



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CELINE RÊGO FERNANDES

ANÁLISE TERMoeCONômICA DA GERAÇÃO DE VAPOR POR CALDEIRA
EM UMA REFINARIA DE PRODUÇÃO DE ALUMINA

SÃO LUÍS - MA

2025

CELINE RÊGO FERNANDES

**ANÁLISE TERMoeCONômICA DA GERAÇÃO DE VAPOR POR CALDEIRA
EM UMA REFINARIA DE PRODUÇÃO DE ALUMINA**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Maranhão - UFMA, Campus São Luís, como pré-requisito para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Glauber Cruz

SÃO LUÍS - MA

2025

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Fernandes, Celine Rego.

ANÁLISE TERMoeCONômICA DA GERAÇÃO DE VAPOR POR CALDEIRA
EM UMA REFINARIA DE PRODUÇÃO DE ALUMINA / Celine Rego

Fernandes. - 2025.

68 f.

Orientador(a): Glauber Cruz.

Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do
Maranhão, São Luís, Maranhão, 2025.

1. Exergia. 2. Irreversibilidade. 3. Termodinâmica.
4. Utilidades. I. Cruz, Glauber. II. Título.

CELINE RÊGO FERNANDES

**ANÁLISE TERMoeCONômICA DA GERAÇÃO DE VAPOR POR CALDEIRA
EM UMA REFINARIA DE PRODUÇÃO DE ALUMINA**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Maranhão - UFMA, Campus São Luís, como pré-requisito para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Mecânica.

São Luís, 06 de agosto de 2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Glauber Cruz
(Orientador – CCEM / UFMA)

Prof. Dr. Jorge Bertoldo Junior
(Avaliador Interno – CCEM / UFMA)

Prof. Dr. Valter Nunes Trindade Junior
(Avaliador Externo – DEEQ / UFMA)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus e a Nossa Senhora, por me guiarem, protegerem e iluminarem durante toda esta jornada.

Aos meus pais, Helena e Cassiano, por todo o esforço de uma vida para que eu pudesse conquistar oportunidades que eles não tiveram. Por todo o amor, cuidado e apoio incondicional em cada passo que dei. Vocês são meu porto seguro e os primeiros a celebrarem cada conquista minha.

Aos meus irmãos, Edson e Cássio, por quem carrego com orgulho o papel de irmã mais velha. Que eu possa ser sempre exemplo, apoio e inspiração em suas caminhadas.

Ao professor Glauber Cruz, meu orientador, pela dedicação, paciência e pelas valiosas contribuições técnicas e acadêmicas que tanto enriqueceram este trabalho. Sua exigência e profissionalismo foram fundamentais — e exatamente por isso escolhi tê-lo como orientador.

Aos amigos e familiares pelo carinho e por sempre torcerem por mim.

Ao colega de trabalho e engenheiro mecânico João Kilberth, pela generosidade e disponibilidade em compartilhar conhecimentos e informações essenciais para este estudo.

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, deixo meu sincero e profundo agradecimento.

*“Que a tua vida não seja estéril. Sê útil. Deixa
rasto.”*

São Josemaria Escrivá

RESUMO

A crescente demanda por eficiência energética, aliada à pressão por práticas industriais mais sustentáveis, tem impulsionado a adoção de métodos avançados de avaliação de desempenho em sistemas térmicos. Neste contexto, a análise termoeconômica surge como uma abordagem estratégica que integra os princípios da termodinâmica com critérios econômicos, permitindo uma compreensão mais abrangente sobre os impactos operacionais e financeiros da geração de energia térmica. Diante da importância do vapor como insumo crítico em processos industriais de grande escala, especialmente, na indústria de alumina, torna-se fundamental compreender não apenas a eficiência do sistema, mas também os custos associados às irreversibilidades do processo. Este estudo apresenta uma análise termoeconômica da geração de vapor por uma caldeira de leito fluidizado circulante (LFC) instalada em uma refinaria de produção de alumina. A caldeira opera com carvão betuminoso de alta volatilidade e apresenta circulação natural de água. Foram utilizados dados operacionais provenientes do sistema supervisor *Connected Plant*, versão *Uniformance* PHD 2023, registrados entre janeiro e agosto de 2024, para avaliação da eficiência energética e exergética, bem como para a estimativa dos custos da produção de vapor. A partir da modelagem matemática realizada por meio do *software MatLab*, revelou-se que a eficiência térmica variou entre 85,43% e 89,79%, enquanto a exergética foi de 21,60% a 35,40%, com uma elevada destruição de exergia (da ordem de 107,75 a 194,06 MW). Observou-se uma correlação direta entre a destruição de exergia e o custo específico de produção de vapor. A maior taxa de destruição de exergia, de 194,06 MW, foi associada ao custo mais elevado de produção, atingindo 14,09 U\$D t⁻¹. Em contrapartida, a menor destruição de exergia, de 107,75 MW, resultou em um custo de 12,44 U\$D t⁻¹. A produção de vapor permaneceu abaixo da meta de 280 t h⁻¹, e as emissões estimadas de CO₂ alcançaram 60,50 t dia⁻¹. Ao associar ciência térmica e estratégia econômica, este trabalho reforça que eficiência não é apenas uma meta técnica, mas uma vantagem competitiva e ambiental indispensável no cenário industrial atual.

Palavras-chave: Exergia; Irreversibilidade; Utilidades; Termodinâmica.

ABSTRACT

The growing demand for energy efficiency, coupled with pressure for more sustainable industrial practices, has driven the adoption of advanced performance assessment methods for thermal systems. In this context, thermoeconomic analysis emerges as a strategic approach that integrates the principles of thermodynamics with economic criteria, enabling a more comprehensive understanding of the operational and financial impacts of thermal energy generation. Given the importance of steam as a critical input in large-scale industrial processes, especially in the alumina industry, it is crucial to understand not only the system's efficiency but also the costs associated with process irreversibilities. This study presents a thermoeconomic analysis of steam generation by a circulating fluidized bed (CFB) boiler installed in an alumina production refinery. The boiler operates with high-volatility bituminous coal and features natural water circulation. Operational data from the *Connected Plant* supervisory system, version *Uniformance* PHD 2023, recorded between January and August 2024, were used to assess energy and exergy efficiency, as well as to estimate steam production costs. Mathematical modeling using *MatLab* software revealed that thermal efficiency ranged from 85.43% to 89.79%, while exergy efficiency ranged from 21.60% to 35.40%, with high exergy destruction (ranging from 107.75 to 194.06 MW). A direct correlation was observed between exergy destruction and the specific cost of steam production. The highest exergy destruction rate, 194.06 MW, was associated with the highest production cost, reaching US\$ 14.09 t⁻¹. In contrast, the lowest exergy destruction, 180.69 MW, resulted in a cost of US\$ 12.44 t⁻¹. Steam production remained below the target of 280 t h⁻¹, and estimated CO₂ emissions reached 60.50 t day⁻¹. By combining thermal science and economic strategy, this work reinforces that efficiency is not just a technical goal, but an indispensable competitive and environmental advantage in today's industrial landscape.

