



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO

Campus Caruaru

Bacharelado em Engenharia Mecânica

PEDRO NATANAEL FIRMINO DA SILVA

**PROJETO TÉRMICO-MECÂNICO DE UMA CALDEIRA FLAMOTUBULAR
APLICADA À INDÚSTRIA TÊXTIL DO INTERIOR DE PERNAMBUCO**

Caruaru, PE

2021

PEDRO NATANAEL FIRMINO DA SILVA

**PROJETO TÉRMICO-MECÂNICO DE UMA CALDEIRA FLAMOTUBULAR
APLICADA À INDÚSTRIA TÊXTIL DO INTERIOR DE PERNAMBUCO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao corpo docente do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. Marcos Cézar Lima Cordeiro

Caruaru, PE

2021

S586p

Silva, Pedro Natanael Firmino da

Projeto térmico-mecânico de uma caldeira flamotubular aplicada à indústria têxtil do interior de Pernambuco/ Pedro Natanael Firmino da Silva; orientação de Marcos César Lima Cordeiro. – Caruaru, 2021.

71 f.

Trabalho de Conclusão de Curso – (Graduação em Engenharia Mecânica) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica, Curso de Engenharia Mecânica, 2021.

1. Caldeira – Vaso de pressão. 2. Termodinâmica - Leis. 3. Geração de vapor. 4. Indústria têxtil. 5. Fenômenos de transporte. 6. Termodinâmica - Análise. 7. Caldeira – Projeto termodinâmico. 7. Manutenção industrial. 8. Manutenção de máquinas. 9. Engenharia Mecânica - IFPE. I. Cordeiro, Marcos César Lima. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco. III. Trabalho de Conclusão de Curso. IV. Título.

CDD: 621.18

CDU: 621

À todos os que me fizeram chegar até onde eu cheguei, sejam eles professores, pais, parentes e amigos que contribuíram de forma direta e indireta na realização deste trabalho e de todo o curso de Engenharia Mecânica.

AGRADECIMENTOS

Agradecendo primeiramente a Deus, por ter me dado a coragem e inteligência necessária para concluir este curso com êxito. Dedico também meus agradecimentos ao meu pai Leonildo, minha mãe Josiane e meus irmãos Thalita e João Paulo por terem dado o maior apoio e suporte durante toda minha jornada. Agradecendo também a todos os professores do IFPE Caruaru, em especial ao meu orientador Dr. Marcos César Lima Cordeiro pelo suporte na elaboração deste trabalho. Não deixando de agradecer a todos os meus amigos e colegas de curso, amigos que fiz no intercâmbio, no trabalho, no apartamento, no ônibus e nas redes sociais.

“O cientista descobre o que existe, enquanto que o engenheiro cria o que nunca existiu.”
(Theodore von Kármán)

RESUMO

O setor têxtil tem sido bastante explorado nos polos industriais do país. A Associação Brasileira do Vestuário (ABRAVEST) identificou o Brasil como o quarto maior produtor neste setor, representando 2,9%. Já no estado de Pernambuco, mais precisamente na região do Agreste, a indústria de confecção têxtil já é considerada a principal atividade industrial desta região. Um dos principais componentes termo-mecânicos, que são essenciais no processo de produção têxtil, é a caldeira a vapor. Neste contexto, em 2014 foi realizada uma auditoria energética na caldeira a vapor em uma empresa, e foi constatada a necessidade de produção de 4.000 kg de vapor por hora, com uma pressão de trabalho de 10kgf/cm². Diante disso, é proposto neste trabalho realizar o projeto termodinâmico e dimensional de uma caldeira que atenda a necessidade da empresa citada. Na metodologia aplicada, inicialmente, busca-se estruturar o problema mediante realização de pesquisa preliminar sobre as soluções existentes e os seus princípios e por fim, desenvolver o projeto. Após análise histórica das caldeiras e Normas Regulamentadoras, os principais tipos de caldeiras encontrados foram as aquotubulares, flamotubulares e as mistas. Visto que as flamotubulares são as mais utilizadas na região por se adaptarem melhor ao tipo de combustível utilizado (lenha), esta foi escolhida no projeto. Pelas Leis da Termodinâmica foi possível dimensionar uma caldeira com eficiência térmica em torno de 81,07% com auxílio de um economizador e também especificar o material e espessura das chapas e da tubulação em função dos esforços carregados.

Palavras-chave: Caldeira a vapor, Indústria têxtil, Análise termodinâmica, Produção de vapor.

ABSTRACT

The textile sector has been extensively explored in the country's industrial centers. The Brazilian Clothing Association (ABRAVEST) identified Brazil as the fourth largest producer in this sector, representing 2.9%. In the state of Pernambuco, more precisely in the Agreste region, the textile manufacturing industry is already considered the main industrial activity in this region. One of the main thermo-mechanical components, which are essential in the textile production process, is the steam boiler. In this context, in 2014 an energy audit was carried out on the steam boiler of a company, and the need to produce 4,000 kg of steam per hour was verified, with a working pressure of 10 kgf / cm². Therefore, it is proposed in this work to carry out the thermodynamic and dimensional design of a boiler that meets the needs of the aforementioned company. In the applied methodology, initially, the aim is to structure the problem by conducting preliminary research on existing solutions and their principles and, finally, to develop the project. After a historical analysis of the boilers and Regulatory Norms, the main types of boilers found were aquotubular, flamotubular and mixed. Since flamotubulars are the most used in the region because they adapt better to the type of fuel used (firewood), this was chosen in the project. By the Laws of Thermodynamics, it was possible to design a boiler with thermal efficiency around 81.07% with the aid of an economizer and also specify the material and thickness of the plates and piping according to the loads loaded.

Keywords: Steam boiler, Textile industry, Thermodynamic analysis, steam production.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Configuração simplificada da cadeia têxtil.....	2
Figura 2 - Fluxograma do processo produtivo	3
Figura 3 - <i>Aeolipile</i> de Hero	5
Figura 4 - Turbina a vapor projetada por Branca	6
Figura 5 - Caldeira Vagão projetada por James Watt.....	7
Figura 6 - Caldeira de alta pressão projetada por Trevithick	7
Figura 7. Caldeira (a) Flamotubular e (b) Aquatubular.....	9
Figura 8 - Seção de uma caldeira flamotubular do tipo vertical.....	10
Figura 9 – Caldeira flamotubular com fornalha aquatubular MGV-8000.....	11
Figura 10 - Diagrama de uma caldeira aquatubular.	11
Figura 11 - Interior de um cinzeiro de caldeira industrial	12
Figura 12 - Fornalha de uma caldeira industrial.....	13
Figura 13 - Exemplo de caldeira industrial	13
Figura 14 - Superaquecedor de caldeira industrial	14
Figura 15 - Superaquecedor do tipo convectivo.....	14
Figura 16 – Superaquecedor do tipo radiante.....	15
Figura 17 - Comportamento da temperatura de saída do vapor de acordo com a carga de utilização da caldeira.	15
Figura 18 - Esquematização de um atemperador.....	16
Figura 19 - Economizador de caldeira industrial.....	16
Figura 20 - Chaminé de uma caldeira industrial.....	17
Figura 21: Diagrama sequencial dos equipamentos da caldeira.....	18
Figura 22: Volume de controle da tubulação.....	28
Figura 23. Câmara de combustão com grelha fixa horizontal.....	30
Figura 24. Fluxograma da Metodologia do Projeto da Caldeira	31
Figura 25. Fluxograma geral dos fluxos de fluidos na Caldeira.....	36
Figura 26. representação gráfica do superaquecedor.....	38
Figura 27. Representação gráfica do Economizador	40
Figura 28. Representação gráfica da Câmara de Combustão	41
Figura 29. Representação gráfica da Câmara de Evaporação	42
Figura 30. Taxas de carregamento indicadas por algumas fornalhas em operação (kg/m ² h)...	44
Figura 31. Representação da Tensão Circunferencial	46

Figura 32. Representação da Tensão Longitudinal	46
Figura 33. Tipo de solda a ser feita nas juntas das chapas	50
Figura 34. Interface do EES 2013	51
Figura 35: Comparação gráfica dos resultados dos 3 autores	54
Figura 36. Dimensões da grelha para Câmara de Combustão em vista perspectiva	55
Figura 37: Dimensões da câmara de evaporação em vista perspectiva.....	56
Figura 38. Desenho esquemático da caldeira e todos os seus componentes	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores normalmente indicados para o coeficiente de excesso de ar.....	33
Tabela 2 - Poder calorífico superior dos combustíveis mais utilizados em caldeiras	34
Tabela 3 - Parâmetros do Ciclo	37
Tabela 4 - Pressões e temperaturas de superaquecimento do vapor de água.	38
Tabela 5. Avaliação de Grupo Potencial de Risco para Evaporador segundo NR-13.....	48
Tabela 6. Eficiência de solda de acordo com o tipo de solda e grau de inspeção.	50
Tabela 7. Tabela de valores dos Pontos da Caldeira.	52
Tabela 8: Tabela dos valores de calor transferido e perdido nos equipamentos	52
Tabela 9: Comparação de parâmetros entre os trabalhos levantados pelo autor.....	53
Tabela 10: Dimensões da Grelha da fornalha.....	55
Tabela 11: Dimensões da câmara de evaporação	56
Tabela 12. Especificação do tubo selecionado	57

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Calor específico médio das cinzas e gases de combustão	29
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras latinas

A_g	Área da grelha	[m ²]
$C_{p_{ar}}$	Calor específico médio do ar de combustão	[kJ/kg.°C]
$C_{p_{cb}}$	Calor específico médio do combustível	[kJ/kg.°C]
c_{pcz}	Calor específico médio de cinzas	[kJ/kg.°C]
c_{p_i}	Calor específico médio do componente i	[kJ/kg.°C]
\bar{C}_{p_q}	Calor específico médio dos gases	-
$C_{p_{\omega}}$	Calor específico médio da umidade do ar	[kJ/kg.°C]
$\frac{dE}{dT}$	Diferencial total de energia no processo	-
e	Coeficiente de excesso de ar	-
Δh_{ar}	Diferença de entalpia do ar que entra na caldeira	-
Δh_c	Diferença de entalpia do combustível da caldeira	-
Δh_{ω}	Diferença de entalpia da umidade do ar que entra na caldeira	-
h_{ls}	Entalpia do líquido saturado	[kJ/kg]
h_{vs}	Entalpia do vapor saturado	[kJ/kg]
h_e	Entalpia da água na entrada do tambor	[kJ/kg]
h_s	Entalpia da água que deixa o tambor	[kJ/kg]
\dot{m}_{cb}	Consumo de combustível	[kg/s]
m_{ar}	Massa real de ar de combustão	[kg/kg comb]
\bar{m}_{O_2}	Massa mínima e oxigênio para queimar o combustível	
$m_{O_2}(C)$	Massa mínima de oxigênio para queimar o carbono	

$m_{O_2}(H_2)$	Massa mínima de oxigênio para queimar o hidrogênio	
$m_{O_2}(S)$	Massa mínima de oxigênio para queimar o enxofre	
\dot{m}_q	Massa real de gases de combustão	[kg/s]
\dot{m}_{cx}	Massa de cinzas leves arrastadas pelos gases	[kg/s]
\dot{m}	Fluxo total de água que deixa o tambor	[kg/s]
\bar{m}_{cb}	Taxa de carregamento	-
\dot{m}_{cb}	Consumo de combustível	[kg/h]
\bar{m}_{ar}	Massa estequiométrica do ar	[kg/kg combustível]
m_{ar}	Massa real de ar	[kg/kg combustível]
\bar{m}_g	Massa estequiométrica dos gases de combustão	[kg/kg combustível]
m_g	Massa real os gases de combustão	[kg/ kg combustível]
P_{cs}	Poder calorífico superior	[kJ/kg]
P_{ci}	Poder calorífico inferior	[kJ/kg]
\dot{Q}	Energia absorvida pela caldeira	[kW]
\dot{q}_q	Energia associada ao fluxo de gases	[kW]
\dot{Q}_d	Calor líquido disponível na câmara de combustão	-
T_{cb}	Temperatura do combustível	[°C]
T_{ar}	Temperatura do ar de combustão	[°C]
T°	Temperatura de referência	[°C]
T_q	Temperatura dos gases	[°C]
V_{ar}°	Volume estequiométrico de ar	[m ³ n/kg combustível]
V_{ar}	Volume real de ar	[m ³ n/kg combustível]
V_g°	Volume estequiométrico dos gases de combustão	[m ³ n/kgcombustível]

V_g	Volume real dos gases de combustão	
\dot{W}	Trabalho realizado no processo	[kW]
W	Teor de umidade	[kg umidade/kg combustível]
x_{m_i}	Fração mássica do componente i nos gases de combustão	-
x	Título do vapor	-

Letras gregas

η	Rendimento do sistema	
Σp	Soma de todas as perdas no processo.	
ω_{ar}	Umidade do ar	[kg/kg ar seco]
Σ	Símbolo do somatório	-

Fórmulas químicas

C	Teor de carbono	[kg carbono/kg combustível]
H	Teor de hidrogênio	[kg hidrogênio/kg combustível]
S	Teor de enxofre	[kg enxofre/kg combustível]
O	Teor de oxigênio	[kg oxigênio/kg combustível]

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1. <i>Objetivo geral</i>	3
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	3
1.3. ESTRUTURA DA MONOGRAFIA	4
CAPÍTULO II.....	5
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1. GERAÇÃO DE VAPOR	5
2.1.1. <i>História da geração de vapor</i>	5
2.1.2. <i>Tipos de Geradores de Vapor</i>	8
2.2. PRINCIPAIS COMPONENTES.....	12
2.2.1. <i>Cinzeiro</i>	12
2.2.2. <i>Fornalha ou Câmara de combustão</i>	12
2.2.3. <i>Caldeira/Vaso de pressão</i>	13
2.2.4. <i>Superaquecedor</i>	14
2.2.5. <i>Economizador</i>	16
2.2.6. <i>Chaminé</i>	17
2.2.7. <i>Reservatório</i>	17
2.2.8. <i>Bomba hidráulica</i>	17
2.3. DIAGRAMA DE MONTAGEM DA CALDEIRA	18
2.4. TIPOS DE VASOS DE PRESSÃO.....	18
2.5. NORMAS DE PROJETO E OPERAÇÃO.....	18
2.5.1. <i>Instalação da Caldeira</i>	21
2.5.2. <i>Segurança na Operação das Caldeira</i>	22
2.6. TERMODINÂMICA E FENÔMENOS DE TRANSPORTE.....	23
2.6.1. <i>Combustíveis</i>	23
2.6.2. <i>Combustão</i>	24
2.7. ANÁLISE ENERGÉTICA DOS COMPONENTES DA CALDEIRA	26
2.8. ESPECIFICIDADES DA CÂMARA DE COMBUSTÃO	30
CAPÍTULO III	31
METODOLOGIA.....	31

3.1. COMBUSTÃO NA CALDEIRA	32
3.2. SELEÇÃO DE COMBUSTÍVEL, CALDEIRA E SEUS COMPONENTES	34
3.3. HIPÓTESES	35
3.4. PARÂMETROS DO CICLO E DEFINIÇÃO DOS ESTADOS TERMODINÂMICOS	36
3.4.1. <i>Balanço de massa</i>	37
3.4.2. <i>Superquecedor</i>	37
3.4.3. <i>Economizador</i>	39
3.4.4. <i>Câmara de combustão</i>	40
3.4.5. <i>Câmara de Evaporação</i>	42
3.4.6. <i>Eficiência na geração de vapor</i>	43
3.5. PROJETO GEOMÉTRICO DOS EQUIPAMENTOS DE TROCA TÉRMICA	44
3.6. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MECÂNICOS DA CALDEIRA	45
3.6.1. <i>Determinação da Espessura das paredes dos tubos</i>	45
3.6.2. <i>Determinação da pressão máxima de trabalho admissível (PMTA).....</i>	47
3.6.3. <i>Volume do Evaporador e Grupo Potencial de Risco</i>	47
3.6.4. <i>Espessura Mínima para Chapas</i>	48
3.6.5. <i>Aspectos de soldagem</i>	49
3.7. ENGINEERING EQUATION SOLVER	51
CAPÍTULO IV	52
RESULTADOS	52
4.1. ESTADOS TERMODINÂMICOS DO CICLO	52
4.2. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	53
4.3. DIMENSÕES DA CÂMARA DE COMBUSTÃO	55
4.4. DIMENSÕES DA CÂMARA DE EVAPORAÇÃO	55
4.5. ESPECIFICAÇÃO DOS TUBOS.....	56
4.6. EQUIPAMENTOS ACOPLADOS	57
CAPÍTULO V	59
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	59
REFERÊNCIAS	62
ANEXO A – CÓDIGO EES PARA A CALDEIRA	64
ANEXO B - TENSÕES ADMISSÍVEIS (MPa) SEGUNDO CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1	68
ANEXO C – CLASSES DE AÇO CARBONO UTILIZADA NA CALDEIRA DE ACORDO COM A FORMA DE APRESENTAÇÃO	69

ANEXO D: PLANO DE MANUTENÇÃO DA CALDEIRA 70

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

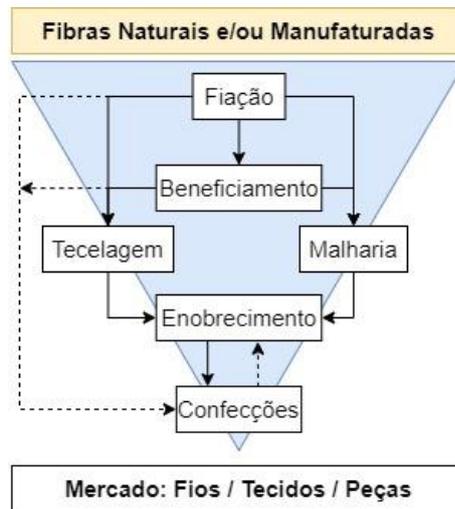
Na economia brasileira, o setor têxtil tem sido de grande importância industrial para o país (Bezerra & Freitas, 2013). Em 2014, a Associação Brasileira do Vestuário (ABRAVEST) identificou o Brasil como o quarto maior produtor de vestuário, chegando a 2,9% da produção mundial. O ciclo completo das etapas da confecção, na maioria das vezes não é realizado por uma única empresa, sendo alguns processos terceirizados por “indústrias de facção” que compõem a maioria das empresas do ramo da confecção, se dedicando apenas a uma fase do processo de fabricação de roupas (BEZERRA & FREITAS, 2013).

Segundo Silva *et al* (2012), na região do Agreste Pernambucano, a indústria de confecção e têxtil teve grande expansão, sendo atualmente a principal atividade industrial desta Mesorregião. Este avanço abrange principalmente as cidades de Caruaru, Toritama e Santa Cruz do Capibaribe, que segundo as informações da Relação Anual de Informações Sociais (RAISMTE), em 2013, aproximadamente 81% das confecções e indústrias têxtil do Agreste de Pernambuco estavam concentradas nestes três municípios.

Além da importância na geração de renda e empregos, o setor têxtil destaca-se por abranger outros segmentos, como a estamparia, tinturaria bordado, texturização e lavagem do *jeans*. No processamento do *jeans*, o setor responsável por transformar o material bruto em um produto final acabado é a lavanderia. Nela, a cor, a textura, e acabamentos personalizados são inseridos, modificando a estrutura do tecido de acordo com a necessidade do cliente (SILVA *et al.*, 2012).

A cadeia têxtil é simplificada na Figura 1, onde é mostrado o processo iniciando na divisão das fibras têxteis em naturais e manufaturadas, seguindo para a fiação, beneficiamento, tecelagem ou malharia, enobrecimento e, por fim, a confecção (BEZERRA & FREITAS, 2013). As lavanderias participam principalmente dos processos de beneficiamento, enobrecimento, tingimento, alvejamento e lavagem.

Figura 1 - Configuração simplificada da cadeia têxtil



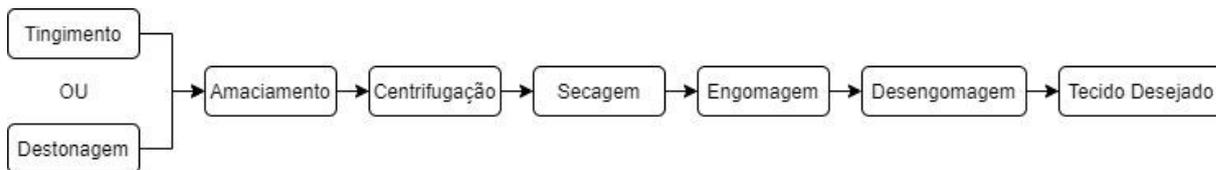
Fonte: Bezerra e Freitas, 2013. Adaptado

Na cadeia têxtil, o tecido pode sofrer dois processos inicialmente, o tingimento para obter coloração mais escura que a original do tecido, ou a destonagem para obter coloração mais clara. No processo de destonagem (alvejamento), as peças sofrem uma descoloração causada por uma enzima aplicada nas peças durante 45 minutos na temperatura de 60 °C. No processo de tingimento é adicionado o corante na cor desejada em um equipamento que aplica o pigmento ao tecido em um intervalo de temperatura que varia de acordo com o tecido e com o tipo de pigmento aplicado. Em seguida o tecido segue para o amaciamento. Nesse processo é dado ao *jeans* uma maior maciez aplicando um amaciante numa temperatura de 40°C durante 5 ou 10 minutos. Nos processos de centrifugação e secagem ocorrem a remoção da umidade contida no tecido por meio de centrífugas ou vaporização térmica.

