo da maneira desejada pode-se utilizar um termômetro na saída dos gases queimados. Outro indicador é a cor da chama, que varia com o tipo de combustível. Ainda, tem-se com grande importância a medição dos níveis de emissão dos gases de combustão produzidos pela caldeira a fim de indicar se a queima dos combustíveis está dentro dos parâmetros corretos, e para isso, utiliza-se um analisador de gases. É comum que o fabricante estabeleça os limites considerados aceitáveis das cores da chama e dos componentes dos gases emitidos pela chaminé (SOUZA; ANDRADE; DECOLIN; FERRAR, 2020).

Por fim, o queimador é composto normalmente por um acendedor, geralmente elétrico; um insuflador de ar que antecede de maneira automática a centelha, para afastar gases não queimados dentro da caldeira e que podem gerar uma explosão; um insuflador de ar para melhorar a queima dos gases de combustível, e; a insuflação de ar após desligar a chama para afastar possíveis gases não queimados. Estes procedimentos são realizados de forma automática e programados no queimador (BOTELHO; BIFANO, 2015).

2.6.2 Desareador

O desaerador é um equipamento térmico e tem, como principal função, remover o oxigênio da água através de processo mecânico. O oxigênio pode ser corrosivo e danoso às caldeiras, portanto este dispositivo aumenta a vida útil de um sistema de vapor substancialmente. Para isso, o desaerador é abastecido com água com os gases dissolvidos que precisam ser eliminados. Essa água entra em contato com o vapor, aquecendo-a. Este aumento de temperatura faz com que a solubilidade dos gases diminua, dificultando a mistura com a água. Quando estes não conseguem mais se dissolver nos líquidos, são expelidos (CARDOSO, 2018).

2.6.3 Manutenção da caldeira

A NR 13 (2014) informa que os reparos ou alterações nas caldeiras devem respeitar o respectivo código de projeto de construção e as prescrições do fabricante. Os projetos de alteração ou reparo devem ser concebidos previamente quando as condições de projeto forem modificadas ou quando ocorrer reparos que possam comprometer a segurança. Esta alteração

deve ser aprovada por profissional hábil e determinar os materiais, procedimentos de execução e controle de qualificação do pessoal. Por fim, é importante que os sistemas de controle e segurança da caldeira sejam submetidos à manutenção preventiva ou preditiva.

Ainda segundo a NR13 (2014), para garantir a segurança das caldeiras, elas devem ser inspecionadas de três formas distintas: de maneira inicial, periódica e extraordinária.

A inspeção de segurança inicial deve ser realizada em caldeiras novas, antes de entrar em funcionamento. Este procedimento normalmente é realizado no fabricante.

No caso da inspeção de segurança periódica, a qual compreende avaliações interna e externa, tem alguns prazos a serem seguidos, a saber:

- 12 meses para as caldeiras A, B e C;
- 12 meses para caldeiras de recuperação de álcalis e;
- 24 meses para caldeiras da categoria A, tendo sido testadas as pressões de abertura das válvulas de segurança quando estiver no décimo segundo mês.

Por fim, a inspeção de segurança extraordinária precisa ser feita quando:

- Caldeira for danificada por acidente ou outro motivo, colocando em risco a segurança do equipamento;
- Caldeira sofrer alguma manutenção relevante e que, portanto, possa comprometer suas condições de segurança;
- Antes de a caldeira ser colocada em funcionamento novamente, se tiver permanecido inativa por mais de 6 meses e;
- Quando acontecer modificação no local de instalação do equipamento.

2.6.4 Normas Regulamentadoras

Atualmente existe uma norma regulamentadora para orientar os cuidados mínimos para se operar uma caldeira. Esta norma de segurança foi emitida pelo Ministério do Trabalho e é denominada NR 13. Existem ainda, outras normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a saber, que são: NBR 12177-1, NBR 12177-2, NBR 13203, NBR 13932.

2.6.4.1 NR 13

A NR13 implementa algumas regras para uso, inspeção, instalação e manutenção nas caldeiras a vapor, tubulações, vasos de pressão e os tanques metálicos. Sua principal função é estabelecer diretrizes para garantir o uso destes equipamentos de forma segura e manter a integridade das estruturas, e, conseqüentemente, a segurança dos trabalhadores do ramo. É importante salientar que, segundo a NR13, a responsabilidade de adotar e acompanhar a aplicação de todas as medidas propostas cabe às empresas. Ainda, outra função importante é na ajuda à preservação do meio ambiente (SILVA, 2019).

Por fim, ela é composta por sete regras principais, que são:

- Em relação aos equipamentos;
- Em relação aos cumprimentos de regras;
- Em relação a determinação de inspecionar as tubulações inicialmente e periodicamente para garantir a segurança das estruturas;
- Em relação a determinação de que os vasos de pressão devem ser classificados em categorias conforme a classe de fluido e os riscos;
- Em relação à classificação das caldeiras conforme pressão e volume interno;
- Em relação às responsabilidades das empresas, e;
- Em relação a garantia por parte das empresas da realização de testes específicos e demais procedimentos em total segurança, para evitar riscos à integridade física dos trabalhadores.

2.6.4.2 NBR 12177

A NBR 12177, de novembro de 2019, regida pela ABNT, tem como título geral “Caldeiras estacionárias a vapor – Inspeção de segurança” e é subdivida em duas partes principais:

- Parte 1: Caldeiras Flamotubulares;
- Parte 2: Caldeiras Aquatubulares.

Os objetivos desta norma são fixar as condições exigíveis para realizar as inspeções de segurança das caldeiras estacionárias flamotubulares a vapor; também se destina exclusivamente às caldeiras estacionárias, sendo estas novas ou não, e sujeitas ou não a chama, já instaladas; e por fim, esta norma não se aplica à inspeção de caldeiras ainda em construção.

2.6.4.3 NBR13203

Outra importante norma que rege as caldeiras é a NBR 13203, de setembro de 1994, com o título de “Inspeção de segurança de caldeiras estacionárias elétricas a vapor”. Esta norma destina-se exclusivamente às caldeiras elétricas, novas ou não, já instaladas. E também fixa as condições exigíveis para realizar as inspeções de segurança das caldeiras estacionárias elétricas a vapor.

2.7 Análise do rendimento energético

Para se calcular o rendimento energético de uma caldeira, deve-se coletar informações experimentais com instrumentos posicionados nos efluentes de interesse. A partir dessas informações deve-se determinar toda a energia envolvida no processo; o que corresponde ao calor gerado na fornalha, calor transferido ao fluido de trabalho, calor associado ao fluxo de massa, a ocorrência de combustão parcial e o calor perdido para o meio ambiente por condução, convecção e radiação (BAZZO, 2005).

Normalmente, as normas utilizadas para realizar este cálculo são a norma DIN (alemã) e a norma ASME (americana). Seguindo o cálculo com estas normas, tem-se que a caldeira do tipo aquatubular apresenta maior rendimento energético em comparação com a caldeira do tipo flamatubular. Este fato deve-se à melhor disposição da superfície de aquecimento, o que favorece a transmissão de calor gerado na fornalha, e também, à presença de superaquecedores de vapor, economizadores e aquecedores que recuperam grande parte do calor residual dos gases quentes da combustão (ELETROBRÁS, 2005).

A eficiência ou rendimento térmico de uma caldeira corresponde à razão entre a quantidade de energia transferida à água para convertê-la em vapor com o consumo de energia contida no combustível. Existem dois métodos para realizar este cálculo: método direto ou método indireto. Este último vem sendo mais utilizado por fornecer resultados mais confiáveis (SENGER, 2015).