Keywords: Exergy; Irreversibility; Utilities; Thermodynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Consumo de energia nas indústrias por tipo de fontes no Brasil em 2024	16
Figura 2. Emissões de CO_2 por segmento empresarial no Brasil de 1970 a 2023	17
Figura 3. Fluxograma representativo e esquema do processo Bayer para a produção de alumina	20
Figura 4. Principais insumos fornecidos pelo setor de Utilidades de uma refinaria	22
Figura 5. Arquitetura e esquemático do fluxo de calor e água de uma caldeira flamotubular	23
Figura 6. Arquitetura e esquemático do fluxo de calor e água de uma caldeira aquatubular	24
Figura 7. Representação esquemática de uma caldeira de leito fluidizado circulante (LFC)	25
Figura 8. Representação para balanço de massa e energia de um volume de controle genérico	28
Figura 9. Esquemático da análise exergoeconômica: etapas e finalidades	35
Figura 10. Esquemático ilustrativo da operação de uma caldeira de leito fluidizado circulante (LFC)	38
Figura 11. Duto do ar primário da caldeira LFC (vista direita): 1- duto de sucção do pré-aquecedor; 2 - superaquecedor tubular de passagem do ar; 3 – aquecedor de condensado de água; 4 - ventilador de ar primário; 5 - dutos de ar primário; 6 - caixa de vento	39
Figura 12. Duto do ar secundário da caldeira LFC (vista esquerda): 1- ar frio para os transportadores de combustível; 2 - ar quente para a alimentação de combustível (tubo de ar); 3- ar quente para bocais de ar secundário; 4 - ar quente para os dutos esquerdo e direito; 5- ar quente para os queimadores; 6- pré-aquecedor tubular de passagem de ar	40
Figura 13. Vista simplificada do sistema de caldeira LFC por meio do <i>Connected Plant</i>	42
Figura 14. Visualização da interface da modelagem matemática por meio do <i>MatLab</i> usada para análise termoeconômica da caldeira LFC	44

Figura 15. Comparação entre as eficiências térmicas calculada e real da caldeira LCF nos meses de janeiro a agosto de 2024 49

Figura 16. Eficiência exergética na caldeira LFC durante os meses de janeiro a agosto de 2024 50

Figura 17. Comparação mensal entre exergia útil e destruição de exergia na caldeira LFC durante os meses de janeiro a agosto de 2024 52

Figura 18. Produção de vapor na caldeira LFC durante os meses de janeiro a agosto de 2024 54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros técnicos da caldeira LFC da marca <i>Foster Wheeler</i>	40
Tabela 2. Percentual em massa dos principais componentes físico-químicos do carvão betuminoso de origem colombiana em base seca	41
Tabela 3. Propriedades termodinâmicas aplicadas à análise de produção de vapor em caldeira LFC	43
Tabela 4. Média e desvio padrão dos dados exportados da caldeira LFC por meio do <i>Connected Plant</i> durante janeiro a agosto de 2024	46
Tabela 5. Resultados da análise termoeconômica da geração de vapor por caldeira LFC durante janeiro a agosto de 2024	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFB (LFC)	Caldeiras de Leito Fluidizado Circulante
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COU	Centro Operacional de Utilidades
ELETRONORTE	Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
ETA	Estação de Tratamento de Água
PCI	Poder Calorífico Inferior
PIUP	Processos Industriais e Uso de Produtos
ONU	Organização das Nações Unidas
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

LISTA DE SÍMBOLOS

$\dot{Q}$	Taxa de transferência de calor
T	Temperatura na superfície de controle
T_0	Temperatura inicial
$\dot{E}^Q$	Fluxo exergético térmico
ε	Eficiência exergética
$\dot{C}$	Taxa de custo da corrente
$\dot{Z}$	Taxa de custo relacionada à aquisição e operação do equipamento
c	Custo unitário por unidade de exergia
$\dot{A}$	Taxa de transferência de exergia associada
$\dot{A}_d$	Taxa de exergia destruída
f	Fator exergoeconômico
r	Diferença relativa de custo
$\dot{m}_{ar}$	Vazão mássica de ar de combustão
c_p	Calor específico do ar a pressão constante
$T_{combustão}$	Temperatura de combustão
$T_{entrada}$	Temperatura do ar na entrada do sistema
Q_{ar}	Calor necessário para o aquecimento do ar de combustão
$Q_{útil}$	Energia útil gerada no processo de vaporização
$\dot{m}_{vapor}$	Vazão mássica de vapor gerado
h_{vapor}	Entalpia específica do vapor gerado e água de alimentação
$h_{água}$	Entalpia específica da água de alimentação
$\eta_{térmica}$	Eficiência térmica
Q_{comb}	Energia liberada pela combustão
I	Irreversibilidade
$\dot{m}_{carvão}$	Vazão mássica de carvão
h	Entalpia específica
v	Velocidade
g	Constante da gravidade
z	Altura
T_a	Temperatura ambiente
G	Fluxo de massa

E	Energia do sistema instantânea integrada sobre o volume de controle
$\dot{W}_{m\acute{a}x}$	Potência máxima transferida
$\dot{W}$	Potência efetiva transferida
$\dot{S}_g$	Taxa de geração de entropia
$\dot{W}_\lambda$	Potência perdida por irreversibilidade
e_{vapor}	Exergia específica do vapor
h_{vapor}	Entalpia de vapor
s_{vapor}	Entropia de vapor
h_0	Entalpia de referência
s_0	Entropia de referência

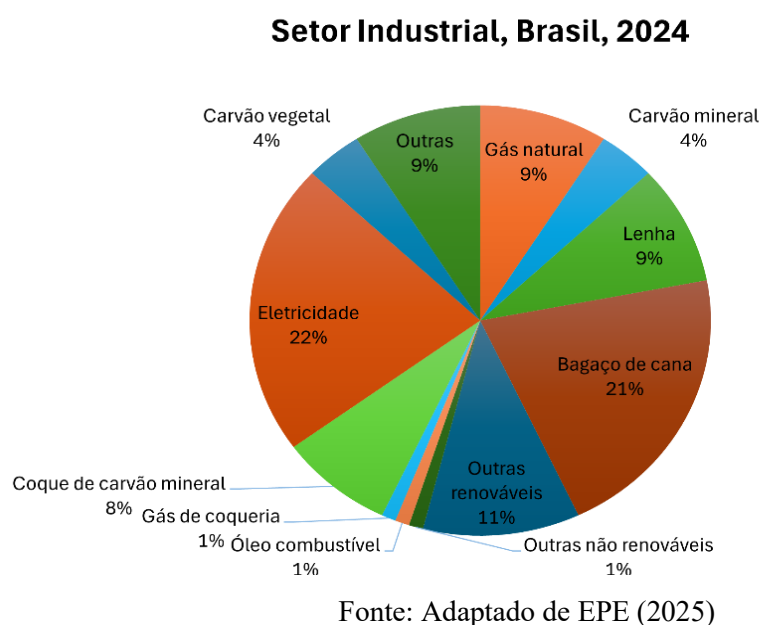
SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	19
2.1. GERAL	19
2.2. ESPECÍFICOS	19
3. REVISÃO TEÓRICA	20
3.1. PROCESSO BAYER	20
3.2. CENTRO OPERACIONAL DE UTILIDADES (COU)	22
3.3. CALDEIRAS	23
3.4. CONCEITOS DE TERMODINÂMICA	27
3.4.1. A Primeira Lei da Termodinâmica e o Balanço de Energia	27
3.4.2. A Segunda Lei da Termodinâmica, Irreversibilidades e Eficiência Exergética	30
3.4.3. Exergia e Avaliação da Qualidade Energética	32
3.5. ANÁLISE TERMOECONÔMICA	34
4. METODOLOGIA	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
6. CONCLUSÃO	56
REFERÊNCIAS	57
ANEXO I	65

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda global por energia e o foco na sustentabilidade têm impulsionado a necessidade de otimizar processos industriais, especialmente em setores de alto consumo energético, como a indústria de produção de alumina (Ferreira, 2023). A Figura 1 ilustra as principais fontes de energia utilizadas na indústria no Brasil em 2024 (EPE, 2025). Em refinarias de alumina, que utilizam grandes quantidades de energia térmica e elétrica, a eficiência energética é considerada um fator preponderante para manter a competitividade e garantir a sustentabilidade do setor metalúrgico (Guinoa *et al.*, 2023).

