

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
LEANDRO FRANÇA SCHADEK

ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE CALDEIRAS MISTAS EM UM FRIGORÍFICO

CASCADEL

2017

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
LEANDRO FRANÇA SCHADEK

ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE CALDEIRAS MISTAS EM UM FRIGORÍFICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial de avaliação para obtenção do título de Engenheiro Mecânico pelo Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz.

Professor Orientador: Mestre Eliseu Avelino Zanella Junior.

CASCADEL

2017

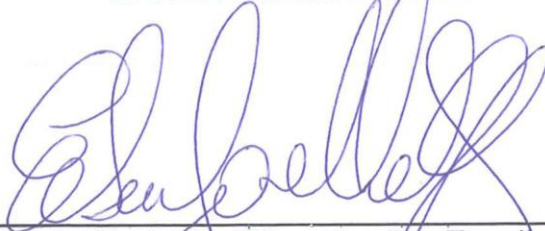
CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ

LEANDRO FRANÇA SCHADEK

ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE CALDEIRAS MISTAS EM UM FRIGORÍFICO

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Mecânica, da FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob orientação do Professor Mestre Engenheiro Mecânico Eliseu Avelino Zanella Junior.

BANCA EXAMINADORA



Orientador Prof. Me. Eliseu Avelino Zanella Junior
Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz
Engenheiro Mecânico.



Prof. Me. Roberson R. Parizotto
Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz
Engenheiro Mecânico



Prof. Geovane Duarte Pinheiro
Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz
Engenheiro de Controle e Automação

RESUMO

A produção de vapor é essencial desde a revolução industrial e hoje as empresas buscam produzi-lo com mais eficiência. As caldeiras mistas podem utilizar diversos combustíveis em sua antefornalha produzindo vapor com um bom rendimento. O objetivo desse trabalho foi fazer um estudo baseado em caldeiras mistas, descobrindo fabricantes e trazendo informações sobre suas eficiências. Para isso, foi escolhido um frigorífico para apresentar os dados de produção de vapor, regime de trabalho e custo do combustível para a realização do estudo. Foram pesquisados fabricantes de caldeiras e informações para contato, e com base na necessidade do frigorífico essas empresas apresentaram suas caldeiras e eficiências. Encontrou-se um diferencial de rendimento entre as caldeiras, que influencia no consumo de combustível. Foi feita uma análise de consumo das caldeiras mistas e a escolha da que mais se aplicava ao frigorífico, com o melhor rendimento. Os resultados mostraram a influência do rendimento das caldeiras na geração de vapor e a economia de recursos financeiros e naturais que pode ser obtida com a escolha da melhor opção.

Palavras-chave: economia; rendimento; combustível.

ABSTRACT

Steam production has been essential since the industrial revolution and today companies are looking to produce it more efficiently. Mixed boilers can use various fuels in their furnace producing steam with good yield. The objective of this work was to do a study based on mixed boilers, discovering manufacturers and bringing information about their efficiencies. For this, a slaughterhouse was chosen to present the steam production data, working regime and fuel cost for the study. Boiler manufacturers and contact information were researched, and based on the need for the slaughterhouse these companies presented their boilers and efficiencies. There was a yield differential between the boilers, which influences fuel consumption. An analysis of consumption of the mixed boilers and the choice of the one that applied the most to the slaughterhouse, with the best yield. The results showed the influence of boiler yield on the generation of steam and the saving of financial and natural resources that can be obtained by choosing the best option.

Keywords: economy; yield; fuel.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Energia absorvida pelo vapor.....	25
Equação 2 – Energia disponível na fornalha.....	26
Equação 3 – Cálculo de rendimento térmico.....	26
Equação 4 – Cálculo de rendimento térmico aproximado	27
Equação 5 – Consumo de combustível.....	27

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Caldeira flamotubular	12
Figura 2 – Caldeira vertical.....	13
Figura 3 – Caldeira cornovaglia.....	14
Figura 4 – Caldeira lancashire.....	15
Figura 5 – Caldeira multitubular.	16
Figura 6 – Caldeira escocesa.....	17
Figura 7 – Caldeira locomóvel.....	18
Figura 8 – Caldeira locomotiva.....	18
Figura 9 – Caldeira aquatubular.	19
Figura 10 – Caldeira aquatubular de tubos retos.	20
Figura 11 – Caldeira de tubos curvos com um tambor.....	21
Figura 12 – Caldeira de tubos curvos com dois tambores	22
Figura 13 – Parede com tubos de água	23
Figura 14 – Caldeira mista	24
Figura 15 – Consumo de combustível	34
Figura 16 – Custo do combustível.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fabricantes.....	32
Tabela 2 – Contatos dos fabricantes.....	32
Tabela 3 – Caldeiras mistas.....	33

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS	10
1.1.1 Objetivo Geral	10
1.1.2 Objetivos específicos.....	10
1.2 JUSTIFICATIVA	10
1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 CALDEIRAS	11
2.1.1 Caldeiras Flamotubulares.....	12
2.1.2 Caldeiras Aquatubulares	18
2.1.3 Caldeiras Mistas	22
2.2 RENDIMENTO TÉRMICO.....	24
2.2.1 Cálculo de rendimento térmico	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 MATERIAIS	28
3.2 MÉTODOS	28
3.2.1 Coleta de dados do frigorífico.....	28
3.2.2 Pesquisa de fabricantes	29
3.2.3 Levantamento das caldeiras mistas	29
3.2.4 Análise de consumo	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
4.1 FRIGORÍFICO.....	31
4.2 FABRICANTES	31
4.3 CALDEIRAS MISTAS.....	33
4.4 ANÁLISE DE CONSUMO.....	34
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38
ANEXOS – TABELAS TERMODINÂMICAS	39

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de se gerar vapor vem desde a revolução industrial, com as máquinas a vapor e os novos meios de produção, naquela época a sua maior utilização era em locomotivas, máquinas a vapor e turbinas para geração de energia. Hoje o vapor é amplamente utilizado, principalmente em indústrias, fazendo parte dos processos industriais e em outras várias aplicações, como higienização, esterilização ou cozimento.

Altafini (2002, p. 03) diz que “caldeira é o nome popular dado aos equipamentos geradores de vapor, cuja aplicação tem sido ampla no meio industrial e também na geração de energia elétrica nas chamadas centrais termelétricas”. As caldeiras são equipamentos com a função de produzir e armazenar vapor de água, utilizando energia de alguma fonte para transferir para a água. Vários tipos de combustíveis podem ser usados como fonte de energia, dependendo do tipo de caldeira.

As caldeiras mistas entram no mercado tendo a capacidade de utilizarem vários combustíveis diferentes, sólidos, líquidos e gasosos, e ainda com uma boa eficiência e sendo relativamente fácil a instalação e produção.

A eficiência das caldeiras é baseada na energia transferida pelo combustível para a água comparado com a energia total liberada pelo combustível. Essa eficiência depende de muitos fatores, como as perdas de calor na caldeira ou o regime de trabalho.

No mercado de hoje a busca por uma maior eficiência está em todos os setores possíveis e na geração de vapor com as caldeiras essa eficiência tem um grande impacto, visto que são queimadas grandes quantidades de combustíveis, chegando a milhares de toneladas por mês. A eficiência das caldeiras tem considerável influência econômica, com o custo desses combustíveis, e ambiental, sendo que eles são retirados do meio ambiente e também causam poluição quando queimados.

Neste trabalho foi realizado um estudo com base em fabricantes de caldeiras no Brasil. Para isso foi utilizado dados de um frigorífico para analisar as caldeiras mistas e a eficiência que este tipo de configuração pode oferecer.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Fazer um estudo da eficiência de caldeiras mistas para aplicação em um frigorífico.

1.1.2 Objetivos específicos

- Verificar as condições de trabalho da caldeira em um frigorífico;
- Pesquisar fabricantes de caldeiras no mercado;
- Fazer o levantamento das caldeiras mistas dos fabricantes que atendem as necessidades do frigorífico;
- Calcular o consumo das caldeiras com base em suas eficiências;
- Avaliar e escolher a caldeira mista que melhor se aplica no frigorífico.

1.2 JUSTIFICATIVA

A eficiência das caldeiras na geração de vapor influencia nos gastos de uma empresa com combustíveis e também causa impacto ambiental, com a queima desses combustíveis e a sua extração.

O estudo aqui feito será para encontrar fabricantes que trabalham com caldeiras mistas e analisar a eficiência das caldeiras existentes no mercado, a fim de verificar e comparar o consumo para escolher a que melhor se aplica no frigorífico.

1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa será feita com fabricantes do mercado brasileiro, com base em dados de um frigorífico para coletar as informações das caldeiras mistas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CALDEIRAS

Uma caldeira de vapor é um dos mais comuns geradores de vapor, que por definição, segundo Pera (1990, p. 1.1) é um trocador de calor que usa energia térmica de um combustível, ar e fluido vaporizante para produzir vapor, também dito como um associado de equipamentos para garantir um maior rendimento.

Outra definição pela NR-13 (BRASIL, 1978), “Caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os refervedores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo”.

A caldeira de vapor é constituída principalmente de um vaso fechado com tubos, onde fica a água, montado junto à fornalha e coberto por um revestimento.

A NR-13 (BRASIL, 1978) classifica as caldeiras pelas classes de pressão, sendo:

- Categoria A: Pressão de operação é superior a 1960 kPa (19,98 kgf/cm²);
- Categoria C: Pressão de operação igual ou inferior a 588 kPa (5,99 kgf/cm²) e volume interno igual ou inferior a 100 litros;
- Categoria B: caldeiras que não se enquadram nas categorias anteriores.

Também com base no grau de automação:

- Manuais;
- Semi-automática;
- Automática.

E conforme o tipo de fonte de energia usada:

- Sólido;
- Líquido;
- Gasoso;
- Caldeiras elétricas;
- Caldeiras de recuperação.