No processo seguinte, o de engomagem, aplica-se uma “goma” no tecido para impor propriedades desejadas em altas temperaturas. Tais propriedades dependem do tipo de goma e do tipo de tecido que em seguida segue para a desengomagem, processo em que é removido a goma adicionada no processo anterior ao tecido. Para que essa remoção seja possível, o tecido deve ser submetido à temperatura de 60 °C sob a ação de um desengomante durante 20 minutos.

Na Figura 2 temos o fluxograma do processo produtivo da empresa, localizada na cidade de Toritama-PE.

Figura 2 - Fluxograma do processo produtivo



Fonte: Adaptação de Bezerra & Freitas, 2013.

Percebe-se então que há uma demanda por energia térmica associada aos processos. Para isso, existe a transferência de calor nos equipamentos através do vapor gerado pelo gerador de vapor. Este vapor deve ser gerado em uma taxa que supra a necessidade de toda a planta a uma pressão suficiente para que o vapor chegue em todos os equipamentos superando todas as perdas de carga existentes nas tubulações externas e internas dos equipamentos. O vapor é conduzido até os equipamentos através de uma tubulação projetada e isolada termicamente para que as perdas de calor sejam reduzidas.

Dessa forma, ao perceber a importância da geração de vapor em todos os processos dessa cadeia têxtil, a empresa onde o estudo foi feito, realizou uma auditoria externa junto dos alunos de Mestrado de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto com intuito de avaliar a empresa do ponto de vista energético, em 2014. Nessa auditoria, foi avaliada a necessidade de 4.000 kg de vapor por hora, com uma pressão de projeto de 10kgf/cm². Diante disso, este trabalho tomará dados de entrada a vazão mássica de vapor e a pressão obtidas no processo de auditoria para projetar uma caldeira que atenda plenamente as condições de funcionamento, operação e segurança.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. *Objetivo geral*

Este trabalho tem como objetivo geral realizar o dimensionamento termodinâmico de uma caldeira que produza vapor em quantidade e pressão suficiente para ser utilizado nos processos produtivos em uma indústria têxtil no agreste de Pernambuco.

1.2.2. *Objetivos específicos*

Como objetivos específicos, o presente trabalho pretende:

- Estudar os tipos de caldeiras existentes;

- Selecionar o melhor tipo para a aplicação desejada;
- Projetar as dimensões da caldeira que supra a necessidade de vapor e pressão especificada através dos balanços de energia termodinâmicos;
- Calcular a quantidade necessária de combustível que será queimado assim como a emissão de gases de combustão na atmosfera;
- Dimensionar as partes importantes da caldeira, afim do melhor aproveitamento térmico;
- Estabelecer condições de trabalho para que o equipamento se comporte conforme o projetado, evitando assim falhas e possíveis acidentes;
- Estabelecer critérios de operação, tanto como de instalação e segurança seguindo as normas e padrões estabelecidos.

1.3. ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. No primeiro capítulo é apresentada a justificativa, motivações e objetivo geral e os específicos.

No segundo capítulo é exposta a fundamentação teórica e nela são relatados os conceitos do que é vapor e como ele é gerado em um contexto de evolução histórica em suas principais aplicações até hoje. Além disso, são apresentados os principais tipos de geradores e seus componentes. Também serão abordados alguns requisitos de projeto e operação das Normas Regulamentadoras de Caldeiras e Vasos de Pressão, como a NR13, NR253 e a NBR 12177. E por fim, conceitos termodinâmicos e fenômenos do transporte serão devidamente explanados com intuito de apresentar as características que influenciam na eficiência de um gerador de vapor.

No capítulo três é apresentada a metodologia de desenvolvimento deste trabalho, a qual descreve o funcionamento do ciclo da caldeira, as considerações de projeto e os parâmetros de entrada para as equações de balanço de energia aplicadas de acordo com as Leis da Termodinâmica em cada componente da caldeira. E também as dimensões físicas da caldeira.

No capítulo quatro são apresentados os resultados do trabalho: os estados termodinâmicos definidos, o dimensionamento da caldeira e os procedimentos necessários para sua instalação e manutenção que assegurem segurança para os operadores. E por fim, teremos o capítulo cinco com as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1.GERAÇÃO DE VAPOR

Ao longo da história, o homem vem cada vez mais superando seus desafios. Durante este percurso, civilizações, organizações e indivíduos contribuíram em avanços tecnológicos que nunca teriam sido realizados antes. Um bom exemplo é o uso seguro e eficiente do vapor. Um dos mais significantes eventos que modificou o mundo atual foi a Revolução Industrial que começou no final do século XVII. O desejo em gerar vapor a qualquer hora e quando precisasse foi o que marcou a revolução e continuou graças aos avanços tecnológicos. Sem esses avanços, a revolução industrial não seria igual a qual conhecemos (KITTO & STULTZ, 2005).

2.1.1. História da geração de vapor

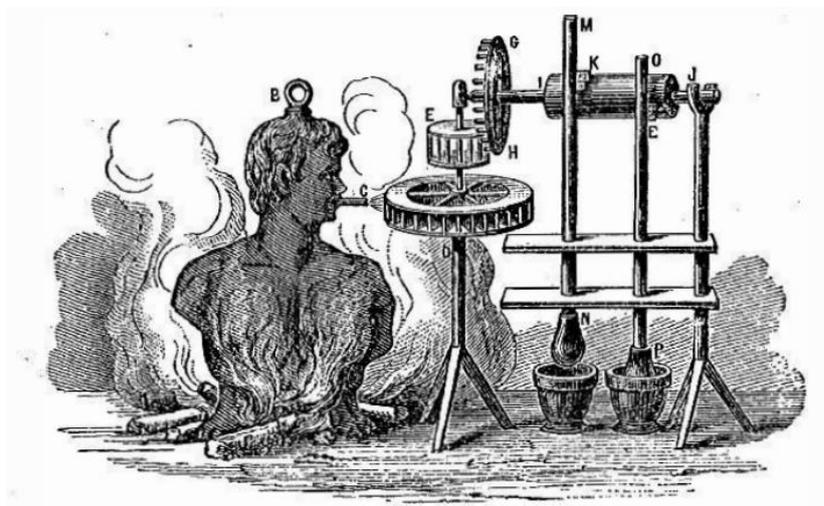
Em 200 A.C., o matemático e cientista grego Hero projetou uma máquina simples que utilizava do vapor como fonte de energia (Figura 3). A máquina possuía um caldeirão com água em cima de um local com chamas. As chamas aqueciam o caldeirão, transmitindo calor para a água. Quando a água alcançava os 100 °C, esta passava da forma líquida para a forma de vapor. O vapor fluía através de tubos acoplados a uma esfera que girava livre em torno de um eixo localizado em duas extremidades. Quando o vapor escapava pelos tubos angulados em 90° opostos entre si, a esfera girava em relação ao eixo. Hero nomeou o equipamento como *aeolipile*, que em *Latim* significa máquina rotatória a vapor. A invenção foi apenas um experimento sem nenhuma sugestão para o seu uso, porém deu início as ideias de utilização do vapor para produzir trabalho útil. Ainda hoje, a ideia principal prevalece: gerar calor, transferir calor para a água para produzir vapor (KITTO & STULTZ, 2005).

Figura 3 - *Aeolipile* de Hero



No início do século XVII o italiano Giovanni Branca projetou um equipamento que transformava a energia do vapor em trabalho útil (Figura 4). Primeiramente, o vapor era produzido seguindo o princípio do *Aeolipie* de Hero, sendo canalizado até uma roda que rotacionava com a pressão do vapor. Assim, iniciou-se o desenvolvimento da turbina a vapor.

Figura 4 - Turbina a vapor projetada por Branca



Fonte: Thurston, 1902

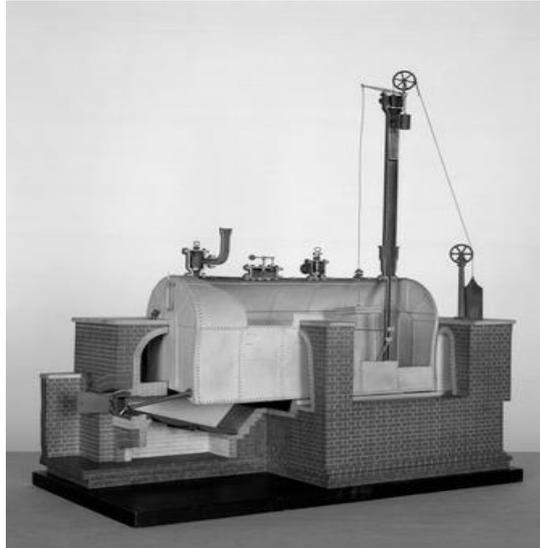
No século XVIII, surgiram as primeiras máquinas destinadas a gerar vapor, com o intuito da utilização posterior do calor proveniente da máquina. Esse tipo de equipamento surgiu com a necessidade de gerar calor sem o inconveniente da geração da queima direta do carvão fóssil. A ideia principal era captar a energia gerada em uma unidade central e distribuir o calor de forma mais sistematizada (BAZZO, 1995)

Nos dias atuais, as plantas indústria estão cada vez mais complexas, combinando elementos altamente sofisticados de Engenharia. O calor pode ser obtido tanto de recursos naturais (carvão, madeira, gás natural), quanto de energia nuclear através do urânio. Outras possíveis fontes de calor incluem calor residual de outros processos, gases de exaustão, biomassa, energia geotérmica, energia solar e outras fontes de reaproveitamento de calor (KITTO & STULTZ, 2005).

Um dos primeiros equipamentos já conhecidos como caldeira foi a *Waggon Boiler* (Caldeira Vagão), nome dado devido ao seu formato, apresentado por James Watt no final do século XVIII (Figura 6). Em seguida, o inventor e construtor Richard Trevithick, que observava as estações de bombeamento nas minas do seu pai e percebeu que o maior problema com muitos sistemas de bombeamento era a capacidade da caldeira. Naquela época o cobre era o único

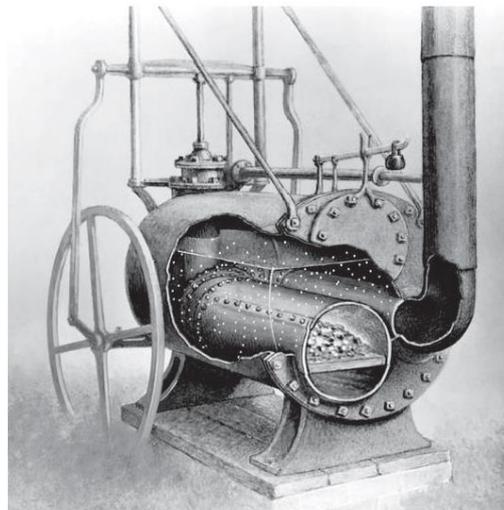
material disponível para este tipo de serviço até que as placas de ferro começaram a ser utilizadas, no entanto seu tamanho máximo era apenas de 60 cm. Em 1804, Trevithick projetou uma máquina de alta pressão, que só foi possível graças ao sucesso da construção de uma caldeira de alta pressão. A caldeira de Trevithick era feita de ferro fundido no formato cilíndrico e extremidades achatadas (KITTO & STULTZ, 2005).

Figura 5 - Caldeira Vagão projetada por James Watt



Fonte: Science Museum, 2020

Figura 6 - Caldeira de alta pressão projetada por Trevithick



Fonte: Kitto & Stultz, 2005.

Ao passo em que as demandas por vapor foram aumentando, houve necessidade de aumentar a capacidade das caldeiras ou acabar com o inconveniente de operar várias unidades

menores. Os engenheiros sabiam que, quanto maior a área de contato com o vapor, maior seria sua capacidade e eficiência. Pensando em melhorar essa eficiência, os desenvolvedores de máquinas a vapor começaram a pensar em termos de economia de combustível. A maior parte do calor era perdido por conta do pouco contato que a água e os gases tinham com a superfície aquecida. O Dr. John Allen foi o primeiro pesquisador a calcular a eficiência de uma caldeira em 1730. Para reduzir as perdas de calor, Allen desenvolveu um forno interno com a fumaça fluindo através de um tubo pela água. Para evitar uma deficiência no fornecimento de ar para a combustão, Allen sugeriu o uso de foles para forçar a passagem de ar, representando assim a primeira forma de circulação forçada.

Projetos posteriores adicionaram vários tubos de passagem de gás, ao invés de apenas um, o que aumentou a área de contato com a água. As caldeiras flamotubulares foram o *design* essencial dos meados de 1870.

Apesar das modificações, essas caldeiras eram limitadas em capacidade e pressão, o que por sua vez limitava suas dimensões. Além dos problemas de engenharia, houve um grande número de acidentes provocados devido ao aquecimento direto do vaso de pressão, que continha grandes volumes de água e vapor submetidos a altas temperaturas e pressão. Assim, os inventores reconheceram que precisariam de uma estrutura diferente que suportasse maiores capacidades limitando as consequências relacionadas a problemas de alta pressão, assim, começaram a desenvolver as caldeiras do tipo aquatubulares (KITTO & STULTZ, 2005).

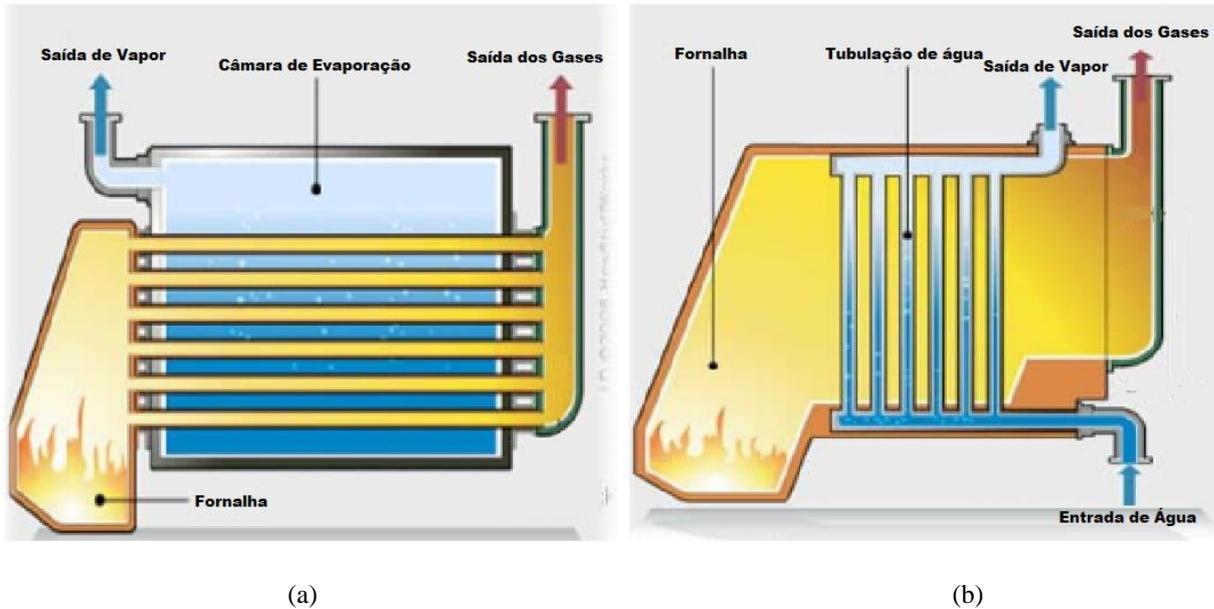
Além de todo o estudo em engenharia sobre as centrais de geração de vapor, vale ressaltar a importância do equipamento para livrar os processos de produção do inconveniente que é a queima direta do combustível no local em que é desejada a troca de calor. Uma centralização da geração de calor ajuda a distribuir de forma mais conveniente e prática o calor por toda a instalação.

2.1.2. Tipos de Geradores de Vapor

Geradores de vapor são equipamentos complexos que produzem vapor transformando a energia térmica de um combustível junto com ar, aquecendo um líquido até que este chegue no seu estado gasoso, constituídos de equipamentos associados e integrados para a obtenção de um maior rendimento térmico possível. Essa definição abrange todos os tipos de geradores de vapor, seja de água, mercúrio ou qualquer outro produto, sendo os equipamentos geradores de vapor de água mais conhecidos como Caldeiras de Vapor (PERA, 1990).

Atualmente, existem dois principais tipos de geradores de vapor, os flamotubulares e os aquatubulares. Ambos são compostos por um corpo e tubos internos resistentes a pressão, montados sobre uma estrutura de alvenaria ou metálica que envolve o corpo da caldeira e a fornalha (BAZZO, 1995). As representações destes tipos de caldeiras podem ser observadas na Figura (7) a seguir:

Figura 7. Caldeira (a) Flamotubular e (b) Aquatubular



Fonte: Thermodyne Engineering (2020).

As caldeiras do tipo flamotubulares, fogotubulares ou fumotubulares são projetadas de forma que a água circule pela carcaça externa enquanto os gases de combustão passam por tubos de duas ou mais passagens que seguem em direção a chaminé onde são descartados (BAZZO, 1995). Sua aplicação, geralmente, abrange pequenas capacidades e produção de vapor saturado a baixa pressão (LEITE, 2008). Uma caldeira Flamotubular industrial, pode ser visualizada na Figura 8, a seguir:

Figura 8 - Seção de uma caldeira flamotubular do tipo vertical



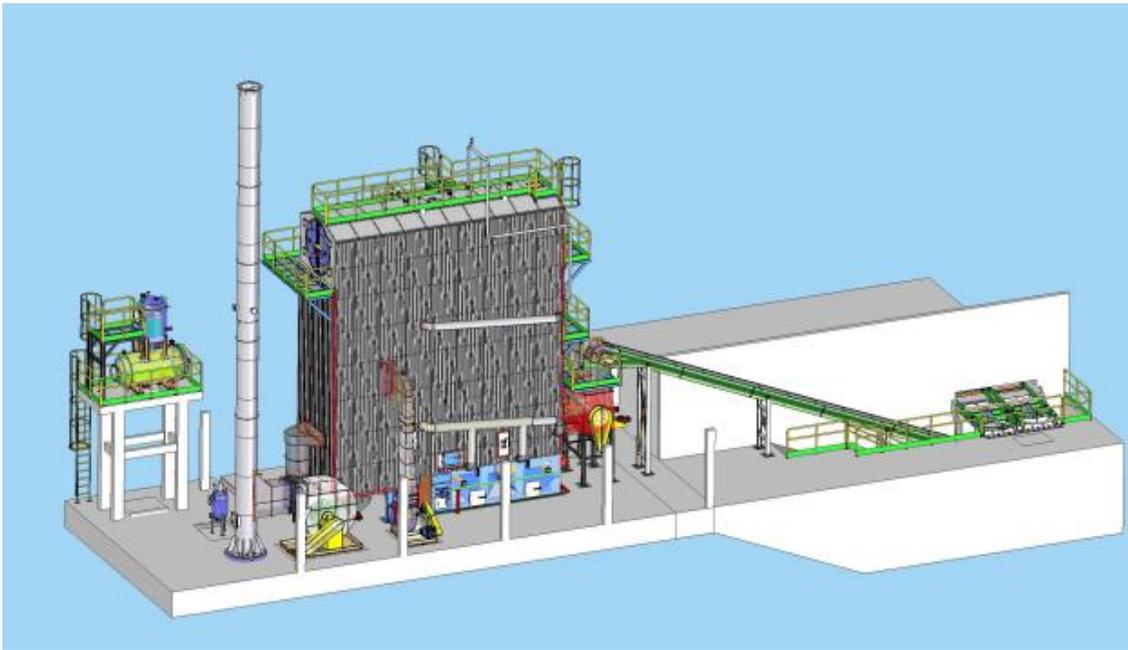
Fonte: Soluções Industriais, 2020.

As caldeiras flamotubulares podem ser construídas com fornalhas internas ou externas, sendo as de fornalha interna as que possuem maior produção de vapor por unidade de área de superfície de aquecimento, variando entre 30 e 40 kg/m² h.