Figura 1. Consumo de energia nas indústrias por tipo de fontes no Brasil em 2024

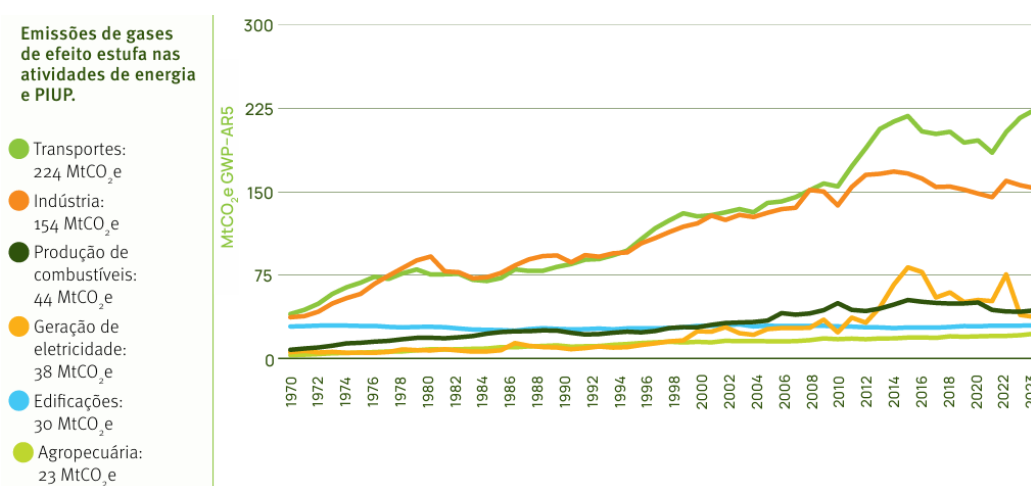


Diante da relevância da eficiência energética na indústria de alumina, torna-se igualmente importante considerar os impactos ambientais associados ao consumo energético. Neste contexto, as emissões de dióxido de carbono (CO_2) no setor de energia decorrem da queima de combustíveis fósseis em atividades que demandam força ou calor, como transporte, indústria e geração elétrica (Tsai *et al.*, 2024). É notório afirmar que as diferentes indústrias também emitem gases poluentes ao produzir energia, mas há outras fontes: processos físico-químicos e o uso de produtos, como na produção de aço, cimento

ou na transformação da bauxita em alumínio, alocados no setor de Processos Industriais e Uso de Produtos (PIUP) (Tsai *et al.*, 2024).

Conforme a Figura 2, somando os setores de energia e PIUP, a indústria apresentou uma queda de 2,6 milhões de toneladas de CO_2 em 2023 comparado a 2022 — uma redução de 2,00%. Os setores de transporte, indústria e produtores de combustíveis foram responsáveis por, aproximadamente, 82,00% das emissões de CO_2 em 2023, de acordo com o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) (Tsai *et al.*, 2024). Isto posto, a conversão de energia causa danos ambientais e esgota recursos, exigindo uma análise completa da eficiência termodinâmica, custos e impactos ambientais (Faria *et al.*, 2022).

Figura 2. Emissões de CO_2 por segmento empresarial no Brasil de 1970 a 2023



Fonte: Adaptado de Tsai *et al.* (2024)

Neste contexto, a termoeconomia, que combina economia e termodinâmica, destaca a exergia como a grandeza mais adequada para avaliar custos e impactos socioambientais. A análise exergoambiental, que incorpora princípios de exergoeconomia é aplicada para avaliar os impactos ambientais e a sustentabilidade dos processos de termoconversão de energia (Ferreira, 2023).

A exergia, definida como a capacidade máxima de realização de trabalho por um sistema, mediante um processo reversível, até que se alcance o equilíbrio com o meio, é considerada a forma mais racional de distribuir custos em sistemas energéticos, refletindo diretamente o valor econômico de um fluxo energético (Oliveira; Scalón; Modolo, 2020). Em sistemas complexos, é necessário implementar uma contabilidade de custos de

exergia, além da análise básica, considerando os recursos reais de exergia primária disponíveis para avaliar o impacto e a sustentabilidade do sistema de produção. Esta abordagem permite identificar perdas energéticas, avaliar a viabilidade econômica de tecnologias alternativas e otimizar o uso dos recursos disponíveis (Casisi; Khedr; Reini, 2022).

Para isto, neste estudo, serão explorados conceitos fundamentais de termodinâmica e exergia, juntamente com metodologias de análise econômica aplicadas a sistemas energéticos. A pesquisa analisará a geração de vapor em caldeiras, com ênfase na avaliação do desempenho e importância deste processo para a maximização da eficiência energética no contexto industrial, no qual serão identificadas as oportunidades de aprimoramento, aumentar a eficiência e promover um processo produtivo mais sustentável e economicamente viável.

A análise termoeconômica proposta neste estudo fornecerá percepções valiosas não apenas para a refinaria de alumina, mas também contribuirá para a literatura técnica, apresentando um modelo matemático aplicável à outras instalações industriais similares. Os resultados serão utilizados para incentivar a adoção de práticas mais eficientes e sustentáveis na produção de alumina, em conformidade com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (ONU, 2018).

A pesquisa está alinhada a quatro dos 17 ODS:

- **ODS 7:** Energia acessível e limpa;
- **ODS 9:** Indústria, inovação e infraestrutura;
- **ODS 12:** Consumo e produção responsáveis;
- **ODS 13:** Ação contra a mudança global do clima.

Portanto, a otimização do uso de recursos energéticos (ODS 7), o aumento da eficiência e a mitigação dos impactos socioambientais (ODS 9), a redução de custos e do consumo de recursos naturais (ODS 12), e a diminuição do impacto de carbono da refinaria (ODS 13) são elementos que respondem às demandas atuais por sustentabilidade industrial e práticas alinhadas aos objetivos globais.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Realizar uma análise termoeconômica da geração de vapor da caldeira de leito fluidizado circulante (LFC) em uma refinaria de alumina, visando identificar oportunidades de melhoria na eficiência energética e redução de custos operacionais.

2.2 ESPECÍFICOS

- a) Mapeamento e caracterização da caldeira:
 - i) identificar e analisar as características técnicas e operacionais da caldeira;
- b) Avaliação da eficiência energética:
 - i) determinar a eficiência da caldeira;
 - ii) calcular a exergia associada ao processo de geração de vapor e identificar os principais fatores que conduzem as irreversibilidades.
- c) Análise dos custos operacionais:
 - i) estimar os custos operacionais, incluindo consumo de combustível;
 - ii) avaliar o impacto das ineficiências energéticas nos custos totais de produção.
- d) Desenvolvimento de um modelo matemático para cálculo termoeconômico:
 - i) Criar um modelo termoeconômico para avaliar continuamente a performance energética e econômica da caldeira.
- e) Contribuição para a sustentabilidade e competitividade.