2.7.1 Método direto

Segundo Eletrobrás (2005), para se calcular a eficiência através do método direto deve-se dividir a energia produzida pela caldeira em forma de vapor e o consumo de energia do combustível. A energia produzida pela caldeira é referente ao produto entre a vazão mássica de vapor e a mudança de entalpia entre o estado inicial e final da água, conforme a equação 3:

$$\eta_{MD} = \frac{\dot{m}_v(h_v - h_a)}{\dot{m}_c PCS} \quad (3)$$

Em que:

η_{MD} Eficiência pelo método direto;

\dot{m}_v Vazão mássica de vapor (kg/s);

h_v Entalpia de vapor produzido (kJ/kg);

h_a Entalpia de água produzida (kJ/kg);

\dot{m}_c Vazão mássica de combustível (kg/s);

PCS Poder calorífico superior do combustível (kJ/kg).

Para obter esses valores são necessárias diversas medições. Para o vapor superaquecido deve-se medir a vazão, temperatura e pressão do vapor produzido, utilizando essas duas últimas variáveis para encontrar a entalpia. Caso a caldeira estudada produza vapor saturado, considera-se que o vapor saturado é seco ou com título elevado, sendo necessário somente a pressão para saber a entalpia. Contudo, a formação de espuma no tubulão ou outro problema de arrasto pode influenciar na produção de vapor com título relativamente baixo. Para conseguir obter este valor de título deve-se utilizar um calorímetro de estrangulamento, expandido o vapor até a pressão atmosférica em condições adiabáticas e avaliando a entalpia no estado superaquecido (ELETROBRÁS, 2005).

2.7.1.1 Poder Calorífico

Segundo Heywood (1988), o poder calorífico de um combustível é a grandeza do calor da reação à pressão constante ou volume constante a uma temperatura padrão para uma combustão completa por unidade de massa de combustível. Dessa forma, é possível dizer que o poder calorífico é a energia que está contida no combustível e varia dependendo das quantidades de hidrogênio e carbono, já que o carbono possui energia interna específica menor que o hidrogênio, podendo ser denominado como poder calorífico inferior e poder calorífico superior.

Garcia (2002) define poder calorífico de um combustível como a quantidade de calor desprendida quando queimado completamente, levando a estequiometria em consideração. O

poder calorífico é chamado de Poder Calorífico Inferior (PCI) caso a quantidade de calor despreendida foi medida a partir da água gerada. Contudo, se a água resultante da combustão for considerada na fase líquida, tem-se o Poder Calorífico Superior (PCS).

2.7.2 Método indireto

O cálculo utilizado pelo método indireto utiliza as perdas de calor no sistema. Esse método apresenta maior confiabilidade em relação ao método direto devido ao fato de que as perdas são menos flutuantes (BAZZO, 1995).

Para se obter a perda total de calor deve-se somar as perdas por transferência de calor e as perdas associadas aos fluxos que saem da caldeira, com a exceção do fluxo de vapor. Assim, esse cálculo leva em consideração as perdas pela chaminé, por convecção e radiação, perdas por purgas, perdas associadas à temperatura das cinzas e perdas relacionadas com o combustível não convertido presente nas cinzas. Os fatores seguem conforme Eletrobrás, (2005).

2.7.2.1 Perdas pela chaminé

Existem duas parcelas principais que caracterizam a perda pela chaminé: a primeira é em relação aos gases secos formados na combustão e a segunda é associada ao vapor presente na chaminé. A perda referente à entalpia do gás seco gerado na combustão é representada na equação 4:

$$P_{GS} = (m_{CO_2} C_{pCO_2} + m_{SO_2} C_{pSO_2} + m_{O_2} C_{pO_2} + m_{N_2} C_{pN_2})(T_{CH} - T_R) \quad (4)$$

Em que:

m_i - Massa do componente i formado na combustão, ([kg/kg] de comb.);

C_{p_i} - Calor específico médio entre as temperaturas T_{CH} e T_R , [kJ/kg.°C];

T_{CH} - Temperatura dos gases na chaminé, [°C]; e

T_R - Temperatura de referência adotada, [°C].

A fim de simplificar os cálculos, considera-se que grande parte dos gases é constituída de nitrogênio atmosférico, resultando na equação 5:

$$P_{GS} = m_{GS} * C_{par}(T_{CH} - T_R) \quad (5)$$

Em que:

m_{GS} - Vazão mássica dos gases de combustão, ([kg/kg] de comb.);

C_{par} - Calor específico médio do ar entre T_{CH} e T_R , [kJ/kg.°C];

As perdas referentes à presença de vapor na chaminé são calculadas por:

$$P_V = m_P * C_{pv}(T_{CH} - T_R) + m'_v * h_{lv} \quad (6)$$

Em que:

m_P - Vazão mássica total de vapor, ([kg/kg] de comb.);

C_{pv} - Calor específico médio do vapor entre T_{CH} e T_R , [kJ/kg.°C];

m'_v - Vazão mássica de vapor formado na combustão e presente no combustível, ([kg/kg] de comb.);

h_{lv} Entalpia de vaporização da água na entalpia de referência (kJ/kg);

Ainda deve-se considerar as perdas referentes à presença de monóxido de carbono e fuligem nos gases de combustão, porém tais valores geralmente não são significativos.

Perdas por radiação e convecção

Adota-se geralmente o valor de perda de 1% a 4% da energia fornecida pela grande dificuldade de determinar as perdas por radiação e convecção pelo costado da caldeira devido às diversas medições que devem ser realizadas para obter tal valor.

2.7.2.2 Perdas por purga

Este cálculo refere-se às perdas de energia causadas pelo fluxo de água retirada na purga, que é necessária para manter as concentrações de sais na água dentro da caldeira em níveis aceitáveis, e é dado por:

$$P_P = v_P * C_{p_a}(T_P - T_R) \quad (7)$$

Em que:

v_P - Vazão média de água purgada, (kg/h);

C_{p_a} - Calor específico da água no estado líquido, (kJ/kg.°C);

T_P - Temperatura de saturação da água na pressão da caldeira (°C).

A purga pode ocorrer de forma contínua ou periódica. Para realizar a medição da eficiência da caldeira deve-se interromper o funcionamento da purga para permitir uma adequada avaliação de desempenho associados ao processo de combustão e transferência de calor.

2.7.2.3 Perdas associadas à temperatura das cinzas

Para caldeiras que queimam combustíveis sólidos tem-se que a saída das cinzas implica em perdas, que devem ser calculadas para cada caso específico. Porém, para facilitar a execução do cálculo, tem-se:

$$P_{TC} = m_R * 1170 \quad (8)$$

Em que:

m_P - Massa de cinza obtida pela massa de combustível, (kg);

O valor de 1170 (kJ/kg) representa um valor médio aproximado da entalpia sensível das cinzas.

