

Study the energy efficiency of a fire-tube boiler in a dairy industry

Estudo da eficiência energética de uma caldeira flamotubular em uma indústria de laticínios

Article Info:

Article history: Received 2022-01-20 / Accepted 2022-03-01 / Available online 2022-03-15

doi: 10.18540/jcecv18iss2pp14015-01e

Marlons Lino da Cruz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2641-2567>

Federal University of Viçosa, Brazil

E-mail: marlons.cruz@ufv.br

Antônio Marcos de Oliveira Siqueira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7088-3211>

Federal University of Viçosa, Brazil

E-mail: antonio.siqueira@ufv.br

Júlio Cesar Costa Campos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9488-8164>

Federal University of Viçosa, Brazil

E-mail: julio.campos@ufv.br

Charles Luiz da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1558-0485>

Federal University of Viçosa, Brazil

E-mail: charles.silva@ufv.br

Resumo

Neste estudo foi realizada uma análise da caldeira flamotubular horizontal, com ante fornalha e grelha aquatubular, de categoria B, movida a combustível sólido (toras de madeira). Essa caldeira possui capacidade de produção de 2500 kgV/hora, Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA) de 833,56 kPa e Pressão de teste Hidrostático (PTH) de 1.250,34 kPa e está instalada em uma fábrica de laticínios situada na cidade de São Geraldo – MG. Esse trabalho teve como objetivo principal estudo da eficiência térmica, levando em consideração os métodos diretos e indiretos, de propostas de melhoria dessa eficiência e uma apresentação dos procedimentos de operação e manutenção desse equipamento. No decorrer do trabalho foram investigados e analisados os dados técnicos desse equipamento, do combustível, além dos impactos ambientais causados pela queima desse combustível e de parâmetros que interferem na eficiência térmica da caldeira. Foi encontrado um rendimento térmico de 74,65%, com uma perda de 25,35%, referentes a 11,18% dos gases secos de combustão, 5,50% dos gases úmidos de combustão, 4,30 da umidade do combustível, 4,00% por radiação de convecção, 0,25% pela umidade do ar de alimentação, 0,08% pela queima incompleta do combustível e 0,04% pelas cinzas não queimadas.

Palavras-chave: Caldeira flamotubular. Método das perdas. Eficiência. Modelagem matemática.

Abstract

The present work presents the analysis of the horizontal flamotubular boiler, with furnace and aquatubular grid, B category, powered by solid fuel (wood logs). This boiler has a production capacity of 2500 kgV / hour, Maximum Allowable Working Pressure (PMTA) of 833.56 kPa and Hydrostatic Test Pressure (PTH) of 1,250.34 kPa and is installed in a dairy factory located in the city of São Geraldo – MG. This work its main objective is the study of thermal efficiency, taking into account the direct and indirect methods, proposals to improve this efficiency and a presentation of the operation and maintenance procedures for this equipment. During the work, technical data of

this equipment, the fuel, and the environmental impacts caused by the burning of this fuel were noted and analyzed, and parameters that interfere with the thermal efficiency of the boiler were studied. A thermal efficiency of 74.65% was found, with a loss of 25.35%, referring to 11.18% of the dry combustion gases, 5.50% of the humid combustion gases, 4.30 of the fuel moisture, 4.00% by convection radiation, 0.25% by feed air humidity, 0.08% by incomplete combustion of fuel and 0.04% by unburned ash.

Keywords: Flamotubular boiler. Loss method. Efficiency. Mathematical modeling.

1. Introdução

O crescente desenvolvimento tecnológico se dá através das crescentes necessidades humanas por saúde, alimentação, segurança, participação de grupos sociais, educação, crescimento pessoal, profissional, lazer, dentre outros, o que impulsiona o mercado a aumentar a oferta de produtos e serviços que atendam a essa demanda. Os consumidores, cada vez mais exigentes, estão à procura desses produtos e serviços com baixo custo, alta qualidade, com entrega no mínimo prazo possível, com serviços de assistência técnica de qualidade e rapidez e que sejam atendidos da melhor forma possível. Em resposta a essas necessidades e exigências, com o objetivo de superar as expectativas dos consumidores, as empresas se especializam cada vez mais, o que faz com que haja uma quantidade dessas empresas, o que contribui para a alta concorrência do mercado.

Para atender a essas novas demandas, as fábricas também precisam se adaptar a esse novo cenário socioeconômico, aumentando a produção, conseqüentemente, aumentando a poluição ambiental. Houve então uma preocupação com a preservação do meio ambiente através da diminuição dos impactos ambientais negativos e aumento dos positivos, criando leis e normas que controlam as fábricas nesse sentido ambiental. As principais leis são a Lei da Política Nacional do Meio Ambiente – nº 6.938 de 17/01/1981, a Lei dos Crimes Ambientais – nº 9.605 de 12/02/1998, a Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos – nº 12.365 de 02/08/2010, a Lei de Recursos Hídricos – nº 9.433 de 08/01/1997, a Lei dos Agrotóxicos – nº 7.802 de 11 de julho de 1989, a Lei 11.445/2007 – Política Nacional de Saneamento Básico, e o Novo Código Florestal Brasileiro – nº 12.651 de 25/05/2012.