Para que haja o contato da água com a total superfície dos tubos, o nível de água deve estar sempre acima da tubulação. Essas caldeiras de fornalha interna são também conhecidas como caldeiras escocesas, onde geralmente são utilizados óleo ou gás natural como combustível. Mesmo com um rendimento térmico próximo dos 84%, elas possuem uma pressão e produção de vapor limitada, sendo operantes em até 15 bar e 15.000 kg de vapor por hora (BAZZO, 1995).

Para a utilização de combustíveis sólidos, como lenha ou carvão, opta-se por caldeiras flamotubulares de fornalha externa. Esse tipo de fornalha é totalmente envolvido por paredes d'água, uma característica das caldeiras aquatubulares, para melhor aproveitamento do calor gerado pela fornalha externa, porém, os gases seguem por tubos, caracterizando como caldeiras flamotubulares mista, visto na Figura 9.

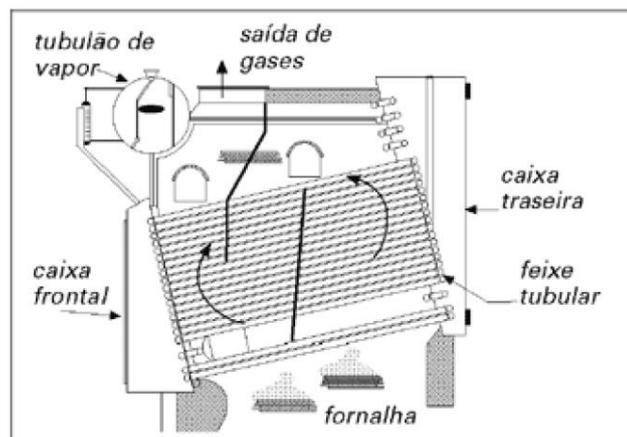
Figura 9 – Caldeira flamotubular com fornalha aquatubular MGV-8000



Fonte: Baggio, 2018.

Já as caldeiras aquatubulares são projetadas de forma que a água passe por dentro dos tubos finos, distribuídas em paredes d'água ou feixes tubulares, como visto na Figura 10. As paredes d'água são posicionadas em volta da câmara de combustão onde essas paredes recebem calor predominantemente através de radiação. Os feixes tubulares são interligados a dois tambores, onde a troca de calor acontece por convecção e radiação gasosa (BAZZO, 1995). Geralmente, esse tipo de caldeira é utilizado quando se requer uma capacidade de produção de vapor de maior porte e com pressões e temperatura do vapor superaquecido elevadas (LEITE, 2008).

Figura 10 - Diagrama de uma caldeira aquatubular.



Fonte: Alberichi, 2013

Conhecido os principais tipos de caldeiras, no tópico seguinte serão abordados os principais componentes para as caldeiras citadas.

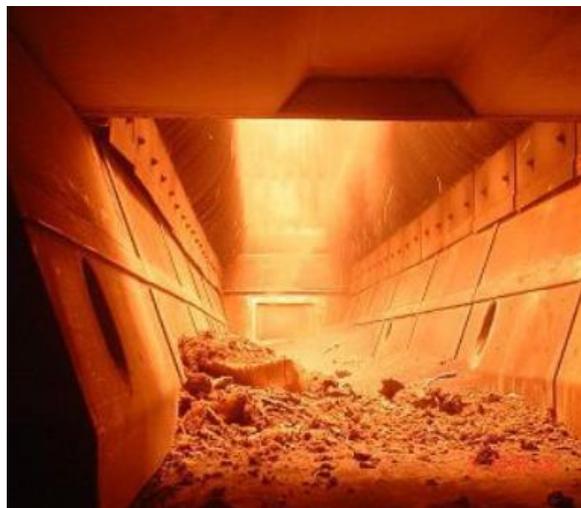
2.2. PRINCIPAIS COMPONENTES

Em geral, os tipos de caldeiras citados podem possuir os componentes mostrados a seguir.

2.2.1. Cinzeiro

Para o processo da queima de combustível, tem-se inicialmente um local específico para o depósito do mesmo. O cinzeiro é o local onde são armazenadas as cinzas ou restos de combustíveis que atravessaram a grelha ou canais de vazão de cinzas e não completaram a combustão. Para as caldeiras flamotubulares de fornalha externa, tem-se a fornalha com grelha como o lugar onde o combustível sólido é depositado para ser queimado, já nas caldeiras de fornalha interna, tem-se os queimadores posicionados em seu interior (PERA, 1990). A Figura 11 mostra a visão interna de um cinzeiro utilizado em caldeiras industriais de grande porte.

Figura 11 - Interior de um cinzeiro de caldeira industrial

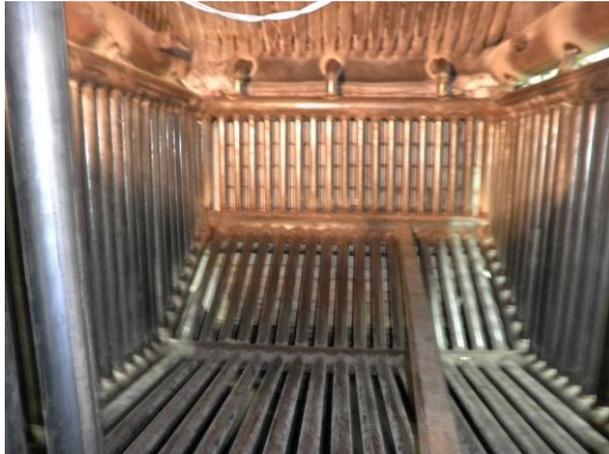


Fonte: Malgadi, 2020

2.2.2. Fornalha ou Câmara de combustão

A combustão efetiva ocorre na câmara de combustão ou fornalha, é o volume onde todo o combustível já foi consumido e então ocorre a troca de calor. Essa câmara pode ser revestida de alvenaria refratária, podendo ou não conter tubulações em volta (paredes d'água) (BAZZO, 1995), como visto na Figura 12:

Figura 12 - Fornalha de uma caldeira industrial



Fonte: Maringá, 2018

A câmara de combustão é localizada na parte inicial e mais inferior da caldeira. Dado início ao processo de queima e transferência de calor gerado na caldeira. Nela, temos como entrada o combustível (lenha) e o ar necessário para a queima, tendo como saída os gases de combustão e as cinzas provenientes da queima do combustível.

2.2.3. Caldeira/Vaso de pressão

Os gases de combustão, em seguida, seguem seu percurso, seja em tubos (flamotubulares) ou em canais (aquatubulares) onde trocam calor com a água, elevando-a até sua temperatura de ebulição gerando o vapor desejado. Esse processo ocorre em um vaso fechado, conhecido como a caldeira propriamente dita, ou vaso de pressão, visto na Figura 13, que é submetido a altas pressões, seja pelos gases de combustão ou pela pressão de vapor da água (PERA, 1990).

Figura 13 - Exemplo de caldeira industrial



Fonte: GB Técnica, 2019

2.2.4. Superaquecedor

Antes de entrar para a câmara de evaporação, os gases passam por um trocador de calor que fará com que a temperatura do vapor que sai da câmara de evaporação aumente, garantindo que o vapor não condense ao longo da tubulação que o leva até os equipamentos de uso. O vapor trocará calor com os gases no seu ponto de maior temperatura, através do superaquecedor, fazendo com que a troca seja mais rápida e mais eficiente.

Figura 14 - Superaquecedor de caldeira industrial



Fonte: (Wuxi CO., 2019)

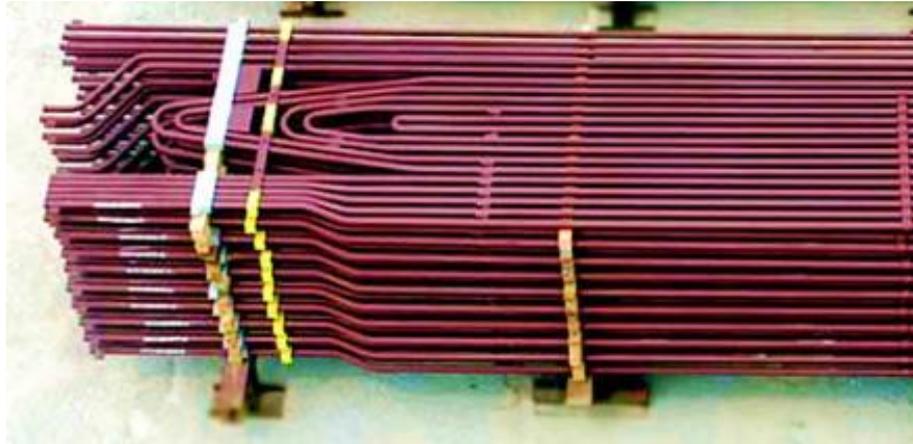
Existem basicamente dois tipos de superaquecedores: os convectivos e os radiantes. Os convectivos são instalados no curso dos gases de combustão, como mostra na Figura 15, enquanto os radiantes são instalados direto na câmara da combustão em contato com o calor radiante das chamas, ilustrado na Figura 16:

Figura 15 - Superaquecedor do tipo convectivo.



Fonte: ORL, 2020.

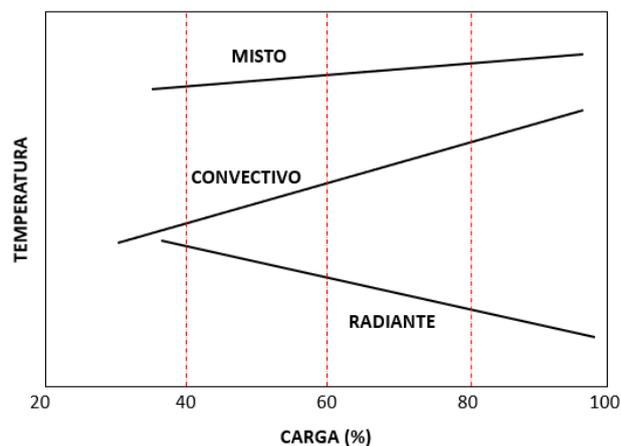
Figura 16 – Superaquecedor do tipo radiante.



Fonte: Samarth Engineering. 2020.

Bazzo (1995) mostra através do gráfico da Figura 17 como a temperatura se comporta de acordo com a carga de utilização da caldeira nos tipos de superaquecedores acoplados. Na Figura 17, pode-se observar que a temperatura de saída do vapor varia negativamente para os superaquecedores radiantes de acordo com a carga que será utilizada na caldeira.

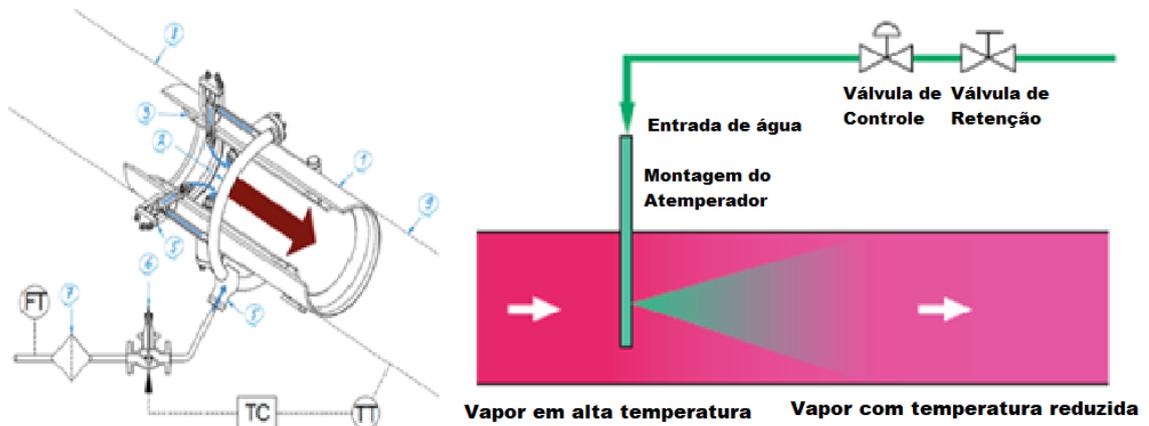
Figura 17 - Comportamento da temperatura de saída do vapor de acordo com a carga de utilização da caldeira.



Fonte: BÓÇON, 2015

Para ter um melhor controle da temperatura de saída de vapor, é necessária a instalação de um atemperador, dispositivo que controla a temperatura do vapor através da injeção de água na tubulação na proporção correta. A Figura 18 ilustra o esquema de injeção de água na tubulação de vapor através do atemperador.

Figura 18 - Esquematização de um atemperador.

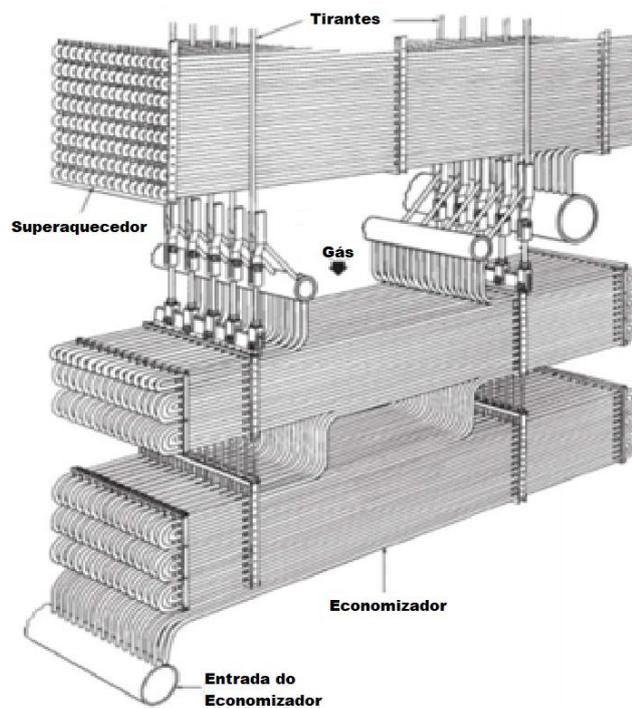


Fonte: IMI CRITICAL ENGINEERING and CCJ, 2020 (Adaptado).

2.2.5. Economizador

No final do processo, os gases de combustão ainda possuem um calor residual. Este calor ainda pode ser aproveitado através do economizador, visto exemplo na Figura 19. Este componente “economiza” este calor residual através da troca com a água de alimentação, elevando um pouco sua temperatura, antes de entrar no vaso de pressão (PERA, 1990).

Figura 19 - Economizador de caldeira industrial



Fonte: Telhado, 2015

2.2.6. Chaminé

Por fim, os gases de combustão saem pela chaminé, processo também conhecido como *tiragem*. Nessa etapa os gases podem ser expulsos por um ventilador exaustor, sendo chamado de tiragem induzida, ou por um ventilador soprador de ar, com pressão suficiente para vencer a perda de carga, chamado de tiragem forçada (PERA, 1990). Na Figura 20 vemos um exemplo de chaminé utilizada na caldeira industrial.

Figura 20 - Chaminé de uma caldeira industrial



Fonte: (SmartFire, 2019)

2.2.7. Reservatório

O reservatório de água deve suprir a volume exigido pela caldeira para seu funcionamento. Neste trabalho não é considerada a vazão de água de entrada no reservatório, considerando assim que o reservatório do sistema possui um volume suficientemente grande que mantenha a mesma pressão durante todo o fluxo de trabalho. Pode-se utilizar de um reservatório comum residencial, contanto que o volume supra a necessidade da caldeira.

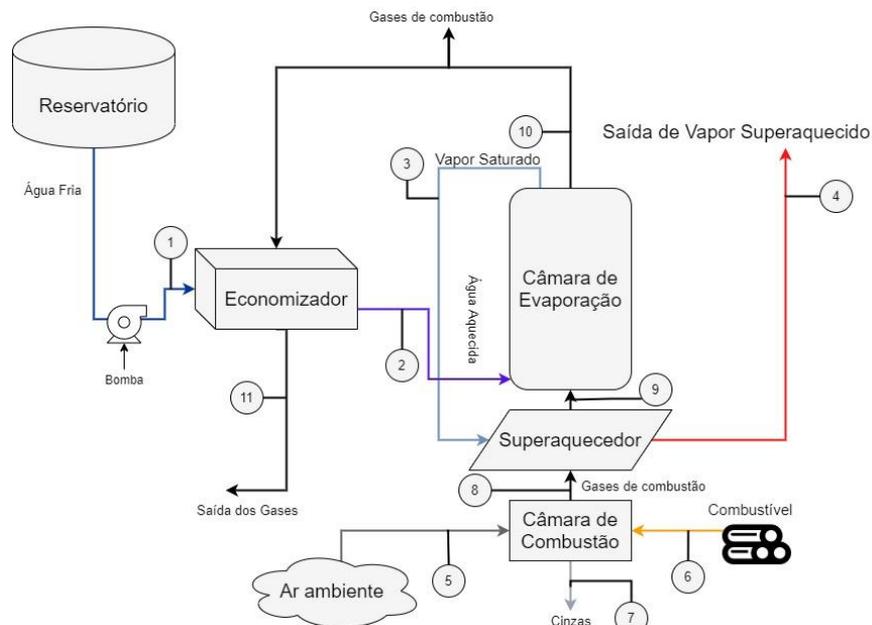
2.2.8. Bomba hidráulica

A bomba hidráulica é utilizada para promover a pressão necessária para que a água escoar pela caldeira. Sem ela, o escoamento se torna inviável no equipamento. O cálculo da bomba é feito através da pressão provida pela altura do reservatório e a pressão necessária para o escoamento da água no interior da caldeira.

2.3. DIAGRAMA DE MONTAGEM DA CALDEIRA

Uma vez demonstrados os tipos de caldeiras e os seus componentes, a acoplagem dos equipamentos será dada pela Figura 21, onde mostra a posição de um equipamento em relação ao outro.

Figura 21: Diagrama sequencial dos equipamentos da caldeira



Fonte: Autor (2020)

2.4. TIPOS DE VASOS DE PRESSÃO

Segundo Telles (1986) os vasos de pressão de forma geral podem ser cilíndricos, cônicos ou esféricos. Podendo ainda diferir quanto a sua posição de instalação: verticais, horizontais e inclinados. De um modo geral os verticais são mais caros que os horizontais, contudo são preferíveis quando há uma limitação de terreno. Os horizontais por sua vez são comumente utilizados para trocadores de calor e para a maioria dos vasos de acumulação.

2.5. NORMAS DE PROJETO E OPERAÇÃO

Para a realização do projeto e operação das caldeiras, existem normas que regulamentam alguns processos e etapas. Tanto a Norma Regulamentadora 13 (NR-13) – Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações como a ASME - *Boiler and Pressure Vessel Code* são as normas que norteiam o desenvolvimento dos projetos de caldeira.

A NR-13 (1996) sob a luz da ASME para vasos de pressão é a norma que "...estabelece requisitos mínimos para gestão da integridade estrutural de caldeiras a vapor, vasos de pressão

e suas tubulações de interligação nos aspectos relacionados à instalação, inspeção, operação e manutenção, visando à segurança e saúde dos trabalhadores”. Esta norma, em geral, aplica-se a todos os equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão atmosférica através de qualquer fonte de energia.

O não cumprimento de qualquer item desta norma que possa causar acidente ou doença relacionada ao trabalho constitui uma condição de Risco Grave e Iminente (RGI). Algumas condições listadas a seguir constituem RGI sem necessidade de justificativa para enquadramento:

- Operação dos equipamentos que se enquadram nessa NR sem os dispositivos necessários de segurança contra a sobrepressão previstos nos códigos de projeto.
- O não cumprimento do prazo na inspeção de segurança periódica de caldeiras;
- Bloqueio intencional ou inadvertido dos dispositivos de controle de pressão das caldeiras e vasos de pressão sem a devida justificativa técnica baseada em normas ou procedimentos formais de operação;
- Ausência de dispositivos de controle de nível de água de caldeira;
- Continuidade de operação após ter sido indicado como não recomendada por relatório de inspeção de segurança.
- Operação da caldeira por trabalhador não habilitado de acordo com os requisitos estabelecidos no Anexo I da presente norma, ou que não esteja sob supervisão de um operador qualificado.

Muitas outras especificações estão presentes na norma, sendo necessário revisá-la por completo para cumprir com todos os seus requisitos.

Em relação ao projeto da caldeira, a norma apresenta algumas disposições gerais. Nesta NR, as caldeiras são subdivididas em 3 categorias conforme segue:

- Categoria A: Caldeiras cujo a pressão de operação é igual ou superior a 1960 kPa.
- Categoria C: Caldeiras cujo a pressão de operação é igual ou inferior a 588 kPa, e seu volume interno é igual ou inferior a 100 L (cem litros);
- Categoria B: Caldeiras que não se enquadre nas categorias anteriores.