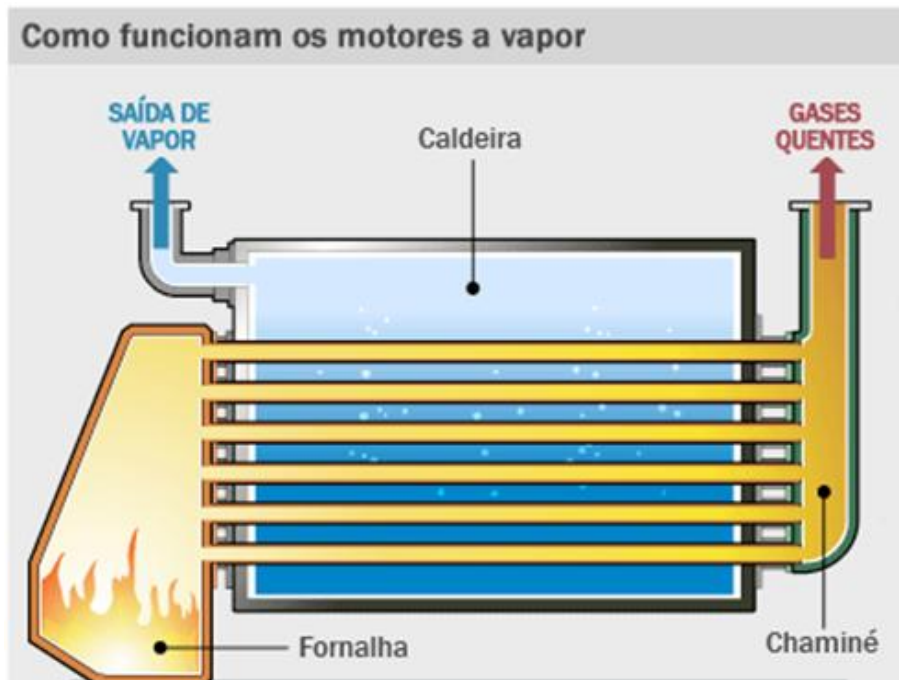
Diferenciando as caldeiras pela sua construção, podemos classificar elas em flamotubulares e aquatubulares.

2.1.1 Caldeiras Flamotubulares

Nas caldeiras flamotubulares a queima e os gases quentes passam por dentro dos tubos, circulando por toda a caldeira cedendo calor para a água que esta contida no corpo e envolta de todos os tubos (PERA, 1990), como ilustrado na Figura 1.

As caldeiras flamotubulares são também conhecidas por caldeiras fumotubulares e são construídas de forma que a água circule ao redor de diversos tubos, montados entre espelhos, na forma de um único feixe tubular. Os gases de combustão circulam por dentro dos tubos, em duas ou mais passagens, em direção da chaminé, por onde são lançados ao meio ambiente (BAZZO, 1995, p. 84).

Figura 1 – Caldeira flamotubular



Fonte: Adaptado de Brain (2008).

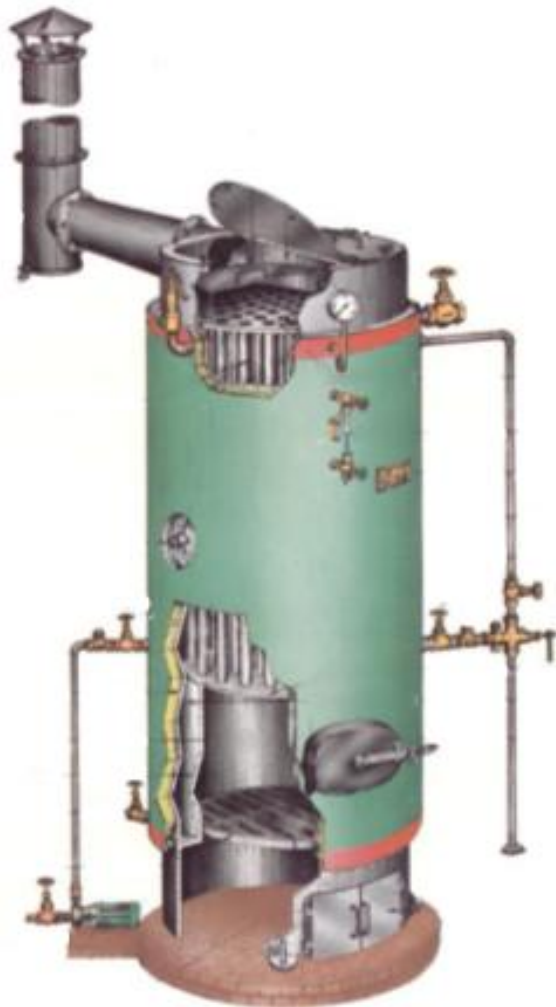
Dentro das caldeiras flamotubulares ainda se classificam as verticais e horizontais.

2.1.1.1 Caldeiras Verticais

As Caldeiras verticais, como mostra a Figura 2, são feitas com o corpo cilíndrico fechado nas pontas por espelhos planos, neles ficam fixados os tubos verticais que no interior circula os gases quentes (PERA, 1990). O autor também afirma que as caldeiras verticais operam com um rendimento baixo, cerca de 65%, e que geralmente são construídas para trabalharem a 10 kgf/cm² de pressão e com 2 a 30 m² de superfície de aquecimento.

Uma vantagem é o pequeno espaço que ocupa esse tipo de caldeira, facilitando o transporte e a construção de sua fundação. Outra vantagem é que seu interior de fácil acesso que facilita a limpeza.

Figura 2 – Caldeira vertical



Fonte: Adaptado de Martinelli Jr (2002).

2.1.1.2 Caldeiras Horizontais

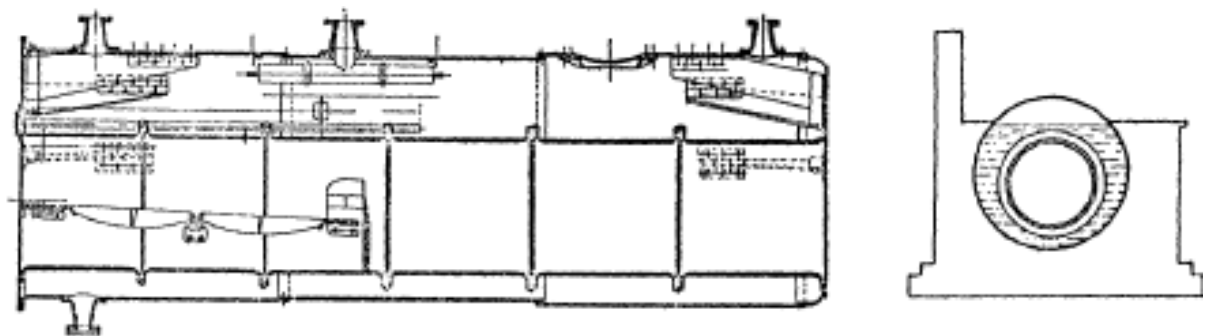
Segundo Pera (1990, p. 7.4) a classe das caldeiras horizontais abrange vários tipos, desde as já em desuso com grandes volumes até as mais modernas e compactas. O autor também apresenta os vários tipos de caldeiras horizontais, que são:

- a) Caldeira Cornovaglia;
- b) Caldeira Lancashire;
- c) Caldeira Multitubular;
- d) Caldeira Escocesa;
- e) Caldeira Locomotiva e Locomóvel.

A seguir, uma breve descrição destes tipos.

a) Caldeira Cornovaglia

Figura 3 – Caldeira cornovaglia



Fonte: Martinelli Jr (2002).

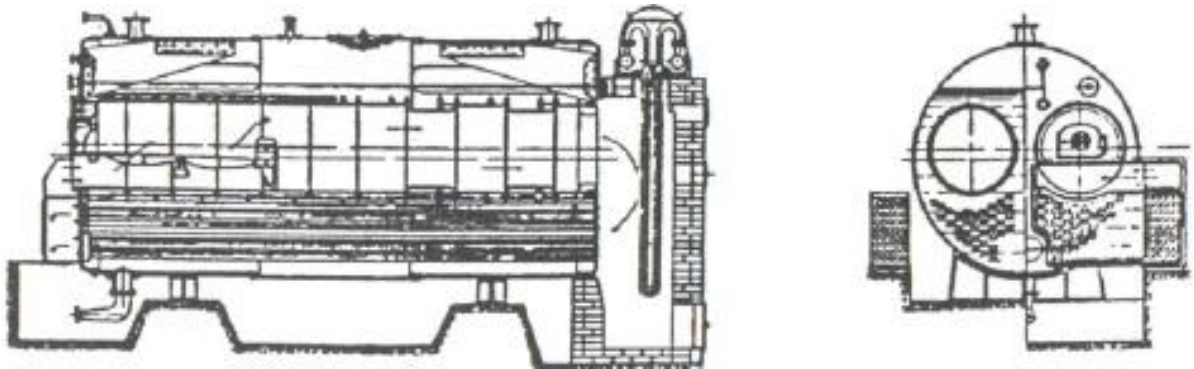
A Figura 3 mostra uma caldeira cornovaglia, elas são construídas com um corpo cilíndrico, com os gases da combustão passando ao seu redor. Suas características são: grande volume de água, demora em atingir as condições de operação e rendimento térmico baixíssimo (PERA, 1990).

Possui grandes dimensões, cerca de 100 m² de superfície, que limita sua pressão máxima em 10 kgf/cm², e sua capacidade específica varia de 12 a 14 kg/m² de superfície (MARTINELLI JR, 2002).

b) Caldeira Lancashire

De acordo com Martinelli Jr (2002, p. 24), são construídas com dois (às vezes três ou quatro) tubulões internos e alcançam uma superfície de aquecimento de 120 a 140 m², como na Figura 4. Com alguns tipos atingindo de 15 a 18 kg/m² de superfície.

Figura 4 – Caldeira lancashire



Fonte: Pera (1990).

Pera (1990, p. 7.5) coloca que este tipo de caldeira é um aperfeiçoamento da caldeira cornovaglia, acumulando vantagens ao introduzir mais tubos internos, aumentando sua superfície de aquecimento sem aumentar a dimensão do corpo da caldeira. O autor também indica que houve um aperfeiçoamento feito para que fosse concebidas unidades com maiores produções de vapor, isso foi feito com a introdução de um feixe tubular de tubos com diâmetros pequenos.