3 REVISÃO TEÓRICA

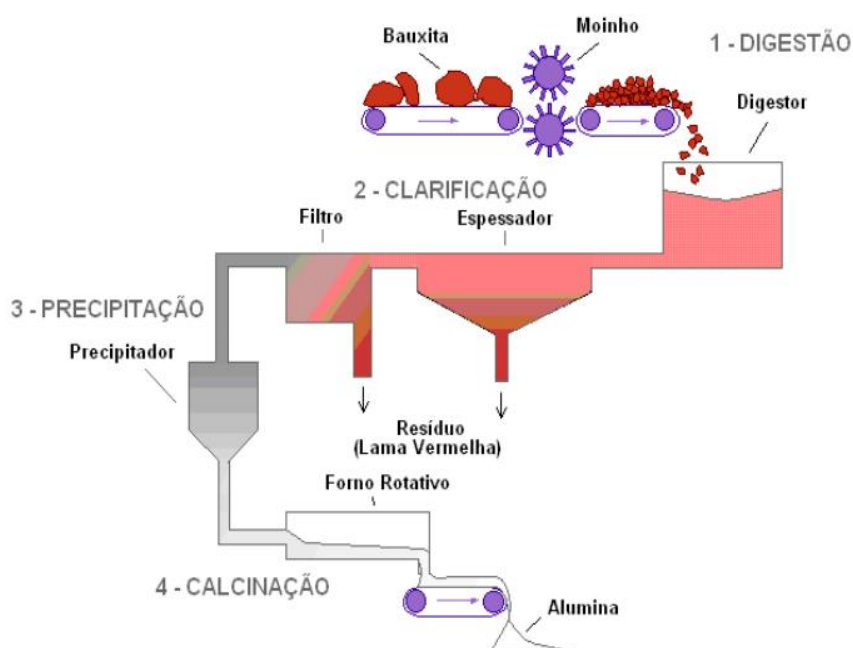
3.1 PROCESSO BAYER

O Brasil ocupa posições significativas na produção global de alumínio, sendo o 12º (décimo segundo) maior produtor de alumínio primário, 4º (quarto) de bauxita e 3º (terceiro) de alumina. Esta última é obtida por meio do processo Bayer, que envolve a dissolução dos hidróxidos de alumínio presentes na bauxita utilizando uma solução alcalina de hidróxido de sódio (NaOH), sob condições controladas de temperatura a 150,00 °C e pressão a 1,00 MPa (Babisk *et al.*, 2023).

Historicamente, o processo Bayer substituiu o método *Le Chatelier* por ser mais eficiente e econômico na produção de alumina (Al_2O_3). O método anterior, desenvolvido por *Louis Le Chatelier*, utilizava o carbonato de sódio (Na_2CO_3) e altas temperaturas (1200,00 °C), enquanto o processo Bayer, ainda em uso, simplificou a produção ao introduzir NaOH e aplicar pressão constante durante a digestão (Silva Filho *et al.*, 2007).

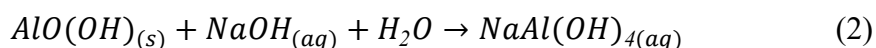
O procedimento Bayer pode ser dividido em várias etapas principais: digestão, clarificação, precipitação e calcinação, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3. Fluxograma representativo e esquema do processo Bayer para a produção de alumina



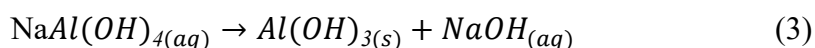
Fonte: Retirado de Silva Filho *et al.* (2007)

No processo de digestão, a bauxita é triturada e misturada com NaOH sob condições específicas para dissolver os compostos de alumínio, formando um licor verde (este nome é dado devido à coloração ligeiramente esverdeada que o licor pode adquirir, dependendo das impurezas presentes no minério de bauxita) (Silva Filho *et al.*, 2007), conforme apresentadas nas Equações 1 e 2.

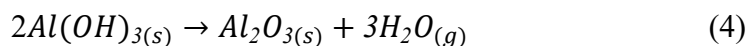


A clarificação separa as fases sólida e líquida por meio da combinação de duas técnicas: espessamento seguido de filtração. Os resíduos gerados na etapa de digestão passam por tanques conhecidos como espessadores ou lavadores, que operam em circuito de decantação contracorrente. Esta etapa tem como finalidade concentrar os resíduos de bauxita, maximizando a recuperação de NaOH e fornecer um fluxo (*overflow*) com baixa concentração de sólidos para a etapa seguinte – a filtração (Gois; Lima; Melo, 2003).

Posteriormente, na precipitação, o licor verde é resfriado e cristais de alumina são adicionados para estimular a formação de novos cristais, em um processo oposto à digestão (Silva Filho *et al.*, 2007), o qual é descrito pela Equação 3.



Os cristais de alumina formados são direcionados para a etapa de calcinação. Nesta etapa final, a alumina é purificada e seca a cerca de 1000,00 °C, resultando em cristais puros e brancos, o que pode ser observado por meio da Equação 4, prontos para uso industrial (Silva Filho *et al.*, 2007).



A operacionalização eficaz e segura do processo Bayer está intrinsecamente vinculada à disponibilidade contínua dos insumos e serviços providos pelo Centro Operacional de Utilidades (COU), os quais desempenham papel essencial na manutenção

das condições técnico-operacionais requeridas ao longo das distintas fases da produção de alumina.

3.2 CENTRO OPERACIONAL DE UTILIDADES (COU)

O Centro Operacional de Utilidades (COU) em uma refinaria é uma instalação essencial responsável por fornecer os serviços e recursos necessários para o funcionamento contínuo e eficiente da planta (Oliveira, 2022), como demonstrado na Figura 4.

Figura 4. Principais insumos fornecidos pelo setor de Utilidades de uma refinaria



Fonte: Elaborada pela Autora (2025)

Conforme Rocha (2018), os principais produtos que são fornecidos aos clientes são:

- **Água tratada ou potável:** fornecida pela Estação de Tratamento de Água (ETA);
- **Ar comprimido:** produzido por quatro compressores, utilizado em serviços e instrumentação na refinaria;
- **Vapor:** produzido por cinco caldeiras, utilizado na produção de alumina e fornecido para toda a refinaria;
- **Energia elétrica:** gerada por dois turbogeradores que utilizam vapor das caldeiras e parte do vapor é usado em cogeração;

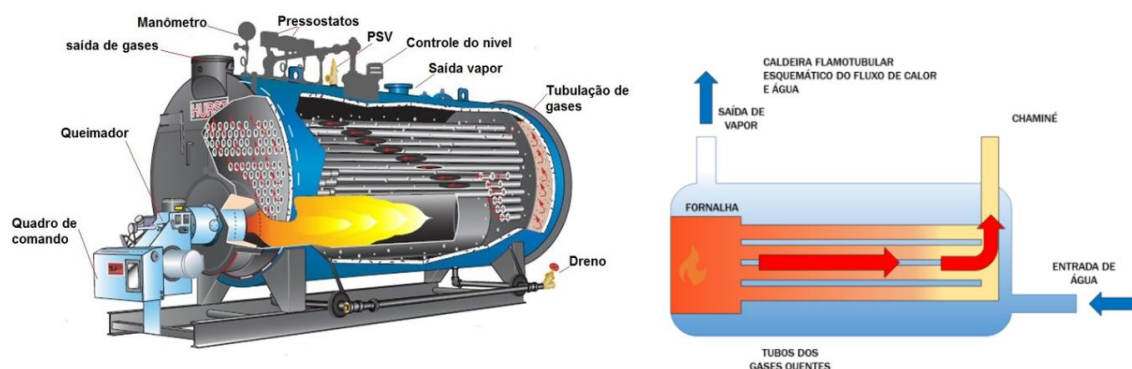
- **Tratamento de esgoto:** realizado pela Estação de Tratamento de Efluentes (ETE).