Um das propostas dessas leis e normas é a substituição das fontes de energia não renováveis, como o petróleo, carvão mineral, gás natural e a energia nuclear pelas renováveis, como a eólica, solar, hidrelétrica e a biomassa, que é composta por matéria orgânica, advindas de plantas e animais. Esta é uma ótima alternativa para as fábricas, utilizada como combustíveis em caldeiras industriais, para alimentar máquinas térmicas, como motores a combustão, locomotiva a vapor e turbina a vapor, autoclaves para esterilização de materiais, cozimento de alimentos e outras situações. A utilização da biomassa pelas fábricas faz com que se obtenha menor poluição e diminuição de impactos ambientais negativos, respeitando o meio ambiente e as normas e leis inerentes a ela. Também há diminuição dos custos de produção, diminuindo conseqüentemente custos finais de produtos, aumento da eficiência energética e aumento da competitividade mercadológica, à medida que se aumente a eficiência térmica das caldeiras. Essa eficiência depende de vários fatores como excesso de consumo de combustível, excesso ou falta de purgas, poder calorífico do combustível e isolamento térmico da caldeira, por exemplo.

Dentro desta ótica, o objetivo desse trabalho é o estudo da eficiência térmica e a proposição de possíveis melhorias ao funcionamento da caldeira flamotubular responsável pelo fornecimento do vapor necessário ao processo de produção de laticínios da empresa localizada na região da Zona da Mata Mineira.

2. Matriz Energética Brasileira

Pode-se comparar os combustíveis industriais carvão, óleo combustível e gás natural através das características, segundo Capehart et al. (2012), como o preço da matéria-prima, disponibilidade independentemente do tipo de clima e política internacional climática, complexidade do

equipamento no local para queimar o combustível, o armazenamento e transporte do combustível, emissões causadas pela combustão, sucessos anteriores dessa tecnologia para caldeiras utilizando o combustível em análise. Após essa análise, a empresa pode optar por qual combustível utilizar. Segundo Madejski e Zymelka (2020) nos últimos anos foram observadas a necessidade de utilizar diferentes combustíveis sólidos e até mesmo da mistura de diferentes combustíveis. Mas para os vários combustíveis que existem, há uma série de fontes de energia, na qual às diversas formas de produção de energia dá-se o nome de matriz energética, ou seja, é o conjunto de todas as fontes de energia que cada país tem. Alguns a principal fonte é hidráulica, outros é a derivada de petróleo e assim por diante, de acordo com a tecnologias e condições ambientais, financeiras e tecnológicas que possuem.

As tecnologias avançam em ritmo acelerado para o aumento da utilização de fontes renováveis, consideradas limpas e a substituição das não renováveis pelas renováveis. Com isso, houve o aperfeiçoamento e desenvolvimento de novas fontes de energia, que atualmente pode-se citar o petróleo, gás natural, energia elétrica, carvão mineral, energia eólica, biodiesel e produtos da cana. A Empresa de Pesquisa Energética através do Balanço Energético Nacional (2021) – BEN -, referente ao ano de 2020 traz algumas informações sobre essas fontes. Esse documento mostra que a capacidade instalada de energia elétrica total no Brasil saltou de 170.118 MW em 2019 para 174.737 MW, em 2020, o que representa um aumento de 2,64% no mesmo período. O uso do biodiesel passou de 5.923.868 m³ em 2018 para 6.432.0089 m³ em 2019, representando um aumento de 8,6%. O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) aponta um aumento de 2,3% na produção de cana-de-açúcar no mesmo período, de 639 milhões de toneladas em 2019 para 662,1 milhões de toneladas em 2020. A energia eólica saltou de 55.986 GWh em 2019 para 57.051 GWh em 2020, o que representa um aumento de 1,9%. A produção de petróleo cresceu 5,7%, alcançando a média de 2,94 milhões de barris diários. Já o carvão metalúrgico diminuiu em 8,1% sua produção.

Além da capacidade instalada de energia elétrica total no Brasil, O BEN 2021 traz informações sobre a produção e o consumo energético brasileiro, no mesmo período de 2019 a 2020 que foi de 65,2% hidráulica, 9,10% biomassa, 8,8% eólica, 8,3% gás natural, 3,1% carvão e derivados, 2,2% nuclear, 1,66% solar e 1,6% derivados de petróleo, como mostra a Figura 1.

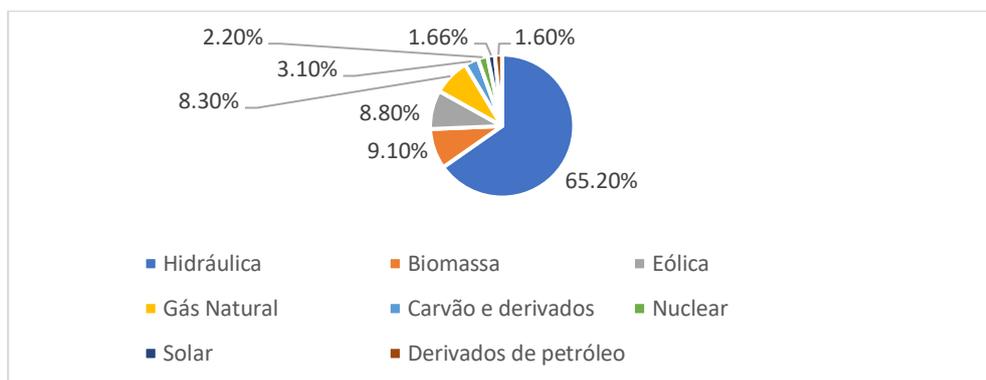


Figura 1 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.