2.7.2.4 Perdas associadas ao combustível não convertido presente nas cinzas

Em teoria, para calcular esta perda seria necessário realizar um ensaio determinando o poder calorífico da mistura de cinzas e de combustível não convertido. Porém, devido a grande dificuldade desta operação, utiliza-se a análise da quantidade de carbono sem queimar existente

nas cinzas. A partir deste valor é possível determinar a perda, em que 33780 é referente a um fator de correção:

$$P_{CC} = m_c * 33780 \quad (9)$$

Em que:

m_c – Massa de carbono presente nas cinzas, (kg);

2.7.2.5 Perdas totais

Após determinar todos estes valores, tem-se que a eficiência pelo método indireto é:

$$\eta_{MI} = 1 - \frac{\sum Perdas}{q_f} \quad (10)$$

Ou também através da equação 10:

$$\eta_{MI} = 1 - \left[K + \frac{\lambda \left(\frac{a}{c+1} \right) c_p * (T_P - T_R)}{PC} \right] \quad (11)$$

Em que:

K - Representa a somatória de todas as perdas exceto as perdas pela chaminé, correspondendo tipicamente à menor parcela das perdas;

λ - Coeficiente de excesso de ar na combustão, relacionando o ar real fornecido com o ar teórico requerido pelo combustível;

PCs – Poder calorífico superior do combustível.

2.7.3 Estratégias e melhorias de rendimento

Existem algumas estratégias primordiais para o incremento do rendimento da caldeira, que são: economia do uso de combustível, minimização das perdas de calor no sistema gerador de vapor e transporte até locais de utilização e cuidados referentes à manutenção periódica e utilização da correta instrumentação. (SENGER, 2015)

O projeto dos sistemas, operação e manutenção periódica são fatores fundamentais para garantir economia no sistema de vapor. Ao analisar a viabilidade de implementar um projeto para reduzir o consumo de combustível, deve-se levar em consideração o impacto que a mudança ocasionará e se a economia de combustível justifica o investimento realizado. (ELETROBRÁS, 2005)

Ainda segundo a Eletrobrás (2005), a maior economia nos geradores de vapor deve-se a utilização da energia de forma eficiente, evitando as perdas pós-combustão e garantindo uma grande eficiência na troca de calor entre a energia provinda da combustão com a água.

Por fim, para a operação a Eletrobrás (2005) sugere os seguintes cuidados recomendados:

- Para caldeira que utiliza combustível líquido deve-se controlar sua temperatura para garantir sua pulverização e queima total;
- Para caldeiras que utilizam combustível sólido deve-se reduzir ao máximo o nível de umidade e garantir que a geometria e o tamanho dos combustíveis sejam conforme recomendado pelo fabricante;
- Atentar a quantidade de ar no processo de combustão, tendo em vista que o excesso de ar gera queda de temperatura dos gases e a baixa quantidade de ar pode dificultar a queima de todo combustível;
- Verificar a temperatura da chaminé pois pode ser um indicador de falha no sistema;
- Caldeira sempre limpa e com inspeções periódicas;
- Manutenção dos equipamentos.

2.8 Cálculo de *payback*

Payback é um método de avaliação simples, amplamente utilizado para determinar o tempo necessário para que um projeto pague pelo seu investimento. O tempo de *payback* é calculado como o tempo para que os benefícios auferidos se igualem ao valor de investimento de determinado projeto. Sempre se procura um menor tempo de *payback*, ou seja, o projeto apresenta um rápido retorno em relação ao valor investido (MATA, 2019).

Para Souza e Clemente (2008), o *payback* também pode ser representado como uma forma de avaliar o risco de determinado investimento em um projeto. Como exemplo, projetos que se aproximem do final de sua vida econômica apresentam alto grau de risco.

O *payback* pode ser representado por:

$$\text{Payback} = \min\{j\} \text{ tal que } \left\{ \sum_{j=1}^N \frac{FC_j}{(1+TMA)^j} \geq |FC_0| \text{ e } FC_k > 0, \text{ para } j + 1 \leq k \right. \quad (12)$$

Em que:

- FC_0 : é o investimento inicial;
- FC_j : representa o fluxo de caixa no tempo j ;
- FC_k : é o fluxo de caixa descapitalizado no período k ;
- TMA : é a Taxa Mínima de Retorno.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento deste trabalho e o tipo de pesquisa em que se classifica. Também se desenvolveu um fluxograma demonstrando as etapas do projeto e as variáveis e os indicadores necessários para o alcance do resultado. Finalmente tem-se os instrumentos de coleta e a tabulação dos dados do trabalho.

3.1 Tipo de Pesquisa

O principal objetivo da pesquisa é encontrar soluções para determinado problema através de procedimentos científicos, utilizando de uma maneira formal e sistemática de desenvolvimento do método científico (GIL, 1999).

A pesquisa apresenta uma classificação ampla, tendo duas principais abordagens: qualitativa e quantitativa. Utiliza-se a abordagem qualitativa quando pretende-se descrever a complexidade de um problema sem envolver estudos experimentais e manipulação de variáveis. Assim, reúne-se informações sobre os fenômenos investigados utilizando depoimentos, estudos de casos, um histórico sobre a ocorrência dos fatos e entrevistas abertas e não direcionadas (GRESSLER, 2004). Já a abordagem quantitativa é baseada nas informações obtidas através de números, utilizando de métodos estatísticos, com dados adquiridos por pesquisas de campo ou boletins informativos (SILVA, 2001).

A finalidade da pesquisa com caráter exploratória segundo Gil (1999) é esclarecer, desenvolver e modificar conceitos e ideias, levando em consideração hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores, com um levantamento bibliográfico, documental, entrevistas e estudos de caso.

A pesquisa descritiva pode estabelecer correlações entre variáveis, definindo sua respectiva natureza. Este tipo de pesquisa expõe características de determinada população ou fenômeno, como principal ferramenta a coleta de dados (VERGARA, 1997).

Já a pesquisa explicativa explica o porquê e a razão das coisas, identificando fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos, aprofundando o conhecimento da realidade (GIL, 1999).

Também existe a pesquisa metodológica, que é o estudo referente a instrumentos de captação ou manipulação da realidade, sendo associada aos procedimentos, caminhos ou maneiras que levam a atingir um determinado fim. A pesquisa aplicada com uma finalidade

prática é motivada pela necessidade de desenvolver problemas concretos. Por fim, a pesquisa intervencionista tem como intenção modificar a realidade estudada. Sua principal diferença para a pesquisa aplicada se baseia na necessidade de resolver efetivamente um problema, não apenas apresentando soluções (VERGARA, 1997).

Em relação aos procedimentos técnicos tem-se como principais ferramentas para a pesquisa bibliográfica a utilização de obras acadêmicas e livros, podendo estes serem digitalizados, impressos ou retirados online, via Internet. Também pode-se utilizar dados através de experimentos ou estudos de casos já realizados. A pesquisa experimental por sua vez é responsável por grandes avanços científicos, manipulando variáveis com o intuito de observar, analisar e interpretar as informações que são alteradas na pesquisa, utilizando equipamentos adequados e técnicas específicas (GIL, 1999).

A pesquisa documental é elaborada através de diversas fontes diferentes, sem um tratamento analítico. Esta pesquisa caracteriza-se pelo envolvimento e identificação do pesquisador com as pessoas investigadas. Por sua vez, a pesquisa-ação é realizada a partir de bases empíricas associadas a uma ação ou resolução de um problema, no qual os participantes e pesquisadores envolvidos são cooperativos e participativos (FONSECA, 2002).

Por fim, para Yin (2001), para realizar um estudo de caso deve-se realizar um minucioso e exaustivo estudo de um ou mais objetos, permitindo um amplo e detalhado conhecimento, com a lógica do planejamento, coleta e análise dos dados adquiridos. Gil (1999) considera os exemplos mais característicos deste tipo de pesquisa as investigações sobre ideologia ou aquelas que evidenciam diversas posições acerca de um mesmo problema.