Os itens obrigatórios, para caldeiras de combustíveis sólidos, que devem conter no equipamento são:

- Válvula de segurança com pressão de abertura ajustadas para valor igual ou inferior a pressão máxima de trabalho admissível (PMTA);
- Instrumento indicador de pressão de vapor acumulado;
- Sistema de alimentação de água independente com intertravamento para evitar o superaquecimento.

Toda caldeira deve conter fixada ao seu corpo, de fácil acesso e visualização os seguintes dados:

- Identificação do fabricante;
- Número de ordem definido pelo fabricante;
- Ano de fabricação;
- PMTA;
- Capacidade de produção de vapor;
- Área de superfície de aquecimento
- Código do projeto e ano de edição.

Além da placa de identificação, a sua categoria também deve estar visível (A, B ou C).

A norma também apresenta a documentação necessária que o usuário da caldeira deve possuir em seu estabelecimento. Os pontos necessários são os destacados:

- Informações contidas no prontuário da caldeira:
 - Código de projeto e ano de edição;
 - Especificação dos materiais;
 - Procedimentos de fabricação, montagem, inspeção e determinação da PMTA;
 - Registro de execução do teste hidrostático de fabricação;
 - Desenhos técnicos e dados para monitoramento de vida útil da caldeira;
 - Características funcionais;
 - Dados dos dispositivos de segurança;
 - Ano de fabricação;
 - Categoria da caldeira.
- Registro de Segurança;
- Projeto de Instalação;
- Projeto de Alteração ou Reparo;
- Relatórios de inspeção.

O Registro de Segurança é um livro constituído de páginas numeradas, pastas ou em formato digital, contendo todas as ocorrências importantes que possam influir nas condições de segurança da caldeira. Também deve conter as ocorrências de inspeções de segurança e extraordinárias, constando a condição operacional da caldeira, o nome legível e assinatura do profissional habilitado (PH) e do operador presente no momento da inspeção. Caso seja considerado que a caldeira está inadequada para uso, deve conter esta informação no Registro de Segurança, recebendo seu encerramento formal.

2.5.1. Instalação da Caldeira

Segundo a NR-13, a instalação da caldeira no ambiente em que será utilizada, deve seguir as normas impostas pela própria. A autoria do projeto de instalação deve ser do PH, obedecendo os aspectos de segurança, saúde e meio ambiente previstos em normas, convenções e disposições legais aplicáveis.

As caldeiras devem ser instaladas em casa de caldeiras ou em local apropriado, denominado área das caldeiras. Quando instalada em ambiente aberto, deve ser localizada a 3 metros de outras instalações, do limite de propriedade de terceiros, do limite com vias públicas e de depósito de combustíveis, com exceção de reservatórios para partida com até 2.000 L de capacidade. Deve também dispor de pelo menos 2 (duas) saídas amplas, permanentemente desobstruídas e dispostas em direções distintas e também um sistema de captação e lançamento dos gases e material particulado, proveniente da combustão. Sendo indispensável sistema de iluminação de emergência caso operar a noite.

Em ambiente fechado, a casa da caldeira deve conter as seguintes requisições:

- Um prédio separado, de material resistente ao fogo, podendo conter apenas uma parede adjacente a outras instalações do estabelecimento, com as outras paredes afastadas de no mínimo 3 (três) metros de outras instalações, conforme especificado para caldeiras instaladas em ambiente aberto;
- 2 (duas) saídas amplas desobstruídas permanentemente e em direções distintas;
- Ventilação permanente com entradas de ar que não possam ser bloqueadas;
- Não ser utilizada para qualquer outra finalidade;
- Acesso fácil e seguro para operação e manutenção da caldeira, sendo que nos guarda-corpos, os vãos devem impedir a queda de pessoas;

- Sistema de captação e lançamento dos gases e material particulado para fora da área de operação;
- Iluminação conforme as normas oficiais vigentes e sistema de iluminação de emergência.

Quando o local não puder atender os requisitos da norma, deve ser elaborado um projeto alternativo com medidas de segurança que atenuem os riscos, comunicando a representação sindical dos trabalhadores predominante no estabelecimento.

2.5.2. Segurança na Operação das Caldeira

Seguindo as especificações da NR13, toda caldeira deve possuir manual de operação atualizado, contendo os seguintes itens:

- Procedimentos de partidas e paradas;
- Procedimentos e parâmetros operacionais de rotina;
- Procedimentos para situações de emergência;
- Procedimentos gerais de segurança, saúde e preservação do meio ambiente.

Com o manual disponível em local de fácil acesso, a norma também exige os demais requisitos:

- Os instrumentos de controle devem ser mantidos calibrados e em boas condições. Pode-se ocorrer a neutralização provisória dos instrumentos, desde que haja uma justificativa formalmente documentada, por motivos de operação e manutenção;
- A qualidade da água deve ser controlada e tratada para que suas características físico-químicas sejam adequadas aos parâmetros de operação;
- Toda caldeira deve ser obrigatoriamente operada e controlada pelo operador de caldeira habilitado.

Além de cumprir com todos os requisitos da norma, as caldeiras devem ser submetidas a inspeções de segurança inicial, periódica e extraordinária, seguindo também recomendações da NR13.

Concluindo este tópico sobre as normas que regulam o projeto e instalação da caldeira de forma a propor mecanismos de operação segura, no próximo tópico será relatado os conceitos de termodinâmica e fenômenos dos transportes aplicados a caldeira.

2.6. TERMODINÂMICA E FENÔMENOS DE TRANSPORTE

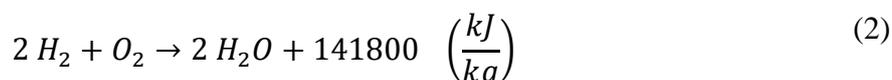
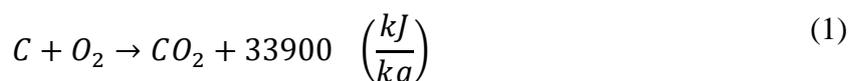
A termodinâmica é a ciência que descreve e define a transformação de uma forma de energia em outra. Suas leis básicas consistem em dizer que: a energia, em todas as suas formas, se conserva e apenas uma porção dessa energia pode ser convertida em trabalho útil. Essas leis são conhecidas como primeira e segunda lei da termodinâmica, respectivamente. A termodinâmica ajudou no entendimento do processo de transformação de calor (energia térmica) em trabalho mecânico (ÇENGEL & BOLES, 2011).

Antes do processo ser analisado, é necessário ter conhecimento sobre as propriedades do fluido de trabalho (nesse caso, o vapor), como a entalpia, entropia e volume específico. Para a obtenção dos dados sobre essas propriedades, existem tabelas específicas para o vapor e outros elementos que foram regulamentadas por associações internacionais. As mais comuns são as tabelas regulamentadas pela *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) que dão suporte aos cálculos termodinâmicos (KITTO & STULTZ, 2005).

Para entender melhor o fluxo de geração de vapor, alguns princípios devem ser visitados, como a evaporação e circulação da água. No processo de evaporação da água, ao invés de ocorrer o aumento da temperatura com a adição de energia térmica, a energia é utilizada na mudança de fase, da fase líquida para a gasosa. A quantidade de energia necessária para que o processo ocorra por completo depende basicamente da massa e da pressão do recipiente em que a água se encontra, assim, através das tabelas citadas anteriormente consegue-se medir essa energia (PERA, 1990).

2.6.1. Combustíveis

Define-se combustível como todas as substâncias capazes de reagir com o oxigênio e liberar energia, seja na forma líquida, sólida ou gasosa. No caso dos combustíveis sólidos, a energia liberada se dá pelas reações químicas do oxigênio com o carbono, hidrogênio e enxofre, vistos nas Equações 1, 2 e 3 (BAZZO, 1995):





2.6.2. Combustão

No processo de combustão, deseja-se utilizar o máximo energia que o combustível pode oferecer, mesmo sabendo que a combustão nunca terá uma eficiência de 100%, uma vez que parte da energia é perdida para o meio ambiente, seja pela exaustão dos gases, cinzas, pelas paredes da caldeira ou pela combustão incompleta. Para que as perdas sejam minimizadas, os seguintes pontos devem ser observados:

- Suprimento adequado de ar;
- Nível da mistura ar/combustível;
- Temperaturas compatíveis;
- Tempo de combustão.

O suprimento de ar deve ser feito de forma adequada. Quanto maior a quantidade de ar suprimido, melhor é realizado a combustão, porém, caso o suprimento seja feito de forma excessiva, pode-se perder calor sensível com os gases de combustão. Deve-se então observar um ponto de equilíbrio nesse suprimento para que as perdas sejam mínimas.

A temperatura de combustão depende do projeto da câmara e do tipo de combustível, assim como o tempo em que o combustível deve permanecer na câmara, para que sua combustão seja completa. Para se atingir maiores temperaturas, é aconselhável um pré-aquecimento do ar de combustão, recirculação de gases quentes ou utilizando oxigênio diretamente. A presença de monóxido de carbono ou fuligem na chaminé é um sinal de temperaturas baixas na câmara de combustão.

A partir da Equação 7 encontramos a quantidade mínima necessária de oxigênio para que a combustão seja completa.

$$\bar{m}_{O_2} = m_{O_2}(C) + m_{O_2}(H_2) + m_{O_2}(S) \quad (7)$$

Em que:

\bar{m}_{O_2} = Massa mínima de oxigênio para queimar o combustível

$m_{O_2}(C)$ = Massa mínima de oxigênio para queimar o carbono

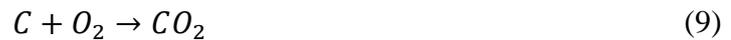
$m_{O_2}(H_2)$ = Massa mínima de oxigênio para queimar o hidrogênio

$m_{O_2}(S)$ = Massa mínima de oxigênio para queimar o enxofre

Segundo Çengel (2011), podemos admitir que a parcela de oxigênio contido no ar representa 21% de sua massa total, logo podemos calcular a massa de ar em relação a massa de oxigênio presente no mesmo pela Equação 8:

$$\bar{m}_{ar} = \frac{100}{21} \times \dot{m}_{O_2} \quad (8)$$

Para calcular a massa estequiométrica do oxigênio para queimar apenas o carbono presente no combustível tomamos como base a Equação 9:



Uma vez que temos que 12 kg/kmol de carbono que reage com 32 kg/kmol de oxigênio para formar o CO_2 , assim temos a Equação 10:

$$m_{O_2}(C) = \frac{32}{12} \times C \quad (10)$$

Onde:

C = Teor de carbono presente no combustível.

Da mesma forma temos para o hidrogênio e o enxofre nas Equações 11 e 12:



Para o hidrogênio, leva-se em consideração o hidrogênio já combinado com o próprio oxigênio do combustível, assim temos a Equação 13:

$$m_{O_2}(H_2) = \frac{16}{2} \times \left[H - \frac{O}{8} \right] \quad (13)$$

Onde:

H = Teor de hidrogênio presente no combustível.

E para o enxofre temos a Equação 14:

$$m_{O_2}(S) = \frac{32}{32} \times S \quad (14)$$

Onde:

S = Teor de enxofre presente no combustível.

2.7. ANÁLISE ENERGÉTICA DOS COMPONENTES DA CALDEIRA

Para um bom aproveitamento do calor fornecido na câmara de combustão, a caldeira necessita de alguns componentes que façam com que esse aproveitamento seja mais efetivo, e funcione como planejado. Os componentes utilizados são listados a seguir.

Na análise energética utilizamos a primeira Lei da Termodinâmica nos equipamentos para quantificar a entrada e saída de energia pela Equação 15.

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum m_e \cdot h_e - \sum m_s \cdot h_s \quad (15)$$

Onde,

$\frac{dE}{dt}$ = Diferencial total de energia no processo

\dot{Q} = Energia absorvida pela caldeira (kW)

\dot{W} = Trabalho realizado no processo (kW)

m_e = Massa que entra no sistema (kg/s)

h_e = Entalpia da massa que entra no sistema (kJ/kg)

m_s = Massa que sai do sistema (kg/s)

h_s = Entalpia da massa que sai do sistema (kJ/kg)

Na análise da energia envolvida nos processos que ocorrem em uma caldeira, deve-se levar em consideração o balanço de energia proveniente da primeira Lei da Termodinâmica (Equação 15). A partir dela, desenvolve-se a equação necessária para calcular o calor disponível na câmara de combustão somando o calor liberado na queima do combustível mais o calor associado aos fluxos de massa do combustível, do ar e da umidade do ar de combustão, exposto na Equação 16 (Bazzo, 1995):

$$\dot{Q}_d = \dot{m}_{cb} \times [PCI + \Delta h_{cb} + m_{ar} \cdot \Delta h_{ar} + \omega_{ar} \cdot m_{ar} \cdot \Delta h_{\omega}] \quad (16)$$

Onde,

\dot{Q}_d = Calor líquido disponível na câmara de combustão (kJ/s)

\dot{m}_{cb} = Consumo de combustível (kg/s)

Δh_{ω} = Variação da entalpia da umidade do ar (kJ/kg)

Δh_{cb} = Variação da entalpia do combustível (kJ/kg)

Δh_{ar} = Variação da entalpia do ar (kJ/kg)

m_{ar} = Massa real de ar de combustão (kg/kg comb)

ω_{ar} = Umidade do ar (kg/kg ar seco)

PCI = Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg)

Sendo T a temperatura ambiente, ainda por meio da Primeira Lei da Termodinâmica, temos que:

$$\Delta h_{ar} = Cp_{ar} \cdot (T_{ar} - T') \quad (17)$$

Em que:

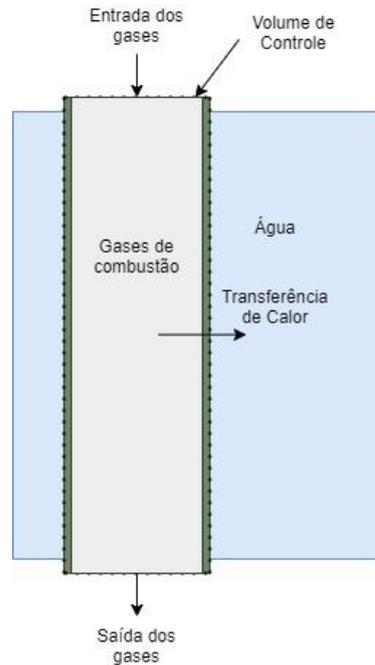
T_{ar} = Temperatura do ar de combustão (°C)

T' = Temperatura de referência (°C)

Cp_{ar} = Calor específico médio do ar de combustão (kJ/kg.°C)

Os gases de combustão perderão calor para a água da caldeira através dos tubos e paredes d'água, como visto na Figura 22.

Figura 22: Volume de controle da tubulação



Fonte: Autor (2020)

Pela primeira Lei da Termodinâmica, temos a Equação 18 para a transferência de calor dos gases de combustão para a água:

$$\frac{dE}{dT} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}(h_e - h_s) \quad (18)$$

Onde:

$\frac{dE}{dT}$ = diferença de energia total em relação ao tempo

\dot{Q} = transferência de calor entre a fronteira do volume de controle

\dot{W} = transferência de trabalho entre a fronteira do volume de controle

\dot{m} = fluxo de massa no volume de controle

h_e = entalpia associada à massa que entra no volume de controle

h_s = entalpia associada à massa que sai do volume de controle

Com o sistema funcionando em regime permanente e nenhum trabalho sendo realizado, simplificamos a Equação 18 para a Equação 19:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot (h_s - h_e) \quad (19)$$

Onde, para vapor saturado (configuração de mistura), temos a Equação 20 de acordo com Çengel, (2011):

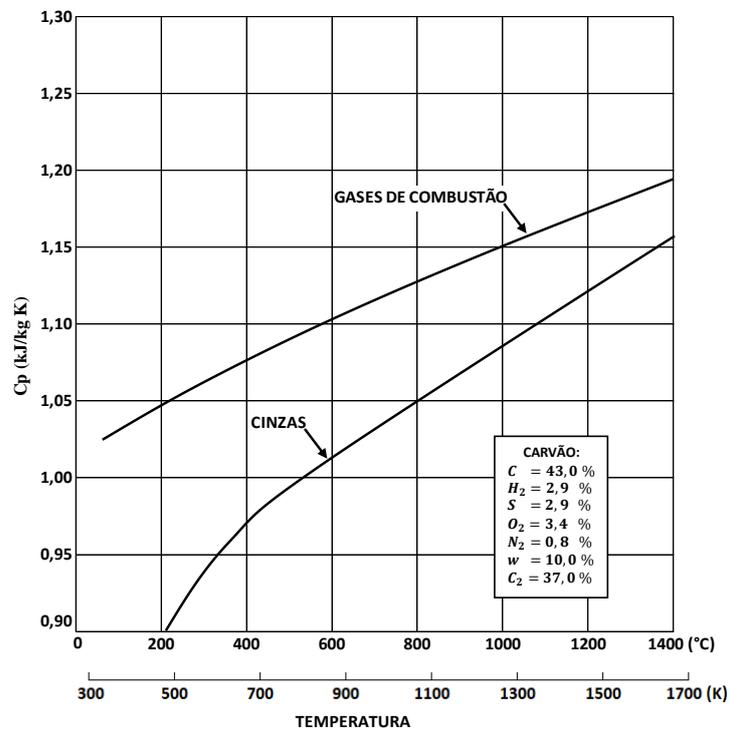
$$h_s = (1 - x) \cdot h_{ls} + x \cdot h_v \quad (20)$$

Para determinar a temperatura dos gases de combustão em qualquer ponto da caldeira, deve-se calcular a energia residual do fluxo de gases e cinzas leves, segundo Bazzo (1995), pela Equação 21:

$$\dot{q}_q = \dot{m}_q \cdot \bar{c}_{pq} \cdot (T_q - T') + \dot{m}_{cz} \cdot c_{pcz} \cdot (T_q - T') \quad (21)$$

O valor da entalpia e do calor específico médio das cinzas são encontrados no Gráfico 1:

Gráfico 1. Calor específico médio das cinzas e gases de combustão



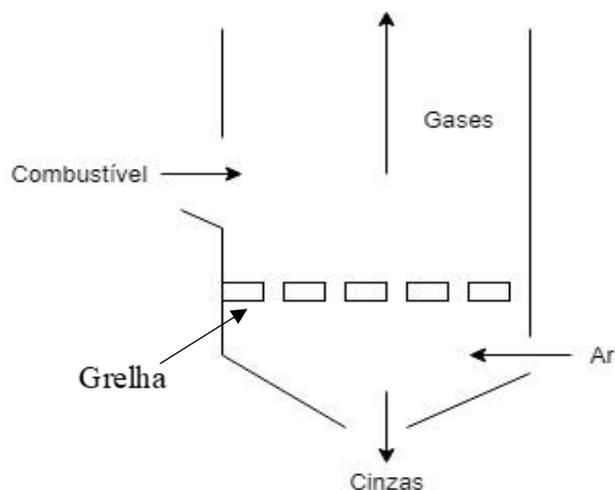
Fonte: Bazzo, 1995.

2.8. ESPECIFICIDADES DA CÂMARA DE COMBUSTÃO

De acordo com a Norma FM 23M - *Constructional Details of Combustion Chambers* (2020), a câmara de combustão é o lugar onde ocorre todo o processo da queima do combustível na caldeira que gera o gás de queima aquecido. Sendo que para câmaras de combustão de caldeiras de combustíveis sólidos, existem dois principais tipos: os de grelha fixa e grelhas móveis, onde os de grelha fixa podem variar entre horizontal e inclinadas.

Na Figura 23, observa-se um exemplo de câmara de combustão de grelha fixa horizontal, modelo mais simples e mais fácil de ser utilizado. Para uma melhor eficiência na combustão, as grelhas podem ser dispostas na forma inclinada, facilitando a remoção das cinzas por gravidade. Segundo Tier (2003), para um rendimento superior, uma esteira pode ser adicionada no lugar da grelha, formando assim grelha de rolo que facilita ainda mais a remoção das cinzas na câmara.