Percebe-se que no território brasileiro predomina o uso principal de energia hidráulica e em menor uso a solar, mas esse panorama está em transformação devido a conscientização ambiental, portanto a redução do uso das fontes nucleares, derivados de petróleo e carvão e ao incentivo às fontes solares, gás natural, eólica e a biomassa.

3. Biomassa

A biomassa é derivada de materiais de origem animal, vegetal, industrial e florestal, tendo como um dos principais combustíveis a cana-de-açúcar. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (2020) – ANEEL -, biomassa é qualquer recurso renovável proveniente de matéria orgânica, seja de origem animal ou vegetal, para geração de energia que seja de fácil obtenção e reposição, diminuindo os impactos ambientais negativos. Outra definição de biomassa é trazida por Cereijo (2014), como sendo a biomassa composta por materiais orgânicos, ou seja, polímeros orgânicos, gorduras e proteínas com pequenas quantidades de materiais inorgânicos, como sódio, fósforo, cálcio, ferro, etc. Rabaçal (2010) complementa o conceito de biomassa afirmando que esta tem algumas características como elevado teor de humidade, baixa densidade, baixas temperaturas de fusão das cinzas e elevado teor em voláteis. Esse autor aponta que a composição da biomassa consiste em celulose, hemicelulose, lenhina, lipídios, proteínas, açúcares simples, amido, água, hidrocarbonetos, cinzas e outros compostos e que os principais componentes dela são o carbono, hidrogênio e oxigênio, podendo ser caracterizada de acordo com a granulometria, em homogênea (*pellets*) ou heterogênea (casca de árvore não tratada).

O processo de combustão da biomassa envolve tanto processos físicos quanto químicos, altamente complexos, sendo caracterizadas por Rabaçal (2010), em ignição, secagem, pirólise e combustão do resíduo carbonoso. Na primeira fase, ignição, um fluxo mínimo de energia é gerado de uma fonte externa que pode ser uma chama piloto ou ar aquecido por uma resistência elétrica que é exposta a transferência de calor por convecção e, ao atingir uma temperatura elevada, misturando-se com o ar, inicia a ignição. Na fase de secagem e volatilização são necessárias temperaturas entre 323 K e 423 K para que então a pirólise, que é a degradação térmica na ausência de um agente oxidante externo, ocorra. Por último, a fase de combustão do resíduo carbonoso, que é um resíduo resultante de volatilização que possui carbono e cinzas além de pequenas quantidades de hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre.

4. Emissões

Schirmer e Rudniak (2009) afirmam que as emissões de poluentes por parte das indústrias são materiais particulados, composta de poeira, neblina, aerossóis, fumaça, fuligem e quaisquer outros materiais suspensos no ar, compostos sulfurosos, ou seja, quem contém enxofre em sua composição, como dióxido de enxofre (SO_2), trióxido de enxofre (SO_3), sulfatos (SO_4^{2-}), sulfeto de hidrogênio (H_2S), compostos hidrogenados, como monóxido de nitrogênio (NO), o dióxido de nitrogênio (NO_2) e o óxido nitroso (N_2O), além do dióxido de carbono CO , o dióxido de carbono CO_2 e compostos orgânicos voláteis (COV) representados pela maioria dos solventes, lubrificantes e combustíveis em geral.

5. Caldeiras

A Norma Regulamentadora 13 (NR13, 1978) define caldeiras como sendo equipamentos que produzem e acumulam vapor com pressão acima da atmosférica, conceito complementado por Rocco (2011) afirmando que caldeiras industriais queimam combustíveis e geram energia térmica, elevando a temperatura da água e transformando-a em vapor, conforme Figura 2. Esse vapor, quando produzido por caldeiras, podem ser utilizados para secagem, cozimento, lavagem de utensílios, geração de energia, aquecimento ambiental, desinfecção, pasteurização dentre outras aplicações, como afirma Bello (2018). Além disso, existem vários tipos de caldeiras e, por isso, possuem classificações quanto a classe de pressão, ao grau de automação, de acordo com a energia utilizada para o aquecimento, com a mobilidade, com a posição do costado e com a troca térmica.

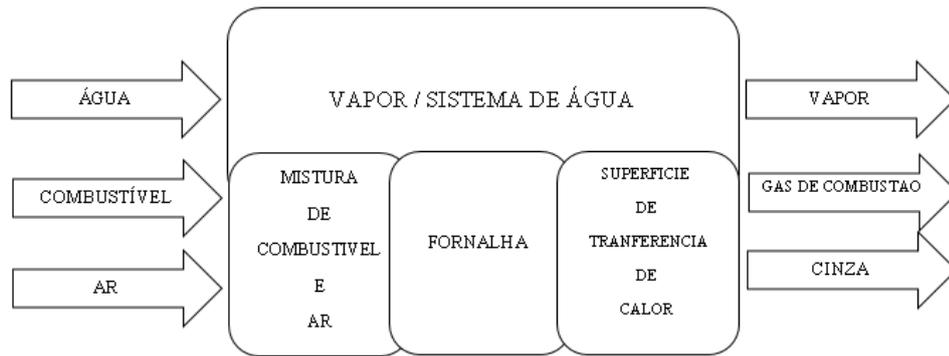


Figura 2 – Diagrama básico de uma caldeira.