Assim, baseado nas abordagens apresentadas, este trabalho consiste em uma pesquisa de natureza quantitativa, pois utiliza de dados numéricos, cálculos e modelos matemáticos para o alcance dos resultados e também análise dos dados obtidos, utilizando a pesquisa bibliográfica no desenvolvimento do projeto. Ainda, tem-se uma pesquisa de caráter exploratório, com a apresentação de um estudo de caso.

3.2 Materiais e Métodos

O presente capítulo discorrerá sobre os diferentes materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da pesquisa para mensurar, conferir e analisar as variáveis do projeto.

A Figura 11 apresenta um fluxograma com as principais etapas desenvolvidas neste trabalho.

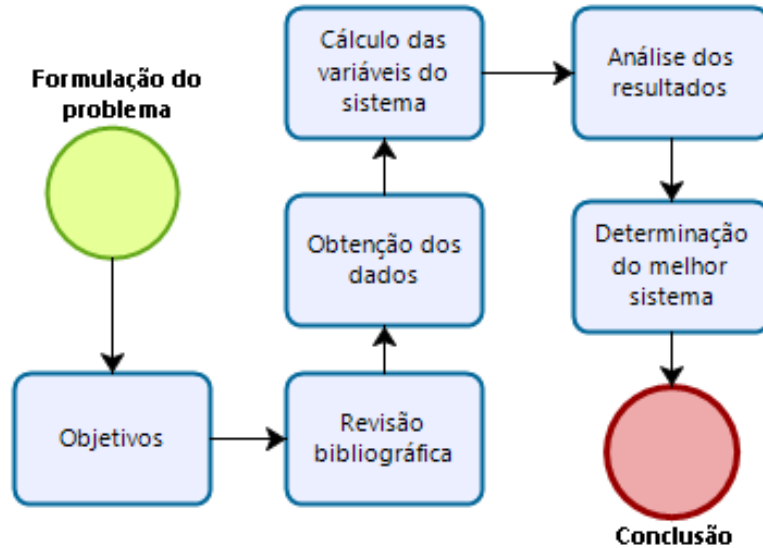


Figura 11: Fluxograma das etapas deste trabalho.
Fonte: Pesquisa direta, 2021

Analisando a Figura 11 percebe-se que a primeira parte do projeto consiste na formulação do problema, que foi a identificação de um estudo de caso em uma empresa do ramo automobilístico. Depois, os objetivos do projeto são levantados e começa a realização de uma pesquisa bibliográfica acerca do tema estabelecido, para auxiliar no desenvolvimento do estudo. Então inicia-se a parte prática, na obtenção dos dados para a realização dos cálculos das variáveis do sistema. Finalmente tem-se a obtenção dos resultados, com a determinação do sistema que melhor satisfaz a empresa e a conclusão do trabalho.

3.2.1 Estudo de caso

O estudo de caso desenvolvido refere-se à readequação para geração de vapor com a finalidade de abastecer uma indústria automobilística após uma mudança no processo de secagem dos automóveis, o que significou em uma grande redução do consumo de vapor na planta.

Atualmente, a planta tem três caldeiras responsáveis pela geração de vapor, demonstrada na tabela 3. São elas:

Tabela 3: Caldeiras da planta

Caldeira	Pressão (kgf/cm ²)	Vazão (ton/h)	Temperatura de entrada (°C)
2	10	27	115
3	30	12	140
4	30	12	115

Fonte: Pesquisa direta, 2021

Resumidamente, tem-se:

- 2 caldeiras aquatubulares de alta pressão (30kgf/cm²), com vazão de 12 ton/h, conforme figuras 13 e 14;
- 1 caldeira aquatubular de baixa pressão (10kgf/cm²), com vazão de 27 ton/h, conforme figura 12.

As figuras 12, 13 e 14 mostram as caldeiras 2, 3 e 4 respectivamente e as tabelas 4 e 5 mostram as especificações da caldeira 3 e 4 respectivamente.



Figura 12 - Caldeira 2

Fonte: Pesquisa direta, 2021



Figura 13 – Caldeira 3

Fonte: Pesquisa direta, 2021

Tabela 4: Especificação da caldeira 3

Caldeira 3			
Fabricante		CONFAB Industrial S.a.	
Caldeira Tipo		FM-9-52-ME	
N° de fabricação		77479	
N° de série		B-1145	
Norma de Projeto		ASME SEC-1-1995	
Pressão	De projeto	36,9	kgf/cm²
	Máx. trab. Admissível	33,5	kgf/cm²
	de operação	10/33,5	kgf/cm²
	de teste	55,3	kgf/cm²
Temperatura do vapor		183/240	°C
Superfície de aquecimento		251,4	m²
Capacidade de vapor		12000	kg/h
Ano de fabricação		1995	

Fonte: Pesquisa direta, 2021.



Figura 14 – Caldeira 4

Fonte: Pesquisa direta, 2021

Tabela 5: Especificações da caldeira 4

Caldeira 4			
Fabricante		DEDINI Indústria de Base	
Caldeira Tipo		FM-9-52-ME	
Nº de Ordem		OP-7.7598	
Nº de série		B-1127	
Norma de Projeto		ASME SECT-1	
Pressão	De projeto	39,7	kgf/cm²
	de operação	32,9	kgf/cm²
	de teste	58	kgf/cm²
Temperatura do vapor		239	°C
Superfície de aquecimento		251,4	m²
Capacidade de vapor		12000	kg/h
Edição		ED-2007/AD-2008	
Ano de fabricação		2009	

Fonte: Pesquisa direta, 2021.

A caldeira 3 apresenta maior temperatura de entrada devido a um economizador que utiliza a saída dos gases de combustão na chaminé da caldeira para aquecer a água de entrada, aumentando sua eficiência.

As caldeiras 3 e 4 eram anteriormente utilizadas para alimentar as estufas que são responsáveis pela secagem da pintura dos automóveis com alta pressão de vapor. Porém, com a mudança neste processo de secagem, não existe a necessidade de gerar vapor com alta pressão.

Assim, os atuais consumidores de vapor na planta necessitam de vapor com pressão de apenas 1,73 kgf/cm².

Ainda é importante destacar que a caldeira 2 tem uma grande capacidade de produção e produz vapor a uma pressão maior do que a utilizada pelos consumidores, sendo necessário reduzir a pressão por meio de uma válvula reguladora de pressão para atender os requisitos, o que corresponde a uma perda muito grande de eficiência no processo.

Em busca de aproveitar essa capacidade ociosa, estipulou-se a utilização de uma turbina para geração de energia elétrica com o vapor gerado em excesso, porém foi constatado que o vapor deveria sofrer um aquecimento muito alto para garantir baixa umidade durante a passagem pela turbina, e ainda, o fato de não compensar financeiramente devido à eficiência do ciclo e o alto custo do combustível na caldeira.

Os consumidores atuais de vapor da planta estão discretizados na tabela 6, em sua exigência máxima, após a mudança no processo de secagem da pintura dos automóveis:

Tabela 6: Consumo de vapor na planta

Equipamento	Pressão de vapor (Bar)	Consumo (kcal/h)
Casa de ar	1,7	5.392.800
Aquecimento banhos Fosfato	1,7	800.000
Aquecimento de tintas	1,7	300.000
Restaurante S10	1,7	100.000
Tratamento de ar comprimido	1,7	30.000
Perdas em eficiência	1,7	1.557.920
TOTAL		8.180.720

Fonte: Pesquisa direta, 2021

Para este projeto pretende-se determinar então a eficiência das caldeiras atualmente; determinar a eficiência, a vazão de vapor e o consumo de combustível para as caldeiras 3 e 4 ao realizar uma redução de pressão na produção de vapor e analisar economicamente a implementação de um sistema eletrônico no queimador da caldeira 3 para aumentar a eficiência desta caldeira.