Figura 23. Câmara de combustão com grelha fixa horizontal



Fonte: Autor (2020)

CAPÍTULO III

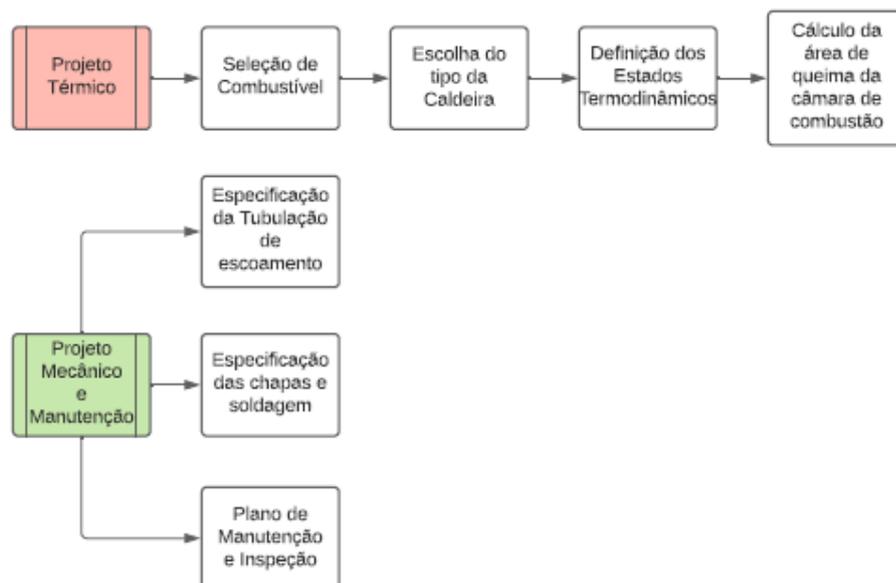
METODOLOGIA

Este trabalho tem como objetivo dimensionar uma caldeira que opere de forma eficiente para uma lavanderia na cidade de Toritama, conforme parâmetros de projeto pré-estabelecidos, sendo eles: Pressão nominal de 10kgf/cm² a uma demanda de 4.800 kg de vapor por hora.

Para isso, inicialmente serão verificadas as condições locais para instalação do equipamento, como disponibilidade de gás natural e/ou lenha. Dessa forma será possível definir o combustível, e por fim o tipo de caldeira. Com a definição da caldeira e o seu combustível, o passo seguinte é o de avaliar os parâmetros de entrada como combustível, comburente e água e calcular os estados termodinâmicos, conforme Bazzo (1990), em cada equipamento da caldeira por meio de balanços de massa e energia fundamentadas nas Leis da Termodinâmica. O dimensionamento geométrico da câmara de combustão finaliza a parte de projeto da caldeira, que deverá ser comparada com os resultados de Senger (2015) e Souza (2015).

Por fim, para uma maior disponibilidade de operação da caldeira será proposto um plano de rotina de manutenção e inspeção. Segue abaixo um fluxograma, Figura 24, de como seguirá a metodologia deste projeto:

Figura 24. Fluxograma da Metodologia do Projeto da Caldeira



Pois bem, nos tópicos seguintes será dada sequência nas etapas de projeto e operação. Na etapa projeto serão apresentadas as equações de reações químicas relacionadas a combustão e as Leis da termodinâmica que regem o processo de conservação de massa e energia, em seguida algumas considerações serão levantadas, para que assim os estados termodinâmicos sejam definidos nos equipamentos da caldeira.

3.1. COMBUSTÃO NA CALDEIRA

Um dos dados de entrada para dimensionamento da caldeira é a quantidade de ar atmosférico que entra no processo, assim como suas propriedades intensivas como temperatura e pressão. Para que seja calculada a massa de ar que deve ser admitida na caldeira para a queima do combustível recorreremos a manipulações matemáticas das Equações (10), (11), (12), (13) e (14), temos que:

$$m_{ar} = 138,2 \times \left[\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right] \quad (22)$$

Em que:

C = teor de carbono do combustível (kg/kg de combustível)

H = teor de hidrogênio do combustível (kg/kg de combustível)

S = teor de enxofre do combustível (kg/kg de combustível)

O = teor de oxigênio do combustível (kg/kg de combustível)

Da mesma forma conseguimos a massa dos gases formados na combustão pelas Equações 23:

$$m_g = 44 \times \left[\frac{C}{12} \right] + 9 \times \left[H + \frac{W}{9} \right] + 64 \times \left[\frac{S}{32} \right] + 0,7685 \times m_{ar} \quad (23)$$

Em que:

W = teor de umidade do combustível (kg/kg de combustível)

Uma vez que temos a lenha como combustível selecionado e tem-se o parâmetro da massa de ar estequiométrica (Equação 22), logo para calcular a massa real de ar que será demandada da caldeira, recorreremos à Tabela 1. Nela podemos observar o coeficiente de excesso de ar normalmente esperado para alguns tipos de combustíveis.

Tabela 1. Valores normalmente indicados para o coeficiente de excesso de ar

Combustível	Tipo de Queima	Excesso de ar (%)
Gás Combustível	suspensão	5 a 20
Carvão pulverizado	suspensão	10 a 25
Óleo combustível	suspensão	10 a 25
Carvão granulado	grelha	30 a 60
Lenha	grelha	30 a 60

Fonte: Bazzo, 1995.

Diante da tabela 1, podemos perceber que é necessária uma demanda de 30% a 60% em excesso de ar para que seja feita a combustão completa. Além disso, para medir a quantidade de calor liberada por completo por um combustível em regime permanente utiliza-se do termo poder calorífico. O poder calorífico depende da forma em que se encontra o H_2O presente nos produtos. Quando o H_2O se encontra na forma líquida é chamado de poder calorífico superior (PCS) e quando encontra-se na forma gasosa é chamado de poder calorífico inferior (PCI) (Çengel & Boles, 2011).

Já o poder calorífico inferior depende apenas da presença de água nos gases de combustão e calor latente de evaporação pela Equação 24.

$$PCI = PCS - 2440 \times (9 \times H + W) \quad (24)$$

Em que:

PCI = Poder Calorífico Inferior (kJ/kg)

PCS = Poder Calorífico Superior (H = Teor de hidrogênio (kg hidrogênio/kg combustível))

H = Teor de hidrogênio (kg hidrogênio/kg combustível)

W = Teor de umidade (kg umidade/kg combustível)

Pela composição do combustível é conhecida o teor de umidade e a parte ($9 \times H$) representa a parcela de vapor de água formada pela combustão do hidrogênio presente no mesmo. A Tabela 2 mostra o poder calorífico superior de alguns combustíveis mais utilizados.

Tabela 2 - Poder calorífico superior dos combustíveis mais utilizados em caldeiras

Combustível	Poder calorífico superior (kJ/kg)
Óleo combustível	43.800
Lenha (base seca)	16.000
Carvão fóssil	19.000
Bagaço de cana	9.400
Gás natural	51.800

Fonte: Bazzo, 1995.

No caso da lenha, sua composição química (base seca) possui os seguintes valores aproximados:

Carbono – 49%

Hidrogênio – 6%

Oxigênio – 44%

Cinzas – 1%

Segundo dados experimentais do departamento de engenharia da UTFPR, além desses dados de composição, o teor de umidade também para base seca pode variar entre 15 e 25%. A seguir serão levantadas as hipóteses dos volumes de controle para definição dos estados termodinâmico.

3.2. SELEÇÃO DE COMBUSTÍVEL, CALDEIRA E SEUS COMPONENTES

Devido à ausência de linhas de gás na cidade de Toritama, e a existência de uma maior disponibilidade de lenha na região, este último foi escolhido como combustível do projeto. Em seguida, em função do combustível foi possível definir a caldeira do tipo flamotubular como caldeira deste projeto e também o tipo de fornalha sendo escolhida a de grelha fixa inclinada.

Comparado a uma caldeira convencional, alguns equipamentos foram adicionados ao ciclo com intuito de melhorar a eficiência do projeto. Os equipamentos adicionados foram: o superaquecedor e o economizador.

Para que o fluido permaneça em forma de vapor, um superaquecedor deverá ser implementado com objetivo de elevar e estabilizar a temperatura do fluido até os 300°C para

garantir que o vapor não condense durante seu percurso até os equipamentos da lavanderia. Um superaquecedor do tipo radiante será o modelo utilizado neste trabalho uma vez que promove temperaturas mais elevadas e um controle melhor na qualidade do vapor.

O material selecionado no superaquecedor deverá ser a liga NF12 ou SAVE12 que suporta temperaturas de até 600 °C. Já os suportes e espaçadores devem ser confeccionados em aço inoxidável por suportar temperaturas maiores que estarão sujeitos conforme Santos *et. al.* (2011).

Por fim, para garantir que a caldeira não atinja temperaturas muito elevadas na saída do superaquecedor, um atemperador deverá ser instalado como forma de controle da temperatura do vapor, injetando água líquida controlando assim sua temperatura de saída.

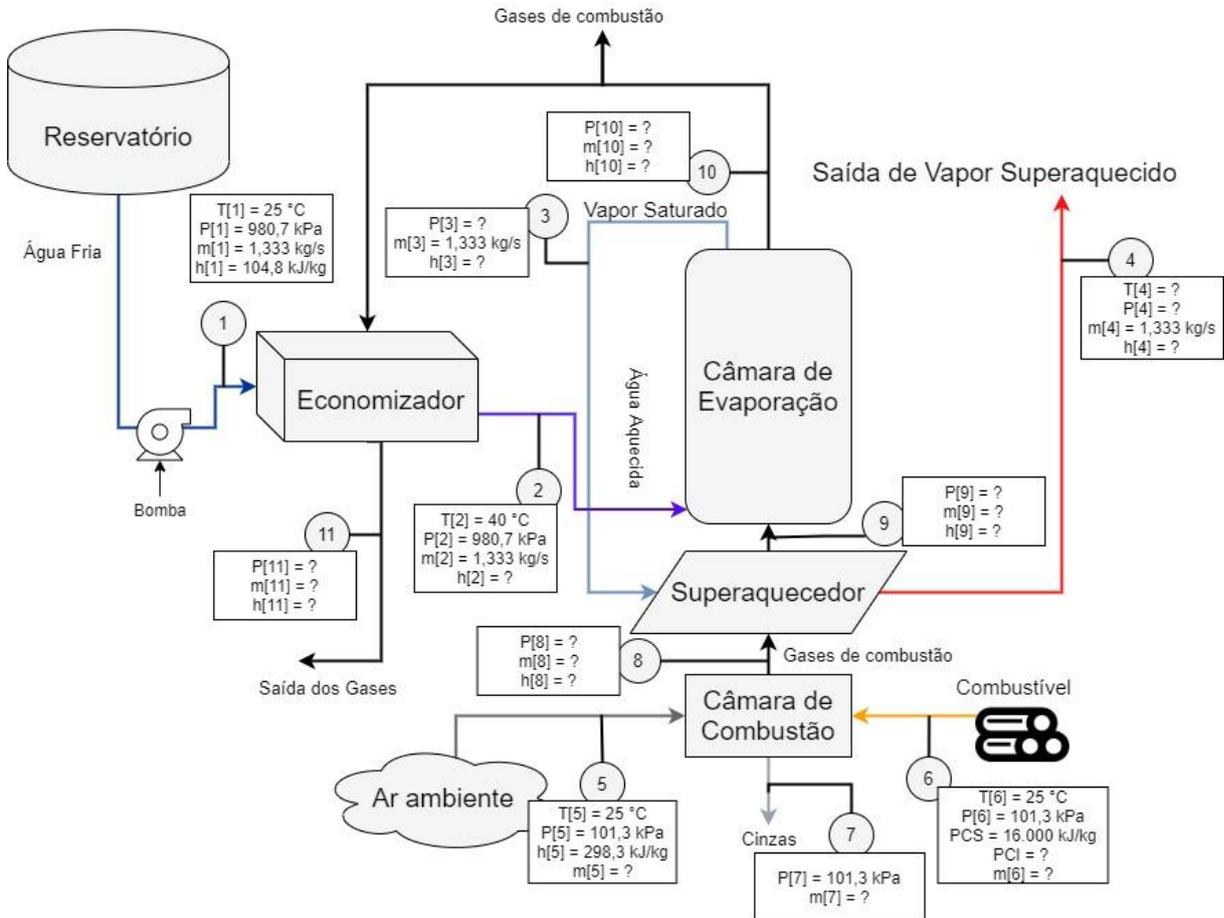
3.3. HIPÓTESES

Em ciclos termodinâmicos geralmente propõe-se as hipóteses para que os cálculos sejam precisos. Seguem as hipóteses do problema deste trabalho:

1. O sistema opera em condições de regime permanente;
2. Não existe troca de calor com o meio, assumindo que os componentes estão bem isolados;
3. As variações de energia cinética e potencial no fluxo são desprezíveis;
4. Os fluxos de massas são preservados durante o circuito;
5. Os trocadores de calor possuem uma eficiência de 80% neste projeto; (SENGER, 2015).
6. No ponto 3, saída da câmara de evaporação, o fluido se encontra como vapor saturado;
7. Segundo (Pera, 1990), a pressão de saída do superaquecedor tende a ser entre 3 e 5% maior que a pressão de entrada;
8. As propriedades termofísicas dos produtos de combustão são iguais às do ar atmosférico.
9. O combustível utilizado possui 15% de umidade;
10. Desconsidera-se a presença do nitrogênio na composição química do combustível, vapor de nebulização e a umidade do ar de combustão por representar parcelas pequenas em relação a conta global.

Para esta caldeira iremos adicionar um economizador para pré-aquecer a água que vai para a câmara de evaporação. A Figura 25 representa todos os equipamentos e estados termodinâmicos do ciclo da caldeira necessários para a análise:

Figura 25. Fluxograma geral dos fluxos de fluidos na Caldeira.



Fonte: Autor (2020).

3.4. PARÂMETROS DO CICLO E DEFINIÇÃO DOS ESTADOS TERMODINÂMICOS

Antes de projetar qualquer equipamento, deve-se primeiro estruturar o problema, identificando a necessidade do cliente. Na análise realizada verificou-se a necessidade do vapor nas indústrias de lavanderia. Como no trabalho de Bezerra (2013) não detalha o consumo de vapor, utilizou-se do consumo apresentado no trabalho de Costa (2014) por se tratar de empresas semelhantes (4.000 kg de vapor por hora), e uma pressão de trabalho de 10 Kgf/cm². Segundo Macintyre (2017), a vazão de fornecimento de água deve ser reajustada em 20%, assim, tendo uma vazão de 4.800 litros de água por hora. A Tabela 3 mostra todos os parâmetros de entrada utilizados neste trabalho.

Tabela 3 - Parâmetros do Ciclo

PARÂMETRO	VALOR	FONTE
Temperatura ambiente	25 [°C]	-
Pressão atmosférica	101,325 [kPa]	-
Fluxo de água	1,333 [kg/s]	(Costa, 2014)
Temperatura de Saída do Economizador [T2]	40 [°C]	(Costa, 2014)
Pressão do vapor na Saída da Câmara de Evap. [P3]	980,655 [kPa]	(Costa, 2014)
Temperatura de saída de vapor superaquecido [T4]	300 [°C]	(Pera, 1990)
Temperatura de referência para o calor específico [T']	0 [°C]	(Pera, 1990)
Concentração de Hidrogênio no combustível (lenha) [H]	0,06	(Bazzo, 1995)
Concentração de Carbono no combustível (lenha) [C]	0,49	(Bazzo, 1995)
Concentração de Oxigênio no combustível (lenha) [O]	0,44	(Bazzo, 1995)
Poder calorífico superior do combustível (lenha)	16.000 [kJ/kg]	(Bazzo, 1995)
Calor específico do combustível (lenha)	0,42 [kJ/kg °C]	(Bazzo, 1995)

Fonte: Autoria Própria (2020)

3.4.1. Balanço de massa

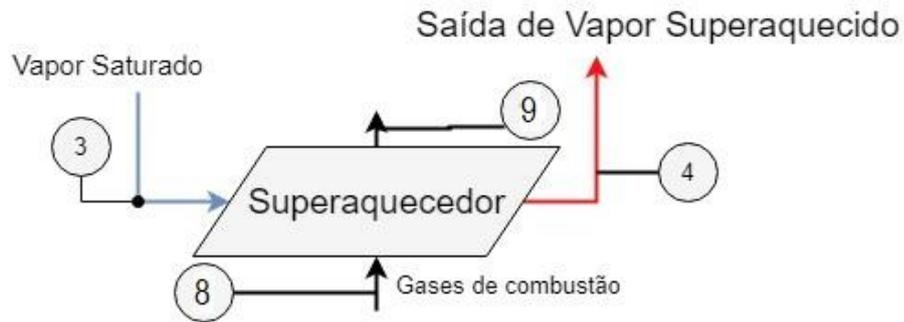
Para qualquer componente da caldeira o balanço de massa é dado pela seguinte Equação 25:

$$\sum m_{entra} = \sum m_{sai} \quad (25)$$

3.4.2. Superaquecedor

O volume de controle do superaquecedor pode ser visto na Figura 26.

Figura 26. representação gráfica do superaquecedor.



Fonte: Autor (2020)

Para este componente percebemos que existe troca de calor entre dois componentes: os gases de combustão e o vapor. Pelo balanço de massa para o vapor que entra e sai do superaquecedor, temos que:

$$m[4] = m[3] \quad (26)$$

Pela hipótese (7), temos que a pressão na saída do superaquecedor será dada pela Equação 27:

$$P[4] = P[3] \cdot 1,05 \quad (27)$$

Identificada a pressão no estado do vapor para a temperatura de superaquecimento, utilizaremos a

Tabela 4 encontrada em (Pera, 1990).

Tabela 4 - Pressões e temperaturas de superaquecimento do vapor de água.

Pressões (kgf/cm ²)	Temperaturas (°C)
10 – 20	300 – 350
30 – 50	375 – 424
50 – 100	425 – 450
100 – 200	450 – 475

Fonte: Pera, 1990.

Como a caldeira deste projeto trabalhará na pressão de 10 kgf/cm² temos uma temperatura de no mínimo 300 °C, ainda, com uma variação de temperatura de +/- 15°C devido a oscilação de demanda de vapor. Temos a temperatura no ponto 4:

$$T[4] = 300 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (28)$$

Utilizando a Primeira Lei no Superaquecedor, partindo da Equação 1 temos a Equação 29 no lado do vapor:

$$Q_{Sp_{vp}} = m[4] \cdot h[4] - m[3] \cdot h[3] \quad (29)$$

Analisando agora os gases, por Balanço de massa para os gases, temos que

$$m[9] = m[8] \quad (30)$$

Temos pela hipótese 5 que o calor transferido para o vapor representa 80% do calor transferido dos gases, assim temos a Equação 31:

$$Q_{Sp_{vp}} = 0,8 \cdot Q_{Sp_{Gases}} \quad (31)$$

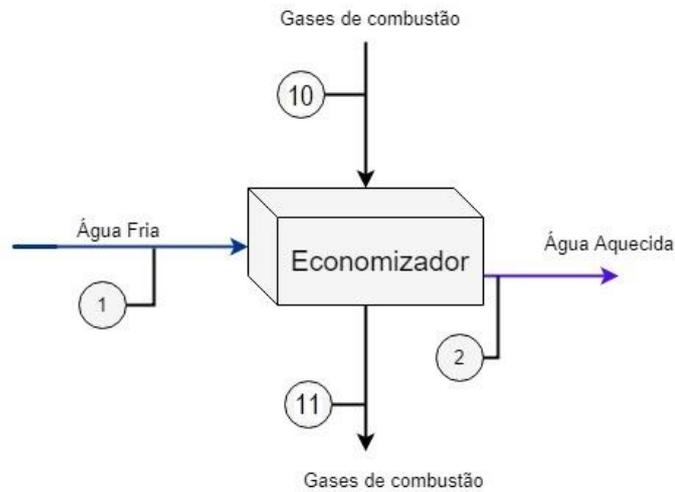
Temos então a Primeira Lei no lado dos gases a Equação 32:

$$Q_{Sp_{Gases}} = m[9] \cdot h[9] - m[8] \cdot h[8] \quad (32)$$

3.4.3. Economizador

O economizador tem como entrada os gases de combustão e a água fria, e após trocarmos calor, tem-se como saída água aquecida e os gases de combustão, como visto na Figura 27.

Figura 27. Representação gráfica do Economizador



Fonte: Autor (2020)

Pelo balanço de massa na entrada e saída do economizador para o fluido de água, temos que:

$$m[2] = m[1] \quad (33)$$

A partir da Primeira Lei, para entrada e saída de água no economizador, temos a Equação 34:

$$Q_{EC_{\text{Água}}} = m[2] \cdot h[2] - m[1] \cdot h[1] \quad (34)$$

Pelo balanço de massa na entrada e saída do economizador para os gases de combustão, temos que:

$$m[11] = m[10] \quad (35)$$

Pela hipótese 5 na transferência de calor no economizador, temos a Equação 36:

$$Q_{EC_{\text{Água}}} = 0,8 \cdot Q_{EC_{\text{Gases}}} \quad (36)$$

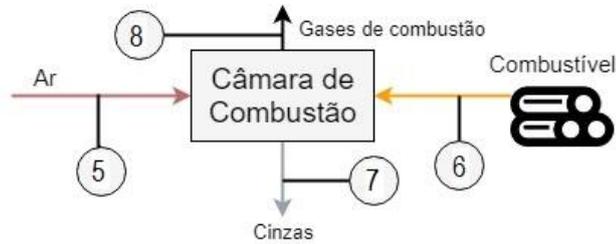
Temos então pela Primeira Lei no lado dos gases a Equação 37:

$$Q_{EC_{\text{Gases}}} = m[11] \cdot h[11] - m[10] \cdot h[10] \quad (37)$$

3.4.4. Câmara de combustão

Na Figura 28 temos o fluxograma da câmara de combustão, que mostra o ar quente e o combustível como entrada, e os gases de combustão e as cinzas como saída.