5.1 Classificações de Caldeiras

A Escola Nacional da Inspeção do Trabalho (ENIT) através da NR 13 (2020) classifica as caldeiras em duas categorias, quanto às classes de pressão, em categorias A e B. A categoria A possui pressão de operação igual ou superior a 1.960 kN/m^2 , com volume superior a $0,1 \text{ m}^3$ e a categoria B possui pressão de operação acima de 60 kN/m^2 e inferior a 1.960 kN/m^2 , volume interno superior a $0,1 \text{ m}^3$, conforme Figura 3.



Figura 3 - Classificação das caldeiras

Moreira (2007) classifica as caldeiras quanto ao grau de automatização como manuais, semiautomáticas e automáticas, como mostra a Figura 3. Moreira (2007) também classifica as caldeiras de acordo com a energia utilizada para o aquecimento, que pode ser por combustíveis líquidos (óleo BPF, óleo xisto, diesel e gorduras), sólidos (lenha em tora, cavaco, carvão, bagaço de cana, cascas e caroços, por exemplo) e gasosos (gás natural e gás liquefeito de petróleo (GLP)), elétricas (eletrodos submersos a resistores), de recuperação (uso de gases com altas temperaturas de outros processos exotérmicos), nucleares (urânio) e solares. O mesmo autor classifica as caldeiras de acordo com a mobilidade que podem ser estacionárias ou móveis (navais, rodoviárias ou

ferroviárias), quanto à posição do costado, ou corpo, que podem ser horizontais ou verticais, e quanto a troca térmica como flamotubulares, aquatubulares, mistas e elétricas, ambos mostrados na Figura 3.

5.1.1 Caldeiras Flamotubulares

Baggio (2018) define caldeiras flamotubulares (tubo de fogo ou piro-tubular) como de construção simples, produz gases quentes na sua combustão, é utilizada para pequenas produções de vapor (em torno de 10 toneladas por hora) e pressões baixas (até 1.000 kPa). Moreira (2007) aponta algumas vantagens como baixo custo de aquisição; pouca alvenaria necessária para sua construção; pré-fabricada; de fácil operação; atende bem ao aumento instantâneo de demanda de vapor; não necessita de tratamento de água muito apurado; fácil limpeza da fuligem; fácil substituição de tubos e desvantagens das caldeiras flamotubulares como baixo rendimento térmico; partida lenta; pressão de operação de até 1.961,33 kPa; baixa taxa de vaporização; capacidade de produção limitada; necessita de muito espaço; circulação de água deficiente; dificuldades na instalação de economizador, superaquecedor e pré-aquecedor; grande peso.

6. Descrição Do Sistema De Geração De Vapor

A empresa Laticínios, em estudo, aqui denominada Empresa X, localiza-se na cidade de São Geraldo – MG, a 33,8 km de Ubá e a 30 km de Viçosa/MG. A empresa produz queijo minas frescal, requeijão, ricota, manteiga e mussarela. A caldeira utilizada nesse Laticínio é do tipo flamotubular horizontal, com ante fornalha e grelha aquatubular, de categoria B, movida a diesel originalmente, mas adaptada a combustível sólido (toras de madeira).

O local destinado às caldeiras é denominado casa de caldeiras, que é um local que precisa ser limpo, organizado e arejado, de acesso restrito ao operador, onde não se pode estocar nenhum tipo de material a não ser os materiais utilizados para o processo de combustão da caldeira. A Figura 4 mostra a casa da caldeira da fábrica de laticínios em estudo.



Figura 4 - Casa da caldeira da empresa X

Essa caldeira foi produzida pela Fábrica de Caldeiras Santa Luzia Ltda, situada na cidade de Juiz de Fora, MG em 2002, possui capacidade de produção de 2.500 kgV/hora do tipo SIM/22, modelo HFWB, número de série 1874. Possui Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA) de 833,56 kPa e Pressão de teste Hidrostático (PTH) de 1.250,34 kPa e superfície de aquecimento de 116 m², sendo 77 m² de caldeira e 39 m² de ante fornalha e capacidade de 2500 kgV/hora. Esse equipamento usava como combustível óleo diesel, mas foi adaptada para biomassa.

A Tabela 1 apresenta um resumo das características da caldeira em estudo: tipo, modelo, ano de fabricação, produção de vapor, PMTA, PMT, classificação segundo a NR 13, código de construção, tipo de vapor, número de passes, área de superfície de aquecimento, material do costado, material dos espelhos, câmara de combustão, tipo de fornalha e o combustível.

Tabela 1 – Características da caldeira em estudo.

Marca / Fabricante	Empresa X
Produto	Caldeira Industrial
Tipo	SIM/22
Modelo	HFWB
Ano de Fabricação	2002
Produção de Vapor	2.500 kgV/hora
Pressão Máxima de Trabalho Admissível – PMTA	833,56 kPa
Pressão de Teste Hidrostático – PMT	1.250,34 kPa
Classificação NR13	Categoria B
Código de Construção	ASME
Tipo de Vapor	Saturado
Número de Passes	4
Área de Superfície de Aquecimento	116 m ²
Material do Costado	ASTM A-367
Material dos Espelhos	ASTM A-367
Câmara de Combustão	Ante fornalha
Tipo de Fornalha	Aquatubular
Combustível	Lenha de eucalipto – sólido

A Tabela 2 apresenta as características do combustível, como poder calorífico superior, densidade, temperatura, umidade, percentual de carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio, cinzas e de carbono fixo e material volátil. Algumas informações implícitas utilizadas na simulação serão apresentadas a seguir. O valor do PCI foi estimado por meio de correlação (= 3.035 kJ/kg).

