

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

GILVAN EDUARDO RAMOS

ANÁLISE TERMODINÂMICA DE UMA CALDEIRA DE ÁGUA NA INDÚSTRIA

CAXIAS DO SUL

2024

GILVAN EDUARDO RAMOS

ANÁLISE TERMODINÂMICA DE UMA CALDEIRA DE ÁGUA NA INDÚSTRIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof: Dr. Giovani Dambros Telli

CAXIAS DO SUL

2024

GILVAN EDUARDO RAMOS

ANÁLISE TERMODINÂMICA DE UMA CALDEIRA DE ÁGUA NA INDÚSTRIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof: Dr. Giovani Dambros Telli

Aprovado em Clique ou toque aqui para inserir uma data.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Giovani Dambros Telli
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Alexandre Vieceli
Universidade de Caxias do Sul

Ms. William Galiotto
Universidade de Caxias do Sul

RESUMO

A queima de combustíveis fósseis é um processo altamente utilizado no âmbito da indústria mundial desde o seu desenvolvimento na revolução industrial, com impacto significativo no avanço tecnológico que ocorreu nesse período. Porém, por se tratar de um recurso limitado e não renovável, e causar danos severos ao meio ambiente, cada vez mais empresas buscam investir em novas tecnologias ou desenvolvimento de sistemas que operem de forma mais eficiente e econômica. O objetivo deste trabalho foi analisar o processo de operação de uma caldeira de água quente, com a utilização de gás natural como combustível, para buscar o modelo de operação no qual opere com maior eficiência, para diminuir possíveis gastos de utilização de matéria prima, mantendo a qualidade e quantidade de energia necessária para a operação na empresa. Foi realizada a análise de eficiência energética e exergética, assim como balanço de massa e energia para operação dessa caldeira e proposto novos dados de entrada para melhorar a operação do sistema. A partir da variação das temperaturas de entrada e de saída no qual estava sendo utilizada no modelo de operação real, foi identificado uma melhora na utilização da energia e exergia proveniente da oxidação do combustível, com isso foi obtido uma eficiência melhor da utilização das matérias-primas. Foi obtido uma melhora de 7,14% na utilização da energia e um aumento de 4,70% da eficiência exergética do processo de combustão da caldeira.

Palavras-chave: Caldeira; Eficiência; Gás natural; Processo de combustão; Energia.

ABSTRACT

The burning of fossil fuels is a process highly used in global industry since its development in the industrial revolution, with a significant impact on the technological advances that occurred during this period. However, because it is a limited and non-renewable resource, and causes severe damage to the environment, more and more companies are looking to invest more in new technologies or the development of systems that operate more efficiently and economically. The objective of this work is to analyze the operating process of a hot water boiler, using natural gas as fuel, to seek the operating model in which it operates at high efficiency, to reduce possible costs of using raw materials, and maintaining the quality and quantity of energy required for the company's operations. An energy and exergy efficiency analysis will be carried out, as well as a mass balance for the operation of this boiler and new input data will be proposed for better system operation. Based on the variation in the inlet and outlet temperature used in the real operating model, an improvement was identified in the utilization of energy and exergy from fuel oxidation. As a result, better efficiency in the use of raw materials was achieved. There was a 7,14% improvement in energy utilization and a 4,70% increase in the exergy efficiency of the boiler combustion process.

Keywords: Boiler; Efficiency; Natural gas; Combustion process; Energy

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de Caldeira	16
Figura 2 - Caldeira Fumotubular	17
Figura 3 - Caldeira Aquatubular	18
Figura 4 - Categoria das Caldeiras e suas Capacidades.....	19
Figura 5 - Avaliação do rendimento de combustão	25
Figura 6 - Diagrama dos termos da equação da energia para um volume de controle	28
Figura 7 - Fluxograma das etapas desenvolvidas	32
Figura 8 – Caldeira Aalborg e queimador Monarch.....	35
Figura 9 – Volume de controle	37
Figura 10 - Exergia na saída da caldeira x Exergia destruída	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do gás extraído na Bacia de Campos, antes de passar pela unidade de fracionamento (Gás 1) e após ter sido processado pela unidade, gás 2.....	20
Tabela 2 - Poder Calorífico de Gases	21
Tabela 3 - Variável componentes da equação de combustão	26
Tabela 4 – Composição do gás natural	33
Tabela 5 – Características Físico-química do gás natural	33
Tabela 6 – Capacidades Gerais da Caldeira	35
Tabela 7 – Dados de operação da caldeira	40
Tabela 8 – Produto da combustão	41
Tabela 9 - Balanço entalpia e entropia dos gases de combustão	41
Tabela 10 - Valores de Energia do Volume de Controle.....	42
Tabela 11 - Valores de exergia do combustível e ar.....	43
Tabela 12 - Valores de exergia dos componentes da caldeira.....	43
Tabela 13 – Balanço de exergia na caldeira	43
Tabela 14 - Cenários dos novos modelos de operação.....	45
Tabela 15 - Balanço energético da variação da temperatura de saída.....	45
Tabela 16 - Balanço exergético para variação da temperatura de saída.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NO	Monóxido de Nitrogênio
GLP	Gás liquefeito de petróleo
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
Cp	Calor específico
CO	Monóxido de Carbono
GN	Gás natural
CO ₂	Dióxido de carbono

LISTA DE SIGLAS

FCC	Unidade de craqueamento de catalítico fluido
PGN	Unidade de processamento de gás natural
UCS	Universidade de Caxias do Sul
TCC	Trabalho de conclusão de curso

LISTA DE SÍMBOLOS

\dot{m}	Fluxo de vazão mássica [kg/s]
T	Temperatura [K]
Q	Calor [W]
W	Trabalho [kW]
h	Entalpia [kJ/K]
s	Entropia [kJ/k]
ψ	Exergia [kW]
η	Eficiência [%]
PCI	Poder calorífico inferior [kJ/kg]
Ψ	Exergia [kJ/kg]
λ	Excesso de ar [%]
\bar{C}_p	Calor específico [kJ/kg]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivo geral	14
1.2.2	Objetivos específicos	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	CALDEIRAS	15
2.1.1	Componentes de uma caldeira	15
2.1.2	Caldeiras Fumotubulares	16
2.1.3	Caldeiras Aquatubulares	17
2.1.4	Categoria de Caldeiras	18
2.2	COMBUSTÍVEL	19
2.2.1	Gás Natural	19
2.2.2	Poder Calorífico	21
2.2.3	Temperatura Adiabática da Chama	22
2.3	PROCESSO DE COMBUSTÃO.....	22
2.3.1	Combustão completa	23
2.3.2	Combustão incompleta	23
2.3.3	Avaliação do Rendimento da Combustão	24
2.4	EQUAÇÃO GERAL DA COMBUSTÃO.....	25
2.5	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	26
2.5.1	Princípio de conservação da Massa e Energia	27
2.5.2	Energia fornecida e disponível	29
2.5.3	Segunda lei da termodinâmica	30
2.5.4	Eficiência exergética	31
3	METODOLOGIA	32
3.1	ANÁLISE DO DESEMPENHO OPERACIONAL DO SISTEMA.....	33
3.1.1	Coleta de dados	33
3.1.2	Equação geral da combustão	34
3.1.3	Especificação técnica da caldeira	34
3.2	ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DO SISTEMA.....	35

3.2.1	Identificação de ineficiências ou perdas de calor	37
3.2.2	Proposição de novos dados de operação	37
3.3	ANÁLISE COMPARATIVA DA NOVA PROPOSTA DE OPERAÇÃO	38
4	RESULTADOS	39
4.1	ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS	39
4.1.1	Dados coletados na operação da caldeira de água quente	39
4.1.2	Análise do processo de combustão.....	40
4.2	BALANÇO DE ENERGIA DA COMBUSTÃO	41
4.3	ANÁLISE EXERGÉTICA DO SISTEMA	42
4.4	VARIAÇÃO NO MODELO DE OPERAÇÃO.....	44
4.4.1	Balanco energético do novo modelo de operação.....	44
4.4.2	Balanco exergético do novo modelo de operação	45
5	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

Devido aos efeitos da globalização, diversas empresas produzem os mesmos tipos de produtos ou serviços, gerando um cenário extremamente competitivo. Visto isso, as empresas precisam buscar a melhoria contínua, seja aprimorando os processos já utilizados dentro da organização quanto a adequação a novas tecnologias, com o intuito de se destacar no mercado.

Diante disso, é importante analisar a eficiência energética e o desempenho operacional dos sistemas de aquecimento, onde o consumo de energia e a eficiência energética tem impacto direto na viabilidade econômica das operações. Seguindo esse contexto, a análise termodinâmica do processo de aquecimento da caldeira de água é uma ferramenta indispensável para otimizar a eficiência dos recursos da empresa.

Outra razão que justifica a busca por uma melhor na eficiência energética do sistema de caldeira está relacionada a redução dos impactos ambientais. Ao analisar dados reais ao comparar com dados teóricos, pode-se identificar possíveis ineficiências no processo que podem levar a um maior gasto de combustível ou o aumento da emissão de gases poluentes na atmosfera.

Como o processo de geração de vapor por caldeira industrial usualmente utiliza gás natural como combustível, que é um combustível fóssil, portanto uma substância finita, deve-se ter o melhor aproveitamento possível da oxidação de combustível sem gerar muitas perdas. Além de trabalhar em condições de sistema subotimizadas, pode-se ter geração de monóxido de carbono e fuligem no processo, que são altamente tóxicos e prejudiciais ao ser humano e o meio ambiente.

Com o levantamento dos dados relativos à operação do sistema, surge a oportunidade de realizar amplas análises de uma gama de aspectos operacionais, que acolhe desde o balanço energético e exergético até as perdas térmicas, além do desempenho operacional e as perspectivas de aprimoramento visando o aumento da eficiência do sistema.

Inicialmente realizou-se a coleta dos dados reais do sistema em operação e a identificação das especificidades da caldeira de água em estudo como sua configuração, *layout*, capacidade térmica e características operacionais. Com a compilação desses dados foi realizado um processo de análise comparativa com os dados operacionais de sistemas de referência propostos em materiais de estudo de termodinâmica.

Após realizado a análise das capacidades do sistema de operação em um estado real, foi realizado simulações matemáticas com uma proposta de novo modelo de operação, para

verificar se ocorreu uma melhora da performance e eficiência desse novo modelo, e o comparativo do quanto de aproveitamento terá em relação ao processo real.

A empresa no qual foi realizado a análise de operação de caldeira atua no ramo alimentício e utiliza a água quente proporcionada para o processo de secagem de alguns produtos. Permitindo assim auxiliar na velocidade no qual os produtos ficam prontos para comercialização, e também auxiliando no processo de pasteurização, evitando presença de microrganismos no alimento.

Através desse detalhamento da análise termodinâmica baseada em dados reais, busca-se contribuir significativa na melhora do funcionamento do sistema operacional, trazendo maior economia e competitividade da empresa no setor alimentício.

Conforme Gonçalves (2011), a análise energética tem como objetivo mensurar a capacidade de transformação interna do processo, e a análise exérgica é a capacidade de transformação da energia em trabalho. Realizando o estudo dessas análises físicas da operação da caldeira, pode-se verificar a quantidade e a qualidade de trabalho que se pode gerar, e com isso, comparar com o processo real para identificação dos locais onde ocorrem possíveis perdas de processo.