Figura 28. Representação gráfica da Câmara de Combustão



Fonte: Autor (2020)

O fluxo de massa de entrada de ar frio, também deve ser multiplicado pelo fator de excesso de ar. Como pode ser visualizado na Equação 38, adaptada ao problema:

$$\text{Fluxo de ar } m[5] = 138,2 \cdot \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right) \cdot m[6] \times ExAR \quad (38)$$

Onde depende do fluxo de massa de combustível $m[6]$ e o excesso de ar ($ExAR$) é utilizado 30% da Tabela 1.

Entalpia do combustível baseada no seu calor específico pela Equação 39:

$$h[6] = C_{p_{combustível}} \cdot T[6] \quad (39)$$

O fluxo de massa de combustível, pelo balanço de massa, é definido pela Equação 40, em que n pode ser considerado como a eficiência da caldeira:

$$m[6] = \frac{m[4] \cdot (h[4] - h[2]) + m[5](h[5] - h[10])}{PCI \cdot n} \quad (40)$$

Na saída de gases da câmara de combustão temos o fluxo de gases definido pela Equação 41.

$$m[8] = \left(44 \cdot \left(\frac{C}{12} \right) + 9 \cdot \left(H + \frac{W}{9} \right) \right) \cdot m[6] + 0,7685 \cdot m[5] \quad (41)$$

Na equação acima podemos observar que a massa no estado oito é um somatório de duas parcelas: a primeira delas é referente ao combustível ao reagir com o oxigênio do ar

atmosférico. Já a segunda refere-se a 76,85% da massa do estado cinco, que é composta por nitrogênio e não reage com o combustível.

Para encontrar a temperatura dos gases de combustão na câmara, segundo Bazzo (1995), utiliza-se da Equação (42).

$$T_{ad} = T_0 + \frac{Q_d}{m_g \cdot \bar{c}_{pg} + m_{cz} \cdot \bar{c}_{pcz}} \quad (42)$$

Em que:

T_{ad} = Temperatura adiabática dos gases (K)

T_0 = Temperatura ambiente (K)

Q_d = Energia disponível na fornalha (kJ/kg_{comb})

m_g = Massa real dos gases (kg/kg_{comb})

m_{cz} = Massa real das cinzas leves arrastadas pelos gases (kg/kg_{comb})

\bar{c}_{pg} = Calor específico médio dos gases (kJ/kg.K)

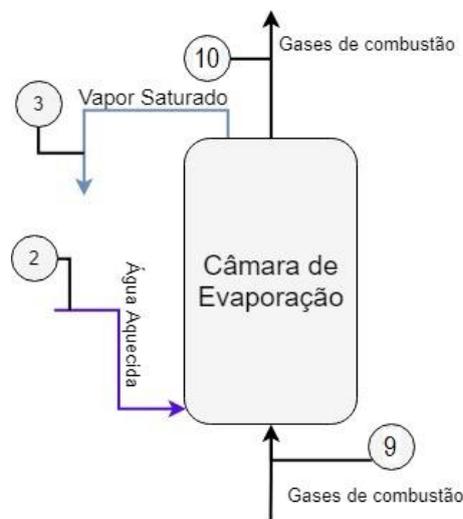
\bar{c}_{pcz} = Calor específico médio das cinzas (kJ/kg.K)

A energia disponível na fornalha é calculada pela Equação (16), que é o calor gerado na câmara de combustão.

3.4.5. Câmara de Evaporação

O volume de controle da câmara de evaporação pode ser demonstrado na Figura 29.

Figura 29. Representação gráfica da Câmara de Evaporação



Fonte: Autoria Própria

Na câmara de evaporação, o vapor saturado sai pelo Ponto 3, onde temos as seguintes características:

Por balanço de massa para os estados dois e três, temos então a Equação 43:

$$m[3] = m[2] \quad (43)$$

Na saída de gases da Câmara de evaporação temos a Equação 44 com o fluxo de saída igual ao fluxo de entrada:

$$m[10] = m[9] \quad (44)$$

Aplicando a Primeira Lei na câmara de evaporação na tubulação de água temos a Equação 45:

$$Q_{Ev_{\text{Água}}} = m[3] \cdot h[3] - m[2] \cdot h[2] \quad (45)$$

Pela hipótese 5 temos a Equação 46:

$$Q_{Ev_{\text{Gases}}} = 0,8 \cdot Q_{Ev_{\text{Água}}} \quad (46)$$

Temos então a primeira lei na tubulação de gases a Equação 47:

$$Q_{Ev_{\text{Gases}}} = m[10] \cdot h[10] - m[9] \cdot h[9] \quad (47)$$

3.4.6. Eficiência na geração de vapor

A eficiência na geração de vapor se dá pela quantidade de energia aproveitada pela energia fornecida. No caso da caldeira, a energia aproveitada é calculada pelo fluxo de vapor vezes a diferença de entalpia da saída pela entrada. Já a energia fornecida, é a multiplicação do poder calorífico inferior do combustível com o fluxo de massa de entrada do combustível. Assim, temos o rendimento da caldeira dado pela Equação 48 (ELETROBRAS, 2005).

$$\eta = \frac{\dot{m}_v \times (h_{vs} - h_{ae})}{\dot{m}_c \times PCI} \quad (48)$$

Em que:

\dot{m}_v = vazão em massa de vapor (kg/s)

\dot{m}_c = vazão em massa de combustível (kg/s)

h_{vs} = entalpia de saída do vapor

h_{ae} = entalpia de entrada da água

Dessa forma, até aqui todos os estados termodinâmicos serão definidos em função dos parâmetros de entrada. Logo, faz-se necessário calcular a área de queima da fornalha.

3.5. PROJETO GEOMÉTRICO DOS EQUIPAMENTOS DE TROCA TÉRMICA

Para o projeto geométrico da câmara de combustão, utiliza-se da Equação 49 para dimensionar a área útil da câmara, assim:

$$\bar{m}_{cb} = \frac{\dot{m}_{cb}}{A_g} \quad (49)$$

Em que:

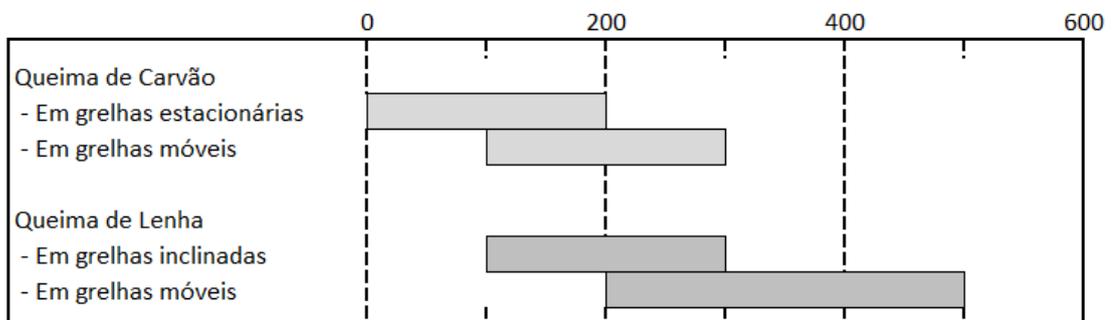
\bar{m}_{cb} = T.axa de carregamento do combustível(kg/h.m²);

\dot{m}_{cb} = Consumo de combustível (kg/h);

A_g = Área da grelha (m²).

Para saber qual taxa de carregamento utilizar, tem-se a Figura 30 como base para os cálculos.

Figura 30. Taxas de carregamento indicadas por algumas fornalhas em operação (kg/m²h)



Fonte: Adaptação de Bazzo, 1995.

Segundo Bazzo (1995), o volume da fornalha é calculado em função da carga térmica volumétrica que é no valor de $350 [kW/m^3]$. Este dado é relevante para calcular a altura da fornalha (H) dada pela Equação 50:

$$H = \frac{V_{forn}}{Ag} \quad (50)$$

Em que:

V_{forn} = Volume da fornalha. (m^3)

3.6. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MECÂNICOS DA CALDEIRA

Ao fim da etapa do cálculo dos parâmetros térmicos da caldeira, faz-se necessário calcular alguns detalhes mecânicos do projeto, como as tensões exercidas nas tubulações de escoamentos com intuito de selecionar os tubos de acordo com material e espessura. Além disso, é importante determinar a espessura das chapas metálicas que revestem a caldeira, assim como determinar a pressão máxima de trabalho admissível (PMTA).

3.6.1. Determinação da Espessura das paredes dos tubos

Para o cálculo da espessura das paredes dos tubos, a espessura mínima deve ser determinada pelas Equações 51 e 52 (ASME, 2010), que se referem as tensões circunferenciais e longitudinais. A espessura de maior valor entre as duas equações deve ser assumida, uma vez que o projeto pode exigir uma espessura maior em alguma direção (longitudinal ou circunferencial).

a) Tensão circunferencial

A espessura na tensão circunferencial é obtida na Equação 51, que é utilizada quando a espessura não ultrapassa a metade do raio interno, ou a pressão interna não ultrapassa o valor de 0,385 multiplicado pela tensão máxima admissível e pela eficiência da junta, no caso de juntas soldadas, como mostra na Figura 31.

$$t = \frac{P \cdot R_i}{S \cdot E_j - 0,6 \cdot P} \quad (51)$$

Em que:

t = Espessura mínima da parede dos tubos (mm);

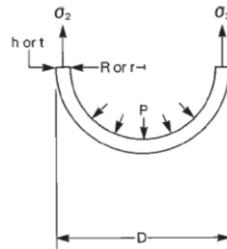
P = Pressão de projeto dos tubos (MPa);

R_i = Raio interno do tubo (mm);

S = Tensão máxima admissível (MPa), de acordo com o Anexo B;

E_j = Eficiência da junta dos tubos;

Figura 31. Representação da Tensão Circunferencial



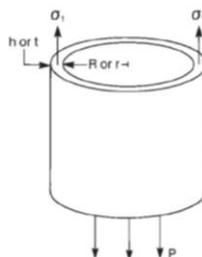
Fonte: (KITTO, 1992)

b) Tensão Longitudinal

A espessura na tensão longitudinal para juntas circunferenciais é dada pela Equação 52, uma vez que a espessura não passe da metade do raio interno, ou a pressão interna não ultrapassa o valor de 1,25 multiplicado pela tensão máxima admissível e pela eficiência da junta. A figura 32 ilustra o presente caso.

$$t = \frac{P \cdot R_i}{2S \cdot E_j - 0,4 \cdot P} \quad (52)$$

Figura 32. Representação da Tensão Longitudinal



Fonte: (KITTO, 1992)

3.6.2. Determinação da pressão máxima de trabalho admissível (PMTA)

O código ASME, *Section VIII, Division 1* para projetos de vasos de pressão define formas de calcular um dos parâmetros mais importantes da caldeira que é a sua Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA). Telles (1986) define PMTA como a pressão que causa na parte em questão uma tensão máxima igual à tensão admissível do material na temperatura de operação correspondente à parte considerada. Para este caso definimos nosso vaso de pressão como o de geometria cilíndrica, uma vez o mesmo, oferece uma maior facilidade de fabricação e assim apresenta menores os custos. Dessa forma, para um vaso cilíndrico, inicialmente, é necessário calcular a sua espessura, pela mesma Equação 51, da espessura de tubos.

A ASME determina que podemos calcular a Pressão Máxima de Trabalho Admissível da caldeira por meio da Equação:

$$PMTA = \frac{S.E.t}{R + 0,6t} \quad (53)$$

3.6.3. Volume do Evaporador e Grupo Potencial de Risco

Seguindo a NR -13 devemos ter alguns cuidados na utilização da caldeira para manter a segurança e integridade física dos trabalhadores. Lembrando que, segundo a NR, o empregador é o responsável pela adoção das medidas preconizadas na mesma.

De início, a caldeira projetada neste trabalho enquadra-se na Classe C da NR-13, visto que esta classe se refere a vasos de pressão contendo vapor de água, gases asfixiantes simples ou ar comprimido.

Além da Classe do vaso, o mesmo também é categorizado pelo seu grupo de risco. O grupo de risco é visto na Tabela 5.

Tabela 5. Avaliação de Grupo Potencial de Risco para Evaporador segundo NR-13

Classe de Fluido	Grupo de Potencial de Risco				
	1 P.V ≥100	2 P.V <100 P.V ≥ 30	3 P.V < 30 P.V ≥ 2,5	4 P.V < 2,5 P.V ≥ 1	5 P.V < 1
	Categorias				
A - Fluido inflamável, combustível com temperatura igual ou superior a 200 °C - Tóxico com limite de tolerância ≤ 20 ppm - Hidrogênio - Acetileno	I	I	II	III	III
B - Combustível com temperatura menor que 200 °C - Tóxico com limite de tolerância > 20 ppm	I	II	III	IV	IV
C - Vapor de água - Gases asfixiantes simples - Ar comprimido	I	II	III	IV	V
D - Outro fluido	II	III	IV	V	V

Fonte: NR-13, 2014.

Desta forma, consegue-se dimensionar a câmara de evaporação.

3.6.4. Espessura Mínima para Chapas

Para calcular a espessura mínima da área que reveste a caldeira, foi utilizada a Equação 51. Os seguintes parâmetros foram escolhidos: a pressão interna é a pressão de trabalho da caldeira, para este caso 9,81 bar ou 10kgf/cm². A tensão admissível está em função do material a ser escolhido. Telles, cita os principais materiais utilizados para construção de caldeiras/ vasos de pressão.

Para este projeto foi selecionado o Aço carbono Si A-515-65, de tensão admissível de 124,6 Mpa para uma temperatura de 300°C (De acordo com o ANEXO B). Segundo Telles (1986) este tipo de aço contém pode conter uma de até 0,6% de Si que cria uma estrutura mais fina e uniforme com menor incidência de defeitos internos. Também podemos destacar que os aços carbono são os de maior uso e empregados na construção da maioria dos vasos de pressão, ainda segundo Teles, este material além de constar uma boa conformabilidade, possui boa

soldabilidade, e ainda apresenta menor preço proporcional a outros aços em relação à sua resistência mecânica.

Uma vez selecionado o material é importante observar a eficiência da solda. A ASME delimita coeficientes de eficiência de solda de acordo com o tipo de solda e o tipo de inspeção, conforme Tabela 05. O coeficiente de solda adotado foi o de 1 ou seja solda de topo, feita por ambos os lados de forma a obter penetração e fusão total com radiografia total.

Por fim, uma vez que o material selecionado foi o aço carbono e com aplicabilidade de utilizar vapor de água, a ASME recomenda que o projetista adicione uma camada de sobre-espessura que será adicionada diante dos efeitos corrosivos. Vieira (2012) recomenda o fator sobre-espessura (C) de: 3,0 mm. Dessa forma, a espessura t obtida foi de 14,72mm

Com a espessura do vaso em mãos é possível calcular a PMTA do vaso de pressão por meio da Equação 53, o valor obtido foi de: 13,4 Bar. Assim é possível observar um fator de segurança de 1,366 em relação a pressão de operação. Outro fator importante é que para esta equação, o fator de espessura calculado foi arredondado para cima de forma a utilizar uma espessura de chapa comercial, logo a espessura utilizada para o cálculo da PMTA foi de 16,0 mm.

3.6.5. Aspectos de soldagem

O código ASME, seção VIII, Divisão 1 cita que é obrigatório que todas as soldas de emenda de chapas no casco e nos tampos dos vasos de pressão sejam de topo com penetração total e de tipos facilmente radiografáveis. Sempre que possível, essas soldas devem ser feitas pelos dois lados.

A ASME também pondera o fator da eficiência da solda de acordo com o tipo de solda aplicado e com o grau de inspeção realizado. A eficiência da solda de acordo com esses critérios pode ser visualizada na Tabela 6.

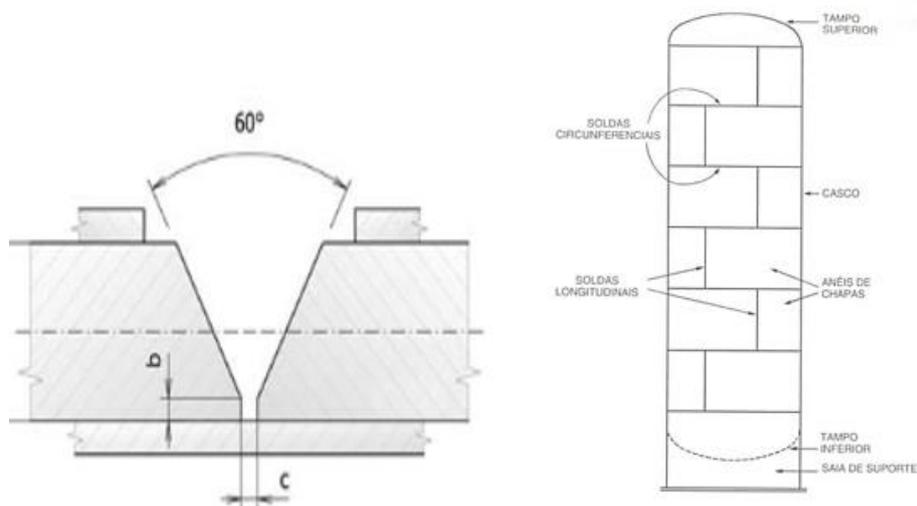
Tabela 6. Eficiência de solda de acordo com o tipo de solda e grau de inspeção.

Tipo de Solda	Limitações	Grau de Inspeção		
		Radiografia total	Radiografia parcial	Não radiografada
Solda de topo feita por ambos os lados ou por procedimento equivalente, de forma a obter penetração e fusão totais	Nenhuma	1,00	0,85	0,70
Solda de topo feita por apenas um lado, com mata-junta permanente	Nenhuma	0,90	0,80	0,65
Solda de topo feita por apenas um lado, sem mata-junta	Uso permitido somente para soldas circunferenciais, para espessuras inferiores a 15 mm e diâmetro do vaso inferior a 610 mm	-	-	0,60
Solda sobreposta com filete duplo de altura total	Uso permitido para soldas longitudinais em espessuras inferiores a 10 mm, e para soldas circunferenciais em espessuras inferiores a 15 mm	-	-	0,55

Fonte: ASME, Seção VIII, Divisão 1

Sob os aspectos de soldagem, Telles (1986) diz que para espessuras de até 19mm o chanfro em V simples é o mais comumente adotado, por sua relação de resistência e facilidade de soldagem, e por isto este será adotado no projeto.

Figura 33. Tipo de solda a ser feita nas juntas das chapas



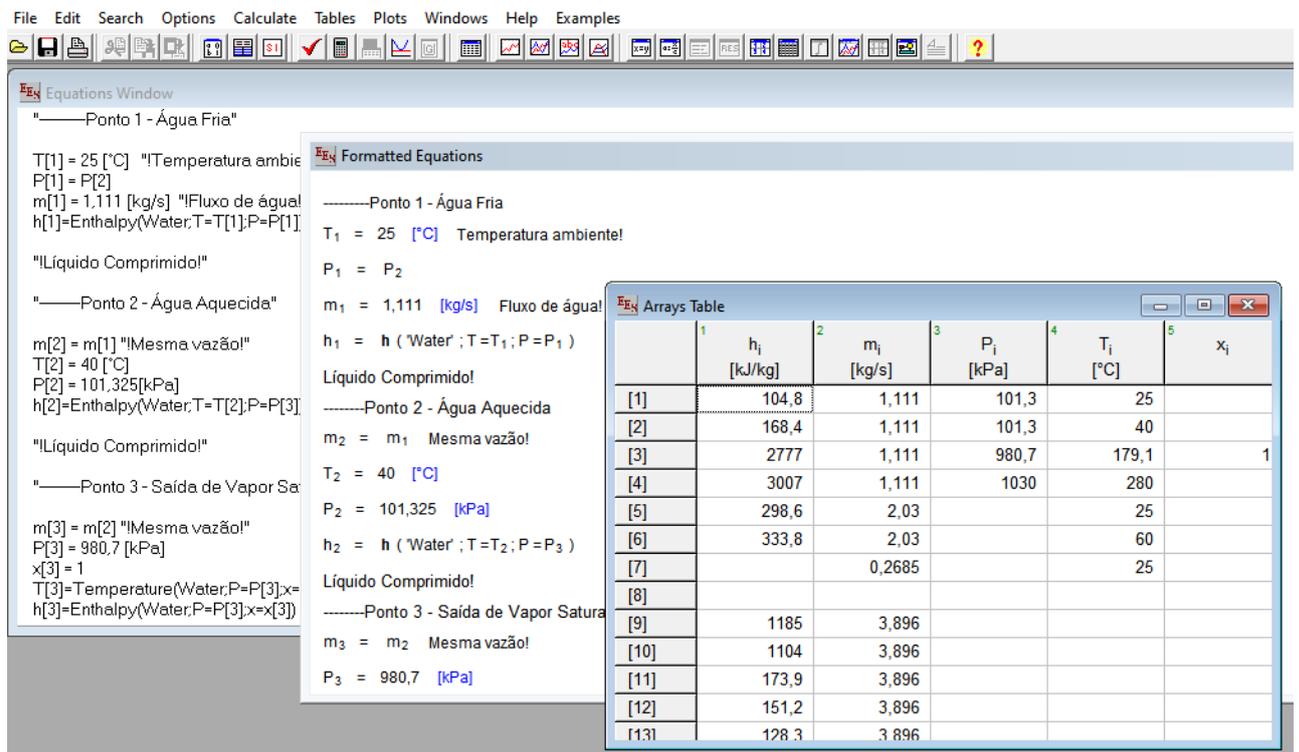
Fonte: Telles (1986)

Por fim, a NR-13 descreve que os sistemas de controle e segurança da caldeira devem ser submetidos à manutenção preventiva ou preditiva. Dessa forma, foi criado um cronograma das atividades de manutenção a serem realizadas sendo classificadas de acordo com sua periodicidade, conforme ANEXO D.