Tabela 2 – Características do combustível.

PARÂMETRO	VALOR [UNIDADE]
Poder calorífico superior	4595 [kcal/kg]
Densidade*	507 [kg/m ³]
Temperatura	298° [K]
Umidade	30 [%]
Carbono	50,2 [%]
Oxigênio	43,4 [%]
Hidrogênio	6,1 [%]
Nitrogênio	0,2 [%]
Cinzas	0,2 [%]
Carbono Fixo**	17,27 [%]
Material Volátil**	83,24 [%]

Já a Tabela 3 apresenta os parâmetros de operação da instalação, apontando as pressões externas e internas da caldeira, temperaturas da água de alimentação, da saída do condensado, do condensado, de referência e da pressão de referência.

Tabela 3 – Parâmetros de operação da instalação.

PARÂMETRO	VALOR [UNIDADE]
Pressão externa da caldeira	101,33 [kPa]
Pressão interna da caldeira	735,50 [kPa]
Temperatura da água de alimentação	333,8 [K]
Temperatura da saída do vapor	503 [K]
Temperatura do condensado	442,9 [K]
Temperatura de referência	298 [K]
Pressão de referência	101,33 [kPa]

7. Resultados e Discussões

7.1 Operação Da Caldeira Em Estudo

A operação da caldeira foi objeto de investigação, através de visitas de campos realizadas junto a Empresa X ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Foram realizadas oito visitas, com acompanhamento do operador técnico da mesma. As principais observações estão registradas e apresentadas adiante.

Quando a pressão interna do equipamento alcançar 735,5 kPa, todos os processos e equipamentos que necessitam de vapor produzido pela caldeira estão preparados para funcionarem, são eles:

- Limpeza dos reservatórios de água que é utilizada para limpeza dos caminhões que transportam leite: os caminhões chegam à fábrica de laticínios, descarrega o leite e em seguida utilizam a água desses reservatórios para higienização do tanque do caminhão, para em seguida, deixar a fábrica;
- Processo de pasteurização do leite a 343 K: o processo de pasteurização do leite consiste no aumento da temperatura deste até aproximadamente 348 K, não muito a mais do que isso, senão ocorre a desnaturação do leite. E logo em seguida, diminui-se a temperatura, o que faz com que haja eliminação dos microorganismos presentes;
 - Produção de salmoura (água saturada de sal), com temperaturas superiores a 363 K;
 - Filamento de mussarela a 345 K: Ao acrescentar fermento ao leite para dar as características finais da mussarela e repousar essa massa por algum tempo, faz com que essa massa atinja uma consistência elástica, formando esses filamentos;
 - Produção de ricota a 363 K;
 - Trituração da massa de requeijão a 363 K;
 - Limpeza de fôrmas de queijo: Essas fôrmas de queijo são recipientes que dão a forma arredondada do queijo.
 - Limpeza de caixas que armazenam queijo pronto a 343 K. Essas caixas são utilizadas para armazenar os queijos prontos e transportá-los até a câmara fria onde irão aguardar o transporte até o cliente;
 - O sistema de descarga de vapor é realizado automaticamente através de quatro válvulas com periodicidade de uma hora, mas caso seja necessário, o operador pode efetuar descarga manual. Essas válvulas estão numeradas de 1 a 4, sendo que a de número 3 é utilizada como descarga de fundo, que é responsável pela retirada de toda sujeira e os restos de materiais químicos produzidos pela caldeira no corpo dela. Cardoso (2018) complementa afirmando que também serve para retirar as impurezas presentes na superfície da água.
 - O sistema de injeção de água é composto por duas bombas, a primeira é a principal e funciona de forma automática, já a segunda é uma bomba de reserva utilizada em casos de emergência, quando a bomba principal não funcionar devido a algum defeito, por exemplo. Esse sistema é responsável por injetar água dentro do corpo da caldeira, que se torna vapor que é canalizado para as linhas de produção. Essa água é bombeada de um poço e tratada através do

SMART DP-16 e SMART SS-15 e é misturada dentro de um reservatório, com o condensado que vem da produção através das linhas que auxilia no aumento da temperatura da água para que esta entre na caldeira com uma temperatura um pouco mais alta para aumentar a eficiência térmica do equipamento.

O controle de pressão máxima de trabalho é feito através de duas válvulas de segurança, uma que é acionada quando a pressão de operação da caldeira atingir 764,92 kPa e a outra quando atingir 784,53 kPa, ambas automaticamente. Se houver alguma falha na primeira válvula, a segunda é acionada, oferecendo uma maior garantia de que a pressão interna do equipamento não exceda limite ao qual ela foi projetada, e nem que haja algum acidente, causando explosão. Os dados coletados neste trabalho mostram que o consumo médio diário de madeira é sazonal, podendo ser estimado em 5,5 m³.

7.2 Eficiência Térmica

A eficiência térmica das caldeiras depende do tipo de combustível, sistema de combustão, design de construção do equipamento e sistema operacional de controle de vapor, de acordo com Conselho dos Proprietários de Caldeiras Industriais dos Estados Unidos (*Council of industrial Boiler Owners*) (2021).