Com o intuito de propor melhorias para aumentar a eficiência energética e exérgica do modelo de produção, e conseqüentemente gerar uma melhor utilização de consumo do combustível e componentes utilizados na operação. Assim, podendo diminuir gastos de operação, além de uma melhor produtividade e qualidade no produto da operação da caldeira.

1.1 JUSTIFICATIVA

O trabalho visa variar dados de operação inicial no sistema operacional na caldeira de água de uma indústria específica, para melhorar o consumo de energia e a eficiência do processo. Dessa maneira pode-se garantir um uso mais eficiente dos recursos disponíveis além de minimizar os impactos ambientais e econômicos do uso de matéria-prima em excesso.

1.2 OBJETIVOS

Este tópico divide-se em dois e tem como função apresentar o objetivo geral e os específicos do trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

Análise termodinâmica de uma caldeira de água que opera com gás natural incorporada na indústria, e possibilitar a identificação de formas de como aumentar sua eficiência energética e exergética.

1.2.2 Objetivos específicos

Para conseguir evoluir no objetivo geral do trabalho, alguns objetivos específicos foram definidos:

- a) Analisar o desempenho operacional do sistema, com base nos dados coletados e especificações técnicas da máquina;
- b) Realizar a avaliação energética e exergética do sistema;
- c) Identificar ineficiências que ocorrem no sistema;
- d) Propor alterações com o objetivo de aumentar a eficiência global do sistema;
- e) Analisar comparativamente as eficiências, energética e exergética, entre o modelo do processo atual e o modelo com novos dados de entrada para a operação do sistema.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é descrito a fundamentação teórica que foi utilizada para atingir os objetivos especificados no capítulo anterior, apresentando os princípios básicos de funcionamento de uma caldeira de água com utilização de gás natural como combustível, as perdas no sistema de produção, os processos de combustão de uma caldeira além dos balanços energéticos e exergéticos de funcionamento do sistema.

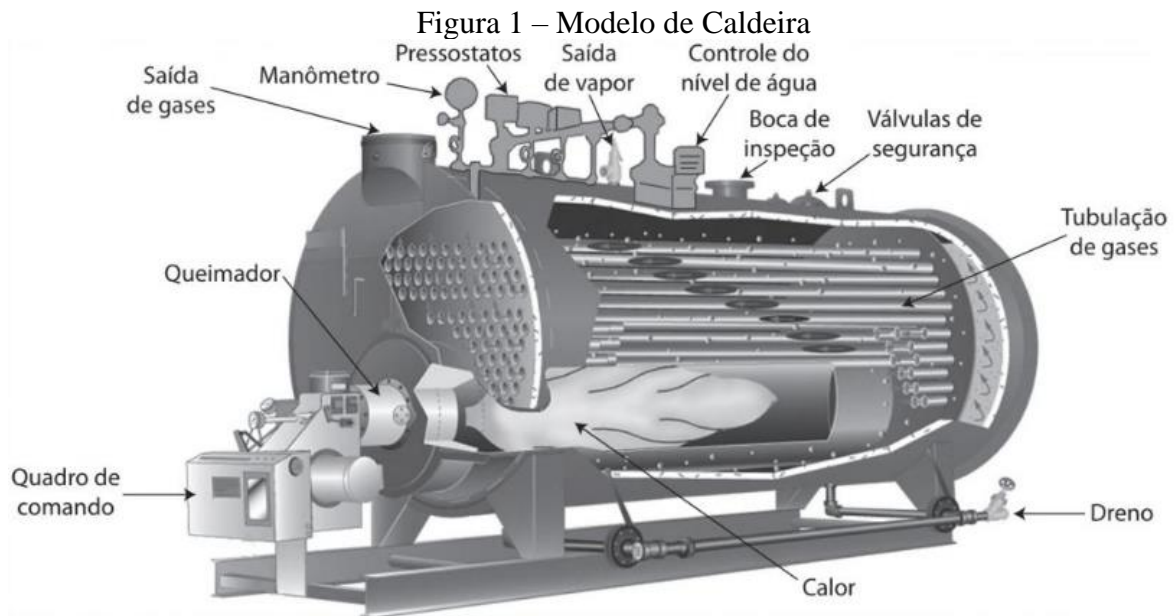
2.1 CALDEIRAS

Segundo Botelho (2015), quando se há a necessidade de geração de calor numa operação na indústria, a solução mais econômica e viável é a realização do aquecimento da água, transformando-a em vapor e enviando até o local onde será consumida. Essa operação da transformação do estado da água, de líquida para vapor com alta pressão em um ambiente fechado e controlado, pode ser realizado através do equipamento chamado caldeira.

2.1.1 Componentes de uma caldeira

De acordo com Botelho (2015), as caldeiras por queima de combustível geralmente são constituídas dos seguintes componentes, conforme ilustrado na Figura 1:

- Corpo da caldeira, reservatório no qual a água alimentada vira vapor;
- Tubos internos, no qual água ou gases circulam para a geração do vapor;
- Alimentador de Combustível;
- Queimador de Combustível;
- Tubulação de saída do vapor, leva o vapor produzido para os pontos no qual serão utilizados;
- Tubulação de saída de gases queimados (chaminé), onde os gases queimados são liberados para a atmosfera;
- Válvulas de descarga (extração) de fundo, para realizar a manutenção e limpeza do sistema devido aos resíduos gerados no processo;
- Válvulas de Segurança, fazem o monitoramento da pressão interna da caldeira para que esta não passe do valor desejado;
- Dispositivos de controle, fazem toda o controle da entrada e saída das substâncias, além de acionar os componentes do sistema.



Fonte: Botelho (2015)

Além dos componentes citados, podem existir outros acessórios implementados a caldeira, variando a necessidade de utilização e aplicação da energia gerada.

2.1.2 Caldeiras Fumotubulares

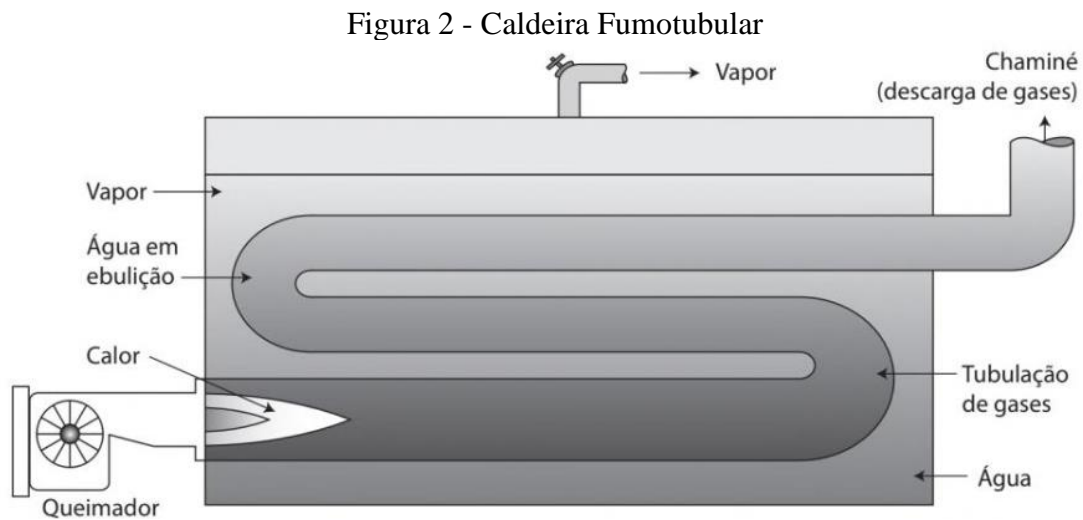
As caldeiras fumotubulares ou flamotubulares tem como característica a circulação dos gases de combustão pelo interior da caldeira através de tubos que os conduzem. Como as partes internas dessas caldeiras são relativamente grandes, a operação é feita com pressões limitadas, impossibilitando a utilização de materiais com espessuras maiores.

Podem ser feitas caldeiras verticais ou horizontais, sendo a última mais comumente utilizada, podendo possuir fornalhas lisas e corrugadas e com traseira seca ou molhada. A maior parte da troca de calor ocorre via radiação luminosa e nas partes posteriores da caldeira, a troca ocorre via radiação gasosa e convecção. A fornalha e os tubos ficam circundados de água e são ancorados nos espelhos (discos externos) por solda junto ao tubulão externo. Os espelhos ficam submetidos à pressão interna do vapor e os tubos e fornalha ficam à pressão externa.

Lagemann (2016) afirma que, como o ar de combustão supre totalmente o queimador vindo de um ventilador de tiragem forçada, inviabilizando a utilização de óleos combustíveis pesados e ultra viscosos, isso ocorre devido a recirculação da vazão do sistema ser baixa, gerando uma alta emissão de carbono não queimado no sistema. Esse tipo de caldeira também possui dificuldade na ignição de alguns gases, como gás natural, que pode ser compensada com a imposição de rotação no escoamento do gás de combustão, esse processo

se chama *swirl* que ocasiona recirculações na parte interna do jato, auxiliando na ignição do gás natural.

Devido a todos os aspectos construtivos do sistema de caldeiras fumotubulares, conforme mostrado na Figura 2, a produção de pressão e vapor costuma ser limitada a um total de 18 bar de pressão de trabalho e geração de 15 Ton/h de vapor.



Fonte: Botelho (2015)

2.1.3 Caldeiras Aquatubulares

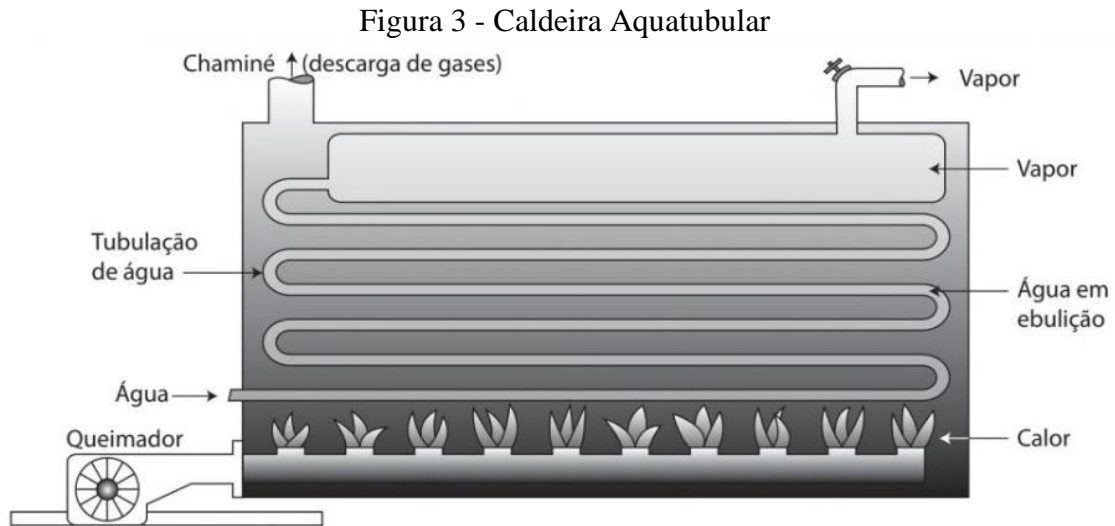
As caldeiras aquatubulares têm como princípio a circulação externa dos gases de combustão com tubos internos que fazem a condução da massa de água e vapor, como pode ser visto na Figura 3, com isso esse tipo de caldeira permite a utilização de materiais mais espessos que viabilizam a operação do sistema em pressões mais elevadas, além de uma geração maior de vapor.