3.7. ENGINEERING EQUATION SOLVER

O *Engineering Equation Solver* (EES) foi o *software* utilizado como método de equacionamento para determinar as soluções para este trabalho, utilizando-se de licença estudantil. Ele configura-se como uma ferramenta importante na solução de equações algébricas e diferenciais, otimização, análises de incertezas e execução de regressões lineares e não lineares. Além disso, o *software* destaca-se por ter um banco de dados de propriedades termodinâmicas e de transporte para centenas de substâncias. Sua interface pode ser visualizada.

Figura 34. Interface do EES 2013



Fonte: Autor (2020)

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. ESTADOS TERMODINÂMICOS DO CICLO

Por meio do *software EES* (2013) junto dos parâmetros de entrada foi possível compilar todas as equações dos estados termodinâmicos em todos os equipamentos da caldeira, e dessa forma foram obtidas as seguintes soluções:

Tabela 7. Tabela de valores dos Pontos da Caldeira.

Ponto	T (°C)	P (kPa)	h (kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)
1	25	980,7	105,7	1,333
2	40	980,7	168,4	1,333
3	179,1	980,7	2777	1,333
4	300	1030	3050	1,333
5	25	101,3	298,6	2,556
6	25	101,3	10,5	0,3381
7	605,6	101,3	-	0,08914
8	605,6	298,6	1998	2,805
9	562	283,8	1836	2,805
10	144,9	142	286,2	2,805
11	134,9	138,6	248,9	2,805

Fonte: Autor.

Tabela 8: Tabela dos valores de calor transferido e perdido nos equipamentos

Equipamento	Calor Transferido (kJ/s)	Calor Perdido (kJ/s)
Câmara de Combustão	4.841	-
Economizador	104,5	20,91
Evaporador	4.347	870
Superaquecedor	454,6	90,9

Fonte: Autor.

No economizador tem-se, pela Tabela 8, uma transferência de 104,5 kJ/s proveniente do calor residual dos gases de combustão, elevando a temperatura da água de 25°C para 40°C (ponto 1 e 2 da Tabela 6), auxiliando assim na evaporação da água. Por meio da Equação (48) de eficiência da caldeira podemos perceber um aumento de rendimento em 1,07% comparado a uma caldeira convencional (sem economizador), que ao longo prazo este rendimento daria uma diferença considerável.

Em resumo por meio da Tabela 7, pelo ponto 6 (entrada da câmara de combustão), podemos perceber que para atendimento da demanda de vapor em 4400 kg/hora é necessária uma queima de 0,34 kg/s ou 20,4 kg/min de lenha mais 2,556 kg/s ou 153kg/min de massa de ar atmosférico, pelo ponto 5, para gerar 4.841 kJ de calor por segundo, na câmara de combustão (Tabela 7) na pressão exigida de 10 bar ou 980,7 kPa. O Código EES para esta aplicação encontra-se no ANEXO A.

Pode-se perceber como o calor é transferido em cada etapa do processo aumentando a temperatura e pressão da água para o resultado desejado. Na tabela 6, no ponto 2 para o ponto 3, tem-se o maior aumento de temperatura, onde na tabela 7, os pontos 2 e 3 correspondem ao evaporador transfere para a água 72% da energia gerada na câmara de combustão.

Mesmo com o aumento considerável na temperatura do ponto 3 para o 4, a transferência de calor não foi tão elevada, já que a pressão teve um aumento pouco significativo, explicando assim os 454,6 kJ/s do superaquecedor comparados aos 4.347 kJ/s do evaporador. A saída do vapor no estado de vapor superaquecido, garante que não ocorrerá condensação em excesso na linha de produção.

Os fluxos de massa de água permanecem constantes durante toda tubulação (pontos 1 ao 4), uma vez que, assim como na tubulação dos gases de combustão, a velocidade do fluxo pode variar durante os processos, mantendo assim o equilíbrio entre a vazão e a pressão.

4.2.COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

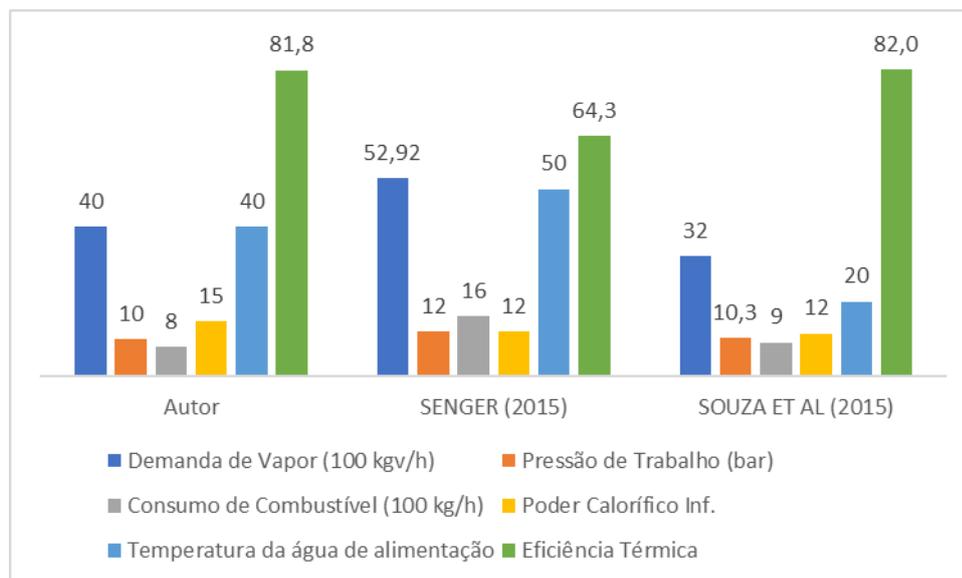
Na tabela a seguir é possível visualizar os dados de demanda e eficiência da caldeira deste trabalho e comparar com SENGER (2015) e SOUZA *et al* (2015).

Tabela 9: Comparação de parâmetros entre os trabalhos levantados pelo autor

PARÂMETROS	AUTOR	SENGER (2015)	SOUZA, ET AL (2015)
Demanda de Vapor (kgv/h)	4.400	5.292	3.200
Pressão de Trabalho (bar)	10,00	12,00	10,3
Consumo de Comb. (kg/h)	1.224	1600,2	913,88
PCI (kJ/kg)	14.682	12.122	11.506
Temperatura da água de alimentação (°C)	40	50	20
Eficiência Térmica (%)	81,07	64,3	82%

Fonte: Autor (2020)

Figura 35: Comparação gráfica dos resultados dos 3 autores



Fonte: Autor (2020)

Por meio da Tabela 8 é percebido que o consumo de combustível é menor que as outras caldeiras de Senger (2015) e Souza *et al* (2015), contudo o combustível utilizado apresenta alto poder calorífico inferior e graças a isso, junto da utilização de equipamentos auxiliares como o economizador foi possível maximizar a eficiência térmica da caldeira.

Analisando os gráficos dos três trabalhos na Figura 35, percebe-se que os projetos com menor consumo de combustível, possui uma eficiência maior, uma vez que a demanda e a pressão dos três projetos são bem parecidas.

Sobre o poder calorífico, mesmo com o maior valor, o trabalho do autor ainda não conseguiu superar a eficiência do projeto de Souza *et al* (2015). Esta diferença é devido às perdas nos equipamentos do trabalho de Souza *et al* (2015) serem menores que o presente trabalho. Como exemplo, neste trabalho foi assumido que teria uma perda de 20% do calor transferido em cada equipamento, já no trabalho de Souza *et al* (2015) foi calculado uma eficiência mais precisa, onde alguns equipamentos chegavam a ultrapassar 90% de eficiência.

A presença do economizador no presente trabalho e no trabalho de Senger (2015) promoveu uma temperatura de alimentação maior nos dois trabalhos em comparação ao terceiro trabalho. Mesmo assim, não foi suficiente para suprir as perdas do trabalho de Senger (2015) que apresentou a menor eficiência. Mesmo sem o economizador, Souza *et al* conseguiu promover uma melhor eficiência.

4.3.DIMENSÕES DA CÂMARA DE COMBUSTÃO

Na tabela 10 temos as dimensões necessárias para a construção da fornalha.

Tabela 10: Dimensões da Grelha da fornalha

Área mínima	5,01 m^2
Área real	6,00 m^2
Largura	2,00 m
Profundidade	3,00 m
Altura	2,27 m

Fonte: Autor (2020)

A partir da equação 49, temos a taxa média para queima de lenha em grelhas inclinadas de 200 kg/m^2s . Temos então, como resultado, a área mínima da grelha de 5,03 m^2 .

A área mínima da câmara de combustão, que por recomendações, deve ser construída de alvenaria por suportar as altas temperaturas provenientes da queima do combustível. Como a grelha possui uma dimensão mínima de 5,03 m^2 , 6,00 m^2 é suficiente para o tamanho da grelha, assim, a câmara de combustão terá sua área interna também de 6 m^2 após o encaixe da grelha, podendo suas dimensões ser maiores que a mínima recomendada.

Figura 36. Dimensões da grelha para Câmara de Combustão em vista perspectiva



Fonte: Autor

Já pela Equação 50 é possível calcular a altura da fornalha, neste caso com o valor de 2,27m. Com estas dimensões, a lenha será queimada de forma que consiga fornecer o calor necessário no projeto.

4.4.DIMENSÕES DA CÂMARA DE EVAPORAÇÃO

A tabela 11 mostra dimensões que podem ser utilizadas na construção da câmara de evaporação, que por sua vez, terá a forma cilíndrica, como visto anteriormente.

Tabela 11: Dimensões da câmara de evaporação

Volume	35,3 m ³
Diâmetro	3 m
Altura	5 m

Fonte: Autor (2020)

Pela Tabela 5 podemos perceber que o potencial de risco está relacionado pela multiplicação do parâmetro pressão (MPa) com o fator volume (m³). Uma vez que a pressão da caldeira já está definida em 1,0 MPa, logo podemos definir os parâmetros dimensionais para calcular o volume levando em consideração o grau de risco, o tamanho e por consequência, o custo da caldeira. Desta forma, como o volume do grupo 1 é maior que 100 m³, consideravelmente grande, foi feita uma análise de volume de acordo com os critérios de risco do grupo 2. Assim, a caldeira deste trabalho se encaixa no Grupo 2 da classe C, tendo o potencial de risco II, com um volume entre 30 e 100 m³, assumindo o menor volume admissível por questões econômicas, e valores inteiros de diâmetro e altura por questões de fabricação.

Figura 37: Dimensões da câmara de evaporação em vista perspectiva



Fonte: Autor

4.5.ESPECIFICAÇÃO DOS TUBOS

Por meio da comparação das Tensões dadas as Equações 51 e 52 foi possível determinar a espessura da parede dos tubos responsáveis pelo escoamento do vapor. Material recomendado segundo o Telles(1986) no ANEXO (C):

Tabela 12. Especificação do tubo selecionado

Material	A-178
Espessura projetada	2,345 mm
Espessura Comercial	2,41 mm
Diâmetro externo do tubo:	41,27 mm
Espaçamento entre os tubos: (2 x diâmetro)	82,54 mm

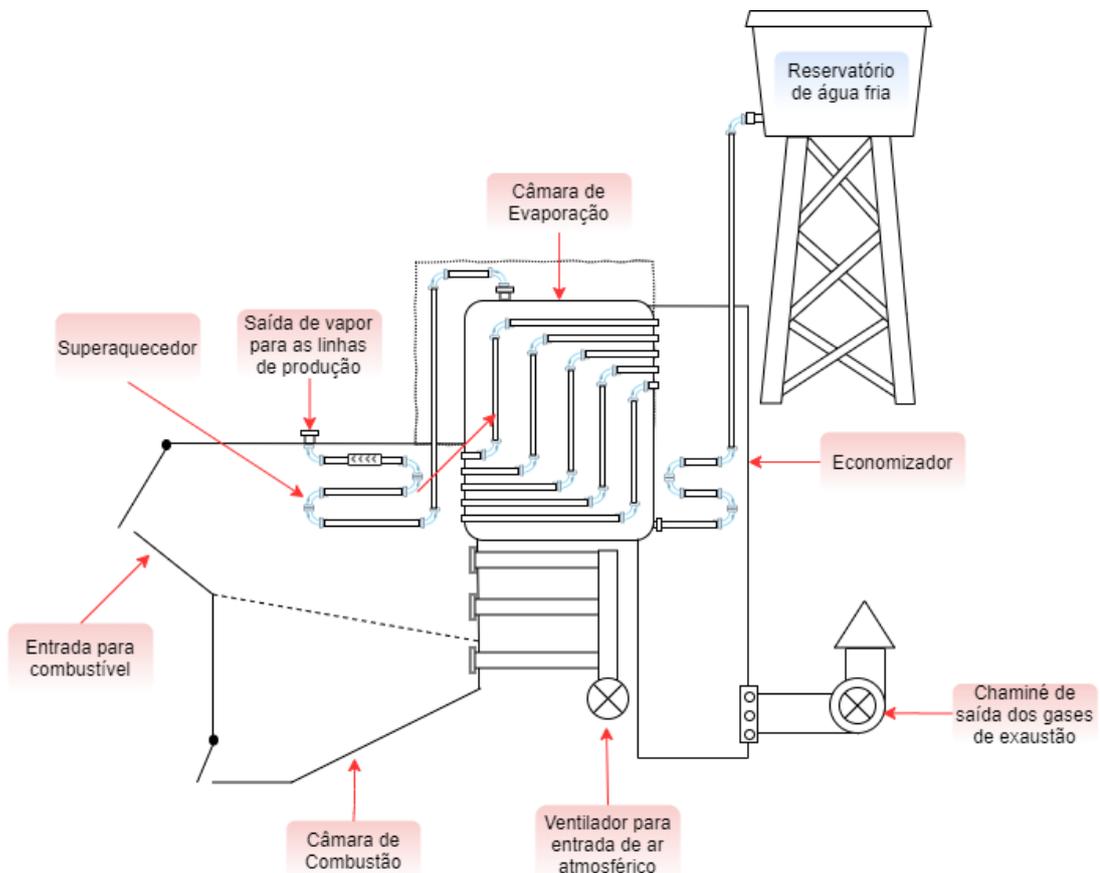
Fonte: Autor

Nota-se que a espessura comercial deve ser maior que a projetada, uma vez que a espessura projetada nos mostra a quantidade mínima de material que suporta as tensões do projeto. O diâmetro externo e espaçamento entre os tubos foi proposto de forma que atenda as especificações comerciais, sem comprometer os resultados do trabalho.

4.6.EQUIPAMENTOS ACOPLADOS

Na Figura 38 temos a visualização do projeto unindo todas as partes estudadas no mesmo.

Figura 38. Desenho esquemático da caldeira e todos os seus componentes



Fonte: Autoria Própria (2020)

Na acoplagem dos equipamentos da caldeira visto na Figura 36, de forma ilustrativa, é exibida a sequência e posição dos equipamentos, sem mencionar dados específicos como o diâmetro das tubulações, quantidade de tubos e posicionamento entre eles. Assume-se que os trocadores de calor serão adquiridos prontos no mercado, seguindo os parâmetros deste projeto, exceto os projetados no mesmo.

No próximo tópico, outros parâmetros para um esquema mais completo do projeto são sugeridos para trabalhos futuros.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver o projeto de uma caldeira que produza vapor em quantidade e pressão suficiente para ser utilizado nos processos produtivos em uma indústria têxtil no agreste de Pernambuco.

Foram expostos os principais componentes da caldeira, desde o cinzeiro à chaminé, o diagrama de montagem da caldeira, os tipos de vasos de pressão, normas de projeto e operação, projeto termodinâmico da caldeira, análise energética dos componentes, além dos parâmetros dos ciclos e estados termodinâmicos. No projeto geométrico foi determinado a espessura das paredes dos tubos, determinação da PMTA, dimensões do evaporador, espessura mínima das chapas de construção e aspectos de soldagem.

Diante dos resultados apresentados, pode-se trazer como conclusões:

- A demanda de vapor de 4400 kg/h foi atendida com o projeto, uma vez que o calor fornecido na câmara de combustão foi transferido suficientemente ao fluxo de água fornecido pelo reservatório na taxa necessária para atingir a demanda. A câmara de evaporação é a principal responsável nesta transferência de calor, que foi projetada com diâmetro de 3m e altura de 5m, dimensões comuns encontradas no mercado.
- O consumo de combustível também é bem compatível comparado aos demais projetos citados neste trabalho. Mesmo sabendo que os valores encontrados aqui são supostos em situações ideais, o valor real aplicado na prática não deve variar muito, assim, utiliza-se dos valores encontrados como uma estimativa.
- O superaquecedor mostrou-se eficiente no seu propósito de deixar o fluido superaquecido, evitando condensação na linha de produção. Uma vez que a temperatura do fluido chega a 300 °C, temos uma margem de segurança. Vale ressaltar que a tubulação da linha de vapor deve ser devidamente isolada para evitar mais ainda as perdas de calor e possível condensação.
- O economizador aumentou consideravelmente a temperatura de alimentação da água na câmara de evaporação, saindo de 25 para 40°C promovendo 1,07% a mais na eficiência da caldeira.

- A câmara de combustão pôde ser dimensionada de forma completa, tanto seu tamanho mínimo, tipo de grelha e inclinação da grelha. Para o caso do combustível ser outro material, o dimensionamento deve ser feito de acordo com o mesmo. O tamanho projetado neste trabalho é também aceitável, visto que é proporcional a outros modelos já existentes no mercado.
- Pela norma da ASME conseguiu-se as dimensões da espessura da parede do evaporador através das tensões máximas circunferenciais e longitudinais. Uma vez que assume a maior espessura dos cálculos sendo a espessura mínima, pôde-se escolher de acordo com os materiais disponíveis no mercado o tipo de chapa que será utilizada na fabricação. Este método garante que a chapa não irá se romper, tanto na longitudinal quanto na transversal.

Todos os parâmetros de segurança devem ser seguidos afim de evitar qualquer tipo de acidente ou falha na caldeira. As pressões máximas admissíveis, espessuras das paredes dos equipamentos e tubulações são o mínimo necessário para que ocorra tudo de forma desejada.

Sobre a melhora da eficiência com a inserção do economizador, conseguimos realizar um cálculo rápido da economia gerada a partir desde equipamento. Com uma média de custo de 900 reais por tonelada de lenha, temos, pelo consumo de combustível equivalente a 1.224 kg de lenha por hora, em um ano, temos 10,7 mil toneladas, 1,07% correspondendo a 182 toneladas, que corresponde a 164 mil reais de economia anual.

Um plano de rotina de manutenção também foi sugerido no Anexo D, como forma a evitar desgaste prematuro dos equipamentos e oferecer segurança e disponibilidade do equipamento para todos que a operam e terceiros. O plano aborda inspeções e limpezas que afetam os equipamentos, assim como a periodicidade que tal manutenção deve ocorrer.

Como sugestão para trabalhos futuros, algumas análises, se feitas, resultarão em resultados mais precisos, como:

- Dimensionamento das bombas e ventiladores necessários para o fluxo dos gases e água da caldeira;
- Projeto da caldeira com outros combustíveis, líquidos, gasosos e outros combustíveis sólidos.
- Projeto da tubulação na linha de produção;
- Projeto de isolamento térmico da caldeira;

O tipo de caldeira assumido para este trabalho mostra-se eficaz, porém outros tipos podem ser explorados em trabalhos futuros, tendo uma visão mais voltada à preservação do meio ambiente, uma vez que a lenha é um combustível consideravelmente poluente. Além de explorar outros equipamentos e configurações que podem afetar a eficiência da caldeira, este trabalho mostra uma gama de complexidade que pode ser explorada no tema.