O cálculo da eficiência de qualquer processo é a relação do que foi gasto, utilizado, ou seja, todos os recursos investidos, considerados como entrada ou *input*, com os produtos obtidos, ou seja, os resultados, as saídas ou *outputs*, segundo PTC (2009). Diversos autores indicam que as perdas de energia em percentual que uma caldeira pode apresentar são de 0,5% a 2% por radiação, 1 a 2% por descarga de fundo, 10 a 30% por gases exauridos pela combustão, ou seja, de 65 a 80% do calor inserido no equipamento é aproveitado no processo produtivo, conforme Figura 5.

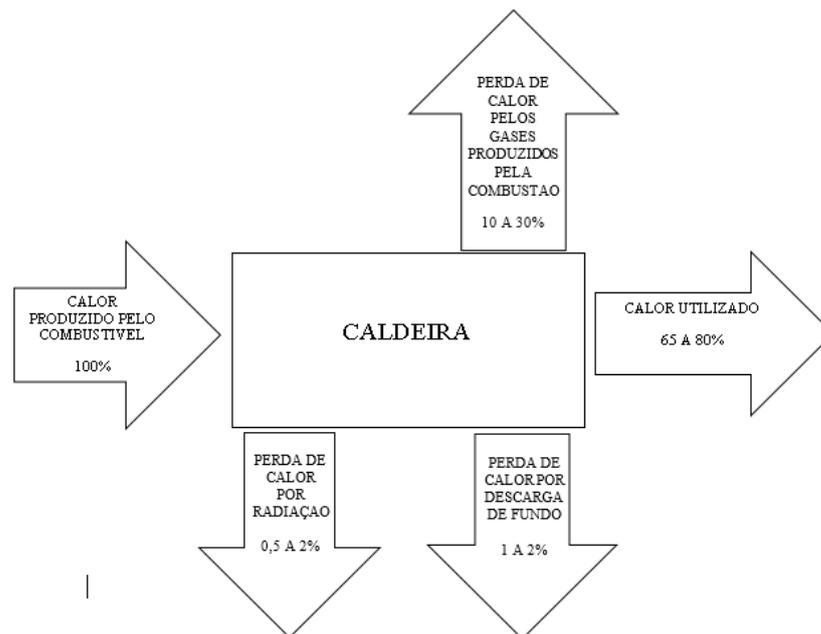


Figura 5 – Balanço de Energia de uma Caldeira.

Os gases produzidos pela combustão possuem temperatura de 463 K, teor de gás oxigênio (O₂) de 14,33%, teor de gás dióxido de carbono (CO₂) de 5,87% e teor de gás monóxido de carbono (CO) de 0,01%, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Características dos gases resultantes da combustão.

PARÂMETRO	VALOR [UNIDADE]
Temperatura dos gases de combustão na base da chaminé	463 K
Teor de gás oxigênio (O ₂)	14,33%
Teor de gás dióxido de carbono (CO ₂)	5,87%
Teor de gás monóxido de carbono (CO)	0,01%

Considera-se também para a análise do desempenho térmico da caldeira em estudo depende do rendimento energético desse equipamento que pode ser calculado através de dois métodos, o método direto e método indireto (Zhang et al., 2013).

Conforme esclarece Senger (2015), no método indireto são consideradas todas as perdas existentes no processo de combustão de uma caldeira e através desse método é realizado o acompanhamento da eficiência energética a) Perdas associadas por cinzas; b) Perdas por convecção e radiação; c) Perdas por vazamentos e purgas e d) Perdas por combustão incompleta (Centrais Elétricas Brasileiras, 2005). Esse método é o mais convencional, pois trata de forma mais sucinta das perdas relacionadas ao processo de combustão e mostra os pontos a serem melhorados para a busca do melhor desempenho de operação do equipamento (Senger, 2015). Esse método é um método mais confiável do que o método direto por serem as perdas de calor menos variáveis. As perdas por chaminés associadas aos gases secos produzidos pela combustão, estão representadas por:

$$P_{GS} = (m_{CO_2} c_{pCO_2} + m_{SO_2} c_{pSO_2} + m_{O_2} c_{pO_2} + m_{N_2} c_{pN_2}) \cdot (T_{CH} - T_R) \quad (\text{Eq. 01})$$

onde:

m_i = massa do componente i formado na combustão, em kg/kg de combustível;

c_{pi} = calor específico médio entre as temperaturas T_{CH} e T_{Ref} , em kJ/kg.°C;

T_{CH} = temperatura dos gases na chaminé, em °C;

T_R = temperatura de referência adotada, em °C;

Já as perdas por chaminés associadas ao vapor presente na chaminé, são representadas por:

$$P_v = m_p * c_{pv} (T_{CH} - T_R) + m'_v * h_{lv} \quad (\text{Eq. 02})$$

onde:

m_p = vazão mássica total de vapor em kg/kg de combustível;

c_{pv} = calor específico médio do vapor entre T_{CH} e T_{Ref} em kJ/kg °C;

m'_v = vazão mássica de vapor formado na combustão e presente no combustível em kg/kg de combustível;

h_{lv} = entalpia de vaporização da água na entalpia de referência em kJ/kg;

As perdas por radiação e convecção são normalmente complexas devido às diversas medições para serem obtidas, entretanto, adota-se para efeito de cálculo, entre 1% e 4% da energia fornecida.