Isso torna esse equipamento uma opção mais viável economicamente e com maior possibilidade de utilização dentro da indústria. Também é possível gerar vapor superaquecido que é necessário para o funcionamento de turbinas a partir de adaptação de acessórios como o superaquecedor no sistema.

Para propiciar um bom funcionamento da caldeira, os queimadores são adaptados para funcionar com um alto índice de recirculação dentro do sistema. Criando um ambiente mais propício para a ignição do combustível, baixa emissão de partículas de carbono não queimados e além de redução na formação de monóxido de nitrogênio (NO).

A água é distribuída por vários tubos que estão em contato com o gás de combustão, esses tubos ficam disposto para garantir a melhor eficiência de circulação de água em ebulição.

As taxas volumétricas de combustão são bem menores que nas caldeiras fumotubulares, devido as características presentes na câmara de combustão, conforme Figura 3.



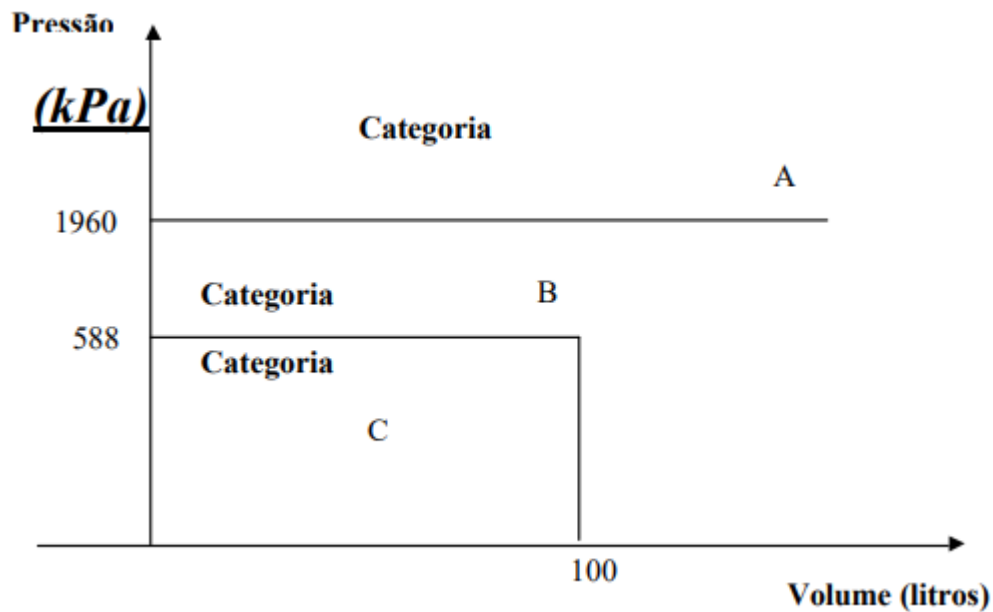
Fonte: Botelho (2015)

2.1.4 Categoria de Caldeiras

De acordo com o manual técnico de caldeiras expedido pelo INMETRO (2000), o critério adotado pela NR13 para a classificação de caldeiras leva em consideração o volume interno da caldeira e a pressão de operação do sistema, representando assim a sua energia disponível. São 3 subdivisões realizadas para distinguir a capacidade dessas caldeiras de acordo com os critérios da norma, e são compatíveis com o risco que cada caldeira pode apresentar, conforme exibido na Figura 4:

- a) Caldeira de categoria “A” têm a pressão de operação igual ou superior a 1960 kPA;
- b) Caldeira de categoria “C” têm a pressão de operação igual ou superior a 588 kPA e o volume igual ou inferior a 100 litros;
- c) Caldeira de categoria “B” são as que não se encaixam em nenhuma das categorias citadas acima.

Figura 4 - Categoria das Caldeiras e suas Capacidades



Fonte: INMETRO (2000)

2.2 COMBUSTÍVEL

De acordo com Lagemann (2016), combustível é toda substância natural, tanto no estado sólido, líquido ou gasoso, que ao ser misturado com o oxigênio gera uma reação química que produz a liberação de energia. Porém, para utilização na indústria, precisa ter alguns requisitos específicos, como ter disponibilidade em grandes quantidades, baixo custo de operação, aplicabilidade da combustão do combustível junto a tecnologia existente e um razoável poder calorífico.

Os combustíveis mais comumente usados nas indústrias são os óleos combustíveis, gás natural e carvão mineral, variando a usabilidade de cada uma dessas substâncias dependendo da sua aplicabilidade. Os combustíveis gasosos costumam ser mais fáceis de serem operados, e possuem um processo de combustão satisfatório, ao contrário dos combustíveis líquidos e gasosos que necessitam a realização de um preparo para operarem satisfatoriamente, e ainda possuem a liberação de carbono e fuligem, que podem ter impacto no meio ambiente em relação ao aquecimento global.

2.2.1 Gás Natural

O gás natural é utilizado na indústria como combustível principalmente devido a sua flexibilidade. O seu consumo vem crescendo constantemente no mercado energético nos

últimos anos. Uma das grandes razões que impulsionam a maior utilização desse combustível é o baixo nível de carbono que ele emite. Considerando as preocupações ambientais a nível global, onde se visa cada vez mais reduzir a emissão de gases poluentes, o gás natural vem ganhando força no mercado.

O gás natural é extraído a partir da decomposição da matéria orgânica fóssil, muito frequentemente encontrado junto a reservas de petróleo. Ele é quimicamente definido como uma mistura de hidrocarbonetos leves, como etano e metano, que em temperatura ambiente e pressão atmosférica permanecem no estado gasoso.

Segundo Lagemann (2016), o gás natural passa por uma unidade de fracionamento onde são retirados água e sulfeto de hidrogênio, a partir do gás úmido, gerando assim gás residual, etano, GLP e gasolina natural. Após a extração, ele é acondicionado na fase gasosa e geralmente transportada por rede de gasodutos que ligam as áreas de produção e os postos de distribuição. Na Tabela 1 pode-se verificar a composição do gás antes e após passar pela unidade de fracionamento.

Tabela 1 - Composição do gás extraído na Bacia de Campos, antes de passar pela unidade de fracionamento (Gás 1) e após ter sido processado pela unidade, gás 2

	GÁS 1	GÁS 2
PCI (kcal/kg)	11.377	11.571
Peso molecular	20	18
Componentes:	Composição em volume (%)	
Metano	81,04	89,90
Etano	10,08	8,50
Propano	4,88	0,50
i-butano	0,72	-
n-butano	1,11	-
Isopentano	0,22	-
Neopentano	0,21	-
Pentanos	0,15	-
Nitrogênio	1,08	0,70
CO ₂	0,52	0,40

GÁS 1 - Gás produzido na Bacia de Campos (antes da PGN).

GÁS 2 - Gás produzido na Bacia de Campos (após a PGN).

Fonte: Lagemann (2016)

A utilização de gás natural possui algumas vantagens em comparação a outros combustíveis, como a facilidade de transporte e armazenamento, alta produtividade e custo relativamente baixo e possuir uma queima mais limpa em relação a combustíveis líquidos. Porém, ele tem um alto grau de inflamabilidade e produz componentes tóxicos como monóxido

de carbono (CO), que impedem a utilização doméstica, além de ser um combustível não renovável, portanto finito para a extração na natureza.

2.2.2 Poder Calorífico

Conforme Lagemann (2016), o poder calorífico é definido como a quantidade de calor que é liberado pela oxidação total de uma unidade de massa ou volume do combustível sobre determinadas condições iniciais de temperatura e pressão, logo quanto mais alto for o poder calorífico, maior será a energia contida no combustível. O valor do poder calorífico geralmente pode ser identificado na unidade [kJ/kg ou kcal/kg].

O poder calorífico também pode ser dividido em dois principais tipos, poder calorífico superior e inferior. O poder calorífico superior se refere a quantidade de calor produzida em 1 kg de combustível, quando este entra em combustão, e os gases da descarga são resfriados de modo que o vapor de água seja condensado.

Já no poder calorífico inferior, os gases de descarga são resfriados até o ponto de ebulição da água, evitando que a água seja condensada. Na maioria dos motores endotérmicos a água contida neles está em temperaturas muito altas, portanto, para base de cálculos, deve ser levado em consideração o poder calorífico inferior. Na Tabela 2 pode-se verificar o poder calorífico de alguns gases comumente utilizados.

Tabela 2 - Poder Calorífico dos Gases

Combustíveis		kJ/m ³ n	kJ/m ³ n (20 °C e 1 atm.)	kcal/m ³ n	kcal/m ³ n (20 °C e 1 atm.)	kJ/kg	kcal/kg
GN da Bolívia	PCS	39.440	36.748	9.413	8.771	48.274	11.532
	PCI	35.580	33.151	8.492	7.912	43.550	10.404
GN de Santos	PCS	41.340	38.518	9.866	9.193	50.560	12.088
	PCI	37.370	34.819	8.919	8.310	45.741	10.927
GLP	PCS	40.845	37.603	9.744	9.070	49.933	11.927
	PCI	37.603	35.037	8.984	8.368	46.026	10.993
Gás ref. (FCC)	PCS	38.240	35.630	9.126	8.504	46.801	11.180
	PCI	34.860	32.480	8.319	7.752	42.663	10.192
Gás de Xisto	PCS	44.980	41.910	10.735	10.003	55.055	13.152
	PCI	41.090	32.285	9.807	9.138	50.294	12.015

Fonte: Lagemann (2015)

2.2.3 Temperatura Adiabática da Chama

De acordo com Bizzo (2023), o desprendimento do calor vindo da reação de combustão pode ser calculado uma vez que o poder calorífico do combustível e a taxa de consumo de combustível na fornalha são conhecidos. Considerando que todo o calor gerado é transformado em entalpia dos produtos de combustão, sem assumir a perda de calor por radiação ao ambiente externo, é possível calcular a temperatura adiabática da chama, conforme Equação 1:

$$\dot{m}_c PCI = \dot{m}_g Cp_g (T_g - T_{ar}) \quad (1)$$

Onde: \dot{m}_c é a taxa de consumo do combustível [kg/s]; PCI é o poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg]; \dot{m}_g é a massa de gases de combustão [kg/s]; Cp_g é o calor específico dos gases de combustão [kJ/kg K]; T_g é a temperatura de saída dos gases de combustão (temperatura adiabática de chama) [K] e T_{ar} é a temperatura de entrada do ar de combustão [K].