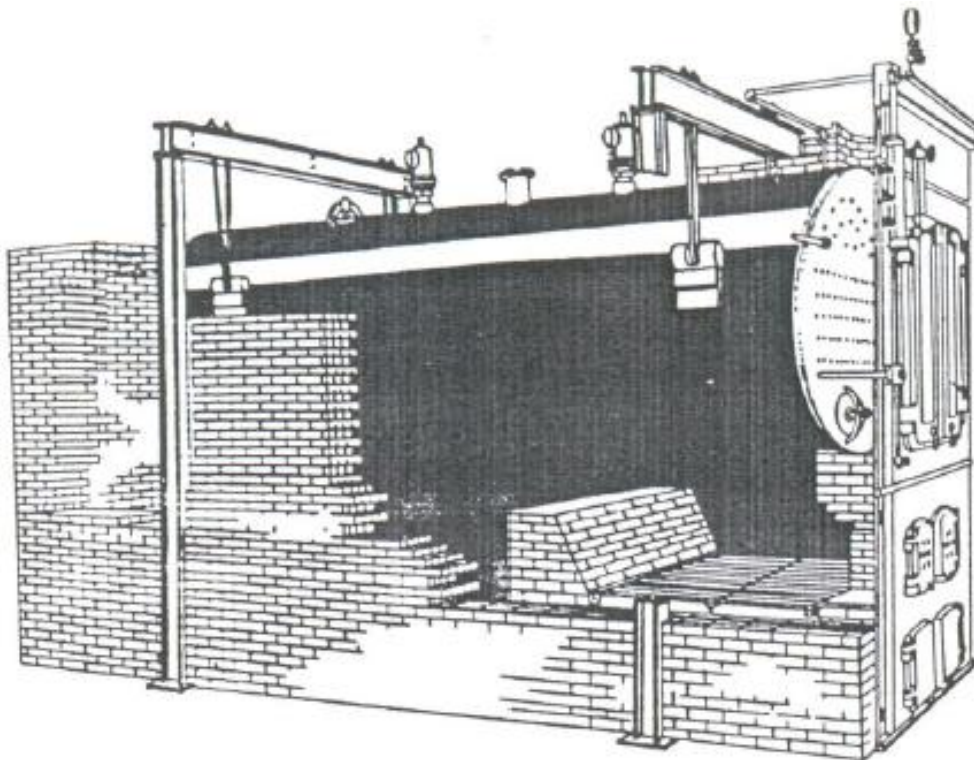
c) Caldeira Multitubular

A substituição dos tubulões que existiam nas caldeiras anteriores por vários tubos menores foi o que deu origem a caldeira multitubular, apresentada na Figura 5. Esses tubos dão duas ou três voltas no interior da caldeira. Não permitindo uso de fornalha interna e usando um revestimento de alvenaria, ela apresenta altos custos de manutenção e instalação (MARTINELLI JR, 2002).

Possui capacidade máxima de 6000 kgv/h com pressão de 16 kg/cm² (PERA, 1990).

Como o próprio nome indica, trata-se de uma unidade equipada com inúmeros tubos fixados aos espelhos do corpo cilíndrico. Os gases de combustão circulam através destes tubos, os quais por fora são banhados pela água contida no corpo da caldeira. Não existe fornalha interna e por conseguinte esta parte da caldeira tem que ser construída externamente à caldeira propriamente dita (PERA, 1990, p. 7.6).

Figura 5 – Caldeira multitubular.



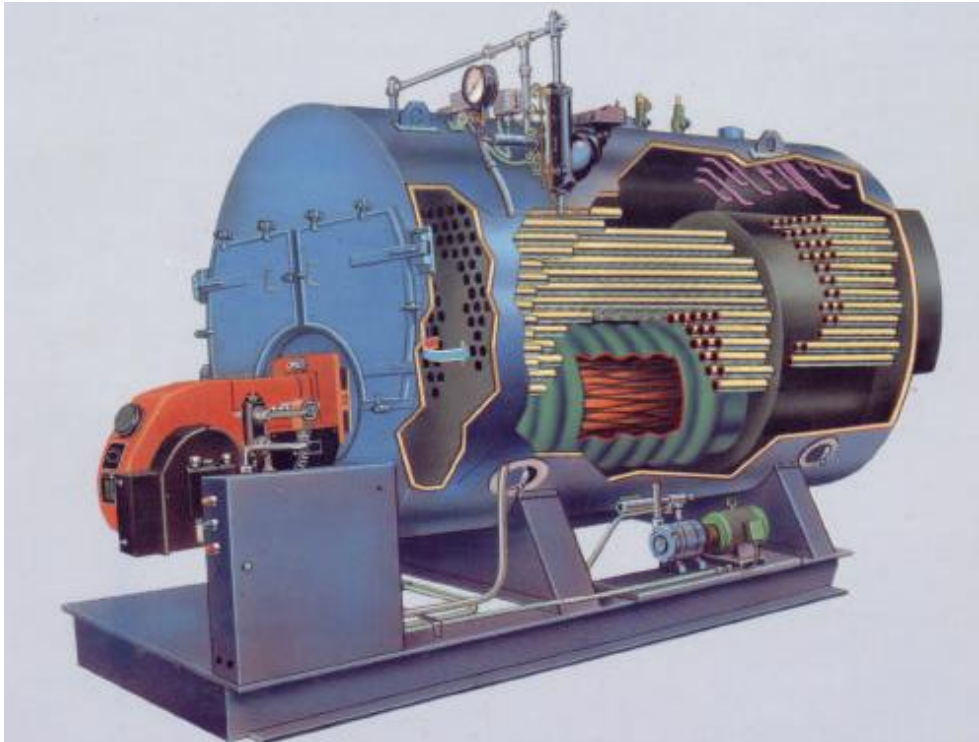
Fonte: Pera (1990).

d) Caldeira Escocesa

As caldeiras escocesas foram a princípio concebidas para fins marítimos, ela também é a origem de todas as caldeiras compactas (PERA, 1990).

Segundo Martinelli Jr (2002, p. 26), é o tipo mais moderno de caldeira flamotubular, não exige gastos com instalações custosas, bastando uma fundação simples, nivelada e ligações com fonte de água, eletricidade de esgoto. Têm controle eletrônico de segurança e funcionamento automático. Conta com um corpo cilíndrico contendo um tubulão com um conjunto de tubos de diâmetros pequenos. Possui uma câmara de combustão feita de refratário na parte posterior, que conduz os gases da combustão para o espelho traseiro. A Figura 6 mostra a caldeira escocesa.

Figura 6 – Caldeira escocesa.



Fonte: Martinelli Jr (2002).

e) Caldeiras Locomotivas e Locomóveis

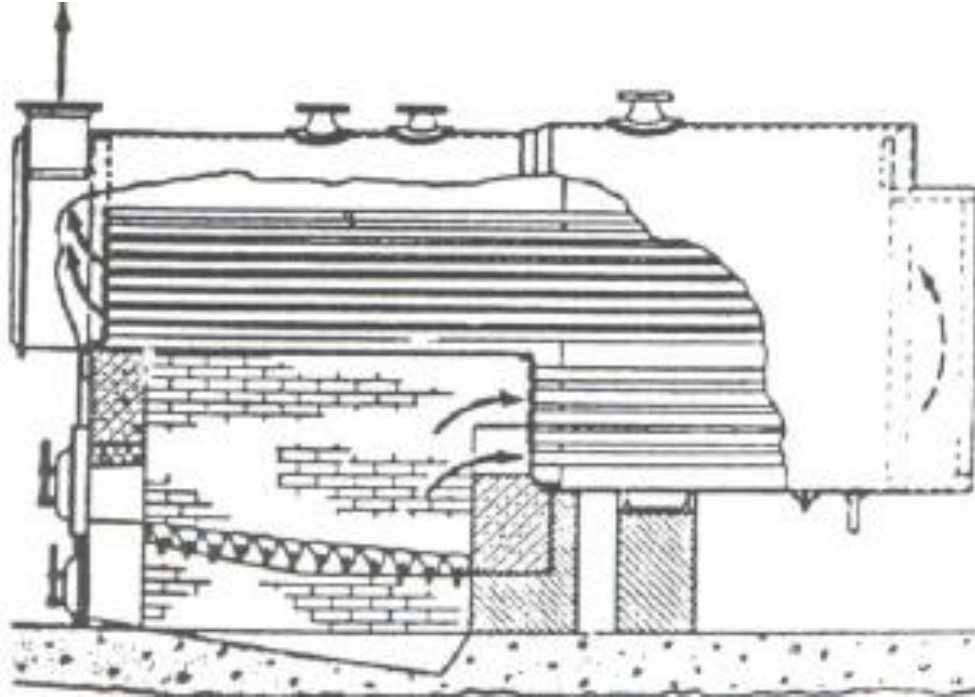
Pera (1990, p. 7.14) descreve a caldeira locomóvel como uma caldeira multitubular junto a uma fornalha revestida construída com dupla parede metálica, que forma uma camada onde circula a água.

O mesmo autor (1990, p. 7.15) descreve também a caldeira locomotiva, dizendo que usa o mesmo tipo construtivo da locomóvel, mas não é estacionária.

Martinelli Jr (2002, p. 25) diz “As caldeiras locomóveis são uma adaptação e modificação das caldeiras locomotivas. Ainda que ideais por fáceis mudanças de local por serem portáteis, elas têm limitações no serviço estacionário. São multitubulares com a fornalha revestida completamente por dupla parede metálica formando uma câmara onde circula água, tendo um razoável custo de construção”.

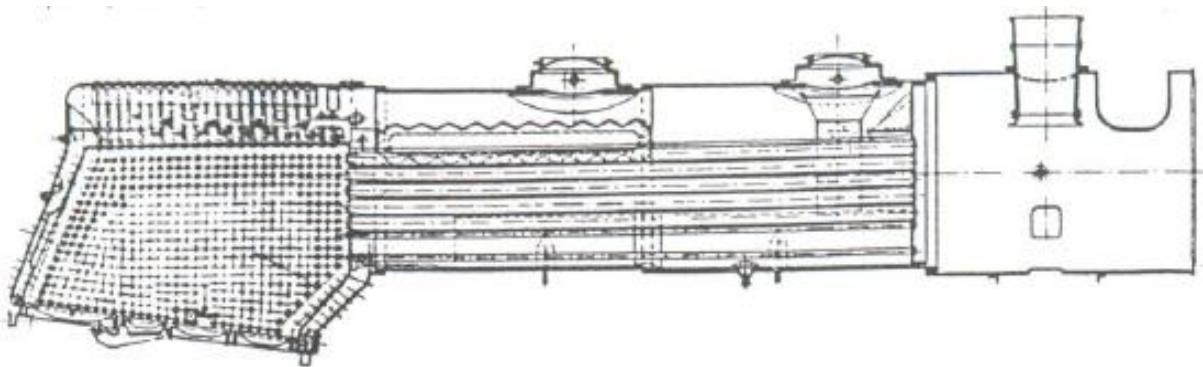
As caldeiras, locomóvel e locomotiva, estão ilustradas nas figuras 7 e 8, respectivamente.

Figura 7 – Caldeira locomóvel.



Fonte: Pera (1990).

Figura 8 – Caldeira locomotiva.



Fonte: Pera (1990).