As purgas são necessárias para garantir que a concentração de sais na água esteja em níveis toleráveis, e suas perdas são inevitáveis, podendo ser calculada através de:

$$P_p = m_p * c_{pa} (T_p - T_R) \quad (\text{Eq. 03})$$

onde:

m_p = vazão média de água purgada em kg/kg de combustível;

c_{p_a} = calor específico da água no estado líquido, em kJ/kg °C;

T_p = temperatura de saturação da água na pressão da caldeira, em °C;

Após a queima dos combustíveis sólidos, as cinzas que saem do equipamento são sinais de que há perdas que devem também ser calculadas através da Equação:

$$P_{TC} = m_R * 1170 \quad (\text{Eq. 04})$$

onde:

m_R = massa de cinza obtida pela massa de combustível em kg/kg de combustível;

1170 = valor médio aproximado da entalpia sensível das cinzas;

Existem também as perdas de calor contido nas cinzas, que estão associados ao combustível não queimado, podendo ser calculado através da Equação:

$$P_{CC} = m_C * 33780 \quad (\text{Eq. 05})$$

onde:

m_C = massa do carbono presente nas cinzas, em kg/kg de combustível

33780 = fator de correção

Portanto, pode-se considerar como perdas totais, pelo método indireto, o somatório de todas as perdas citadas anteriormente, ou expressa pela Equações:

$$n_{MI} = 1 - \frac{\sum \text{Perdas}}{q_f} \quad (\text{Eq. 06})$$

$$n_{MI} = 1 - \left[K + \frac{\lambda \left(\frac{a}{c} + 1 \right) c_p * (T_{CH} - T_{Ref}) p}{PC} \right] \quad (\text{Eq. 07})$$

onde:

K = somatória de todas as perdas citadas anteriormente;

λ = coeficiente de excesso de ar na combustão, relacionando o ar real que foi fornecido como o ar teórico que o combustível requereu (entre 1,40 e 1,50);

PC = poder calorífico do combustível;

Para melhorar a eficiência térmica de uma caldeira são necessários alguns cuidados que estão relacionados, de acordo com Senger (2015) com a economia de combustível, redução das perdas de calor na caldeira, no percurso do fluido dentro do equipamento, dos cuidados relativos à manutenção e utilização da instrumentação de forma correta.

De acordo com Oyama (2017), para reduzir as perdas de calor gerado pelas caldeiras, pode-se utilizar o pré-aquecedor para aquecer o ar de entrada das caldeiras antes este ar entre no equipamento e se misture com o combustível, acelerando assim o processo de combustão. Outra forma para otimizar a eficiência térmica das caldeiras é a utilização dos gases gerados pela combustão entre no economizador, que segundo Santos (2021) é o local por onde passa a água que alimenta a caldeira, aumentando a temperatura dessa água, acelerando também o processo de combustão.

Senger (2015) acrescenta que além disso, deve-se tomar cuidado com a umidade do combustível sólido, que influencia diretamente na queima e na produção de calor, impactando diretamente na eficiência energética. Caso a umidade desse combustível for alta, o processo de

combustão é dificultado, diminuindo a eficiência energética, caso a umidade desse combustível for alta, o inverso acontece. Saidur et al. (2011) afirma que a densificação da biomassa também auxilia além do aumento da densidade da biomassa, contribui para melhorar a qualidade desse combustível e reduz custos de manuseio e transporte.

Nogueira et al. (2005) aponta outros cuidados para aumentar a eficiência energética das caldeiras como o projeto desse equipamento ter sido bem feito, eliminação de sujeiras nas superfícies de troca térmica, monitoramento da temperatura dos gases da chaminé e inspeção visual para verificação de incrustações, instalação de analisadores de gases da chaminé para que dados como a porcentagem de oxigênio, a temperatura do gás da chaminé e a eficiência da caldeira sejam obtidos. Além da instalação de economizador que é considerado um trocar de calor que eleva a temperatura da água antes que ela seja introduzida na caldeira, a recuperação de calor da descarga de fundo que elimina os sais minerais da água injetada na caldeira e o lodo.

Considerando o que ora foi apresentado, os resultados obtidos neste estudo podem ser sumarizados, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados obtidos através do cálculo de rendimento térmico pelo método indireto

PROPRIEDADE	VALOR [UNIDADE]
Massa de ar teórico	$m_{ar,teor} = 4,196$ [kg/kg de comb.]
Excesso de ar	$EA = 214,8$ [%]
Massa de ar real	$m_{ar,real} = 13,21$ [kg/kg de comb.]
Massa de gás seco de combustão	$m_{GS} = 13,54$ [kg/kg de comb.]
Perda pelos gases secos de combustão	$q_1 = 11,18$ [%]
Perda pelos gases úmidos de combustão	$q_2 = 5,50$ [%]
Perda pela umidade do combustível	$q_3 = 4,30$ [%]
Perda pela umidade do ar de alimentação	$q_4 = 0,25$ [%]
Perda pela queima incompleta do combustível	$q_5 = 0,08$ [%]
Perda pela radiação e convecção	$q_6 = 4,00$ [%]
Perda pelas cinzas não queimadas	$q_7 = 0,04$ [%]
Perdas totais	$q_{totais} = 11,18$ [%]
RENDIMENTO TÉRMICO	$n_{MI} = 74,65$ [%]