Para a realização dos cálculos, serão utilizados dados da tabela termodinâmica. Para a situação atual, considera-se que as caldeiras produzem vapor saturado. Ao reduzir a pressão nas caldeiras 3 e 4, considera-se que a temperatura é mantida, entregando então um vapor superaquecido. O poder calorífico do combustível, gás natural, é de 9400 kcal/m³.

3.3 Variáveis e Indicadores

Segundo Gil (1999) pode-se dizer que variável é qualquer coisa que pode ser classificada em duas ou mais categorias. É uma medida ou classificação, uma quantidade que varia, um conceito operacional que apresenta ou contém valores, propriedade, aspecto ou fator, identificado em um objeto de estudo e passível verificação.

Para o estudo e medição de cada variável, existem alguns indicadores que são selecionados de acordo com os objetivos da pesquisa, sendo classificados de forma qualitativa ou quantitativa. Referente às definições apresentadas e os objetivos do trabalho, são separadas as variáveis e indicadores, segundo mostrado na Tabela 7.

Tabela 7: Variáveis e indicadores

Variáveis	Indicadores
Sistema de geração de vapor	<ul style="list-style-type: none"> ● Consumo de combustível; ● Eficiência da caldeira; ● Vazão de vapor.
Consumo de combustível da caldeira	<ul style="list-style-type: none"> ● <i>Payback</i> de sistema eletrônico no queimador da caldeira;

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

3.4 Instrumentos de Coleta de Dados

Esta etapa consiste na obtenção de dados referentes ao tema abordado para adquirir o embasamento necessário para a pesquisa através da revisão bibliográfica, cálculos realizados e observações. Como já mencionado neste capítulo, esta pesquisa é de natureza bibliográfica, quantitativa, descritiva e estudo de caso, logo todos os dados necessários para o estudo foram adquiridos através de uma profunda pesquisa bibliográfica, utilizando livros, teses, dissertações e catálogos, associada com uma observação direta a fim de alcançar dados teóricos e práticos para realização dos cálculos de projeto.

3.5 Tabulação de Dados

Será empregado o *software Microsoft Excel*, que será responsável por realizar os cálculos de projeto, possibilitando a geração de gráficos e tabelas com os resultados do teste. Por fim, o *software Microsoft Word* é empregado para relatar e discutir os resultados obtidos.

3.6 Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo discorre sobre os diferentes tipos e classificações de pesquisa, apresentando suas principais diferenças. Então, foi possível evidenciar as características desta dissertação. Os materiais utilizados e a metodologia adotada também foram abordados para realização das análises. Delimitou-se a área de pesquisa e como ocorre a coleta dos dados obtidos. O próximo capítulo apresenta os resultados obtidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento da pesquisa, apresentando os dados gerados pelos cálculos realizados no *software Microsoft Excel*. Com estes resultados, será possível analisar qual a melhor alternativa para a empresa em questão no estudo de caso.

4.1 Visão geral das caldeiras 2, 3 e 4

Conforme abordado na seção 3.2.1 deste trabalho, as informações da tabela 3 (pressão de trabalho, vazão de vapor e temperatura de entrada) são fundamentais para a realização dos cálculos deste trabalho.

Com essas informações é possível calcular a potência gerada pela caldeira, o consumo de combustível para geração de vapor e a eficiência do sistema. Para isso, deve-se caracterizar primeiramente o comportamento da água na caldeira, através de análise dos valores tabelados na tabela termodinâmica.

Deve-se levar em consideração ainda que a caldeira 2 apresenta uma grande capacidade de produção, e tendo em vista o consumo de vapor da planta, ela se torna superdimensionada para as necessidades da planta. Ainda, esta caldeira precisaria passar por reformas para aumento de sua vida útil. Estes fatos em conjunto justificam a não utilização desta caldeira para análises mais aprofundadas dentro do projeto.

4.1.1 Análise da água de alimentação

Primeiramente deve-se analisar a entalpia que a água de alimentação entra na caldeira. Para isso, deve-se levar em consideração a pressão de operação da caldeira (considera-se que o fornecimento de calor para a caldeira ocorre com pressão constante, seguindo o ciclo Rankine) e a temperatura de entrada da água, considerada no estado de líquido comprimido. Com essas informações, pode-se utilizar a tabela termodinâmica para analisar sua entalpia. Como não existe na tabela termodinâmica as informações exatas referente à pressão de trabalho das caldeiras, é necessário realizar cálculos de interpolação para encontrar os valores exatos da entalpia e volume específico. Os valores de entalpia e volume específico da água de entrada estão apresentados na tabela 8.

Tabela 8: Dados referentes à água de alimentação

Caldeira	Pressão (kgf/cm ²)	Volume específico (m ³ /kg)	Entalpia (kJ/kg)
2	10	0,0010555	483,1861
3	30	0,0010781	590,8323
4	30	0,0010545	484,5932

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

4.1.2 Análise do vapor gerado

Para analisar o vapor gerado nas caldeiras é necessário levar em consideração que o vapor é saturado e verificar sua vazão e pressão de trabalho da caldeira. Deve-se ainda realizar também os cálculos utilizando interpolação por não ter os valores exatos na tabela termodinâmica. Assim, tem-se os resultados da análise discretizados na tabela 9.

Tabela 9: Dados referentes ao vapor gerado

Caldeira	Pressão (kgf/cm ²)	Volume específico (m ³ /kg)	Entalpia (kJ/kg)
2	10	0,198126	2776,3482
3	30	0,068043	2803,0785
4	30	0,068043	2803,0785

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

4.1.3 Cálculo da potência gerada

O cálculo da potência produzida pela caldeira é feito através da multiplicação da vazão de vapor gerado pela diferença de entalpia entre o vapor e a água de alimentação. Divide-se por 3600 para obter o valor da potência em kilowatt. Os valores estão apresentados na tabela 10.

Tabela 10: Potência do vapor gerado nas caldeiras

Caldeira	Vazão (kg/h)	Entalpia de entrada (kJ/kg)	Entalpia de saída (kJ/kg)	Potência (kW)
2	27000	483,186	2776,3482	17198,716
3	12000	590,832	2803,0785	7374,154
4	12000	484,593	2803,0785	7728,284

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

4.1.4 Cálculo do consumo de combustível

Para calcular o consumo do combustível (gás natural) para geração de vapor em cada caldeira utilizou-se dos dados históricos de quantidade de combustível consumido e a vazão de vapor produzida em cada caldeira nos anos de 2019 e 2020, fazendo a divisão entre estes valores e posteriormente uma média, a fim de encontrar uma relação que demonstra a quantidade de vapor produzida (kg) por 1m³ de combustível, conforme tabela 11. Com esta relação é possível

descobrir o consumo de combustível por hora em cada caldeira. O consumo calculado de acordo com a vazão de vapor produzido nas caldeiras está presente na tabela 12.