2.1.2 Caldeiras Aquatubulares

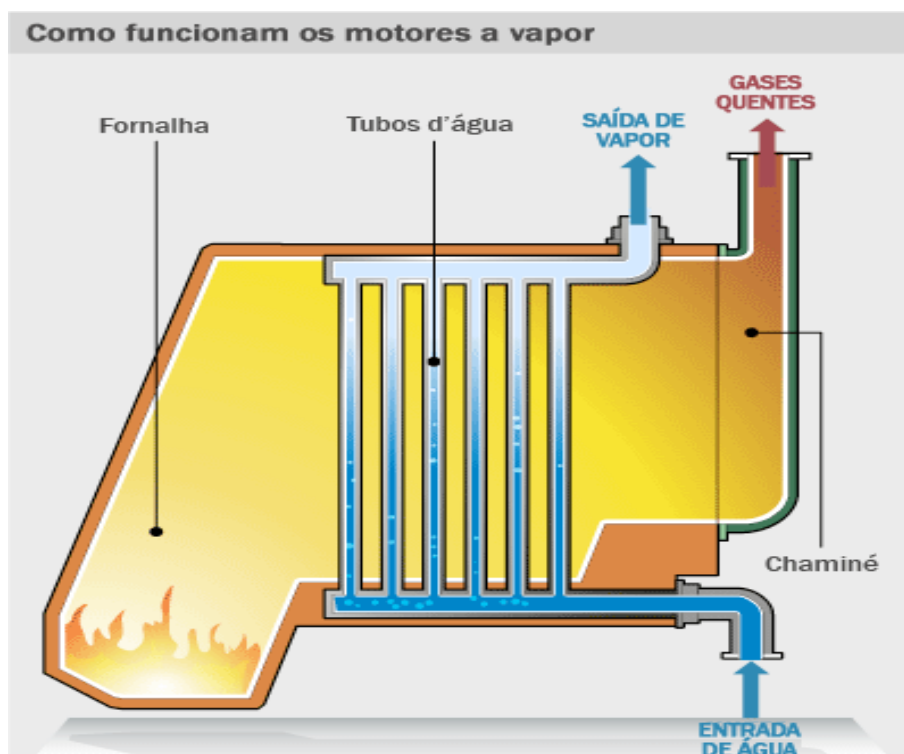
As caldeiras aquatubulares são caldeiras em que a massa de água e vapor passa por dentro dos tubos e externo a eles circula os gases quentes. A sua produção de vapor e pressão de trabalho é maior do que encontrado nas flamatubulares (ALTAFINI, 2002).

Bizzo (2001, p 71) coloca que as caldeiras aquatubulares têm a produção de vapor dentro de tubos interligados a reservatórios horizontais, esses tubos podem ser retos ou curvados, onde que, no tubulão superior ocorre a separação da fase líquida e do vapor e no tubulão inferior ocorre a decantação e purga dos sólidos em suspensão.

A caldeira aquatubular, segundo Martinelli Jr (2002, p. 28) se diferencia pelo fato dos tubos se localizarem fora dos tubulões da caldeira constituindo com estes um feixe tubular. Geralmente são empregadas para obter pressões e rendimentos elevados, pois os esforços nos tubos resultantes das altas pressões são de tração ao invés de compressão, e também pelos tubos estarem fora do corpo da caldeira, assim obtendo superfícies de aquecimento praticamente ilimitadas.

A Figura 9 mostra uma simplificação desta configuração.

Figura 9 – Caldeira aquatubular.



Fonte: Adaptado de Brain (2008).

Podemos classificar três tipos de caldeiras aquatubulares:

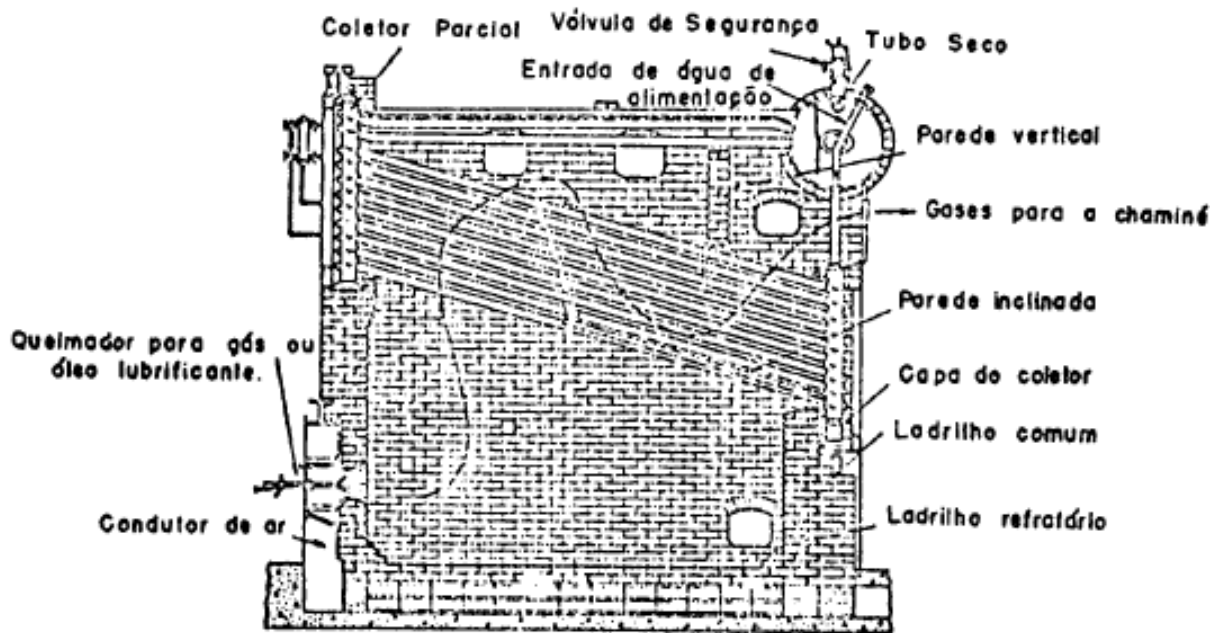
- Caldeiras de tubos retos
- Caldeiras de tubos curvos
- Caldeiras de circulação forçada

2.1.2.1 Caldeiras de Tubos Retos

Martinelli Jr (2002, p. 28) diz que as caldeiras de tubos retos são ainda bastante utilizadas devido a possuírem fácil acesso aos tubos para fins de limpeza ou troca, causarem pequena perda de carga, exigirem chaminés pequenas, também porque todos os tubos principais são iguais, assim necessitando de poucas formas especiais e podem possuir tambor transversal ou longitudinal.

Como mostra a Figura 10, os tubos de água são inclinados, ligados nas extremidades aos coletores e formam com o tubulão um circuito fechado onde circula a água que entra pela parte inferior do tambor, desce pelo interior do coletor posterior e sobe pelos tubos inclinados onde se forma o vapor. A mistura de vapor e água ascende rapidamente pelo coletor.

Figura 10 – Caldeira aquatubular de tubos retos.



Fonte: Martinelli Jr (2002).

A superfície de aquecimento deste tipo de caldeira varia de 67 a 1.350 m², com pressões de até 45 kgf/cm² e capacidades de 3000 a 30000 kgv/h de vapor.

2.1.2.2 Caldeiras de Tubos Curvos

Pera (1990, p 8.7) afirma que as caldeiras de tubos curvos não apresentam restrições de capacidade produtiva, apenas apresentam restrições quando a pressão de trabalho é superior a 160 kgf/cm².

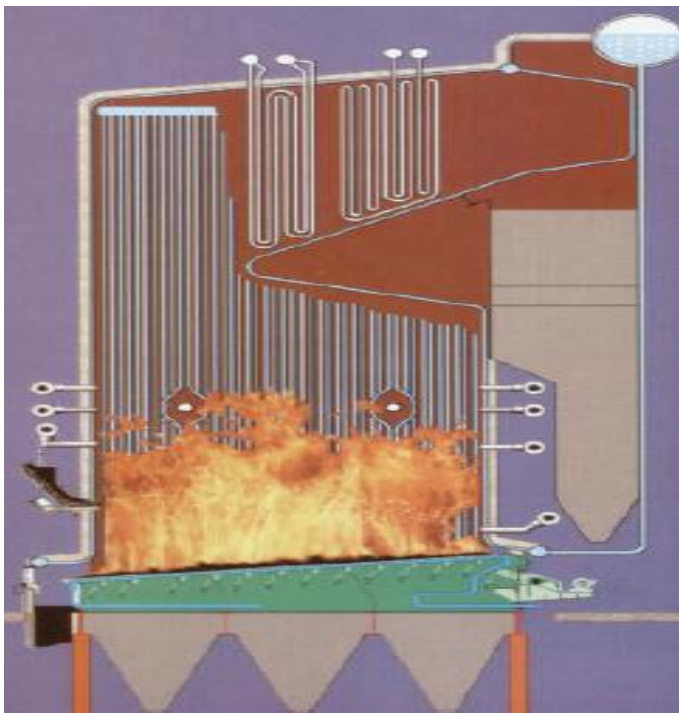
Elas contêm tubos curvos ligados aos tambores, e no início eram feitas com até cinco tambores (MARTINELLI JR, 2002), mas na atualidade são construídas com um ou dois tambores, por motivos de economia e segurança.

Esse tipo de caldeira, principalmente nas que utilizam três ou quatro tambores e utiliza alvenaria para reter o calor, o que é essencial e de grande importância, mas faz com que a instalação seja mais custosa.

Os autores Pera (1990, p. 8.8) e Martinelli Jr (2002, p. 30) dizem que a alvenaria na construção dessas caldeiras foi substituída por paredes de água para diminuir os custos de construção e melhorar o aproveitamento energético. Isso também fez diminuir o tamanho das caldeiras e aumentou a velocidade de vaporização e a vida dos revestimentos.

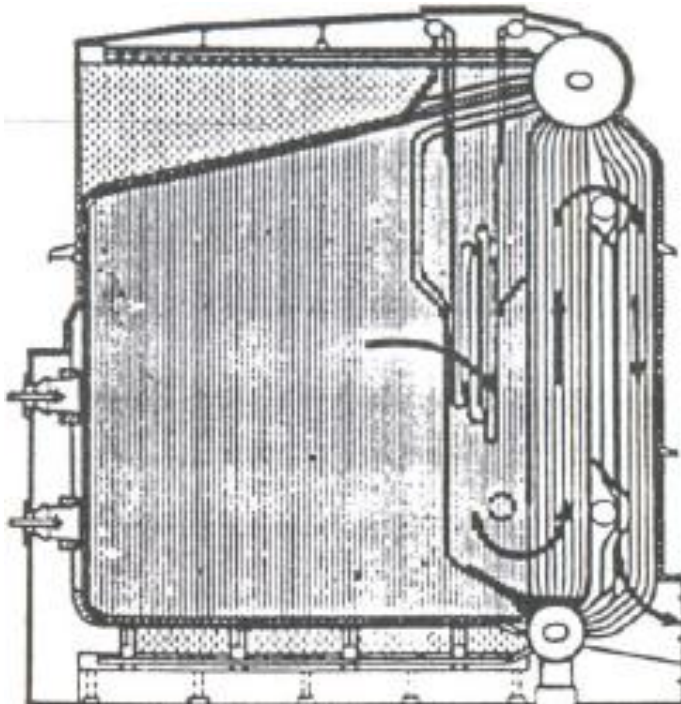
Nas figuras 11 e 12 estão exemplos de caldeiras de tubos curvos, com um e dois tambores.