8. Conclusões

A preocupação com relação à conservação e manutenção do meio ambiente levou as empresas a reduzirem a utilização de combustíveis de fontes de energia não renovável pelas renováveis. Uma das alternativas é a biomassa, que cresceu 9,10% no último senso do BEN 2021. A Empresa X possui uma caldeira flamatubular que utiliza esse combustível nesse equipamento, que nas condições de operação descritas nesse trabalho, resultou em um rendimento térmico de 74,65%, ou seja, houve uma perda de 25,35%, referentes a 11,18% dos gases secos de combustão, 5,50% dos gases úmidos de combustão, 4,30 da umidade do combustível, 4,00% por radiação de convecção, 0,25% pela umidade do ar de alimentação, 0,08% pela queima incompleta do combustível e 0,04% pelas cinzas não queimadas. Para aumentar a eficiência térmica desse equipamento, sugere-se: a) não utilização de entulho como combustível, pois isso causa sujeira excessiva e acúmulo de materiais no fundo da caldeira, o que faz necessário manutenção corretiva para limpeza do fundo desse equipamento em intervalos de tempo muito curtos; b) corrigir grandes vazamentos vapor entre a fornalha e o corpo da caldeira; c) corrigir vazamentos de vapor na sala de visita; d) melhorar isolamento das madeiras em depósito, construindo uma parede para evitar contato direto entre as madeiras e o ar externo; e) troca dos visores dos manômetros da caldeira para melhor visualização e aferição das medições; f) abertura da saída de vapor para as linhas de produção somente quando a caldeira atingir a pressão de trabalho necessária à sua utilização. g) utilização de medição da

composição dos produtos da combustão para análise da emissão e posterior redução de poluentes na atmosfera; h) aferição regular da umidade da madeira para posterior análise dos impactos dessa umidade da eficiência térmica da caldeira.

Referências

- Agência Nacional de Energia Elétrica. (2020). Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 19/03/2021.
- B.L. Capehart, W.C. Turner, and W.J. Kennedy (2016). Guide to Energy Management, 8th Edition, The Fairmont Press.
- Baggio, R. W. O. (2018). Modelagem de uma Caldeira Flamotubular com Fornalha Aquatubular. 2018. 81 f. Dissertação (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, SC.
- Bello, L. F. R. (2018). Introdução de caldeira de biomassa em uma fábrica do ramo de nutrição animal utilizando cavaco de eucalipto como combustível. 37 f. Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, MG.
- Cardoso, D. R. O. (2018). Aumento de eficiência energética de uma instalação de geração de vapor por meio do reaproveitamento de energia em linhas de retorno de condensado. 2018. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.
- Centrais Elétricas Brasileiras (2005). Eficiência energética no uso de vapor. Rio de Janeiro, Eletrobrás, 2005. 196p.
- Cereijo, G. N. (2014). Modelagem simplificada e simulação da combustão de uma partícula de biomassa suspensa em escoamento unidimensional. 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade de Campinas, Campinas, SP.
- Council of industrial boiler owners. 2021. Disponível em: <<https://www.cibo.org/>>. Acesso em 08/03/2021.
- Empresa de Pesquisa Energética. (2021). Balanço Energético Nacional. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>. Acesso em: 24/01/2022.
- Madejski, Paweł & Żymełka, Piotr. (2020). Calculation methods of steam boiler operation factors under varying operating conditions with the use of computational thermodynamic modeling. Energy. 197. 117221. 10.1016/j.energy.2020.117221.
- Moreira, L. C. O. (2007). Comparação entre os poluentes atmosféricos e ruídos emitidos por uma caldeira flamotubular movida a gás natural e a óleo combustível BPF 2A. 145 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, MS.
- Nogueira, Luiz & Rocha, Carlos & Nogueira, Fábio & Monteiro, Marco & Efficientia, Consórcio. (2005). Eficiência energética no uso de vapor: manual prático.
- NR-13 (1978). Norma Regulamentadora: Caldeiras e Vasos de Pressão. Disponível em: Acesso em 12/02/2021.
- Oyama, H. C. (2017). Análise de processo em caldeiras da indústria sucroenergética. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, M. 79 f.
- PTC, A. (2009). ASME PTC 4-2008 Fired Steam Generators. New-York: ASME.
- Rabaçal, M. E. R. F. (2010). Influência das características do combustível no desempenho energético e ambiental de caldeiras domésticas. 2010. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Rocco, C. D. (2011). Um modelo de otimização para as operações de produção de vapor em caldeiras industriais: um estudo de caso na indústria de alimentos. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.
- Saidur, R., Abdelaziz, E.A., Demirbas, A., Hossain, M.S. and Mekhilef, S., (2011), A review on biomass as a fuel for boilers, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, issue 5, p. 2262-

2289.

Santos, P. H. C. (2021). Estudo de caso: Readequação do sistema de geração de vapor em uma empresa automotiva. 2021. 50 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

Schirmer, W. N., & Rudniak, A. (2009). Avaliação das emissões gasosas de diferentes tipos de combustíveis utilizados e seus impactos ambientais. *Tecno-Lógica*, 13(1), 25-34.

<https://doi.org/10.17058/tecnolog.v13i1.839>

Senger, R. (2015). Análise do rendimento térmico de uma caldeira alimentada com lenha em toras. 2015. 62 f. Monografia de Bacharelado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR.

Zhang, H. W., Dong, S., Yang, F., & Shi, L. P. (2013). The Research and Application of Industrial Boiler Energy Efficiency Test System. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 288, pp. 296–302). Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.288.296>