Tabela 11: Média da quantidade de vapor produzida (kg) por 1m³ de combustível

Caldeira	2019		2020		Média
	Quantidade combustível (Nm ³)	Produção de vapor (kg)	Quantidade combustível (Nm ³)	Produção de vapor (kg)	
2	-	-	-	-	12
3	74387	769000	322040	6347000	15,023
4	2265789	27939000	879273	10881000	12,353

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

Tabela 12: Consumo de combustível

Caldeira	Vazão (kg/h)	Poder Calorífico (kcal/m ³)	Taxa de consumo de combustível para produção de vapor	Consumo de combustível (Nm ³ /h)
2	27000	9400	12	2250,00
3	12000	9400	15,02	798,76
4	12000	9400	12,35	971,43

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

4.1.5 Cálculo da eficiência

O cálculo da eficiência é realizado conforme o método direto, indicado na seção 2.7.1, na equação 2. É importante destacar, neste cálculo, a validação da segunda lei da termodinâmica, em que uma máquina térmica não converte todo o calor que recebe em trabalho útil. Os resultados da eficiência de cada caldeira estão demonstrados na tabela 13.

Tabela 13: Eficiência das caldeiras

Caldeira	Entalpia de entrada (kJ/kg)	Entalpia de saída (kJ/kg)	Vazão vapor (kg/h)	Vazão combustível (Nm ³ /h)	Poder Calorífico (kcal/m ³)	Eficiência
2	483,186	2776,3482	27000	2250,00	9400	69,92%
3	590,832	2803,0785	12000	798,76	9400	84,45%
4	484,593	2803,0785	12000	971,43	9400	72,77%

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

O resumo da capacidade de geração atual é apresentado na tabela 14.

Tabela 14: Visão geral do sistema atual

Capacidade de geração atual			
	Caldeira 2	Caldeiras 3	Caldeiras 4
Pressão (kgf/cm ²)	10	30	30
Pressão (MPa)	0,98	2,94	2,94
Vazão (kg/h)	27000	12000	12000
Potência (kW)	17198,72	7374,15	7728,28
Potência (kcal/h)	14788233,81	6340631,24	6645128,40
PC combustível (kcal/m ³)	9400	PC combustível (kJ/m ³)	39355,92
Média Consumo 19/20	12,00	15,02	12,35
Consumo combustível (Nm ³ /h)	2250,00	798,76	971,43
Eficiência pela fórmula (%)	69,92%	84,45%	72,77%

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

4.2 Análise de redução de pressão nas caldeiras 3 e 4

A mudança do processo de secagem dos automóveis produzidos na planta fez com que não existisse a necessidade de geração de vapor à alta pressão. Com isso, uma das soluções que serão analisadas na readequação da utilização de vapor será a análise de redução de pressão das caldeiras 3 e 4, visando atender o consumo com um menor gasto de combustível possível.

Para isso, realizou-se os cálculos para as novas pressões de 2,5 MPa; 2 MPa; 1,8 Mpa; 1,6 Mpa; 1,4 MPa e 1,2 MPa. É importante ressaltar que somente os valores de potência e eficiência são diferentes entre a análise da caldeira 3 e 4 com a redução de pressão, isso porque a entalpia de entrada das duas caldeiras apresenta valores diferentes devido ao economizador da caldeira 3, que aquece a água de alimentação de 115 °C para 140°C.

O primeiro passo para a análise é determinar os valores de entalpia e volume específico para a pressão que está sendo realizado o cálculo. Considera-se que, mesmo reduzindo a pressão, a temperatura de saída do vapor é constante (232,75 °C); portanto, considera-se o vapor como vapor superaquecido. Com o estabelecimento da temperatura e pressão do vapor superaquecido, basta somente realizar um cálculo de interpolação para encontrar os valores específicos de volume específico e entalpia para cada pressão.

Para o cálculo das novas vazões mássicas, deve-se calcular primeiramente a vazão volumétrica da caldeira funcionando no seu estado normal, ou seja, entregando 12000 kg/h de vapor saturado à pressão de 30 kgf/cm². Este cálculo é realizado multiplicando-se a vazão mássica (12000 kg/h) pelo volume específico nestas condições (0,068043 m³/kg). Assim, tem-se a vazão volumétrica de vapor na caldeira (816,5216 m³/h), que representa um valor constante,

levando em consideração que o volume de saída do vapor na caldeira não é alterado. Para o cálculo de vazão mássica para cada pressão então é necessário somente dividir este valor constante de vazão volumétrica pelo volume específico encontrado anteriormente.

Destaca-se ainda que este cálculo não infringe a primeira lei da termodinâmica. O que ocorre no sistema ao realizar a redução de pressão é que uma menor quantidade de calor está sendo adicionada ao sistema, por isso existe uma menor geração de vapor (redução da vazão mássica).

Também é necessário calcular a potência gerada com a caldeira trabalhando com pressões menores. Para isso, basta multiplicar a diferença de entalpia entre o vapor gerado e a água de alimentação pela vazão mássica calculada e dividir por 3600 para se obter o valor da potência em kW. Por fim, realiza-se o cálculo da eficiência através do método direto, com o ressaltado de que a vazão de combustível irá diminuir com a redução de vazão de vapor.

As tabelas 15 e 16 apresentam os valores calculados para a redução de pressão nas caldeiras 3 e 4, respectivamente.

Tabela 15: Análise de redução de pressão da caldeira 3

Caldeira 3								
Pressão (MPa)	Temperatura (°C)	Volume específico (m ³ /kg)	Entalpia de entrada (kJ/kg)	Entalpia de saída (kJ/kg)	Vazão (kg/h)	Potência (kW)	Consumo combustível (Nm ³ /h)	Eficiência (%)
2,942	232,75	0,06804	590,83	2803,079	12000,000	7374,154	798,76	84,4%
2,5	232,75	0,08235	590,55	2828,604	9915,445	6164,263	660,01	85,4%
2	232,75	0,10604	590,22	2855,117	7700,210	4844,495	512,55	85,4%
1,8	232,75	0,11913	590,09	2865,130	6854,160	4331,525	456,24	86,5%
1,6	232,75	0,13546	589,96	2874,822	6027,845	3825,777	401,23	87,2%
1,4	232,75	0,15648	589,83	2884,770	5218,153	3326,485	347,34	87,6%
1,2	232,75	0,18445	589,70	2894,359	4426,771	2833,943	294,66	88,0%
1	232,75	0,22353	589,57	2903,493	3652,881	2347,913	243,15	88,3%

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

Tabela 16: Análise de redução de pressão da caldeira 4

Caldeira 4								
Pressão (MPa)	Temperatura (°C)	Volume específico (m³/kg)	Entalpia entrada (kJ/kg)	Entalpia saída (kJ/kg)	Vazão (kg/h)	Potência (kW)	Consumo combustível (Nm³/h)	Eficiência (%)
2,942	232,75	0,06804	590,83	2803,079	12000,000	7374,154	971,43	72,8%
2,5	232,75	0,08235	484,28	2828,604	9915,445	6456,961	802,68	73,6%
2	232,75	0,10604	483,92	2855,117	7700,210	5071,876	623,35	74,4%
1,8	232,75	0,11913	483,77	2865,130	6854,160	4533,947	554,86	74,7%
1,6	232,75	0,13546	483,63	2874,822	6027,845	4003,817	487,97	75,1%
1,4	232,75	0,15648	483,49	2884,770	5218,153	3480,629	422,42	75,4%
1,2	232,75	0,18445	483,34	2894,359	4426,771	2964,726	358,36	75,7%
1	232,75	0,22353	483,20	2903,493	3652,881	2455,845	295,71	76,0%

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

O resumo da capacidade de geração com a redução de pressão nas caldeiras 3 e 4 está apresentada nas tabelas 17 e 18, respectivamente.