Figura 11 – Caldeira de tubos curvos com um tambor



Fonte: Martinelli Jr (2002).

Figura 12 – Caldeira de tubos curvos com dois tambores



Fonte: Pera (1990).

2.1.2.3 Caldeira de Circulação Forçada

Também existem as caldeiras aquatubulares de circulação forçada. Elas utilizam tubos de menores diâmetros que não necessitam de inclinação para haver fluxo de água e a circulação é feita por uma bomba (BAZZO, 1995).

Essas caldeiras precisam de um excelente controle do sistema, pois a variação no fluxo de água pode causar uma rápida variação na temperatura do vapor de saída.

2.1.3 Caldeiras Mistas

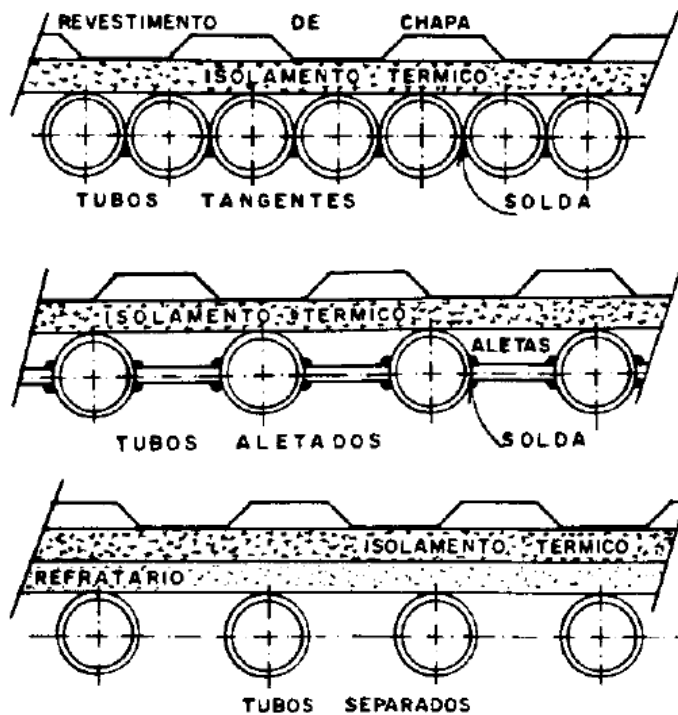
Existe também um tipo misto de caldeira, que une as caldeiras flamotubulares com as aquatubulares, chamadas de caldeiras mistas.

Essas caldeiras foram desenvolvidas a partir da necessidade de usar combustíveis sólidos para caldeiras de menor capacidade. E com uma boa disponibilidade e baixo custo desses combustíveis sólidos a caldeira mista tem uma

boa vantagem. Também podem ser usados outros tipos de combustíveis para geração de calor com um queimador apropriado (BIZZO, 1995).

Bizzo (1995, p. 74) explica que as caldeiras mistas tem a mesma construção de uma caldeira flamotubular, mas com uma antecâmara revestida de paredes com tubos de água. Na Figura 13 estão algumas configurações destes tubos.

Figura 13 – Parede com tubos de água



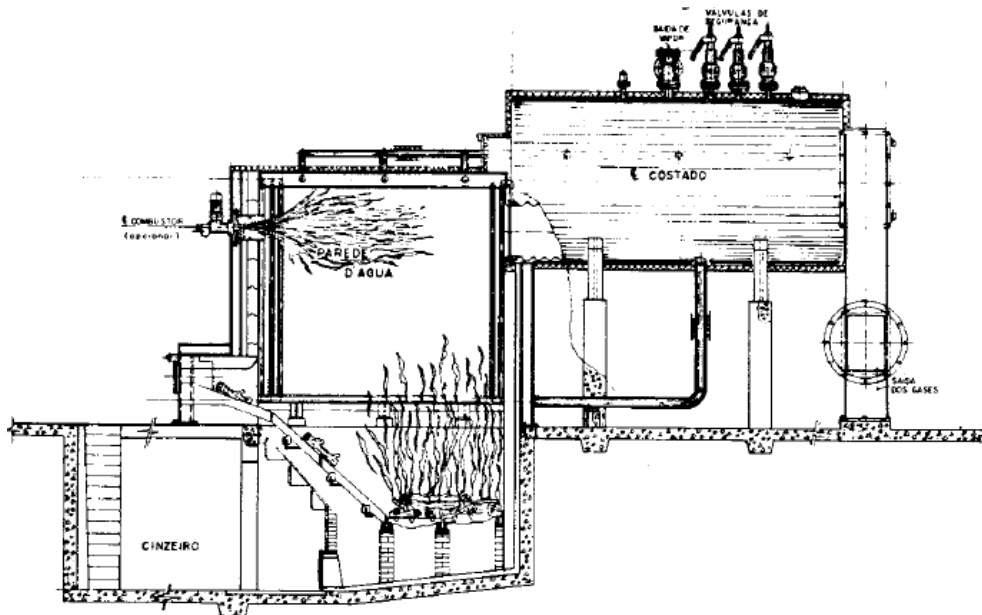
Fonte: Bizzo (1995).

Os combustíveis sólidos queimam na grelha dentro da câmara de combustão, que tem capacidade para um grande volume necessário para a queima de combustíveis sólidos maiores, como lenha em toras ou cavacos, contando com o cinzeiro por baixo da grelha para a retirada das cinzas.

Utilizando os queimadores compatíveis elas podem utilizar combustíveis líquidos ou gasosos dentro da câmara de combustão juntamente com os sólidos, como ilustrado na Figura 14.

Andrade (2017, p. 38) diz que existem equipamentos, que são de realtiva facilidade de construção e operação, com uma média de produção de vapor de 3000 a 25000 kgv/h com uma pressão de trabalho de 15 a 30 kgf/cm².

Figura 14 – Caldeira mista



Fonte: Bizzo (1995).

2.2 RENDIMENTO TÉRMICO

Rendimento térmico ou eficiência é a expressão que significa o resultado da relação entre a disponibilidade energética num sistema e suas dissipações (PERA, 1990). Essa disponibilidade vem dos combustíveis utilizados na caldeira, ou seja, a energia fornecida. As dissipações são as perdas de energia no sistema, que Martinelli Jr (2002, p. 17) classifica como ocasionais, as perdas que existem por erro de projeto, de equipamento ou de operação e normais as que já estão previstas durante o projeto.

Por definição, rendimento térmico ou eficiência térmica de um gerador de vapor é a fração do potencial calorífico do combustível alimentado na fornalha que é absorvida pela água para transformar-se em vapor (PERA, 1990, p. 5.18).

Então, para obter uma maior economia de energia é preciso ter um maior rendimento térmico. Por sua vez, para garantir uma maior eficiência é preciso que a energia do combustível de alimentação da caldeira seja absorvida pela água e não dissipada por outros meios. Por isso, deve-se minimizar ao máximo qualquer tipo de perda que possa ocorrer.

Para verificar a eficiência de uma caldeira, como afirma Pera (1990, p. 19), existem dois métodos.

O Método Direto, que se faz utilizando a produção de vapor da caldeira, a diferença de entalpia da água de entrada e do vapor que sai da caldeira e relacionando com a energia fornecida pelo combustível e pelo ar que participa da combustão, se obtêm o rendimento térmico total do processo.

E o Método Indireto, que consiste em fazer a soma de todas as perdas de energia. Como é um método mais detalhado, e envolve a observação de cada perda separadamente, é o mais aconselhável para uma melhor investigação do comportamento térmico da caldeira como diz Bazzo (1995, p. 166).

Bazzo (1995, p. 166) classifica a perda total de energia como a soma das perdas parciais, sendo:

- Gases de combustão;
- Umidade nos gases de combustão;
- Cinzas;
- Combustão parcial;
- Purgas e vapor de nebulização;
- Fluxo de calor pelas fronteiras do equipamento.

E conhecendo as perdas parciais mais detalhadamente, reduzir essas perdas para aumentar a eficiência se torna mais simples e eficaz.

2.2.1 Cálculo de rendimento térmico

Segundo Bazzo (1995, p. 171), a energia aproveitada do total de energia cedida é o que o rendimento térmico se refere. Para fazer esse cálculo o autor (1995, p. 164) apresenta a Equação 1, que calcula a energia absorvida pelo vapor utilizando a diferença de entalpia e a vazão de vapor da caldeira. E também a Equação 2 (1995, p. 163), que calcula a energia disponível na fornalha somando a energia dos combustíveis.

$$\dot{q}_u \cong \dot{m}_v \cdot (h_v - h_a) \quad (1)$$

Onde:

$\dot{q}_u$: Energia absorvida pelo vapor (kW)

$\dot{m}_v$: Fluxo de vapor (kg/s)

h_v : Entalpia do vapor (kJ/kg)

h_a : Entalpia da água de alimentação (kJ/kg)

$$\dot{q}_d = \dot{m}_{cb} \cdot (Pci + \Delta h_{cb}) + \dot{m}_{ar} \cdot (\Delta h_{ar} + w_{ar} \cdot \Delta h_{vp}) + \dots \quad (2)$$

Onde:

$\dot{q}_d$: Energia disponível na fornalha (kW)

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

Pci : Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg cb)

$\dot{m}_{ar}$: Fluxo de ar de combustão (kg/s)

w_{ar} : Umidade do ar (kg/kg ar seco)

Δh_{cb} : Entalpia do combustível (kJ/kg)

Δh_{ar} : Entalpia do ar de combustão (kJ/kg)

Δh_{vp} : Entalpia da umidade do ar (kJ/kg)

Assim, o rendimento da caldeira é calculado com a Equação 3.

$$\eta = 100 \cdot \frac{\dot{q}_u}{\dot{q}_d} \quad (3)$$

Onde:

η : rendimento térmico da caldeira (%)

$\dot{q}_u$: energia absorvida pelo vapor (kW)

$\dot{q}_d$: energia disponível na fornalha (kW)

Para fazer um cálculo aproximado, desconsiderando algumas variáveis, como do fluxo de combustível e ar da combustão, pode-se aplicar a Equação 4 e obter o rendimento baseado no poder calorífico inferior do combustível.

$$\eta = 100. \frac{\dot{m}_v \cdot (h_v - h_a)}{\dot{m}_{cb} \cdot Pci} \quad (4)$$

Onde:

η : rendimento térmico da caldeira (%)

$\dot{m}_v$: Fluxo de vapor (kg/s)

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

h_v : Entalpia do vapor (kJ/kg)

h_a : Entalpia da água de alimentação (kJ/kg)

Pci : Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg cb)

De outra forma, como Pera (1990, p. 5.19) demonstra, isolando o consumo de combustível na Equação 4 obtense a Equação 5, que permite avaliar a quantidade de combustível consumido.

$$\dot{m}_{cb} = 100. \frac{\dot{m}_v \cdot (h_v - h_a)}{\eta \cdot Pci} \quad (5)$$

Onde:

η : rendimento térmico da caldeira (%)

$\dot{m}_v$: Fluxo de vapor (kg/s)

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

h_v : Entalpia do vapor (kJ/kg)

h_a : Entalpia da água de alimentação (kJ/kg)

Pci : Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg cb)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para a realização do trabalho foi utilizado o *software* Microsoft Excel®, que é um editor de planilhas de interface intuitiva e que inclui também ferramentas para a realização de cálculos.