A temperatura adiabática da chama não pode ser obtida em condições reais, principalmente quando se considera operações em altas temperaturas, porém, o cálculo se torna útil para efeito de comparação de potenciais combustíveis para uma dada necessidade de calor e temperatura. Considerando que a massa dos gases de combustão leva em conta tanto as massas do ar de combustão quanto a do combustível consumido no processo, pode-se realizar a relação ar/combustível para uma massa unitária. Conhecendo esses valores e a temperatura de saída dos gases de combustão, é possível calcular o calor recebido no processo, além da diferença entre a entalpia dos gases à temperatura adiabática da chama e a de saída dos produtos de combustão, a partir da Equação 2.

$$\dot{Q} = \dot{m}_c PCI - \dot{m}_g Cp_g (Ts_g - T_{ar}) \quad (2)$$

Onde: \dot{Q} é o calor recebido pela fornalha [kJ/s] e Ts_g é a temperatura de saída dos gases de combustão da fornalha.

2.3 PROCESSO DE COMBUSTÃO

Conforme Borgnakke e Sonntag (2016), o processo de combustão é constituído de um combustível e um comburente, no qual a massa de cada elemento na reação permanecerá a

mesma de acordo com a lei de conservação da massa, e assim podendo ser descrita por uma equação química. Essa equação possuirá reagentes que são as substâncias iniciais que sofrem o processo de combustão, e resultará em novas substâncias que serão chamadas de produtos do processo de combustão.

Esse processo de combustão gerará calor, luz e massa, e ocorre através da ignição de alguma substância. A relação de massa, temperatura, velocidade de combustão, presença de catalisadores terão impactos diretos na reação dos reagentes e também no produto resultante da operação de combustão.

2.3.1 Combustão completa

A reação de combustão pode ser categorizada completa quando a queima estequiométrica com oxigênio ocasiona a completa oxidação do combustível, ou seja, ele é totalmente queimado, gerando liberação de dióxido de carbono (CO_2) + água (H_2O) e energia. Essa relação está diretamente correlacionada com a quantidade de oxigênio que é distribuída ao reagente para conseguir realizar a total oxidação. A maioria dos processos industriais que realizam esse processo de combustão utiliza o ar do ambiente como fonte de fornecimento de oxigênio.

Para diferenciar o tipo de combustão que foi realizada no sistema deve-se realizar a razão de equivalência ar/combustível (Φ), no qual é comparado a razão teórica (estequiométrica) de volume mássico ou volume molar, contra o volume real utilizado na combustão do sistema, a relação para essa definição segue de seguinte modo na Equação 3:

$$\Phi = \frac{(A/C)_{real}}{(A/C)_{Estequiométrico}} \quad (3)$$

$\Phi = 1$, Mistura estequiométrica;

$\Phi < 1$, Mistura Pobre;

$\Phi > 1$, Mistura Rica.

2.3.2 Combustão incompleta

A combustão incompleta pode ser caracterizada quando não houver oxigênio o suficiente para realizar a total oxidação do combustível. Assim ocasionando a geração de

produtos como monóxido de carbono (CO), fuligem e água, além de produzir menos energia nesse processo.

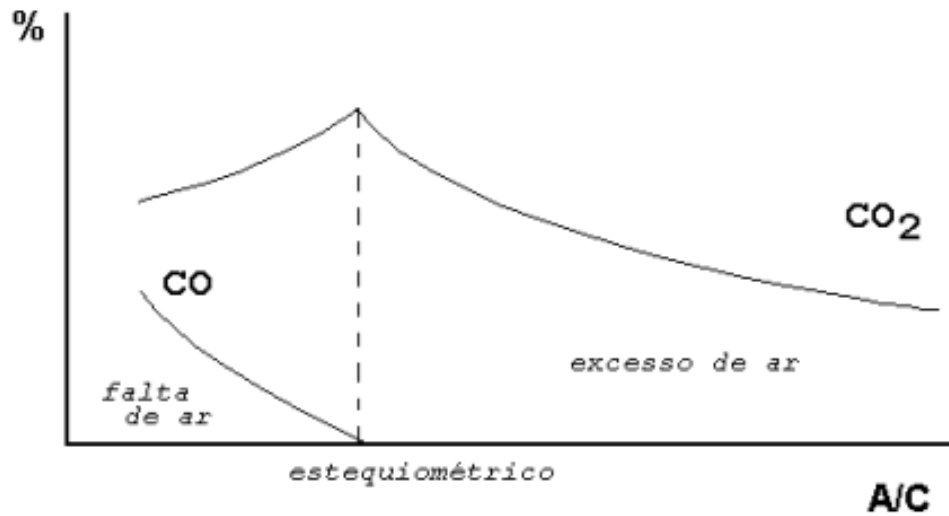
2.3.3 Avaliação do Rendimento da Combustão

Segundo Bizzo (2023), por mais que se busque sempre realizar uma mistura estequiométrica no processo de combustão, somente alguns poucos gases de composição determinada conseguem chegar a esse nível de precisão no processo. Portanto, em condições industriais, habitualmente se proporciona uma maior quantidade de oxigênio do que na teoria, para garantir a total oxidação do combustível. Assim dificultando a possibilidade de gerar uma combustão incompleta, que é causa de perda de calor potencial, além da geração de CO e fuligem no ambiente, que são nocivos aos seres humanos.

Realizando a análise da composição do combustível e a composição dos produtos, o rendimento pode ser calculado em comparação a base teórica dos reagentes. Com isso pode-se determinar a quantidade de calor que está sendo desperdiçada ao aquecer os gases de combustão, possivelmente por conta da utilização de mais ar que o necessário na mistura. Ainda pode-se calcular se parte do combustível está saindo do sistema sem que ele seja totalmente queimado, no caso de estar se utilizando menos ar que o necessário no sistema.

Um dos modos de se realizar essa análise é pela medida do teor de CO₂ no gás de exaustão, a proporção máxima de CO₂ no sistema reflete diretamente na relação ar/combustível, uma vez que o máximo de teor de CO₂ ocorrerá quando a mistura for estequiométrica, e caso a quantidade de oxigênio for insuficiente para a oxidação do combustível, ocorre o aparecimento de monóxido de carbono, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Avaliação do rendimento de combustão



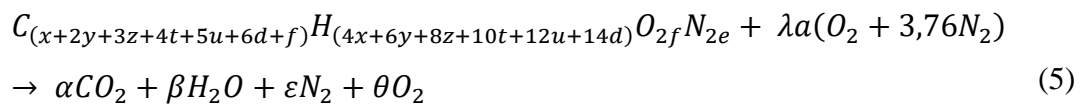
Fonte: Bizzo (2023)

De acordo com Lagemann (2016), pode-se determinar a eficiência da combustão (η [%]) utilizando a Q_n taxa de calor liberado pela reação de combustão [MJ/h]; PCI poder calorífico do interior do combustível [MJ/kg] e a m_c vazão mássica do combustível [kg/h], conforme Equação 4:

$$\eta = (Q_c / m_c * PCI) * 100 \quad (4)$$

2.4 EQUAÇÃO GERAL DA COMBUSTÃO

Com base nos dados disponíveis da composição do gás natural, pode-se realizar a análise do processo de combustão, buscando a partir dos reagentes da composição do combustível, quais serão os produtos dessa queima, conforme mostrado nas Equações 5 a 10 e na Tabela 3.



$$\alpha = n_{CO_2} = (x + 2y + 3z + 4t + 5u + 6d + f) \quad (6)$$

$$\beta = n_{H_2O} = (2x + 3y + 4z + 5t + 6u + 7d) \quad (7)$$

$$a = (2x + 3,5y + 5z + 6,5t + 8u + 9,5d) \quad (8)$$

$$\theta = n_{O_2} = (\lambda - 1) * (2x + 3,5y + 5z + 6,5t + 8u + 9,5d) \quad (9)$$

$$\varepsilon = n_{N_2} = \lambda * (7,52x + 13,16y + 18,8z + 24,4t + 30,08u + 35,72d) + e \quad (10)$$

Tabela 3 - Variável componentes da equação de combustão

Componente	Fórmula química	Variável da Equação 13
Metano	CH ₄	x
Etano	C ₂ H ₆	y
Propano	C ₃ H ₈	z
Butano	C ₄ H ₁₀	t
Pentano	C ₅ H ₁₂	u
Nitrogênio	N ₂	e
Dióxido de Carbono	CO ₂	f

Fonte: Terhan, Comakli (2017)

A Equação 5 descreve a equação geral da combustão referente a queima do combustível utilizado no processo. O valor de λ se refere ao excesso de ar introduzido no queimador para garantir a oxidação total do combustível, com o intuito de não ter geração de monóxido de carbono e fuligem na saída do sistema, assim não tendo maiores impactos no meio ambiente devido a esses produtos serem nocivos ao meio.

2.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

As caldeiras industriais são utilizadas em diversos setores, sempre buscando-se operar com a máxima eficiência possível, pois influencia diretamente nos pontos de vista operacional, econômico e ambiental. De acordo com Lorensetti (2022), considera-se que uma caldeira com eficiência excelente oscila entre 80 e 85%, quando normalmente os resultados rondam por 65 e 75%. Sabe-se de alguns fatores principais que podem impactar na eficiência de uma caldeira:

- Vapor produzido x volume de combustível utilizado, caso haja excesso de uso de combustível para gerar um volume de vapor;

- Percentual de purgas, se houver excesso ou falta de purga pode ocasionar corrosão ou arraste de água, e conseqüentemente desperdício de energia significativo;
- Temperatura da água de alimentação, se a água entrar na caldeira muito fria, será necessário um maior consumo de combustível;
- Poder calorífico do combustível, geralmente é relacionado ao teor de umidade do combustível, caso seja muito alta, terá menor poder calorífico;
- Vazão de gases das caldeiras, é necessária uma quantidade maior de ar do que numa mistura estequiométrica, para oxidar 100% do combustível, porém se usado ar em excesso, diminui a eficiência da chama e aumenta perda de calor. E falta de ar, gera combustão incompleta, com formação de fuligem e CO;
- Isolamento térmico, para reduzir ao máximo perdas de calor;
- Regulagem da queima, tendência de geração de combustão incompleta, ou excesso de consumo de combustível caso não regulada corretamente.

2.5.1 Princípio de conservação da Massa e Energia

Conforme Borgnakke e Sonntag (2016), considerando a lei de conservação de massa aplicada a um volume de controle, pode-se entender que não é possível criar ou destruir massa, portanto afirmar-se que a taxa de variação de massa vai ser o somatório do fluxo de massa que entra menos o fluxo de massa que sai do volume de controle, por isso pode-se exemplificar essa lei com a equação 11:

$$\frac{dm_{v,c}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (11)$$

Onde, \dot{m}_e e \dot{m}_s , são as vazões mássicas de entrada e saída do volume de controle [kg/s], respectivamente.