Tabela 17: Redução de pressão Caldeira 3

Variando pressões							
Caldeira 3							
Pressão (kgf/cm²)	25,49	20,39	18,35	16,32	14,28	12,24	10,20
Pressão (MPa)	2,50	2,00	1,80	1,60	1,40	1,20	1,00
Vazão (kg/h)	9915,44	7700,21	6854,16	6027,85	5218,15	4426,77	3652,88
Potência (kW)	6164,26	4844,50	4331,52	3825,78	3326,48	2833,94	2347,91
Potência (kcal/h)	5300312,07	4165516,20	3724441,09	3289575,82	2860261,90	2436752,64	2018841,49
PC combustível (kcal/m³)	9400,00		PC combustível (kJ/m³)			39355,92	
Média Consumo 19/20	15,02	15,02	15,02	15,02	15,02	15,02	15,02
Consumo combustível (Nm³/h)	660,01	512,55	456,24	401,23	347,34	294,66	243,15
Eficiência (%)	85,43%	85,43%	86,46%	87,22%	87,60%	87,98%	88,33%

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

Tabela 18: Redução de pressão Caldeira 4

Variando pressões							
Caldeira 4							
Pressão (kgf/cm²)	25,49	20,39	18,35	16,32	14,28	12,24	10,20
Pressão (MPa)	2,50	2,00	1,80	1,60	1,40	1,20	1,00
Vazão (kg/h)	9915,44	7700,21	6854,16	6027,85	5218,15	4426,77	3652,88
Potência (kW)	6456,96	5071,88	4533,95	4003,82	3480,63	2964,73	2455,85
Potência (kcal/h)	5551987,41	4361028,50	3898493,01	3442663,34	2992802,07	2549205,60	2111646,72
PC combustível (kcal/m³)	9400,00		PC combustível (kJ/m³)			39355,92	
Média Consumo 19/20	12,35	12,35	12,35	12,35	12,35	12,35	12,35
Consumo combustível (Nm³/h)	802,68	623,35	554,86	487,97	422,42	358,36	295,71
Eficiência (%)	73,58%	74,43%	74,75%	75,05%	75,37%	75,68%	75,97%

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

A partir dos dados gerados, plotou-se dois diferentes gráficos. O primeiro, figura 15, é possível aferir o menor consumo de combustível da caldeira 3 e uma maior eficiência desta em relação à caldeira 4. Ainda, pode-se perceber a relação inversamente proporcional entre a eficiência e o consumo de combustível e ainda o ganho de eficiência com a redução da pressão. A justificativa para isso se deve ao fato de que a pressão diminui, mas como a temperatura é mantida, o vapor anteriormente saturado passa a ser cada vez mais superaquecido, entregando cada vez uma entalpia maior. Contudo, ao reduzir a pressão, a vazão de vapor gerado também diminui devido à expansão do volume específico do vapor; assim, todas estas variáveis devem ser levadas em consideração na determinação da melhor pressão de trabalho para as caldeiras.

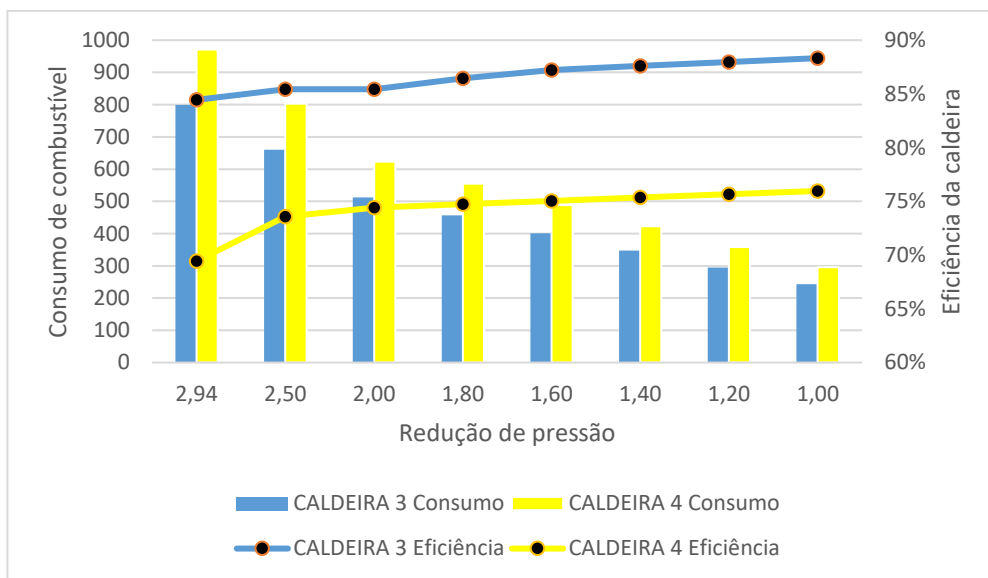


Figura 15: Consumo x Eficiência nas caldeiras 3 e 4.
Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

Por fim, tem-se o gráfico comparando a potência gerada com as diferentes pressões nas caldeiras 3 e 4, figura 16. As vazões de vapor são as mesmas para ambas as caldeiras e a pequena diferença entre as potências das caldeiras se dá pelo fato da entalpia de entrada da caldeira 4 ser um pouco menor em relação à caldeira 3, devido à ausência do economizador.

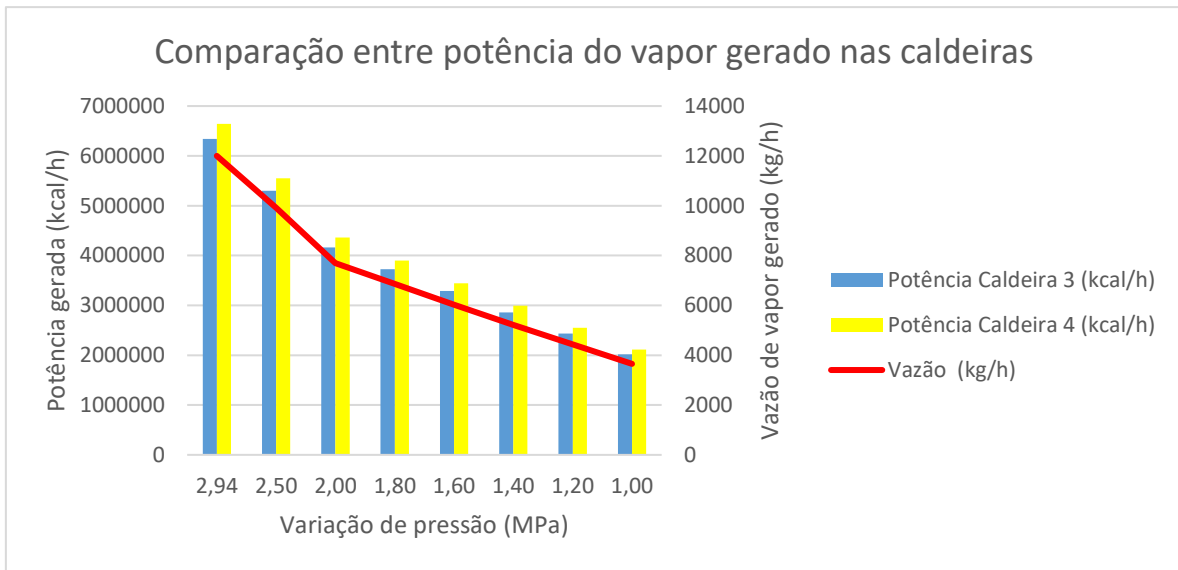


Figura 16: Comparação entre potências nas caldeiras 3 e 4.
Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

4.3 Implementação do sistema eletrônico

A fim de aumentar a eficiência da geração de vapor, foi estudado a possibilidade de implementar um queimador com um sistema eletrônico que permite fazer uma comutação entre a pressão de trabalho da caldeira conforme a necessidade de utilização. Este estudo foi realizado pela empresa “Oilon Brasil Energia”.