As planilhas do *software* foram utilizadas para o registro e organização de todas as informações adquiridas dos fabricantes, de suas caldeiras mistas e para a realização dos cálculos da análise de consumo de combustível das caldeiras.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Coleta de dados do frigorífico

Para realizar o estudo foi escolhido um frigorífico para fornecer os dados que a pesquisa necessita.

Os dados coletados do frigorífico e usados para fazer a escolha da caldeira mista e realizar os cálculos de custo e consumo de combustível foram:

- Capacidade de produção de vapor;
- Pressão do vapor;
- Temperatura de alimentação da água;
- Temperatura do vapor;
- Combustível utilizado;
- Pci do combustível;
- Preço do combustível;
- Horas de funcionamento por mês.

3.2.2 Pesquisa de fabricantes

Através de ferramentas de busca, foram pesquisados fabricantes de caldeiras que poderiam atender a demanda de vapor do frigorífico com uma caldeira de construção mista. Utilizando planilhas foram organizados seus nomes, localizações, sites, telefones e e-mails para contato.

3.2.3 Levantamento das caldeiras mistas

Utilizando os telefones e e-mails das empresas para contato foram identificados os fabricantes que produziam caldeiras mistas, para separar previamente os que não produzem esse tipo de caldeira.

Em seguida apresentada a demanda do frigorífico para os fabricantes e solicitado a eles que apresentassem uma caldeira mista capaz de atender os requisitos e que também informassem quanto de eficiência ela podia entregar.

As respostas dos fabricantes foram registradas e organizadas em uma planilha, contendo os nomes e rendimentos das caldeiras mistas que podiam atender ao regime de trabalho solicitado ou a negativa dos que não possuíam uma caldeira para o frigorífico.

3.2.4 Análise de consumo

Os cálculos de consumo e custo de combustível foram realizados utilizando a Equação 5 dentro de planilhas do Microsoft Excel®, para apresentar os resultados de maneira mais compreensível.

Os dados necessários referentes às entalpias da água de entrada da caldeira e saída do vapor foram adquiridos por meio de tabelas termodinâmicas, disponíveis nos anexos.

Para um maior entendimento da representatividade dos resultados, os cálculos foram feitos também em uma estimativa mensal e anual, considerando o regime de trabalho informado pelo frigorífico.

Foi usada como referência a caldeira com menor eficiência, para fazer um comparativo, com as demais caldeiras, de consumo e custo.

Verificando a caldeira que atingia o maior rendimento e conseqüentemente o menor consumo, foi feita a escolha da caldeira mista que melhor se aplica no frigorífico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 FRIGORÍFICO

A Frimesa é uma cooperativa de grande porte, com sua sede localizada em Medianeira no Paraná, que atua em um sistema cooperativo com cinco mais empresas, Copagril, Lar, C.Vale, Copacol e Primato. Em Medianeira, além da sede da empresa, também fica a Unidade Industrial de Carnes da Frimesa, que foi a escolhida para serem coletados os dados.

No contato feito com o frigorífico, todos os dados requisitados, referentes à Unidade Industrial de Carnes da Frimesa, para a escolha da caldeira mista e realização da análise de consumo foram disponibilizados, que foram:

- Capacidade de produção de vapor: 25000 kgv/h;
- Pressão do vapor: 10 bar;
- Temperatura de alimentação da água: 85 °C;
- Temperatura do vapor: 300 °C;
- Combustível utilizado: cavaco de madeira;
- Pci do combustível: 10460 kJ/kg;
- Preço do combustível: 163 R\$/ton.

A caldeira mista irá trabalhar 24 horas por dia, de segunda a sábado, o que resulta em uma média de 26 dias por mês ou 624 horas por mês.

4.2 FABRICANTES

Realizada a pesquisa de fabricantes de caldeiras, vinte empresas foram encontradas e escolhidas para fazer parte do estudo. As empresas estão apresentadas na Tabela 1, junto aos sites encontrados e suas localizações.

Na Tabela 2 estão listados os contatos das empresas, telefones e e-mails, encontrados em seus sites. Não foi encontrado o e-mail da empresa Vileri Engenharia Industrial LTDA.

Tabela 1 – Fabricantes.

EMPRESA	WEBSITE	LOCALIZAÇÃO
Alfa Laval Aalborg Ind. e Com. LTDA	www.aalborg-industries.com.br	Petrópolis - RJ
Arauterm Caldeiras e Aquec. LTDA	www.arauterm.com.br	Cachoeirinha - RS
Biocal Burntech S/A	www.biocal.ind.br	Agrolândia - SC
Boiler Company Brasil	www.boilercompany.com	Borebi - SP
Dan Power Caldeiras e Equip. LTDA	www.danpower.com.br	Piracicaba - SP
Domel Caldeiras e Aquecedores LTDA	www.domel.com.br	Piracicaba - SP
Engecass Equip. Industriais LTDA	www.engecasscaldeiras.com.br	Rio do Sul - SC
Engeman Engenharia S/A	www.engeman.ind.br	Patos de Minas - MG
H.Bremer & Filhos LTDA	www.bremer.com.br	Rio do Sul - SC
HPB Sistemas de Energia LTDA	www.hpbenergia.com.br	Sertãozinho - SP
Icavi Indústria de Caldeiras S/A	www.icavi.ind.br	Pouso Redondo - SC
Imtab Caldeiras Equip. Ind. LTDA	www.imtab.com.br	Agrolândia - SC
Incal Conterma Ind. e Com. LTDA	www.incalconterma.com.br	Amparo - SP
MML Ind. e Com. De Caldeiras LTDA	www.mmlcaldeiras.com.br	Lambari - MG
Secamaq Indústrias de Máq. LTDA	www.secamaq.com	Saete - SC
Sena Ecal Equip. e Instalações LTDA	www.ecal.com.br	São Paulo - SP
Steammaster Equip. Térmicos LTDA	www.steammaster.com.br	Varginha - MG
Thamil Equip. Industriais LTDA	www.thamil.com.br	Sertãozinho - SP
Vileri Engenharia Industrial LTDA	www.vileri.com.br	Pelotas - RS
Weco S/A	www.weco.ind.br	Porto Alegre - RS

Fonte: O autor (2017).

Tabela 2 – Contatos dos fabricantes.

EMPRESA	E-MAIL	TELEFONE
Alfa Laval Aalborg Ind. e Com. LTDA	dec.rio@alfalaval.com	(24) 2233-9963
Arauterm Caldeiras e Aquec. LTDA	contatos@arauterm.com.br	(51) 3406-6979
Biocal Burntech S/A	marcos@biocal.ind.br	(47) 3534-5400
Boiler Company Brasil	alvaro@boilercompany.com	(14) 3267-7122
Dan Power Caldeiras e Equip. LTDA	danpower@danpower.com.br	(19) 2106-6969
Domel Caldeiras e Aquecedores LTDA	domel@domel.com.br	(19) 3412-5050
Engecass Equip. Industriais LTDA	engecass@engecass.com.br	(47) 3520-2500
Engeman Engenharia S/A	rildo.candido@engeman.ind.br	(34) 3818-5800
H.Bremer & Filhos LTDA	bremer@bremer.com.br	(47) 3531-9000
HPB Sistemas de Energia LTDA	evertonluis@hpbenergia.com.br	(16) 3511-1300
Icavi Indústria de Caldeiras S/A	grabner.engenharia@icavi.ind.br	(47) 3545-8200
Imtab Caldeiras Equip. Ind. LTDA	comercial@imtab.com.br	(47) 3534-0396
Incal Conterma Ind. e Com. LTDA	comercial@incalconterma.com.br	(19) 3807-9899
MML Ind. e Com. De Caldeiras LTDA	vendas@mmlcaldeiras.com.br	(35) 3271-1657
Secamaq Indústrias de Máq. LTDA	vendas@secamaq.com.br	(47) 3563-0306
Sena Ecal Equip. e Instalações LTDA	ecal@ecal.com.br	(11) 2076-3344
Steammaster Equip. Térmicos LTDA	vendas@caldeiras.com	(35) 3690-8000
Thamil Equip. Industriais LTDA	thamil@thamil.com.br	(16) 3945-2732
Vileri Engenharia Industrial LTDA	Não encontrado	(53) 3278-6611
Weco S/A	tiaraju@weco.ind.br	(51) 3349-6200

Fonte: O autor (2017).

4.3 CALDEIRAS MISTAS

Dos vinte fabricantes contatados, apenas as empresas Sena Ecal Equip. e Instalações LTDA e Boiler Company Brasil informaram que não fabricavam caldeiras de configuração mista.

Os fabricantes Arauterm Caldeiras e Aquec. LTDA, Domel Caldeiras e Aquecedores LTDA, Icavi Indústria de Caldeiras S/A e MML Ind. e Com. de Caldeiras LTDA informaram que não fabricavam caldeiras mistas que atendiam os requisitos do frigorífico.

As empresas HPB Sistemas de Energia LTDA e Weco S/A foram contatadas por telefone e e-mail, mas não informaram nenhuma caldeira mista que atendesse os requisitos do frigorífico.

Os demais fabricantes apresentaram suas caldeiras mistas que são compatíveis com a demanda e as respectivas eficiências, como está detalhado na tabela a seguir:

Tabela 3 – Caldeiras mistas.