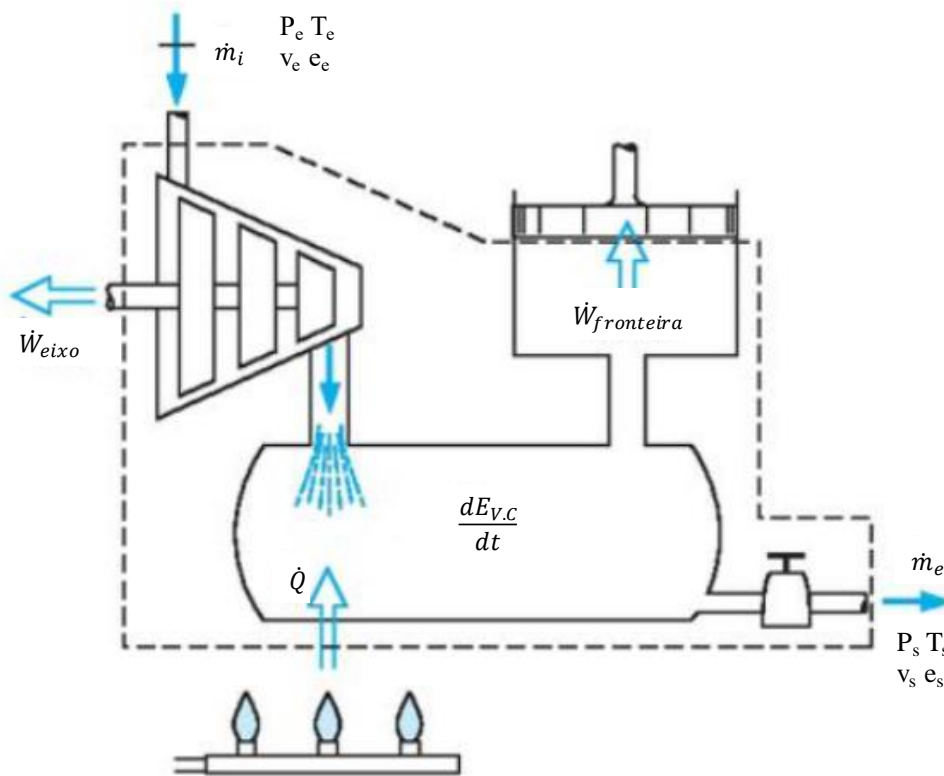
Essa equação também é chamada de equação de continuidade, e pode ser utilizada na maioria das aplicações termodinâmicas, porém quando ocorrem situações em que tem acúmulo de massa que possuem estados termodinâmicos diferentes, para estes casos utiliza-se a Equação 12:

$$(12)$$

$$m_{v,c} = \int p dV = \int (1/v) dV = m_a + m_b + m_c + m_d \dots$$

Deduzindo a partir da lei de conservação de massa, obtém-se a equação da conservação de energia para um volume de controle, envolvendo a taxa de calor transferido, a taxa de trabalho e o fluxo de massa, no qual não se pode criar ou destruir energia, portanto a variação de energia no volume de controle só pode ser provocada pelas taxas de energia que entram e saem do volume de controle, de acordo com Figura 6.

Figura 6 - Diagrama dos termos da equação da energia para um volume de controle



Fonte: Borgnakke (2015)

Para calcular a energia transformada no processo, deve-se também levar em consideração os valores de energia potencial e energia cinética. Define-se para cálculos de operação realizados a pressão constante a adaptação dessas energias, em entalpia total, conforme Equação 13:

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2}V^2 + gZ \quad (13)$$

Onde: h_{tot} é a entalpia da substância [kJ/kg]; g é a aceleração da gravidade [m/s²]; Z é a altura no qual o fluido percorre em ação da gravidade [m].

Com essa definição pode-se chegar à forma geral da equação da conservação de energia, em função do tempo, disponível na Equação 14.

$$\frac{dE_{v,c}}{dt} = Q_{v,c} - \dot{W}_{v,c} + \sum \dot{m}_e h_{tot,e} - \sum \dot{m}_s h_{tot,s} \quad (14)$$

Onde, $dE_{v,c}/dt$ vai ser a variação de energia em função do tempo; $Q_{v,c}$ é o calor e $\dot{W}_{v,c}$ é o trabalho.

2.5.2 Energia fornecida e disponível

De acordo com Terhan e Comakli (2017), para o cálculo do balanço de energia do sistema pode-se desprezar os valores de energia potencial e de energia cinética, e a reação de combustão dentro do queimador é completa a partir da introdução do excesso de ar em comparação ao cálculo estequiométrico, na Equação 15. Para o cálculo da energia gerada pela queima do combustível utiliza-se o valor do poder calorífico inferior, conforme mostrado na Equação 16, e para os demais componentes são utilizados o calor específico e a variação de temperatura de entrada e saída do sistema, Equação 17. Para a eficiência da caldeira é utilizada a Equação 18, no qual utiliza-se a energia do combustível obtida na Equação 16 e a soma da energia do vapor com a energia do gás de combustão que corresponde ao total da energia útil.

$$\dot{E}_{comb} + \dot{E}_{ar} + \dot{E}_{\acute{a}gua} = \dot{E}_{vapor} + \dot{E}_{gc} + \dot{E}_{perda} \quad (15)$$

$$\dot{E}_{comb} = \dot{m}_{comb} * PCI \quad (16)$$

$$\dot{E} = \dot{m} * h \quad (17)$$

$$n_{caldeira} = \frac{\dot{E}_{\acute{u}til}}{\dot{E}_{comb}} \quad (18)$$

Onde, \dot{E} é o fluxo de energia por segundo [kJ/s], \dot{m} é a vazão mássica [kg/s], PCI é o poder calorífico inferior [kJ/kg], h é a entalpia no ponto de análise, C_p é o calor específico do componente e $T_{saída}$ e $T_{entrada}$ é o valor de temperatura de saída e entrada, respectivamente.

2.5.3 Segunda lei da termodinâmica

Segundo Borgnakke e Sonntag (2016), a segunda lei da termodinâmica determina que é impossível construir um motor térmico que em seu ciclo receba uma determinada quantidade de calor de um corpo a alta temperatura e produza igual quantidade de trabalho. Então pode-se afirmar que não é possível ter um sistema com uma eficiência energética igual a 100%

A segunda lei da termodinâmica tem como base a utilização do conceito de entropia, que pode ser considerada como o grau de desordem ou falta de energia de um sistema. Considerando um sistema fechado, a entropia sempre irá aumentar com o tempo, visto que não haverá energia sendo proporcionada pelo ambiente externo, logo a quantidade de energia disponível diminui para realizar o trabalho, reduzindo a eficiência energética do sistema.

Levando em consideração que a taxa de geração de entropia dentro de um volume de controle geralmente não é nula, é necessário identificar essa variável para conseguir calcular a taxa de variação de entropia em função do tempo. Também é necessário trazer a taxa de variação de massa que atravessam a fronteira do volume de controle, pois irá impactar diretamente na taxa de variação de entropia, conforme mostrado na Equação 19.

$$\frac{dS_{v.c}}{dt} = \sum \dot{m}_e S_e - \sum \dot{m}_s S_s + \sum \frac{\dot{Q}_{v.c}}{T} + \dot{S}_{ger} \quad (19)$$

Onde, $dS_{v.c}/dt$ é a variação de entropia em função do tempo; S_e é a entropia na entrada do volume de controle; S_s é a entropia na saída do volume de controle; \dot{m}_e é a vazão mássica na entrada do volume de controle; \dot{m}_s é a vazão mássica na saída do volume de controle; $\dot{Q}_{v.c}$ é a taxa de transferência de calor aplicada no volume de controle; T é a temperatura do ponto de observação e \dot{S}_{ger} é a entropia gerada no volume de controle.

2.5.4 Eficiência exergetica

De acordo com Gonçalves e Gaspar (2011), a exergia é um conceito que constitui a capacidade de transformar a energia proporcionada no sistema em trabalho, ou seja, em energia organizada. A exergia é, portanto:

- A capacidade de transformar energia em energia organizada;
- A disponibilidade de energia para operar as mudanças;
- A capacidade de conservar a qualidade de energia nessas mudanças;
- A diferenciação da qualidade de energia;

A análise exergetica se baseia na segunda lei da termodinâmica, e é utilizada para verificar a qualidade da energia e sua capacidade de conversão em energia útil. Ela também utiliza a primeira lei da termodinâmica para medir a quantidade de energia envolvida no processo. Essa análise possibilita identificar possíveis perdas energéticas, além de proporcionar comparações entre sistemas para otimizar processos.

Para determinar a eficiência exergetica, é necessário descobrir os valores de exergia do vapor de água, da água e a do combustível, com as equações que foram abordadas na seção 3.2, conforme mostrado na Equação 20.

$$\eta_{exergetica} = \frac{\psi_{vapor} - \psi_{\acute{a}gua}}{\psi_{combustível}} \quad (20)$$

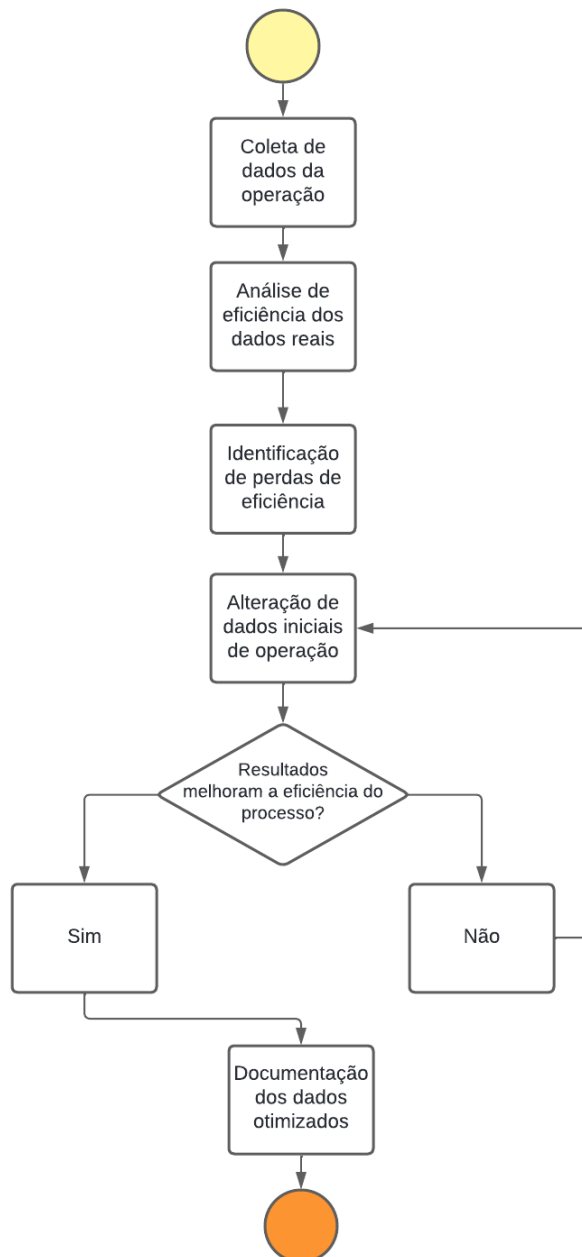
Onde, ψ_{vapor} , $\psi_{\acute{a}gua}$ e $\psi_{combustível}$ são a exergia do vapor, da água e do combustível [kW], respectivamente, e $\eta_{exergetica}$ é a eficiência exergetica do sistema.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo será detalhada a análise operacional da caldeira, apresentando os métodos e equações utilizados.