Primeiramente selecionou-se a caldeira 3 para a realização do estudo por ser a caldeira que apresenta a melhor taxa de economia. Realizou-se nesta caldeira, então, a medição dos gases de exaustão por meio de uma sonda do analisador de gases instalada dentro da chaminé, coletando as informações conforme variação da carga de funcionamento da caldeira (25%, 50%, 100%).

Os resultados coletados estão apresentados na tabela 19.

Tabela 19: Resultados analisador de gases

Medição	Set Point	Fluxo de gás		Medição de fluxo de gás				
		Capacidade (%)	Medido (m ³ n/h)	O ₂ (%)	CO ppm	NO _x ppm	CO ₂ (%)	temp. (°C)
Caldeira 3	1	25	-	13,13	3,67	28,1	4,5	
	2	50	-	9,1	0,17	43,45	6,8	
	3	100	-	9,64	0,9	32,7	6,49	

Fonte: Relatório Oilon Brasil Energia, 2019.

Com esta análise, foi possível perceber uma alta quantidade de oxigênio, o que representa uma queima pobre do combustível, ou seja, um excesso de ar na combustão. Com a instalação do novo queimador será possível ajustar os valores de oxigênio na queima, o que representará uma combustão melhor e, conseqüentemente, uma redução do consumo de combustível.

Quantificou-se então a economia financeira com essa redução de combustível, e percebeu-se que a economia anual com a implementação deste novo queimador seria de R\$251.728,03. O custo para implementação deste sistema foi de R\$439.727,00. Para calcular o *payback*, levou-se em consideração uma despesa de 3% do investimento anual em manutenção e uma depreciação dos bens de 10 anos. Com isso, teve-se a conclusão de que o projeto se torna atrativo para implementação com retorno em 1,94 anos, com uma taxa de retorno de 51,42% ao ano.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

A partir do desenvolvimento do estudo pode-se aferir que o sistema que melhor atenderá a necessidade de consumo da planta de 8.180.720 kcal/h (em sua necessidade máxima) é referente a utilização da caldeira 3, que apresentou maior eficiência em relação às outras caldeiras, com a pressão de 2 MPa, que gera uma potência de 4.165.516,20 kcal/h.

Essa escolha foi realizada levando em consideração que a requisição de consumo da planta demonstrada acima é esporádica, e que tal pressão determinada será capaz de atender a demanda durante a maior parte do tempo. Quando for requisitado essa alta demanda, deve-se considerar um maior tempo de utilização da caldeira para atingir a potência requisitada, ou ainda, utilizar a caldeira 4 paralelamente.

Com esta redução de pressão, e conseqüentemente de consumo de combustível, tem-se um ganho anual de R\$2.822.049,68, considerando o custo do gás natural de R\$2,12/m³ (valor no estado de São Paulo e com ICMS) e 4651 horas trabalhadas no ano, conforme histórico no ano de 2019 (desconsiderou-se o ano de 2020 por ser um ano atípico devido pandemia do Coronavírus).

Por fim, recomenda-se ainda a instalação do queimador com sistema eletrônico, demonstrado no capítulo 4.3, que permitirá a comutação da pressão de funcionamento da caldeira para atender a demanda necessária e uma combustão com melhor estequiometria, o que representará economia financeira em menos de 2 anos.

5.2 Recomendações

A partir da finalidade deste trabalho e dos resultados obtidos, sugere-se como trabalhos futuros:

- Realizar uma análise econômica para substituição de caldeiras na planta por sistemas independentes;
- Realizar uma análise para aquisição de uma nova caldeira que atenda com maior eficiência os requisitos da planta;
- Fazer o cálculo de eficiência das caldeiras da forma indireta, considerando as perdas que ocorrem no processo, em ordem de obter um valor de eficiência mais preciso.

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BIZZO, Waldir A.. **Geração, Distribuição E Utilização De Vapor**. Campinas: UNICAMP, 2003.

BOTELHO, A. (2002) **Productive re-structuring and space production: the motorcar industry established in Brazil**. Revista do Departamento de Geografia, n. 15, pp. 55-64.a

BOTELHO, Manoel Henrique Campos; BIFANO, Hercules Marcello. **Operação de caldeiras: gerenciamento, controle e manutenção**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

CARDOSO, Danilo Rossi de Oliveira. **Aumento De Eficiência Energética De Uma Instalação De Geração De Vapor Por Meio Do Reaproveitamento De Energia Em Linhas De Retorno De Condensado**. 2018. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

ÇENGEL, Yunus A; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill 2007.

ELETRONBRAS. **Eficiência Energética no uso do vapor**. Rio de Janeiro, 2005.

GARCIA, Roberto. **Combustíveis e Combustão Industrial**. Rio de Janeiro. Interciência. 2002.

GILMAN, Jerry. **Boiler Control Systems Engineering**. United State Of America: The Instrumentation, Systems, And Automation Society, 2005.

HEYWOOD, John B.. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. New York: McGraw-Hill, Inc., 1988. 930 p

MATA, Lucas Ribeiro. **Análise da viabilidade técnica e econômica da implantação de sistemas de cogeração em empreendimentos do setor terciário**. 2019. 82 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

MORAN & SHAPIRO. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 2013 7ed.

MORORÓ, Vanessa Costa. **Avaliação De Desempenho E Emissões De Caldeiras De Vapor Híbridas Aplicada À Biomassa**. 2016. 90 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Energias Renováveis, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

NIEUWENHUIS, Paul; WELLS, Peter. **The Global Automotive Industry**. Cardiff: Wiley, 2015.

REIS, Gemírson de Paula dos. **LEAN MANUFACTURING APLICADO À GESTÃO DA MANUTENÇÃO: ESTUDO DE MÚLTIPLOS CASOS**. 2016. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

SENGER, Renan. **Análise Do Rendimento Térmico De Uma Caldeira Alimentada Com Lenha Em Toras**. 2015. 63 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015.

SILVA, Wesley. **NR13**. Disponível em: <https://www.garciasengenharia.com.br/2019/08/27/nr13-resumida-todas-as-regras-que-voce-precisa-conhecer-agora-atualizadas/>. Acesso em: 21 mar. 2021.

SONNTAG, Richard E.; BORGNAKKE, Claus; VAN WYLEN, Gordon J.. **Fundamentos da termodinâmica**. Michigan: Edgard Blücher Ltda., 1997.

SOUZA, Alceu; CLEMENTE, Ademir; **Decisões financeiras e análise de investimentos: fundamentos, técnicas e aplicações** 5ª Ed. São Paulo: Atlas, 2004

SOUZA, Evandro de; ANDRADE, Heryk do Prado de; DECOLIN, Leandro; FERRAR, Allan Christian Krainski. Implantação de Controle Automatizado no Sistema de Combustão de uma Caldeira Industrial. **Revista Eletrônica Multidisciplinar**, Araucária, p. 6-6, dez. 2020.

TEIXEIRA, F. N., LORA, E. E. S., **Suprimento Energético para Termelétricas, in: Geração Termelétrica: planejamento, projeto e operação, Coordenadores: Lora, E.E.S.; Nascimento, M.A.R., Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2004.**

WEDENIWSKI, Sebastian. **The Mobility Revolution in the Automotive Industry: How not to miss the digital turnpike**. Tokyo: Springer, 2015.