EMPRESA	CALDEIRA	EFICIÊNCIA
Alfa Laval Aalborg Ind. e Com. LTDA	FAM-25	88,9%
Biocal Burntech S/A	MGV	88,3%
Dan Power Caldeiras e Equip. LTDA	MIB-FM	84,6%
Engecass Equip. Industriais LTDA	Grelha móvel	90%
Engeman Engenharia S/A	Thor 25.0 e Titan 25.0	84%
H.Bremer & Filhos LTDA	Tecnotherm-5	87,84%
Imtab Caldeiras Equip. Ind. LTDA	Zeus	84,4%
Incal Conterma Ind. e Com. LTDA	Grelha móvel	90%
Secamaq Indústrias de Máq. LTDA	Grelha móvel	86%
Steammaster Equip. Térmicos LTDA	VFMI	86%
Thamil Equip. Industriais LTDA	Grelha móvel	80%
Vileri Engenharia Industrial LTDA	Caldeira E especial	83%

Fonte: O autor (2017).

A Engeman Engenharia S/A apresentou duas opções de caldeiras mistas para atender a demanda, ambas com a mesma taxa de eficiência.

4.4 ANÁLISE DE CONSUMO

Utilizando uma planilha do Microsoft Excel®, os cálculos para a estimativa do consumo e custo do combustível foram realizados e estão apresentados nas figuras 15 e 16:

Figura 15 – Consumo de combustível

Empresa	Caldeira	Eficiência (%)	Consumo (kg/h)	Consumo Mensal (ton)	Consumo Anual (ton)	Economia Anual (ton)
Engecass	Grelha móvel	90,0	7.158	4.466	53.596	6.700
Incal	Grelha móvel	90,0	7.158	4.466	53.596	6.700
Alfa Laval	FAM-25	88,9	7.246	4.522	54.259	6.037
Biocal	MGV	88,3	7.295	4.552	54.628	5.668
H. Bremer	Tecnotherm-5	87,8	7.334	4.576	54.914	5.382
Secamaq	Grelha móvel	86,0	7.491	4.674	56.089	4.207
Steammaster	VFMI	86,0	7.491	4.674	56.089	4.207
Dan Power	MIB-FM	84,6	7.614	4.751	57.017	3.279
Imtab	Zeus	84,4	7.633	4.763	57.152	3.144
Engeman	Thor 25.0 e Titan 25.0	84,0	7.669	4.785	57.424	2.872
Villeri	Caldeira E especial	83,0	7.761	4.843	58.116	2.180
Thamil	Grelha móvel	80,0	8.052	5.025	60.296	Referência

Fonte: O autor (2017).

Figura 16 – Custo do combustível

Empresa	Caldeira	Eficiência (%)	Custo Mensal	Custo Anual	Economia Anual
Engecass	Grelha móvel	90,0	R\$ 728.014,93	R\$ 8.736.179,17	R\$ 1.092.022,83
Incal	Grelha móvel	90,0	R\$ 728.014,93	R\$ 8.736.179,17	R\$ 1.092.022,83
Alfa Laval	FAM-25	88,9	R\$ 737.022,99	R\$ 8.844.275,87	R\$ 983.926,13
Biocal	MGV	88,3	R\$ 742.031,07	R\$ 8.904.372,88	R\$ 923.829,12
H. Bremer	Tecnotherm-5	87,8	R\$ 745.916,94	R\$ 8.951.003,24	R\$ 877.198,76
Secamaq	Grelha móvel	86,0	R\$ 761.876,09	R\$ 9.142.513,08	R\$ 685.688,92
Steammaster	VFMI	86,0	R\$ 761.876,09	R\$ 9.142.513,08	R\$ 685.688,92
Dan Power	MIB-FM	84,6	R\$ 774.483,97	R\$ 9.293.807,62	R\$ 534.394,38
Imtab	Zeus	84,4	R\$ 776.319,24	R\$ 9.315.830,86	R\$ 512.371,14
Engeman	Thor 25.0 e Titan 25.0	84,0	R\$ 780.016,00	R\$ 9.360.191,96	R\$ 468.010,04
Villeri	Caldeira E especial	83,0	R\$ 789.413,78	R\$ 9.472.965,36	R\$ 355.236,64
Thamil	Grelha móvel	80,0	R\$ 819.016,80	R\$ 9.828.201,56	Referência

Fonte: O autor (2017).

As caldeiras de grelha móvel das empresas Engecass e Incal Conterma se mostraram com as melhores eficiências, ambas com 90%, e com 80% a caldeira da empresa Thamil ficou classificada como a de menor eficiência.

Avaliando os dados obtidos, as caldeiras de grelha móvel da Engecass e Incal Conterma foram escolhidas como as que melhor se aplicam dentro do frigorífico.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho teve como objetivo fazer um estudo das caldeiras mistas do mercado e suas eficiências. Foram descobertas as necessidades na produção de vapor do frigorífico, como os dados do vapor produzido, o regime de trabalho de 624 horas da caldeira e o custo do combustível. Essas informações possibilitaram a pesquisa dos fabricantes, suas caldeiras mistas e também fazer a análise de consumo.

Foram encontrados vinte fabricantes para o estudo. O contato com eles, em sua maioria foi feito por e-mail, com facilidade na obtenção das informações requisitadas. A maioria deles fabricavam caldeiras mistas, mas alguns apresentavam em seus sites as caldeiras mistas somente como flamotubulares, mesmo usando uma antefornalha aquatubular, fato descoberto durante o contato com as empresas.

Das vinte empresas contatadas, doze tinham uma caldeira mista que atendia as condições de trabalho do frigorífico e informaram suas eficiências.

As eficiências levantadas das caldeiras foram variadas, com diferenças de até 10%, o que resultou em comparações de consumo e custo de R\$ 1.000.000,00 e 6.700 toneladas de cavaco por ano de economia.

A economia de combustível das caldeiras com maior eficiência, 90%, comparadas com a seguinte melhor classificada, com 88,9% de rendimento, chega a aproximadamente 660 toneladas de cavaco por ano, com custo de mais de R\$ 100.000,00.

Com isso, foram escolhidas duas caldeiras mistas, ambas com 90% de eficiência, como as que melhor se aplicam no regime de trabalho do frigorífico. Sendo elas das empresas Engecass e Incal Conterma.

Por fim, os resultados obtidos evidenciam a importância da avaliação de eficiência no emprego de caldeiras mistas. E que uma análise de consumo pode levar a uma economia de recursos financeiros e naturais.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros é recomendado fazer um levantamento de custos das caldeiras mistas, realizando um comparativo entre as caldeiras e também junto ao consumo delas, para verificar a viabilidade em uma análise de custo e consumo.

Um estudo individual das caldeiras mistas com objetivo de medir e calcular a real eficiência delas, visto que o fornecido pelas empresas é uma estimativa e a eficiência pode ter uma variação de acordo com a instalação ou condição de operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ANDRADE, Alan Sulato. **Curso de Engenharia Industrial Madeireira - MÁQUINAS TÉRMICAS AT-056: GERADORES DE VAPOR**. Curitiba, PR. Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasalan/AT056-Aula03.pdf>>. Acesso em 31/05/2017.

BAZZO, Edson. **Geração de Vapor**. Florianópolis, SC. Editora da UFSC, 1995.

BIZZO, Waldir A. **Apostila Geração, Distribuição e Utilização de Vapor**. Campinas, SP. UNICAMP, 2003.

BRAIN, Marshall. **How Steam Engines Work**. HOWSTUFFWORKS, 2008. Disponível em: <<http://science.howstuffworks.com/transport/engines-equipment/steam2.htm>>. Acesso em 22/05/2017.

BRASIL - MTE. Secretaria de Segurança e Medicina do Trabalho. **Portaria n. 3214, de 08 de junho de 1978. Norma Regulamentadora NR-13: Caldeiras e Vasos de Pressão**. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR13.pdf>>. Acesso em 30/04/2017.

MARTINELLI JR, Luiz C. **Geradores de vapor**. Panambi, RS. UNIJU: Campus Panambi, 2002.

PERA, Hildo. **Geradores de Vapor de Água**. São Paulo, SP. Ed. Fama, 1990.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**. 6. ed. São Paulo, SP. Editora E. Blücher, 2008