Na Figura 7 é apresentado o fluxograma com as etapas que serão realizadas para o desenvolvimento do trabalho.

Figura 7 - Fluxograma das etapas desenvolvidas



Fonte: Autor (2024)

3.1 ANÁLISE DO DESEMPENHO OPERACIONAL DO SISTEMA

Este trabalho apresenta um estudo de caso de uma caldeira de água quente operando em uma empresa do setor alimentício, com o objetivo de geração de calor e no processo de secagem e pasteurização de alguns produtos. Com base nos dados reais coletados na operação do sistema, busca-se realizar melhorias nos parâmetros de operação da caldeira.

3.1.1 Coleta de dados

Para iniciar o estudo de caso, foi necessário primeiramente realizar a coleta de dados de operação, tanto de entrada quanto de saída do sistema. Para isso o *software* de operação da caldeira realiza essa compilação de dados, através de sensores que estão instalados nas entradas e saídas do sistema.

Alguns dos dados que são coletados inicialmente são programados no início da operação, como temperatura, pressão e taxa do fluxo de combustível, tanto na entrada quanto na saída do processo. Em relação ao combustível, como é utilizado gás natural, precisa-se identificar a composição e características das propriedades físicas e químicas do gás para analisar de forma precisa, conforme Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Composição do gás natural

Componente	Gás Natural (% vol.)
Metano (CH ₄)	92,723
Etano (C ₂ H ₆)	1,573
Propano (C ₃ H ₈)	0,407
n-Butano (C ₄ H ₁₀)	0,226
n-Pentano (C ₅ H ₁₂)	0,002
Dióxido de Carbono (CO ₂)	1,403
Nitrogênio (N ₂)	3,432
Outros Componentes	0,235

Fonte: Koochakinia, Ebrahimi-Moghadam e Deymi-Dashtebayaz (2022)

Tabela 5 – Características físico-química do gás natural

Poder Calorífico Superior (PCS)	49.933 kJ/kg
Poder Calorífico Inferior (PCI)	46.026 kJ/kg
Densidade Relativa (ar)	0,601
Peso Molecular	17,41 g/mol
Fator Compressibilidade	0,998

Fonte: Pinheiro (1996)

3.1.2 Equação geral da combustão

A partir dos valores adquiridos em relação a composição do gás de combustão e dos dados de operação da caldeira, é possível realizar a função da reação da combustão completa do gás natural com a mistura de ar seco que ocorre dentro do queimador da caldeira.

Para isso, utiliza-se as Equações 21 a 26, que mostram a composição dos gases de combustão que ocorrem no sistema. Além disso, é possível identificar a fração molar e o calor específico molar de cada componente que compõem o gás de combustão na saída da caldeira, utilizando as equações abaixo:

$$\eta_{gc} = \eta_{O_2} + \eta_{CO_2} + \eta_{H_2O} + \eta_{N_2} \quad (21)$$

$$x = \frac{n}{n_{gc}} \quad (22)$$

$$\bar{C}_{p,CO_2} = 22,26 + 5,981 * 10^{-2} * (T_{gc}) - 2,501 * 10^{-5} * (T_{gc})^2 + 7,469 * 10^{-9} * (T_{gc})^3 \quad (23)$$

$$\bar{C}_{p,H_2O} = 32,24 + 0,1923 * 10^{-2} * (T_{gc}) + 1,055 * 10^{-5} * (T_{gc})^2 - 3,595 * 10^{-9} * (T_{gc})^3 \quad (24)$$

$$\bar{C}_{p,N_2} = 28,90 - 0,1571 * 10^{-2} * (T_{gc}) + 0,8081 * 10^{-5} * (T_{gc})^2 - 2,873 * 10^{-9} * (T_{gc})^3 \quad (25)$$

$$\bar{C}_{p,O_2} = 25,48 + 1,520 * 10^{-2} * (T_{gc}) - 0,7155 * 10^{-5} * (T_{gc})^2 + 1,312 * 10^{-9} * (T_{gc})^3 \quad (26)$$

Onde, η é o número de mol de cada componente [kmol], X é a fração molar de cada componente [kg/kmol], \bar{C}_p é o calor específico [kJ/kmol K] e T_{gc} é a temperatura do gás de combustão na saída do sistema [K].

Com o dado obtido da fração molar de cada componente é possível calcular a massa molecular do combustível, além da fração molar e o calor específico do gás de combustão na saída do sistema de operação.

3.1.3 Especificação técnica da caldeira

A empresa atualmente utiliza uma caldeira flamotubular da Aalborg com um queimador Monarch do tipo WM-G50/1A da empresa Weispauth, conforme Figura 8. Será necessário reunir as especificações técnicas de ambos os componentes para entender as capacidades de operação, pressões e temperaturas máximas de operação quanto a eficiência nominal do sistema, ilustradas na Tabela 6.

Figura 8 – Caldeira Aalborg e queimador Monarch



Fonte: Autor (2024)

Tabela 6 – Capacidades Gerais da Caldeira

Categoria	B
Capacidade Térmica (kcal/h)	4.180.750
Superfície de Aquecimento (m ²)	124
Pressão de trabalho admissível (psig)	170
Pressão de operação (psig)	152
Pressão de teste hidrostático (psig)	255

Fonte: Autor (2024)

3.2 ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DO SISTEMA

Para o estudo de caso da análise de operação de uma caldeira de água quente precisa-se quantificar e qualificar a energia proporcionada dentro do sistema em questão. Para isso será aplicada as leis de conservação da massa, a primeira e segunda lei da termodinâmica e também o balanço exergético. Com esses resultados isso é possível fazer comparativos com dados de referência e analisar possíveis melhorias com a alteração de alguns parâmetros iniciais utilizados no processo.

Aplicando a Equação 27, é possível calcular a exergia específica do combustível usando dados de referência da exergia padrão de cada componente da composição do gás natural, as

suas massas moleculares e as frações molares que foram calculadas na equação geral de combustão. Após essa etapa utiliza-se a Equação 28 para calcular a exergia do combustível.

Para a análise exergética, pode-se buscar o valor da exergia em um ponto específico do volume de controle, utilizado o valor no ponto de entrada ou de saída do sistema, conforme ilustrado na Equação 30. Para o ar será utilizado a Equação 29, para a perda de calor, a Equação 31 e o para os gases da combustão, é calculada a exergia de cada espécie química nos produtos da combustão, e aplicado a fração molar para encontrar a exergia total dos gases de combustão.

$$e_{combustível} = \sum x_i M_i E_{xi}^0 \quad (27)$$

$$\psi_{combustível} = \dot{m}_{combustível} e_{combustível} \quad (28)$$

$$\psi_{ar} = Cp_0 * \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right) - R * \ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) \quad (29)$$

$$\psi = \dot{m} * [h - h_0 - T_0(s - s_0)] \quad (30)$$

$$\psi_{perda\ calor} = \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) * \dot{Q}_{perda} \quad (31)$$

$$\psi_{gás\ combustão} = \sum x_i * \psi_i \quad (32)$$

Onde, $e_{combustível}$ é a exergia específica do combustível, x_i é a fração molar dos componentes do combustível, M_i peso molecular, E_{xi}^0 é a exergia standard, ψ é a exergia no ponto de medição, ψ_i é a exergia de cada componente do gás de combustão, Cp_0 é o calor específico [kJ/kg*K], T_0 é a temperatura do estado morto [K], T_1 é a temperatura do ponto analisado [K], \dot{m} é o fluxo mássico [kg/s], \dot{Q}_{perda} é o calor perdido para o meio ambiente [kW], h e h_0 é a entalpia do volume de controle e do estado morto, respectivamente e S e S_0 é a entropia volume de controle e do estado morto, respectivamente [kJ/kg*K].

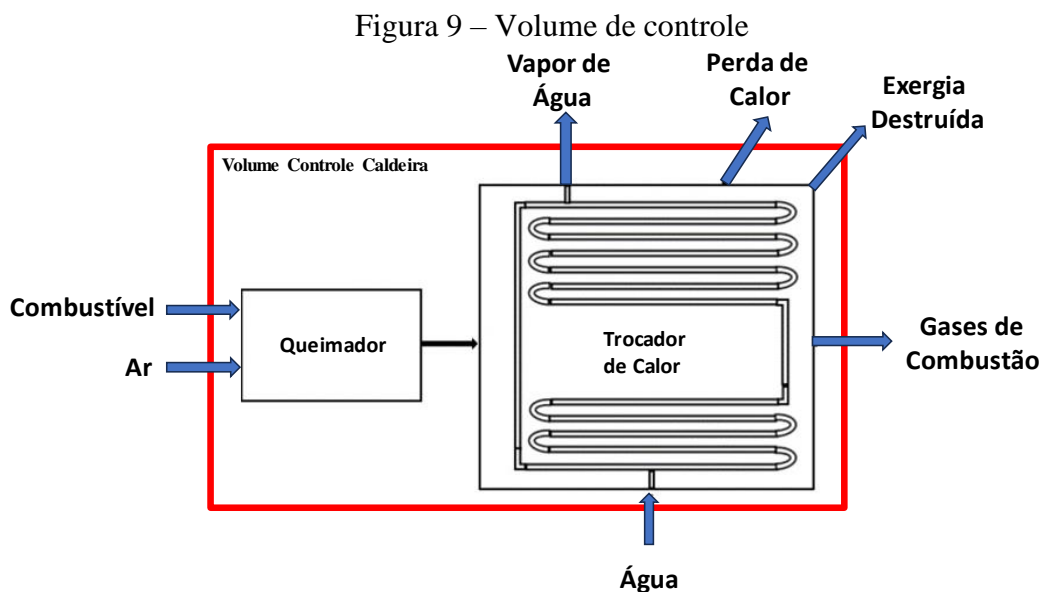
3.2.1 Identificação de ineficiências ou perdas de calor

Após realizar todos os cálculos para identificar os valores de análise energética e exérgica, utilizando os dados de entrada coletados na operação real, realizou-se simulações com variações nos valores dos dados de entrada, para verificar possíveis melhorias.

Para avaliar o desempenho do processo de combustão, é necessário mensurar a quantidade de energia que está sendo desperdiçada na operação, devido a perda de energia para o meio ambiente.

3.2.2 Proposição de novos dados de operação

Com a análise energética e exérgica realizada e a identificação das ineficiências do processo real da operação da caldeira de água quente, buscou-se realizar a modificação de alguns dados iniciais para entender como elas afetarão a eficiência do processo. Na Figura 9 é mostrado o volume de controle utilizado e os valores nos quais serão utilizadas as análises e possíveis modificações de novos cenários.



Fonte: Modificado de Koochakinia, Ebrahimi-Moghadam e Deymi-Dashtebayaz (2022)

Os valores que foram modificados para efetuar a nova análise das eficiências de operação da caldeira são da temperatura inicial da água ($T_{entrada}$) provenientes do alimentador de água, e a temperatura de saída da água ($T_{saída}$) na forma de vapor de água, com o intuito de

tentar chegar o mais próximo possível da queima em fluxo estequiométrico sem que ocorra perdas da oxidação de combustível, geração de monóxido de carbono e fuligem.