3.3 CALDEIRAS

Conforme Cunha (2020), uma caldeira é o gerador de vapor mais utilizado, e composto basicamente por um trocador de calor que opera acima da pressão atmosférica, gerando vapor a partir da energia térmica de uma fonte específica, geralmente um combustível sólido (carvão mineral), líquido (diesel) ou gasoso (gás natural).

As caldeiras desempenham um papel essencial no funcionamento de refinarias, sendo responsáveis pela geração de vapor utilizado em diversos processos industriais. Existem diferentes tipos de caldeiras, cada uma projetada para atender a necessidades específicas de operação (IBP, 2020). Dentre os tipos mais comuns de caldeiras, destacam-se as de fogo flamotubulares, cujos gases quentes passam por tubos imersos em água, como demonstrado na Figura 5, e aquatubulares, cuja água circula por tubos aquecidos pelos gases de combustão (Xavier *et al.*, 2024), conforme evidenciado na Figura 6.

Figura 5. Arquitetura e esquemático do fluxo de calor e água de uma caldeira flamotubular



Fonte: Adaptado de Togawa (2020)

Figura 6. Arquitetura e esquemático do fluxo de calor e água de uma caldeira aquatubular

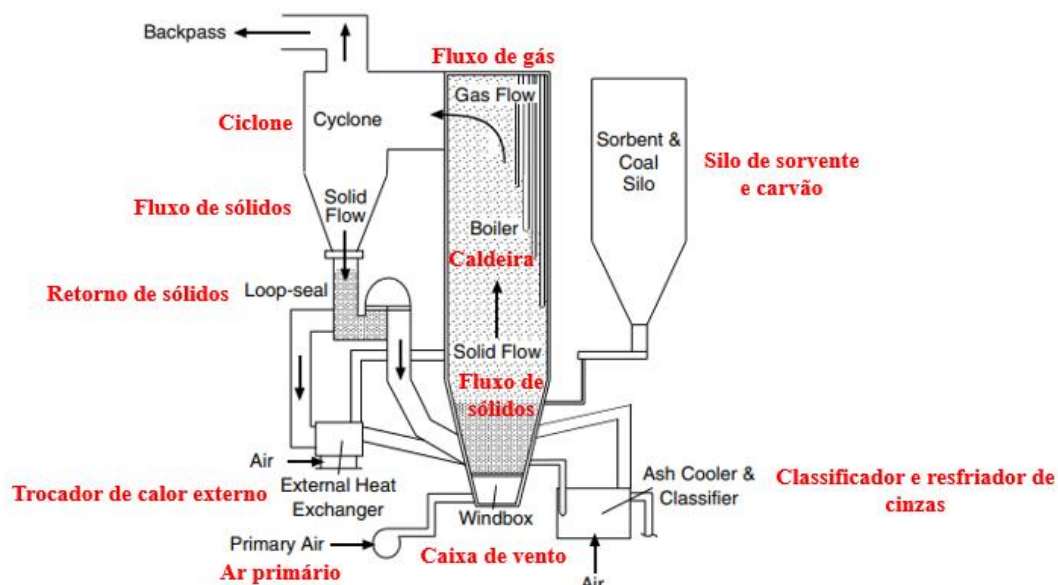


Fonte: Adaptado de Togawa (2020)

As caldeiras flamotubulares operam em baixas pressões, variando entre 4,00 e 19,00 kgf cm⁻², com capacidades de produção de vapor saturado que vão de algumas centenas de quilos até cerca de 10 t h⁻¹ (IBP, 2020). Por sua vez, as caldeiras aquatubulares são projetadas para operar em faixas de pressão mais elevadas, entre 20,00 e 400,00 kgf cm⁻², com vazões de vapor que variam de 10,00 a 1800 t h⁻¹. Nesta última, o vapor produzido pode ser saturado, embora, predominantemente, superaquecido, podendo atingir temperaturas superiores a 600,00 °C (IBP, 2020).

Além disso, as caldeiras de leito fluidizado circulante (LFC), como ilustrado na Figura 7, têm ganhado destaque devido à alta eficiência e capacidade desta de queimar combustíveis com baixo poder calorífico (6,00 a 18,00 MJ kg⁻¹), como os diferentes resíduos sólidos, biomassas e carvão mineral de baixa qualidade (Cunha, 2020).

Figura 7. Representação esquemática de uma caldeira de leito fluidizado circulante (LFC)



Fonte: Adaptado de Basu (2006)

Por meio da Figura 7, pode-se observar (Basu, 2006):

- Silo de sorvente e carvão (*sorbent and coal silo*): o carvão e sorvente (como calcário, que é usado para capturar os óxidos de enxofre, SO_x) são armazenados e preparados para serem introduzidos no sistema;
- Caldeira (*boiler*): é a câmara principal onde ocorre a combustão. O carvão e sorvente são introduzidos na caldeira, e o leito de material sólido é fluidizado pelo ar que entra pela base da caldeira. A combustão do carvão gera calor, que é transferido para o fluido de trabalho (geralmente água) para produzir vapor saturado ou superaquecido;
- Fluxo de sólidos (*solid flow*): os sólidos, como as cinzas e partículas não queimadas, são continuamente recirculados dentro do sistema. Este fluxo garante uma combustão mais completa e eficiente, além de manter a temperatura do leito constante;
- Fluxo de gases (*gas flow*): os gases quentes resultantes da combustão ascendem pela caldeira e, em seguida, passam por outras seções do sistema para transferência de calor e controle de emissões gasosas;

- Ciclone (cyclone): o ciclone separa as partículas sólidas dos gases de combustão. As partículas sólidas são coletadas e também recirculadas para o leito fluidizado, enquanto os gases de combustão seguem para os estágios subsequentes de tratamento;
- Retorno de sólidos por meio do *loop-seal*: após a separação no ciclone, os sólidos são recirculados de volta para a caldeira por meio de um dispositivo conhecido como *loop-seal*, que permite o retorno dos sólidos enquanto mantém a separação das diferentes pressões do sistema;
- Trocador de calor externo (*external heat exchanger*): em alguns projetos, uma parte do fluxo de sólidos pode ser direcionada para um trocador de calor externo para controle de temperatura (760,00 a 870,00 °C) (Blaszczuk; Jagodzick, 2021), cujo calor é transferido do material sólido para o fluido de trabalho (água/vapor) fora da caldeira principal;
- Caixa de vento (*windbox*): é a seção sob o leito fluidizado onde o ar primário é injetado. Este ar é responsável por fluidizar o leito e garantir a combustão eficiente do carvão;
- Ar primário (*primary air*): o ar primário é introduzido na base da caldeira para fluidizar o leito e apoiar a combustão. Este ar geralmente é pré-aquecido antes de ser injetado na caldeira;
- Classificador e resfriador de cinzas (*ash cooler and classifier*): este componente trata as cinzas geradas na combustão. As cinzas são resfriadas e classificadas antes de serem descartadas ou recicladas dentro do sistema;
- *Backpass*: esta é a seção onde os gases de combustão passam após a saída do ciclone. Neste dispositivo, os gases podem ser usados para aquecer mais fluidos de trabalho ou direcionados para sistemas de controle de emissões gasosas antes de serem diluídos e liberados para a atmosfera.