ANEXOS – TABELAS TERMODINÂMICAS

Anexo 1 – Tabela termodinâmica para água saturada

Água saturada: tabela em função da temperatura												
Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m³/kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	v_f	v_g	u_f	u_{fg}	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
0,01	0,6113	0,001000	206,132	0,00	2375,33	2375,33	0,00	2501,35	2501,35	0,0000	9,1562	9,1562
5	0,8721	0,001000	147,118	20,97	2361,27	2382,24	20,98	2489,57	2510,54	0,0761	8,9496	9,0257
10	1,2276	0,001000	106,377	41,99	2347,16	2389,15	41,99	2477,75	2519,74	0,1510	8,7498	8,9007
15	1,705	0,001001	77,925	62,98	2333,06	2396,04	62,98	2465,93	2528,91	0,2245	8,5569	8,7813
20	2,339	0,001002	57,7897	83,94	2318,98	2402,91	83,94	2454,12	2538,06	0,2966	8,3706	8,6671
25	3,169	0,001003	43,3593	104,86	2304,90	2409,76	104,87	2442,30	2547,17	0,3673	8,1905	8,5579
30	4,246	0,001004	32,8922	125,77	2290,81	2416,58	125,77	2430,48	2556,25	0,4369	8,0164	8,4533
35	5,628	0,001006	25,2158	146,65	2276,71	2423,36	146,66	2418,62	2565,28	0,5052	7,8478	8,3530
40	7,384	0,001008	19,5229	167,53	2262,57	2430,11	167,54	2406,72	2574,26	0,5724	7,6845	8,2569
45	9,593	0,001010	15,2581	188,41	2248,40	2436,81	188,42	2394,77	2583,19	0,6386	7,5261	8,1647
50	12,350	0,001012	12,0318	209,30	2234,17	2443,47	209,31	2382,75	2592,06	0,7037	7,3725	8,0762
55	15,758	0,001015	9,56835	230,19	2219,89	2450,08	230,20	2370,66	2600,86	0,7679	7,2234	7,9912
60	19,941	0,001017	7,67071	251,09	2205,54	2456,63	251,11	2358,48	2609,59	0,8311	7,0784	7,9095
65	25,03	0,001020	6,19656	272,00	2191,12	2463,12	272,03	2346,21	2618,24	0,8934	6,9375	7,8309
70	31,19	0,001023	5,04217	292,93	2176,62	2469,55	292,96	2333,85	2626,80	0,9548	6,8004	7,7552
75	38,58	0,001026	4,13123	313,87	2162,03	2475,91	313,91	2321,37	2635,28	1,0154	6,6670	7,6824
80	47,39	0,001029	3,40715	334,84	2147,36	2482,19	334,88	2308,77	2643,66	1,0752	6,5369	7,6121
85	57,83	0,001032	2,82757	355,82	2132,58	2488,40	355,88	2296,05	2651,93	1,1342	6,4102	7,5444
90	70,14	0,001036	2,36056	376,82	2117,70	2494,52	376,90	2283,19	2660,09	1,1924	6,2866	7,4790
95	84,55	0,001040	1,98186	397,86	2102,70	2500,56	397,94	2270,19	2668,13	1,2500	6,1659	7,4158
100	101,3	0,001044	1,67290	418,91	2087,58	2506,50	419,02	2257,03	2676,05	1,3068	6,0480	7,3548
105	120,8	0,001047	1,41936	440,00	2072,34	2512,34	440,13	2243,70	2683,83	1,3629	5,9328	7,2958
110	143,3	0,001052	1,21014	461,12	2056,96	2518,09	461,27	2230,20	2691,47	1,4184	5,8202	7,2386
115	169,1	0,001056	1,03658	482,28	2041,44	2523,72	482,46	2216,50	2698,96	1,4733	5,7100	7,1832
120	198,5	0,001060	0,89186	503,48	2025,76	2529,24	503,69	2202,61	2706,30	1,5275	5,6020	7,1295
125	232,1	0,001065	0,77059	524,72	2009,91	2534,63	524,96	2188,50	2713,46	1,5812	5,4962	7,0774
130	270,1	0,001070	0,66850	546,00	1993,90	2539,90	546,29	2174,16	2720,46	1,6343	5,3925	7,0269
135	313,0	0,001075	0,58217	567,34	1977,69	2545,03	567,67	2159,59	2727,26	1,6869	5,2907	6,9777
140	361,3	0,001080	0,50885	588,72	1961,30	2550,02	589,11	2144,75	2733,87	1,7390	5,1908	6,9298
145	415,4	0,001085	0,44632	610,16	1944,69	2554,86	610,61	2129,65	2740,26	1,7906	5,0926	6,8832
150	475,9	0,001090	0,39278	631,66	1927,87	2559,54	632,18	2114,26	2746,44	1,8417	4,9960	6,8378
155	543,1	0,001096	0,34676	653,23	1910,82	2564,04	653,82	2098,56	2752,39	1,8924	4,9010	6,7934
160	617,8	0,001102	0,30706	674,85	1893,52	2568,37	675,53	2082,55	2758,09	1,9426	4,8075	6,7501
165	700,5	0,001108	0,27269	696,55	1875,97	2572,51	697,32	2066,20	2763,53	1,9924	4,7153	6,7078
170	791,7	0,001114	0,24283	718,31	1858,14	2576,46	719,20	2049,50	2768,70	2,0418	4,6244	6,6663
175	892,0	0,001121	0,21680	740,16	1840,03	2580,19	741,16	2032,42	2773,58	2,0909	4,5347	6,6256
180	1002,2	0,001127	0,19405	762,08	1821,62	2583,70	763,21	2014,96	2778,16	2,1395	4,4461	6,5857

Fonte: VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNACKE (2008).

Anexo 2 – Tabela termodinâmica para vapor superaquecido

Vapor d'água superaquecido												
T	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
$P = 1000 \text{ kPa (179,91)}$				$P = 1200 \text{ kPa (187,99)}$				$P = 1400 \text{ kPa (195,07)}$				
Sat.	0,19444	2583,64	2778,08	6,5864	0,16333	2588,82	2784,82	6,5233	0,14084	2592,83	2790,00	6,4692
200	0,20596	2621,90	2827,86	6,6939	0,16930	2612,74	2815,90	6,5898	0,14302	2603,09	2803,32	6,4975
250	0,23268	2709,91	2942,59	6,9246	0,19235	2704,20	2935,01	6,8293	0,16350	2698,32	2927,22	6,7467
300	0,25794	2793,21	3051,15	7,1228	0,21382	2789,22	3045,80	7,0316	0,18228	2785,16	3040,35	6,9533
350	0,28247	2875,18	3157,65	7,3010	0,23452	2872,16	3153,59	7,2120	0,20026	2869,12	3149,49	7,1359
400	0,30659	2957,29	3263,88	7,4650	0,25480	2954,90	3260,66	7,3773	0,21780	2952,50	3257,42	7,3025
500	0,35411	3124,34	3478,44	7,7621	0,29463	3122,72	3476,28	7,6758	0,25215	3121,10	3474,11	7,6026
600	0,40109	3296,76	3697,85	8,0289	0,33393	3295,60	3696,32	7,9434	0,28596	3294,44	3694,78	7,8710
700	0,44779	3475,35	3923,14	8,2731	0,37294	3474,48	3922,01	8,1881	0,31947	3473,61	3920,87	8,1160
800	0,49432	3660,46	4154,78	8,4996	0,41177	3659,77	4153,90	8,4149	0,3528	3659,09	4153,03	8,3431
900	0,54075	3852,19	4392,94	8,7118	0,45051	3851,62	4392,23	8,6272	0,38606	3851,05	4391,53	8,5555
1000	0,58712	4050,49	4637,60	8,9119	0,48919	4049,98	4637,00	8,8274	0,41924	4049,47	4636,41	8,7558
1100	0,63345	4255,09	4888,55	9,1016	0,52783	4254,61	4888,02	9,0171	0,45239	4254,14	4887,49	8,9456
1200	0,67977	4465,58	5145,36	9,2821	0,56646	4465,12	5144,87	9,1977	0,48552	4464,65	5144,38	9,1262
1300	0,72608	4681,33	5407,41	9,4542	0,60507	4680,86	5406,95	9,3698	0,51864	4680,39	5406,49	9,2983
$P = 1600 \text{ kPa (201,40)}$				$P = 1800 \text{ kPa (207,15)}$				$P = 2000 \text{ kPa (212,42)}$				
Sat.	0,12380	2595,95	2794,02	6,4217	0,11042	2598,38	2797,13	6,3793	0,09963	2600,26	2799,51	6,3408
250	0,14184	2692,26	2919,20	6,6732	0,12497	2686,02	2910,96	6,6066	0,11144	2679,58	2902,46	6,5452
300	0,15862	2781,03	3034,83	6,8844	0,14021	2776,83	3029,21	6,8226	0,12547	2772,56	3023,50	6,7663
350	0,17456	2866,05	3145,35	7,0693	0,15457	2862,95	3141,18	7,0099	0,13857	2859,81	3136,96	6,9562
400	0,19005	2950,09	3254,17	7,2373	0,16847	2947,66	3250,90	7,1793	0,15120	2945,21	3247,60	7,1270
450	-	-	-	-	-	-	-	-	0,16353	3030,41	3357,48	7,2844
500	0,22029	3119,47	3471,93	7,5389	0,19550	3117,84	3469,75	7,4824	0,17568	3116,20	3467,55	7,4316
600	0,24998	3293,27	3693,23	7,8080	0,22199	3292,10	3691,69	7,7523	0,19960	3290,93	3690,14	7,7023
700	0,27937	3472,74	3919,73	8,0535	0,24818	3471,87	3918,59	7,9983	0,22323	3470,99	3917,45	7,9487
800	0,30859	3658,40	4152,15	8,2808	0,27420	3657,71	4151,27	8,2258	0,24668	3657,03	4150,40	8,1766
900	0,33772	3850,47	4390,82	8,4934	0,30012	3849,90	4390,11	8,4386	0,27004	3849,33	4389,40	8,3895
1000	0,36678	4048,96	4635,81	8,6938	0,32598	4048,45	4635,21	8,6390	0,29333	4047,94	4634,61	8,5900
1100	0,39581	4253,66	4886,95	8,8837	0,35180	4253,18	4886,42	8,8290	0,31659	4252,71	4885,89	8,7800
1200	0,42482	4464,18	5143,89	9,0642	0,37761	4463,71	5143,40	9,0096	0,33984	4463,25	5142,92	8,9606
1300	0,45382	4679,92	5406,02	9,2364	0,40340	4679,44	5405,56	9,1817	0,36306	4678,97	5405,10	9,1328
$P = 2500 \text{ kPa (223,99)}$				$P = 3000 \text{ kPa (233,90)}$				$P = 4000 \text{ kPa (250,40)}$				
Sat.	0,07998	2603,13	2803,07	6,2574	0,06668	2604,10	2804,14	6,1869	0,04978	2602,27	2801,38	6,0700
250	0,08700	2662,55	2880,06	6,4084	0,07058	2644,00	2855,75	6,2871	-	-	-	-
300	0,09890	2761,56	3008,81	6,6437	0,08114	2750,05	2993,48	6,5389	0,05884	2725,33	2960,68	6,3614
350	0,10976	2851,84	3126,24	6,8402	0,09053	2843,66	3115,25	6,7427	0,06645	2826,65	3092,43	6,5820
400	0,12010	2939,03	3239,28	7,0147	0,09936	2932,75	3230,82	6,9211	0,07341	2919,88	3213,51	6,7689
450	0,13014	3025,43	3350,77	7,1745	0,10787	3020,38	3344,00	7,0833	0,08003	3010,13	3330,23	6,9362
500	0,13998	3112,08	3462,04	7,3233	0,11619	3107,92	3456,48	7,2337	0,08643	3099,49	3445,21	7,0900
600	0,15930	3287,99	3686,25	7,5960	0,13243	3285,03	3682,34	7,5084	0,09885	3279,06	3674,44	7,3688
700	0,17832	3468,80	3914,59	7,8435	0,14838	3466,59	3911,72	7,7571	0,11095	3462,15	3905,94	7,6198
800	0,19716	3655,30	4148,20	8,0720	0,16414	3653,58	4146,00	7,9862	0,12287	3650,11	4141,59	7,8502
900	0,21590	3847,89	4387,64	8,2853	0,17980	3846,46	4385,87	8,1999	0,13469	3843,59	4382,34	8,0647
1000	0,23458	4046,67	4633,12	8,4860	0,19541	4045,40	4631,63	8,4009	0,14645	4042,87	4628,65	8,2661
1100	0,25322	4251,52	4884,57	8,6761	0,21098	4250,33	4883,26	8,5911	0,15817	4247,96	4880,63	8,4566
1200	0,27185	4462,08	5141,70	8,8569	0,22652	4460,92	5140,49	8,7719	0,16987	4458,60	5138,07	8,6376
1300	0,29046	4677,80	5403,95	9,0291	0,24206	4676,63	5402,81	8,9442	0,18156	4674,29	5400,52	8,8099

Fonte: VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNACKE (2008).