3.3 ANÁLISE COMPARATIVA DA NOVA PROPOSTA DE OPERAÇÃO

Com os dados de entrada alterados, foram realizados os cálculos da análise de eficiência energética e exergética apresentados na seção 3.2, com os novos resultados adquiridos analisou-se comparativamente os valores de eficiência adquiridos com base no processo real efetuado pela caldeira.

Esse passo de análise comparativa com os dados originais do processo de combustão será repetido até que se chegue a um resultado satisfatório de melhoria teórica de eficiência da operação, para que essa nova alternativa de dados iniciais possa ser aplicada no método de operação real do sistema.

4 RESULTADOS

Este capítulo tem como objetivo abordar as etapas de desenvolvimento dos métodos de análise do desempenho e eficiências energéticas e exergéticas executadas pela caldeira, desde o processo de coleta de dados até a simulação de novos possíveis modelos de operação e sua comparação com os dados reais obtidos.

4.1 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS

Para iniciar o processo de análise foi coletado dados de operação da caldeira de água quente em diferentes horários de operação, com diferentes necessidades de energia. No desenvolvimento dos cálculos de operação, foi assumido que o sistema da caldeira atua em regime permanente, não realiza trabalho e as variações de energia cinética e potencial são desprezíveis, por isso foram retiradas das análises.

4.1.1 Dados coletados na operação da caldeira de água quente

Os dados coletados na operação da caldeira de água quente são mostrados conforme Tabela 7, estes foram utilizados como base para realizar os cálculos da análise das energias e exergias do sistema. É possível notar que para todas as medições efetuadas existe uma aplicação de excesso de ar em comparação a combustão estequiométrica, para que não ocorra a geração de monóxido de carbono e diminuição de fuligem, com isso diminuindo o impacto ambiental da caldeira.

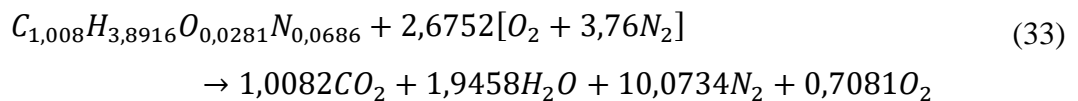
Tabela 7 – Dados de operação da caldeira

Parâmetro	Unidade	Valor
Vazão do combustível	m ³ /h	330
Vazão de ar calculada	m ³ /h	3260,4
Vazão de água	kg/s	0,706
Temperatura água entrada (líquido saturado)	°C	131
Temperatura água saída (vapor saturado)	°C	142
Temperatura reversão	°C	716
Temperatura Chaminé	°C	152
Temperatura Ambiente	°C	25
Excesso de ar	%	36,0%

Fonte: Autor (2024)

4.1.2 Análise do processo de combustão

Aplicando as equações abordadas na seção (2.4), e com os dados adquiridos da composição do gás natural utilizado como combustível, é possível gerar a equação geral da combustão referente ao processo real obtido na operação da caldeira de água quente. A partir dos dados dos reagentes da combustão, obtemos a composição do gás de combustão que terá saída ao final do processo de combustão (considerando combustão completa), conforme mostra Equação 33.



Com a composição do gás de combustão encontrada e identificado a quantidade do número de mols presente para cada componente do produto da combustão, é possível calcular a massa molecular e o calor específico do gás de combustão, conforme mostrado na Tabela 8. Além disso, também se aplicou a lei de conservação de energia para os componentes do gás de combustão, para conseguir os valores de entalpia e entropia que serão usados no balanço da primeira e segunda lei da termodinâmica, conforme Tabela 9.

Tabela 8 – Produto da combustão

Produto da Combustão	Número de mols	Fração Molar %	Massa Molecular kg/kmol	Calor específico kJ/kmol K
CO ₂	1,008	0,073	44	41,591
H ₂ O	1,946	0,142	18	34,599
N ₂	0,708	0,733	28	29,435
O ₂	10,073	0,052	32	30,651
Gás de combustão	13,735	1	27,964	31,121

Fonte: Autor (2024)

Tabela 9 - Entalpia e entropia dos gases de combustão

Componentes	Entalpia kJ/kg	Entalpia estado referência kJ/kg	Entropia kJ/kg K	Entropia estado referência kJ/kg K
CO ₂	327,80	212,82	5,18	4,86
H ₂ O	2.748,26	2.546,50	6,82	8,56
O ₂	389,71	271,31	6,74	6,41
N ₂	442,00	309,61	7,21	6,84
Gás Combustão	635,75	499,87	6,91	6,74

Fonte: Autor (2024)

4.2 BALANÇO DE ENERGIA DA COMBUSTÃO

Utilizando as Equações 15, 16 e 17, é obtido o balanço geral da energia para o processo de combustão do sistema, para isso foi considerado os valores de operação da Tabela 7. Também foi considerado um único volume de controle no qual comporta o queimador e o trocador de calor presente na caldeira, de acordo com a Figura 9, e no qual pode-se ver os valores das energias calculadas conforme Tabela 10.

Com esse volume de controle, a energia que entra no sistema provém da energia liberada através da queima do combustível e sai na forma de vapor saturado, mistura do gás de combustão, além de perdas de calor que ocorrem do sistema para o meio ambiente. Realizado o balanço de energia podemos identificar o total da energia perdida através do processo de troca de calor, essa perda ocorre devido a diversos fatores já abordados na seção 2.5.

Tabela 10 - Valores de Energia do Volume de Controle

Componente		Fluxo de massa kg/s	Calor específico ou PCI kJ/kg k ou kJ/kg	Entalpia kJ/kg	Energia kW	%
Entrada do sistema	Combustível	0,055	46.026	-	2.531	85
	Água	0,706	-	550,65	389	13,1
	Ar	1,155	-	50,69	59	2
Saída do sistema	Vapor de água	0,706	-	2.738,79	1.934	64,9
	Gás de comb.	1,210	-	635,75	769	25,8
	Perda de calor				275	9,2

Fonte: Autor (2024)

Realizando o cálculo da eficiência energética da caldeira em operação real, a partir da Equação 18, é encontrado um valor de 61,04% para a eficiência. Comparando com os artigos do Terhan e Comakli (2017), e do Koochakinia, Ebrahimi-Moghadam e Deymi-Dashtebayaz (2022), ambos encontraram eficiências próximas de 82% para suas análises de combustão da caldeira, com isso pode-se verificar que existe uma subutilização alta dessa caldeira devido a eficiência do processo real estar bem mais baixa a porcentagem de eficiência do processo de referência.

4.3 ANÁLISE EXERGÉTICA DO SISTEMA

Para conseguir realizar o cálculo das exergias do sistema, foi determinado um único volume de controle para todo o sistema, conforme Figura 9. Para a entrada do sistema foi considerado os dados do combustível, do ar e da água de alimentação. E para a saída do sistema foi considerado os valores do vapor de água e gás de combustão, que se originam a partir do processo de combustão. Além da exergia proveniente da perda de calor calculada na primeira lei da termodinâmica, utilizando a Equação 31. Para conseguir realizar o balanço da exergia, conforme visto na seção 3.2, e encontrar a exergia destruída desse processo, conforme Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 - Valores de exergia do combustível e ar

Componentes	Exergia Específica kJ/kmol	Massa Molecular Kg/kmol	Calor Específico kJ/kg K	Exergia kJ/kg
Combustível	856.287,74	17,24	-	49.679,27
Ar	-	-	1,005	0,35

Fonte: Autor (2024)

Tabela 12 - Valores de exergia dos componentes da caldeira

Componentes		Entalpia kJ/kg	Entropia kJ/kg K	Exergia kJ/kg
Entrada do sistema	Combustível	-	-	49.679,27
	Ar	-	-	0,35
	Água	550,65	1,65	64,81
Saída do sistema	Vapor de água	2.738,79	6,89	689,17
	Gás de combustão	635,75	6,91	85,24

Fonte: Autor (2024)

Com base nos valores obtidos nas Tabelas 11 e 12, podemos multiplicar o valor das exergias resultantes junto ao valor do fluxo de massa de cada componente identificado para termos o fluxo de exergia do sistema. Dessa forma, encontra-se a exergia destruída do sistema, conforme Tabela 13.

Tabela 13 – Balanço de exergia na caldeira

	Componente	Fluxo de massa kg/s	Exergia kJ/kg	Fluxo de Exergia kW	%
Entrada do sistema	Combustível	0,055	49.679,27	2.732,36	98,34
	Água	0,706	64,81	45,77	1,65
	Ar	1,155	0,35	0,40	0,01
Total				2.778,53	100%
Saída do sistema	Vapor de água	0,706	689,17	486,70	17,52
	Gás de combustão	1,210	85,24	103,15	3,71
	Perda de Calor	-	-	77,61	2,79
	Exergia Destruída	-	-	2.111,08	75,98

Fonte: Autor (2024)

Observa-se que temos um percentual de 75,98% de exergia destruída nesse processo, isso se deve ao fator de que o processo da caldeira solicitado na operação aumenta a temperatura da água em somente 10 graus e transformando-a em vapor, em relação a entrada dela no sistema. Portanto a caldeira está sendo muito subutilizado, comparado com o quanto de exergia é dissipada através do processo de combustão.

Com os dados do balanço da caldeira em operação real, é possível realizar o cálculo da eficiência exergética, no qual para esse sistema foi encontrado um valor de 16,14%. Segundo Terhan e Comakli (2017) e Koochakinia, Ebrahimi-Moghadam e Deymi-Dashtebayaz (2022), as eficiências exergéticas encontradas foram entre 27 e 32%, comparando ao processo analisado nesse trabalho, foi obtido uma eficiência muito menor em comparação, isso ocorre devido ao não aproveitamento da energia gerada pela queima do combustível, no processo de aquecimento da água.

4.4 VARIACÃO NO MODELO DE OPERAÇÃO

A partir da análise energética e exergética do modelo de operação da caldeira de água quente, é possível notar que possui uma alta quantidade de energia que está se perdendo para o meio ambiente, energia essa que não está sendo utilizada efetivamente para o aquecimento da água no processo.

Para simular novos modelos de operação será variado os valores de temperatura da entrada e saída da água que passa pela caldeira, aumentando a variação de temperatura do processo de aquecimento da água, propõe uma necessidade maior de utilização da energia dissipada na oxidação do combustível, portanto uma melhor eficiência energética e exergética.

4.4.1 Balanço energético do novo modelo de operação

Para realizar esse comparativo, foi simulado 3 novos modelos de operação com variações na temperatura de entrada e saída da água do sistema, conforme Tabela 14, e posteriormente identificado as novas energias perdidas pelo processo de combustão, conforme identificado na Tabela 15.