REFERÊNCIAS

- Alberichi, M., 2013. *ESTUDO DAS INSTALAÇÕES E OPERAÇÕES DE CALDEIRAS DE UMA INDÚSTRIA DE PRODUTOS QUÍMICOS DO ESTADO DO PARANÁ, SOB ÓTICA DA NR-13 E NR-28*. Curitiba: UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ.
- Bazzo, E., 1995. *Geração de Vapor*. 2ª ed. Florianópolis: Ed. da UFSC.
- Bezerra, A. d. S. & Freitas, L. S. d., 2013. Avaliação das atividades de uma lavanderia industrial à luz da Produção Mais Limpa no polo de confecções de Santa Cruz do Capibaribe - PE. XVI SemeAd - Seminários em Administração, outubro, pp. 1 - 14.
- Çengel, Y. A. & Boles, M. A., 2011. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. 7a ed. New York: MC Graw-Hill.
- Costa, S. S. N. d., 2014. *Auditoria Energética à Indústria Têxtil Tempo de Tendências*. Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto .
- ELETROBRAS, 2005. *Eficiência Energética no uso do vapor*. Rio de Janeiro: s.n.
- GB Técnica, 2019. *GB Técnica*. [Online]
Available at: <https://www.gbtecnica.com.br/novo/index.php/projects/caldeira/>
[Acesso em 07 Maio 2020].
- Heat11, 2020. *Direct Industry*. [Online]
Available at: <https://www.directindustry.com/pt/prod/heat-11-gmbh-co-kg/product-108001-1921759.html>
[Acesso em 05 Maio 2020].
- Heatmec, 2016. *HEATMEC - Indústria Metalúrgica Limitada*. [Online]
Available at: <http://www.heatmec.com.br/economizador-caldeiras>
[Acesso em 07 Maio 2020].
- IMI CRITICAL ENGINEERING, 2020 Disponível em: <<https://www.cj-online.com//attemperators>> e <<http://www.imi-critical.com/products/Pages/Product---DAM-B-Steam-Attemperator>>
- Kitto, J. B. & Stultz, S. C., 2005. *Steam - Its generation and use*. 41 ed. Barberton, Ohio: The Babcock & Wilcox Company.
- Leite, N. R., 2008. Tipos e Aplicações de Caldeiras. *Fabricação e Montagem de Caldeiras e Trocadores de Calor*, Setembro, pp. 1-112.
- Macintyre, A. J., 2017, *Instalações Hidráulicas Prediais e Industriais* . LTC; 4ª edição.
- Magaldi, 2020. *Direct Industry*. [Online]
Available at: <https://www.directindustry.com/pt/prod/magaldi-power-spa/product-125951-1889087.html>
[Acesso em 06 Maio 2020].

- Maringá, 2018. *Caldeiras Maringá*. [Online]
Available at: <http://caldeirasmaringa.com.br/equipamentos-e-acessorios/fornalhas/>
[Acesso em 07 Maio 2020].
- ORL, 2020. Disponível em: <<http://www.boiler-units.com/sale-8635425-30mw-unit-steam-super-heater-coils-convective-superheater-in-boiler-once-through.html>>
- Pera, H., 1990. *Geradores de Vapor: um complêndio sobre a conversão de energia com vistas à preservação da ecologia*. São Paulo: Fama.
- SCIENCE MUSEUM/ Science & Society Picture Library, 2020. Disponível em: <<https://www.ssplprints.com/image/85367/20-hp-wagon-boiler-late-18th-century>>
- Santos, D., *et al*, 2011. Materiais para caldeiras e turbinas de centrais termoelétricas avançadas. LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia, UEZ – Unidade de Emissões Zero Estrada do Paço do Lumiar, 1639-048 Lisboa
- Shields, C. D., 1965. *Calderas*. Mexico: Continental S.A..
- Silva, M. V. A. e. *et al.*, 2012. A Questão Ambiental no Pólo de Confeccões de Caruaru: Um Primeiro Ensaio à Luz dos Instrumentos Econômicos de Proteção Ambiental. *Revista Estudos do CEPE*, Janeiro/Junho, Issue 35, pp. 108-132.
- Silva Telles, Pedro Carlos. Vasos de Pressão, LTC, 1996
- SmartFire, 2019. *SmartFire*. [Online]
Available at: <https://www.smartfire.pt/quais-os-cuidados-que-devo-ter-com-a-chamine/>
[Acesso em 07 Maio 2020].
- Smarth Engineering, 2020. Disponível em: <<https://www.indiamart.com/proddetail/radiant-super-heater-6270979188.html>>
- Soluções Industriais, 2020. Disponível em:<
<https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/maquinas-e-equipamentos/tec-calor/produtos/aquecimento-industrial/caldeira-vertical>>
- Telhado, D., 2015. *Projeto Mecânico de Caldeiras de vapor*, Disponível em: <http://www.petroblog.com.br/wp-content/uploads/C%c3%a1lculo-mec%c3%a2nico-caldeiras.pdf>: Petroblog.
- Thermodyne Engineering. 2020. Disponível em: <<https://www.thermodyneboilers.com/steam-boiler-types/>>
- Wuxi CO., 2019. *Alibaba*. [Online]
Available at: <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/boiler-superheater-1047457380.html>
[Acesso em 07 Maio 2020].

ANEXO A – CÓDIGO EES PARA A CALDEIRA

"-----Ponto 1 - Água Fria"

T[1] = 25 [°C] **"!Temperatura ambiente!"**
P[1] = P[2]
m[1] = 1,333 [kg/s] **"!Fluxo de água!"**
h[1]=Enthalpy(Water;T=T[1];P=P[1])

"!Líquido Comprimido!"

"-----Ponto 2 - Água Aquecida"

m[2] = m[1] **"!Mesma vazão!"**
T[2] = 40 [°C]
P[2] = 980,7[kPa]
h[2]=Enthalpy(Water;T=T[2];P=P[3])

"!Líquido Comprimido!"

"-----Ponto 3 - Saída de Vapor Saturado da Câmara de Evaporação"

m[3] = m[2] **"!Mesma vazão!"**
P[3] = 980,7 [kPa]
x[3] = 1
T[3]=Temperature(Water;P=P[3];x=x[3])
h[3]=Enthalpy(Water;P=P[3];x=x[3])

"!Vapor Saturado!"

"-----Ponto 4 - Saída de Vapor Superaquecido"

m[4] = m[3]
P[4] = P[3]*1,05
T[4] = 300 [°C]
h[4]=Enthalpy(Water;T=T[4];P=P[4])

"!Vapor Superaquecido!"

"-----Ponto 5 - Entrada de Ar"

T[5] = 25 [°C]
h[5]=Enthalpy(Air;T=T[5])
P[5] = 101,3 [kPa]
m[5] = (138,2 * (C/12 + H/4 - O/32)*m[6])* exar
v[5]=Volume(Air;T=T[5];P=P[5])

"-----Ponto 6 - Entrada de combustível"

T[6] = 25 [°C]
h[6] = Cp_cb*T[6]
P[6] = P[5]
m[6] = (m[4]*(h[4] - h[2]) + m[5]*(h[5]-h[10]))/(PCI*n)

"-----Ponto 7 - Saída das Cinzas"

P[7]=P[5]
v[7] = v[5]

$$m[7] = m[6] + m[5] - m[8]$$

$$T[7] = T[8]$$

"-----Ponto 8 - Saída de Gases da Câmara de Combustão"

$$m[8] = (44 * (C/12) + 9 * (H + W/9)) * m[6] + 0,7685 * m[5]$$

$$P[8] = \text{Pressure}(\text{Air}; T=T[8]; v=v[8])$$

$$v[8] = v[7]$$

$$T[8] = T_{\text{ref}} + Q_{\text{Cam}} / (m[8] / m[6] * C_{p_ar})$$

"-----Ponto 9 - Saída de Gases do Superaquecedor"

$$m[9] = m[8]$$

$$P[9] = \text{Pressure}(\text{Air}; T=T[9]; v=v[9])$$

$$T[9] = T_{\text{ref}} + (Q_{\text{Cam}} - Q_{\text{Sp_Vapor}}) / (m[8] / m[6] * C_{p_ar})$$

$$v[9] = v[8]$$

"-----Ponto 10 - Saída de Gases da Câmara de Evaporação"

$$m[10] = m[9]$$

$$P[10] = \text{Pressure}(\text{Air}; T=T[10]; v=v[10])$$

$$T[10] = T_{\text{ref}} + (Q_{\text{Cam}} - Q_{\text{Sp_Vapor}} - Q_{\text{Ev_H2O}}) / (m[8] / m[6] * C_{p_ar})$$

$$v[10] = v[9]$$

"-----Ponto 11 - Saída de Gases do Economizador"

$$m[11] = m[10]$$

$$P[11] = \text{Pressure}(\text{Air}; T=T[11]; v=v[11])$$

$$T[11] = T_{\text{ref}} + (Q_{\text{Cam}} - Q_{\text{Sp_Vapor}} - Q_{\text{Ev_H2O}} - Q_{\text{Ec_H2O}}) / (m[8] / m[6] * C_{p_ar})$$

$$v[11] = v[10]$$

"-----Superaquecedor"

"!1a Lei - Vapor!"

$$Q_{\text{Sp_Vapor}} = m[4] * h[4] - m[3] * h[3]$$

"!1a Lei - Gases!"

$$n_{\text{sp}} = 0,8$$

$$Q_{\text{Sp_Vapor}} = Q_{\text{Sp_Gases}} * n_{\text{sp}}$$

$$Q_{\text{Sp_Gases}} = m[8] * h[8] - m[9] * h[9]$$

"-----Câmara de Evaporação"

"!1a Lei - Água!"

$$Q_{\text{Ev_H2O}} = m[3] * h[3] - m[2] * h[2]$$

"!1a Lei - Gases!"

$$n_{\text{ev}} = 0,8$$

$$Q_{\text{Ev_Gases}} * n_{\text{ev}} = Q_{\text{Ev_H2O}}$$

$$Q_{\text{Ev_Gases}} = m[9] * h[9] - m[10] * h[10]$$

"-----Economizador"

"!1a Lei - Água!"

$$Q_{Ec_H2O} = m[2]*h[2] - m[1]*h[1]$$

"!1a Lei - Gases!"

$$n_{ec} = 0,8$$

$$Q_{Ec_H2O} = n_{ec}*Q_{Ec_Gases}$$

$$Q_{Ec_Gases} = m[10]*h[10] - m[11]*h[11]$$

"-----Câmara de Combustão"

"!Rendimento Térmico!"

$$n = 0,8$$

"!Temperatura de Referência!"

$$T_{ref} = 25 [^{\circ}C]$$

"!Dados do combustível!"

$$H = 0,06$$

$$C = 0,49$$

$$O = 0,44$$

$$W = 0,15$$

$$PCS = 16000 [kJ/kg]$$

$$PCI = PCS - 2440 * (9* H + W)$$

$$Cp_{cb} = 0,42 [kJ/kg^{\circ}C]$$

$$Cp_{ar} = 1,0048 [kJ/kg^{\circ}C]$$

"!Balanço de Energia!"

"!Energia Liberada na combustão!"

$$Q_{Cam} = m[6]*(PCI)$$

"!Entalpia dos Gases!"

$$0 = m[8]*h[8] - (m[6]*PCI + m[5]*h[5])$$

"!Área da Câmara de Combustão!"

$$m_{med} = 200/3600 [kg/m^2/s]$$

$$A_{cb} = m[6]/m_{med}$$

$$N_{CALDEIRA} = (m[1]*(h[4]-h[1]))/(m[6]*PCI)$$

$$exar = 1,3$$

"!Volume da Câmara de Combustão!"

$$Q_{\text{forn}} = 350 \text{ [m}^3\text{kJ/s]}$$
$$V_{\text{forn}} = Q_{\text{Cam}}/Q_{\text{forn}}$$

"!Altura da Grelha!"

$$H_{\text{forn}} = V_{\text{forn}}/A_{\text{cb}}$$

"!Tubos!"

$$P_{\text{trabalho}} = P[4]$$

$$R_{\text{interno}} = 25,4 \text{ [mm]}$$

$$E_j = 0,60$$

$$S_{\text{adm}} = 180000$$

$$t_{\text{circ}} = (P_{\text{trabalho}} \cdot R_{\text{interno}}) / (S_{\text{adm}} \cdot E_j - 0,6 \cdot P_{\text{trabalho}})$$

$$t_{\text{trans}} = (P_{\text{trabalho}} \cdot R_{\text{interno}}) / (2 \cdot S_{\text{adm}} \cdot E_j - 0,4 \cdot P_{\text{trabalho}})$$

$$t_{\text{tub}} = t_{\text{circ}} + 2 \text{ [mm]}$$

$$t_{\text{real}} = 2,41 \text{ [mm]}$$

$$d_{\text{ext}} = 41,27 \text{ [mm]}$$

Unit Settings: [kJ]/[C]/[kPa]/[kg]/[degrees]

$$A_{\text{cb}} = 5,031 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$H = 0,06$$

$$n_{\text{sp}} = 0,8$$

$$Q_{\text{Ec,H2O}} = 70,57$$

$$S_{\text{adm}} = 180000$$

$$W = 0,15$$

$$C = 0,49$$

$$H_{\text{forn}} = 2,272$$

$$O = 0,44$$

$$Q_{\text{Ev,Gases}} = 3623$$

$$t_{\text{circ}} = 0,2436$$

$$Cp_{\text{ar}} = 1,005 \text{ [kJ/kg}^\circ\text{C]}$$

$$m_{\text{med}} = 0,05556 \text{ [kg/m}^2\text{/s]}$$

$$PCI = 14316 \text{ [kJ/kg]}$$

$$Q_{\text{Ev,H2O}} = 2898$$

$$t_{\text{real}} = 2,41 \text{ [mm]}$$

ANEXO B - TENSÕES ADMISSÍVEIS (MPa) SEGUNDO CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1

Classe de Material	Forma de Apresentação	Especificação ASTM	Tensões admissíveis (MPa) @ temperatura (°C)																
			-30 a 93	150	205	260	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600
Aço-carbono	Chapas	A-285-C	108,0	108,0	108,0	108,0	106,0	104,0	101,0	97,2	88,9	74,4	62,2	45,6					
	Tubos cond.	A-53-A	80,6	80,6	80,6	80,6	80,6	80,6	78,8	71,6	62,3	54,4	47,5	40,0					
	Tubos cond.	A-53-B	101,0	101,0	101,0	101,0	101,0	101,0	98,4	89,5	75,9	63,4	52,9	38,7					
	Tubos t.c.	A-179	92,3	92,3	92,3	92,3	91,8	90,4	87,5	83,8	73,3	63,4	55,8	47,3					
	Forjados	A-181-60	92,3	92,3	92,3	92,3	91,8	90,4	87,5	83,8	73,3	63,4	55,8	47,3	33,7	22,0			
Aço-carbono Si para altas temperaturas	Chapas	A-515-60	117,8	117,8	117,8	117,8	114,3	111,5	108,0	103,2	88,9	74,4	62,2	45,6	32,3	22,0			
	Chapas	A-515-65	128,1	128,1	128,1	128,1	124,6	121,9	118,2	112,3	95,0	78,5	62,2	45,6	32,3	22,0			
	Chapas	A-515-70	137,7	137,7	137,7	137,7	134,8	132,2	128,3	121,5	101,2	82,6	67,0	50,8	34,2	22,0			
	Tubos cond.	A-106-A	94,4	94,4	94,4	94,4	94,4	94,4	92,4	84,4	73,3	64,0	56,0	47,3	36,0	23,6			
	Tubos cond.	A-106-B	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	115,3	104,9	88,9	74,4	62,2	47,3	36,0	23,6			
	Tubos t.c.	A-210-A1	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	115,3	104,9	88,9	74,4	62,2	45,6	32,3	22,0			
	Forjados	A105	137,7	137,7	137,7	137,7	129,0	125,3	121,6	116,1	101,2	82,6	67,0	50,8	34,2	22,0			
	Forjados	A-216-WC1	137,7	137,7	137,7	137,7	129,0	125,3	121,6	116,1	101,2	82,6	67,0	50,8	34,2	22,0			

ANEXO C – CLASSES DE AÇO CARBONO UTILIZADA NA CALDEIRA DE ACORDO COM A FORMA DE APRESENTAÇÃO

Formas de apresentação	Classes de aço-carbono				
	Aços de baixo carbono	Aços de médio carbono	Aços de médio carbono acalmados	Aços de médio carbono acalmados	Aços de qualidade estrutural
Chapas grossas	A-285 Gr A	A-285 Gr B,C	A-515 Gr 55,60,65 e 70	A-516 Gr 55,60,65 e 70 A-442 Gr 55,60	A-283 Gr.C
Chapas finas					A-570 Gr C
Tubos sem costura	A-106 Gr A		A-106 Gr B		
Tubos com ou sem costura	A-53 Gr A API-5L Gr A	A-53 Gr B API-5L Gr B		A-333 Gr 6	A-120
Tubos com solda por eletrodo	A-139 Gr A	A-134 A-139 Gr B A-671 (285 B)	A-672	A-671	
Tubos com solda por resistência elétrica	A-135				
Tubo para trocadores	A-179 A-214			A-334 Gr 6	
Tubo para caldeiras	A-178		A-210 A-192		
Peças forjadas		A-181	A-105	A-350 Gr. LF1	
Peças fundidas		A-216 Gr WCB		A-352 Gr LCB	
Acessórios de tubulação	A-234 Gr WPA	A-234 Gr WPB		A-420 Gr WPL6	

Fonte: Silva Telles, Pedro Carlos. Vasos de Pressão, LTC, 1996

ANEXO D: PLANO DE MANUTENÇÃO DA CALDEIRA

Atividade:	Retirada de cinzas
Periodicidade:	Diária
Descrição:	A gaveta do cinzeiro deve ser retirada e as cinzas removidas, além disso a grelha deve ter suas passagens de ar desobstruídas.

Atividade:	Limpeza dos tubos dos gases
Periodicidade:	Semanal
Descrição:	Os tubos de fumo devem ser escovados retirando toda fuligem e alcatrão do seu interior. Este procedimento é indispensável para garantir um bom desempenho térmico do equipamento.

Atividade:	Inspeção nos sopradores de fuligem
Periodicidade:	Mensal
Descrição:	Examinar a válvula de drenagem do sistema de tubulação do soprador; limpar a válvula, verificando se existe obstrução no furo da sede.

Atividade:	Inspeção nos filtros de água
Periodicidade:	Mensal
Descrição:	Realizar Limpeza

Atividade:	Inspeção nos tanques de condensação
Periodicidade:	Mensal
Descrição:	Drenagem e ao fim testar o funcionamento da válvula de boia, recolocando-a logo após.

Atividade:	Inspeção nos motores elétricos
Periodicidade:	Mensal
Descrição:	Lubrificar através dos pinos de lubrificação (graxeiros),

Atividade:	Inspeção nos ventiladores
Periodicidade:	Mensal e trimestral
Descrição:	<ul style="list-style-type: none"> • Lubrificar os mancais; (Mensal) • Limpar os dutos que conduzem os gases da combustão para o exterior. (Mensal) • Corrigir, sempre que necessário, a tensão das correias (Trimestral)

Atividade:	Inspeção em bomba hidráulica
Periodicidade:	Mensal, Semestral e Anual
Descrição:	<ul style="list-style-type: none"> • Lubrificar os mancais da bomba e do motor; (Mensal) • Troca dos rolamentos; (Semestral) • Reapertar os parafusos que prendem o motor e a bomba à base; (Anual) • Abrir a bomba e examinar o estado da carcaça, rotor, eixo e rolamento; (Anual)

Atividade:	Inspeção no economizador
Periodicidade:	Trimestral
Descrição:	Examinar e limpar a superfície externa de aquecimento; inspecionar a superfície interna dos tubos, lavando-os com jato de água de alta pressão; no caso de existirem depósitos, pode se tornar necessário o emprego de um limpador de tubos movidos a turbina.

Atividade:	Limpeza de chaminé
Periodicidade:	Semestral
Descrição:	Limpar a sujeira do interior da chaminé

Atividade:	Limpeza da caldeira na parte de água
Periodicidade:	Semestral
Descrição:	<ul style="list-style-type: none"> • Para fazer a limpeza da Caldeira, no lado da água, deve-se retirar toda a água do interior quando esta estiver fria, abrir os tampões e jogar jatos de água pelas aberturas até eliminar todas as impurezas e lamas existentes. • Antes de fechar a caldeira, deve-se desmontar e limpar a sede das válvulas de descarga de fundo.