Em resumo, uma caldeira de leito fluidizado circulante (LFC) queima combustível em um regime de leito fluidizado rápido, cujo gás circula, removendo partículas sólidas do forno (Basu, 2006). Estes sólidos são capturados e recirculados para garantir a mistura e combustão eficiente. A caldeira LFC é composta por um *loop* LFC e uma passagem traseira com superfícies de troca térmica. O circuito inclui forno, separador gás-sólido, reciclagem de sólidos e, opcionalmente, um trocador de calor externo. O *design* desta

caldeira permite uma temperatura uniforme no leito e alta eficiência da ordem de 85,00 a 90,00%, com vantagens como flexibilidade de combustível e menores emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) (Basu, 2006).

A confiabilidade e eficiência das caldeiras impactam diretamente na produtividade e segurança das operações industriais. Por isso, é fundamental monitorar constantemente parâmetros, por exemplo, temperatura, pressão e fluxo de água e vapor, além de garantir a manutenção regular dos sistemas de combustão e transferência de calor e massa (IMTAB, 2024).

3.4 PRINCIPAIS CONCEITOS TERMODINÂMICOS

3.4.1 A Primeira Lei da Termodinâmica e o Balanço de Energia

A análise energética de sistemas térmicos é fundamentada na Primeira Lei da Termodinâmica, que estabelece o balanço de energia como a base para avaliação da eficiência de processos industriais. Esta equação é expressa em termos de variação temporal para representar os efeitos transientes e, posteriormente, integrada ao longo do tempo para determinar alterações finitas (Borgnakke; Sonntag, 2018).

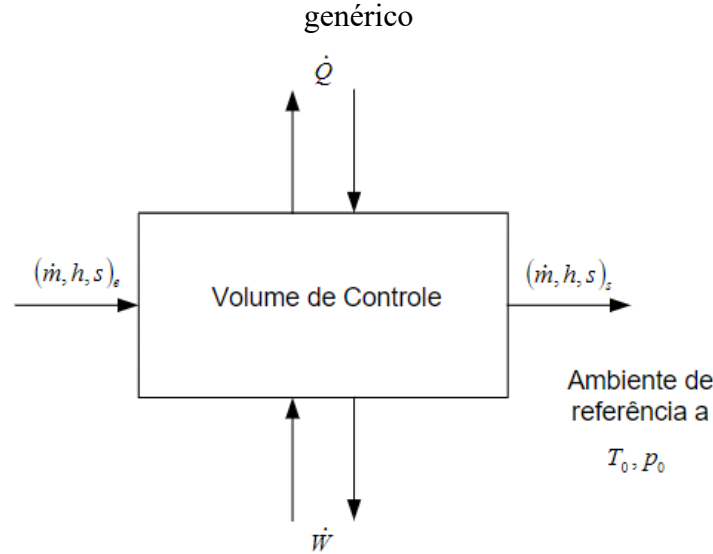
A Equação 5 é normalmente chamada de Conservação de massa ou da Continuidade e descreve a taxa de mudança da massa total com base nos fluxos de massa que entram ($\dot{m}_e$) e saem ($\dot{m}_s$) de um volume de controle (Borgnakke; Sonntag, 2018).

$$\frac{dm_{v.c.}}{dt} = \Sigma \dot{m}_e - \Sigma \dot{m}_s \quad (5)$$

Assim como a massa, a energia possui características conservativas, permitindo uma análise energética que contabiliza os fluxos energéticos e quantifica a eficiência dos processos de conversão termoquímica (Moran *et al.*, 2013). Além disso, massa não pode ser criada ou destruída. Na análise energética de um volume de controle, a taxa de variação das formas de energia deve igualar

a taxa de energia líquida transferida por meio de calor, trabalho e massa (Ferreira, 2023).

Figura 8. Representação para balanço de massa e energia de um volume de controle



Fonte: Retirado de Oliveira, Scalon e Modolo (2020)

A equação de balanço de energia para um volume de controle em regime permanente (Equação 6), conforme Figura 8, afirma que a taxa de variação das formas de energia dentro do volume deve ser zero, avaliando todas as entradas e saídas (Ferreira, 2023).

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_s \dot{m}_{sai} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum_e \dot{m}_e \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (6)$$

Do mesmo modo, a Primeira Lei da Termodinâmica não distingue entre as diversas formas de energia e permite a conversão teórica de uma forma de energia em outra. No entanto, nos processos reais, isto não ocorre devido às direções obrigatórias nos processos. Especificamente, não é possível converter calor completamente em trabalho sem transferir parte deste calor para outro corpo ou para o ambiente (Ferreira, 2023).

Para caldeiras industriais, a aplicação prática da Primeira Lei da Termodinâmica permite calcular o aproveitamento da energia do combustível e ar

de combustão para a geração de vapor (Çengel; Boles, 2013). O balanço considera alguns aspectos, por exemplo:

- O calor fornecido pela queima do combustível;
- A energia utilizada para aquecimento do ar;
- A energia absorvida pela água para conversão em vapor.

O calor necessário para o aquecimento do ar, de combustão (Q_{ar}), em kW, é obtido pela Equação 7:

$$Q_{ar} = \dot{m}_{ar} \cdot c_p \cdot (T_{combustão} - T_{entrada}) \quad (7)$$

sendo:

$\dot{m}_{ar}$: vazão mássica de ar de combustão (kg s^{-1});

c_p : calor específico do ar a pressão constante ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$);

$T_{combustão}$: temperatura de combustão ($^{\circ}\text{C}$ ou K);

$T_{entrada}$: temperatura do ar na entrada do sistema ($^{\circ}\text{C}$ ou K).

A energia liberada pela combustão (Q_{comb}), em kW, é expressa pela Equação 8:

$$Q_{comb} = \dot{m}_{carvão} \cdot PCI \quad (8)$$

consistindo na vazão mássica de carvão $\dot{m}_{carvão}$, em kg s^{-1} , e o poder calorífico inferior (PCI) do carvão em kJ kg^{-1} .

Sendo o calor total fornecido ao sistema (Q_{total}) por meio da Equação 9:

$$Q_{total} = Q_{comb} + Q_{ar} \quad (9)$$

A energia útil ($Q_{útil}$) gerada no processo de vaporização é dada pela Equação 10:

$$Q_{útil} = \dot{m}_{vapor} \cdot (h_{vapor} - h_{água}) \quad (10)$$

obtida a partir da vazão mássica de vapor gerado ($\dot{m}_{vapor}$) e entalpias específicas do vapor gerado e água de alimentação (h_{vapor} e $h_{água}$).

E a eficiência térmica ($\eta_{térmica}$) é dada pela razão entre as energias útil e total fornecida, como expressada pela Equação 11:

$$\eta_{térmica} = \frac{Q_{útil}}{Q_{total}} \cdot 100\% \quad (11)$$

Esta abordagem, conforme Moran *et al.* (2013), permite quantificar o desempenho térmico do sistema, sendo essencial para identificar oportunidades de otimização energética.

3.4.2 A Segunda Lei da Termodinâmica, Irreversibilidades e Eficiência Exergética

Enquanto, a Primeira Lei trata da quantidade de energia, a Segunda Lei da Termodinâmica aborda a qualidade da energia e inevitabilidade das irreversibilidades nos processos reais (Bejan, 2016).