Tabela 14 - Cenários dos novos modelos de operação

	Operação Real	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Temperatura água entrada (líquido saturado) [°C]	132	80	80	80
Temperatura água saída (vapor saturado) [°C]	142	142	162	182

Fonte: Autor (2024)

Tabela 15 - Balanço energético da variação da temperatura de saída

	Componente	Fluxo de massa kg/s	Energia Operação Real kW	Energia Cenário 1 kW	Energia Cenário 2 kW	Energia Cenário 3 kW
Entrada do sistema	Combustível	0,055	2.531	2.531	2.531	2.531
	Água	0,706	389	237	237	237
	Ar	1,155	59	59	59	59
Saída do sistema	Vapor	0,706	1.934	1.934	1.949	1.962
	Gás de comb.	1,210	769	769	794	819
	Perda de Calor	-	275	123	83	45
	Perda de Calor (%)	-	10,88	4,86	3,29	1,78
	Eficiência Caldeira (%)		61,04	67,06	67,64	68,18

Fonte: Autor (2024)

Com os resultados apresentados, nota-se que diminuindo a temperatura de entrada do sistema para 80 °C, já foi obtido uma melhora significativa na eficiência da caldeira de 61,04% para 67,06%. Além disso, aumentando a temperatura de saída, foi obtido um maior aumento na eficiência energética, com uma porcentagem de 68,18%, e a diminuição da quantidade da perda de calor de 10,88% para 1,78% do total de energia disponível.

4.4.2 Balanço exerético do novo modelo de operação

Com a variação aplicada da temperatura de saída da caldeira, também possuímos novos valores para fluxo de exergia e de exergia destruída dentro do sistema, pois tem relação direta com os valores de entalpia e entropia utilizada na Equação 29, conforme mostrado na Tabela 16.

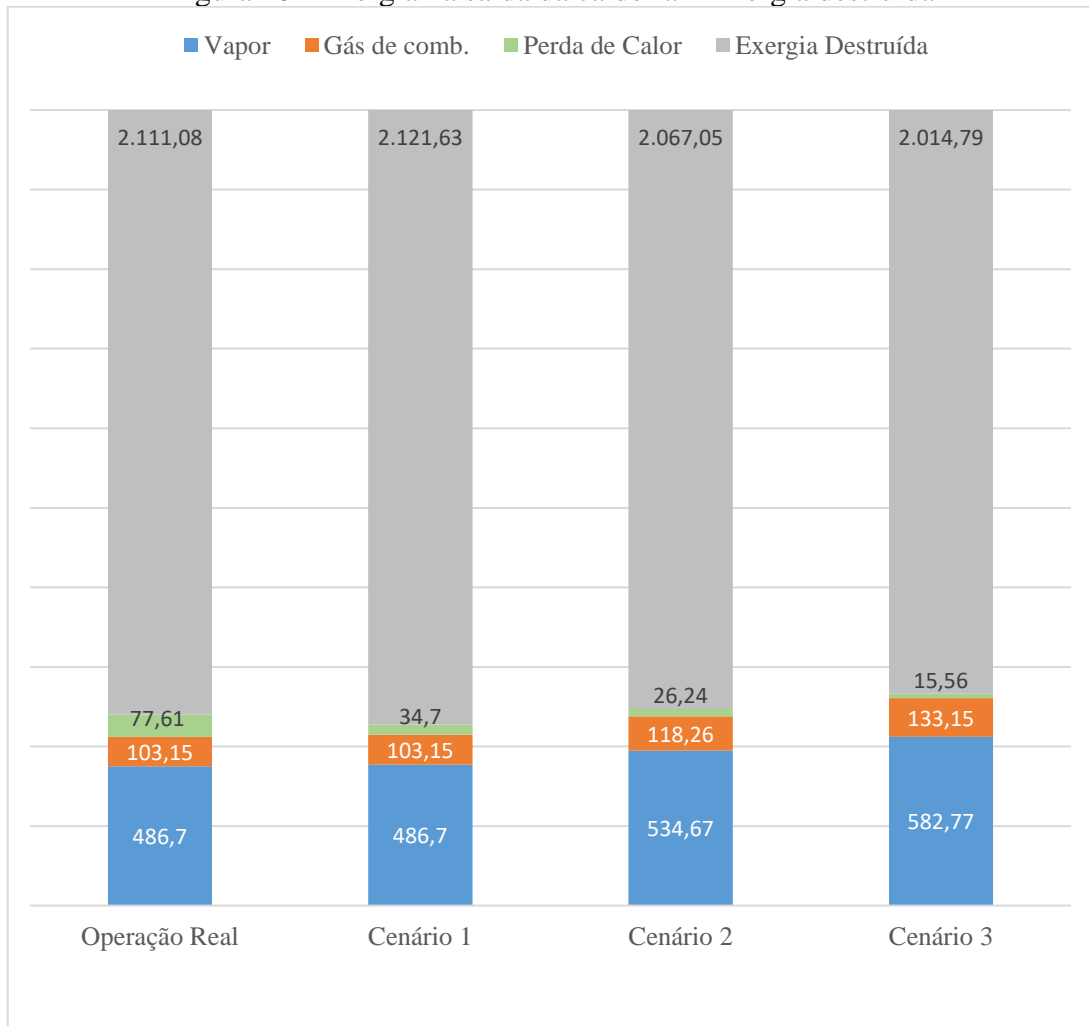
Tabela 16 - Balanço exergético para variação da temperatura de saída

	Exergias Componentes	Exergia Operação Real kW	Exergia Cenário 1 kW	Exergia Cenário 2 kW	Exergia Cenário 3 kW
Entrada do sistema	Combustível	2.732,36	2.732,36	2.732,36	2.732,36
	Água	45,77	13,40	13,40	13,40
	Ar	0,40	0,40	0,46	0,51
Saída do sistema	Vapor	486,70	486,70	534,67	582,77
	Gás de comb.	103,15	103,15	118,26	133,15
	Perda de Calor	77,61	34,70	26,24	15,56
	Exergia Destruída [kW]	2.111,08	2.121,63	2.067,05	2.014,79
	Exergia Destruída (%)	75,98	77,26	75,27	73,36
	Eficiência Exergética (%)	16,14	17,32	19,08	20,84

Fonte: Autor (2024)

Nota-se que aumentando a temperatura de saída e diminuindo a temperatura de entrada, a exergia que estava sendo disponibilizada a partir da oxidação do combustível foi mais bem aproveitada, partindo de uma representação de 75,98% da exergia destruída no processo real para um percentual de 73,36% ao aumentar a temperatura de saída em 40 °C e diminuindo a de entrada em 52 °C, conforme Figura 10.

Figura 10 - Exergia na saída da caldeira x Exergia destruída



Fonte: Autor (2024)

Utilizando a Equação 20 podemos realizar a análise da eficiência exergética para esses novos modelos de operação com variação das temperaturas, conforme Tabela 16. Com isso foi possível identificar uma melhora na eficiência da caldeira de 16,14% para 20,84% quando variado a temperatura de entrada para 80 °C e a de saída para 192 °C. Com esse cenário proposto, foi obtido maior proximidade em relação as eficiências dos artigos de referência que ficavam em torno de 32%. Mesmo com as modificações realizadas na caldeira ainda existe uma subutilização das suas matérias-primas, porém houve um crescimento significativo da porcentagem de aproveitamento e efetividade do processo de combustão.

5 CONCLUSÃO

O trabalho buscou analisar as condições de operação real da caldeira de água quente e verificar novos modelos de operação que pudessem melhorar as perdas de energia e exergia que ocorrem devido ao processo de combustão. A análise foi realizada em um processo de operação normal da caldeira com a adição do combustível, gás natural e ar onde o produto da queima do combustível vai realizar a troca de calor junto a água quente que está sendo bombeada para dentro da caldeira.

Nas condições atuais de operação é possível identificar uma alta perda de energia disponível do processo de combustão ocorrendo na operação do trocador de calor, muito dessa perda ocorre devido à baixa diferença de temperatura entre a saída e entrada da água. A água entra com uma temperatura de 131 °C e está saindo com apenas 142 °C de vapor de água.

Nos 3 novos cenários simulados foi estipulado variações tanto na temperatura de entrada quando na de saída, e com isso houve uma melhora na quantidade de energia que estava sendo perdida no trocador de calor de 275 kW para 45 kW.

A exergia destruída também mostrou uma melhora conforme a temperatura de saída aumenta, saindo de um valor de 2.111,08 kW para 2.014,79 kW para a última operação simulada com temperatura de saída de 182 °C, e a eficiência da exergia da caldeira subiu de 16,15% para 20,84%.

Através dos cálculos efetuados para a análise da caldeira foi possível notar que a caldeira está sendo muito subutilizada, com isso é utilizado uma quantidade maior de matérias-primas para uma variação de temperatura pequena. Isso é possível observar até nos comparativos com os dados de referência dos artigos usados de base para esse trabalho, as eficiências obtidas dessa caldeira ainda ficam abaixo, de 61% contra 82% e 16% contra 32%, para eficiência energética e exergética, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- ALTAFINI, Carlos Roberto. **Apostila Sobre Caldeiras**. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2019.
- BAZZO, E. **Geração de Vapor**. 2ª ed. Florianópolis: UFSC, 1995. (Série Didática).
- BIZZO, Waldir. **Geração, distribuição e Utilização de Vapor**. Campinas: Unicamp, 2023.
- BORGNAKKE, Claus; SONNTAG, Richard. **Fundamentos da Termodinâmica**. 2ª reimpressão. São Paulo, SP: Editora Edgard Blucher, 2016. E-book.
- BOTELHO, Manoel Henrique de campos; Bifano, Hercules. **Operação de Caldeira: Gerenciamento, controle e manutenção**. 2ª ed. São Paulo, SP: Edgar Blucher, 2015. E-book.
- GONÇALVES, Luís Carrilho; GÁSPAR, Pedro Dinis. **Energia, Entropia, Exergia – Conceitos úteis e eficiências**. Covilha, Portugal: Universidade da Beira Interior, 2011.
- GOULART, Pedro de Melo Araújo. **Análise energética e exergetica do ciclo de geração de energia com reaproveitamento de gases de alto-forno de uma siderúrgica**. 2021. Número de folhas 55. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2021.
- GUITARRARA, Paloma. **O gás natural é uma fonte de energia renovável?**. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/gás-natural.htm>. Acesso em 04 de maio de 2024.
- INMETRO, **Manual Técnico de caldeiras**. Brasília: Inmetro, dezembro de 2000.
- KOCHAKINIA, Sajad; EBRAHIMI-MOGHADAM, Amir; DEYMI-DASHTEBAYAZ, Mahdi. **Techno-environmental analyses and optimization of a utility boiler based on real data**. Sustainability, v. 14, n. 4, p. 1-19, 23 fev. 2022.
- LORENSETTI, Rodrigo. **7 Fatores que interferem a eficiência energética em caldeiras indústrias**. Coontrol. Disponível em: <https://blog.coontrol.com.br/fatores-que-interferem-a-eficiencia-energetica-em-caldeiras/>. Acesso em 11 de maio de 2024.
- LEGEMANN, Virgílio. **Combustão em Caldeira Industrial: Óleo & Gás Combustível**. 1ª ed. Rio de Janeiro, RJ: Editora Interciência, 2016. E-book.
- MOSCHINI, Luiz Antônio. **Inspeção de Caldeiras**. 3ª ed. Rio de Janeiro, RJ. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP), 2020. E-book.
- PINHEIRO, Paulo César da Costa. **O gás natural e sua utilização em equipamentos térmicos**. Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.
- TERHAN, Meryem; COMAKLI, Kemal. **Energy and exergy analyses of natural gas-fired boilers in a district heating system**. Applied Thermal Engineering, p. 380-387, 20 abr. 2017.