A Segunda Lei da Termodinâmica, apresentada na Equação 12, complementa o balanço energético ao determinar o verdadeiro valor termodinâmico de um fluxo energético, destacando as ineficiências e perdas reais dos diferentes processos e sistemas térmicos (Fox; McDonald; Pritchard, 2010).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC}^0 s \rho dV + \int_{SC}^0 s \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \geq \int_{SC}^0 \frac{1}{T} \left(\frac{\dot{Q}}{A} \right) dA \quad (12)$$

Os termos reversível e irreversível são usados para descrever processos térmicos. Por exemplo, um processo dito reversível é uma idealização cujo sistema e a vizinhança destes podem retornar aos estados iniciais após o processo. Segundo Ferreira (2023), na prática, todos os processos reais são irreversíveis devido às perdas de energia causadas por condições pontuais, ou seja:

- Transferência de calor com uma diferença de temperatura finitesimal;
- Expansão de um gás ou líquido sem resistência até uma pressão menor;
- Reações químicas e misturas espontâneas de substâncias diferentes;

- Atrito entre fluido e superfícies (perdas de carga).

Qualquer diferença entre os trabalhos reversível (W_{rev}) e útil ($W_{útil}$) é devido às irreversibilidades presentes durante o processo, e essa diferença é chamada de irreversibilidade (I) (Çengel; Boles, 2013), conforme Equação 13.

$$I = W_{rev,sai} - W_{útil,sai} \text{ ou } I = W_{útil,entra} - W_{rev,entra} \quad (13)$$

A irreversibilidade, equivalente à exergia destruída, também pode ser quantificada pelo teorema de *Gouy-Stodola*, que relaciona a temperatura de referência do sistema e geração de entropia (Ferreira, 2023).

Considerando a Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica para sistemas abertos, a potência máxima transferida $\dot{W}_{máx}$ é definida pela Equação 14 (Lucia, 2012):

$$\begin{aligned} \dot{W}_{máx} = & \sum_{entra} G_{entra} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz + T_a s \right)_{entra} \\ & - \sum_{sai} G_{sai} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz + T_a s \right)_{sai} - \frac{d}{dt} (E - T_a \dot{S}) \end{aligned} \quad (14)$$

onde h é a entalpia específica, v é a velocidade, g é a constante da gravidade, z é a altura, T_a é a temperatura ambiente, G é o fluxo de massa e E é a energia do sistema instantânea integrada sobre o volume de controle.

A potência efetiva transferida $\dot{W}$ resulta na Equação 15 (Lucia, 2012):

$$\begin{aligned} \dot{W} = & \sum_{entra} G_{entra} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz + T_a s \right)_{entra} - \sum_{sai} G_{sai} \left(h + \right. \\ & \left. \frac{v^2}{2} + gz + T_a s \right)_{sai} - \frac{d}{dt} (E - T_a \dot{S}) - T_a \dot{S}_g \end{aligned} \quad (15)$$

onde $\dot{S}_g$ é a taxa de geração de entropia.

Considerando a definição de potência perdida por irreversibilidade, $\dot{W}_\lambda$, partindo da Equação 16 (Lucia, 2012):

$$\dot{W}_\lambda = T_a \dot{S}_g \quad (16)$$

Ao integrar a potência perdida por irreversibilidade ($\dot{W}_\lambda$) ao longo do intervalo de tempo correspondente à vida do processo, obtém-se a formulação do teorema de *Gouy-Stodola* conforme apresentada na Equação 17 (Lucia, 2012).

$$W_\lambda = \int_0^\tau dt \dot{W}_\lambda = T_a \int_0^\tau dt \dot{S}_g = T_a S_g \quad (17)$$

Portanto, diferentes formas de energia possuem qualidades distintas, influenciando a capacidade de conversão destas em outras formas viáveis de energia (Ferreira, 2023), sendo uma quantidade positiva para todos os processos reais (irreversíveis), pois $W_{rev} \geq W_u$ para dispositivos que produzem trabalho e $W_{rev} \leq W_u$ para dispositivos que consomem trabalho (Çengel; Boles, 2013).

3.4.3 Exergia e Avaliação da Qualidade Energética

A exergia, relacionada à Segunda Lei da Termodinâmica, quantifica o trabalho máximo que pode ser obtido de um sistema ou fluxo de energia, considerando as interações destes com o ambiente (Moran *et al.*, 2013). Casisi, Khedr e Reini (2022) ressaltaram que, em sistemas energéticos com temperaturas distintas do ambiente, a exergia mede a degradação da energia e redução da capacidade desta em gerar trabalho útil. Parte da exergia é perdida ou destruída de forma irreversível em processos reais, sendo identificada por uma análise exérgica. Esta análise é fundamental para avaliar a qualidade dos fluxos de energia e otimizar processos de conversão (Tuna, 2019).

Na análise de volume de controle, consideram-se três tipos de transferência de energia pela superfície de controle:

- I. Realização de trabalho;
- II. Transferência de calor;

III. Transferência de energia associada à transferência de massa.

Na análise exérgica, emprega-se um balanço exérgico apropriado que considera estas formas de transferência de energia. O trabalho equivalente de uma forma de energia é uma medida da referida exergia, e a exergia pode ser especificada pela realização de trabalho correspondente (Tuna, 2019).

A exergia de uma transferência de calor em uma superfície de controle é determinada pelo trabalho máximo que poderia ser obtido usando o ambiente como reservatório térmico nulo. Este reservatório é como um sumidouro infinito de calor, com a menor temperatura possível (zero absoluto) (Moran *et al.*, 2013). Para uma taxa de transferência de calor ($\dot{Q}$) e uma temperatura na superfície de controle (T), a taxa máxima de conversão de energia térmica em trabalho é definida (Tuna, 2019), por meio da Equação 18.

$$\dot{W}_{MAX} = \dot{E}^Q = \dot{Q} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (18)$$

O termo entre parênteses é chamado de temperatura exérgica adimensional ($1 - \frac{T_0}{T}$). A exergia associada a uma taxa de transferência de calor é chamada de fluxo exérgico térmico, denotado por $\dot{E}^Q$ na análise de um sistema aberto (Tuna, 2019).

A exergia de um fluxo de matéria é a quantidade máxima de trabalho possível quando o fluxo é levado do estado inicial ao estado morto deste, interagindo apenas com o ambiente. Portanto, a exergia de um fluxo de matéria é uma propriedade que depende de dois estados: fluxo e ambiente (Tuna, 2019).

Para as caldeiras, a exergia específica do vapor é calculada pela Equação 19:

$$e_{vapor} = (h_{vapor} - h_0) - T_0 \cdot (s_{vapor} - s_0) \quad (19)$$

sendo h_0 , s_0 e T_0 os valores ambientais de referência.

Multiplicando-se pela vazão mássica, obtém-se a exergia total do vapor, dada pela Equação 20:

$$E_{vapor} = \dot{m}_{vapor} \cdot e_{vapor} \quad (20)$$

Segundo Tuna (2019), uma outra abordagem para avaliar a eficiência exergética de um processo térmico é considerada por meio da Segunda Lei da Termodinâmica. Esta é a razão entre as exergias produzida ou transferida por um fluxo e a consumida, representada pela letra ε . Para uma turbina, por exemplo, pode-se considerar a exergia partir da Equação 21:

$$\varepsilon = \frac{\text{exergia produzida pelo fluxo}}{\text{exergia fornecida pelo fluxo}} \quad (21)$$

Caso for necessário cálculos envolvendo compressores e bombas, esta exergia pode ser calculada pela Equação 22:

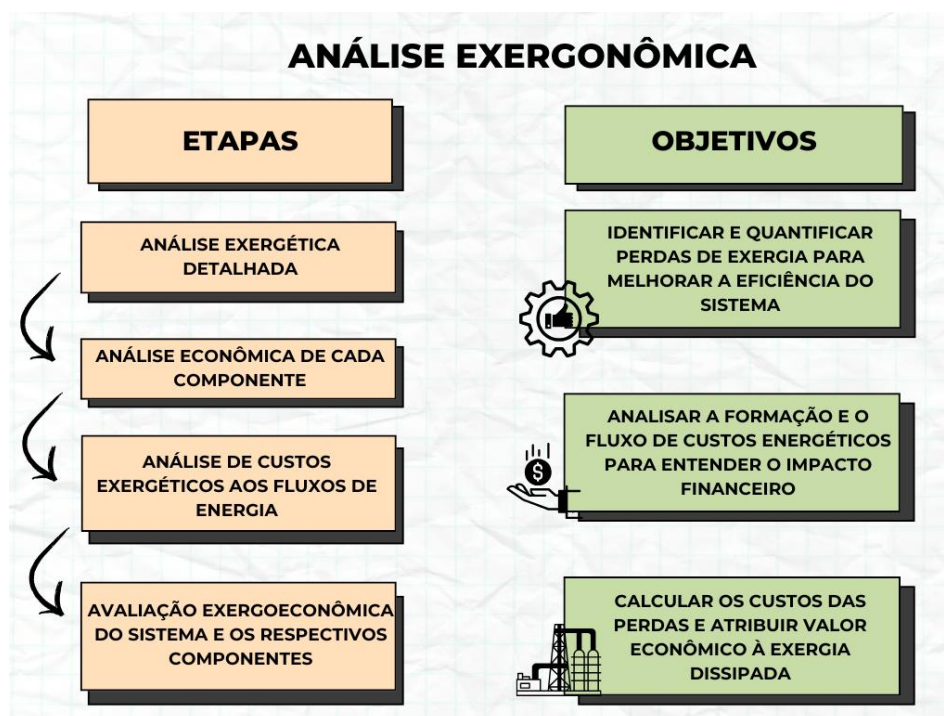
$$\varepsilon = \frac{\text{exergia adicionada ao fluxo}}{\text{exergia fornecida para o fluxo}} \quad (22)$$

3.5 ANÁLISE TERMOECONÔMICA

Conforme Tuna (2019), a exergoeconomia combina análises exergética e econômica para otimizar sistemas de energia, focando na redução de ineficiências e no ajuste ideal de custos por componente. Diferente das análises convencionais, esta avalia as perdas termodinâmicas e os impactos destas nos custos finais, permitindo projetar sistemas mais econômicos. Em sistemas com múltiplos produtos, como a cogeração, essa abordagem define custos individuais de produção (como geração de eletricidade, ar comprimido e vapor, por exemplo), auxiliando na alocação correta de despesas e no uso eficiente de recursos.

A Figura 9 ilustra de forma esquemática as principais etapas e objetivos da análise exergoeconômica, uma metodologia que combina os conceitos de exergia e economia para avaliar o desempenho de sistemas energéticos (Tuna, 2019).

Figura 9. Esquemático da análise exergoeconômica: etapas e finalidades



Fonte: Adaptado de Tuna (2019)

Segundo Oliveira, Scalon e Modolo (2020), a exergia permite atribuir custos a produtos de sistemas térmicos, incluindo combustível, insumos e despesas operacionais. Este parâmetro mostra-se essencial em instalações que fornecem utilidades como energia elétrica, vapor e água resfriada, garantindo que os custos sejam corretamente calculados e cobrados. Dados confiáveis e análise detalhada são fundamentais para uma gestão econômica eficiente.

Pode-se escrever uma equação de balanço de taxa de custo apresentada na Equação 23:

$$\dot{C}_s + \dot{C}_w = \dot{C}_Q + \dot{C}_e + \dot{Z} \quad (23)$$

$\dot{C}$ representa a taxa de custo da corrente (por exemplo, em US\$/hora), enquanto $(\dot{Z})$ considera a taxa de custo relacionada à aquisição e operação do equipamento em análise (Oliveira, Scalon e Modolo, 2020).

A exergia, ao medir os valores termodinâmicos reais de calor, trabalho e interações com o ambiente, além das irreversibilidades do sistema, fornece uma base racional para estimar custos. O custo da exergia avalia cada taxa de custo em termos de

uma taxa de transferência de exergia e um custo unitário (Oliveira, Scalon e Modolo, 2020). Portanto, cada termo de custo pode ser estimado conforme a Equação 24:

$$\dot{C} = c\dot{A} \quad (24)$$

no qual c denota o custo unitário por unidade de exergia (em US\$ ou centavos por kWh, por exemplo) e $\dot{A}$ é a taxa de transferência de exergia associada. Destarte, utilizando os conceitos apresentados e utilizando as definições das taxas de exergia, obtém-se a Equação 25:

$$c_s \sum \dot{m}_s a_s - c_e \sum \dot{m}_e a_e = c_{\dot{Q}} \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \dot{Q} - c_{\dot{W}} \dot{W} + \dot{Z} \quad (25)$$

A Equação 25 pode ser aplicada a todos os componentes de um sistema térmico, cujas incógnitas são os custos unitários por unidade de exergia de cada fluxo. Porém, se um equipamento tiver mais de um fluxo de saída, o número de equações será menor que o de incógnitas, necessitando, por exemplo, a introdução de equações auxiliares (Oliveira, Scalon e Modolo, 2020). Quando há dois fluxos de saída, como em uma turbina, é preciso adicionar uma equação para determinar os custos. Diversos métodos de partição de custos foram propostos para resolver essa questão (Oliveira, Scalon e Modolo, 2020).

- a) Método da igualdade: todos os produtos têm o mesmo custo por unidade de exergia e é definida pela Equação 26.

$$c_s = c_{\dot{W}} \quad (26)$$

- b) Método da extração: os custos dos equipamentos do volume de controle são descarregados em um único fluxo, de acordo com a Equação 27.

$$c_s = c_e \quad (27)$$

- c) Método do sub-produto: define-se um custo para um dos produtos, por meio da Equação 28.

$$\dot{C}_d = c_d \dot{A}_d \quad (28)$$

Segundo Oliveira, Scalón e Modolo (2020), a avaliação exergoeconômica de um sistema visa identificar ações para reduzir os custos operacionais, utilizando seis regras baseadas em variáveis específicas.

- I. Eficiência exergética (ε);
- II. Taxa de exergia destruída ($\dot{A}_d$);
- III. Custos de capital, referentes à aquisição, manutenção e operação dos equipamentos;
- IV. Custo da exergia destruída;
- V. Diferença relativa de custo (r), definida pela Equação 29:

$$r = \frac{c_s - c_e}{c_e} = \frac{\dot{Z}}{c_e \dot{A}_{f,s}} + \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \quad (29)$$

- VI. Fator exergoeconômico (f), determinado pela Equação 30:

$$f = \frac{\dot{Z}}{\dot{Z} + c_d \dot{A}_d} \quad (30)$$

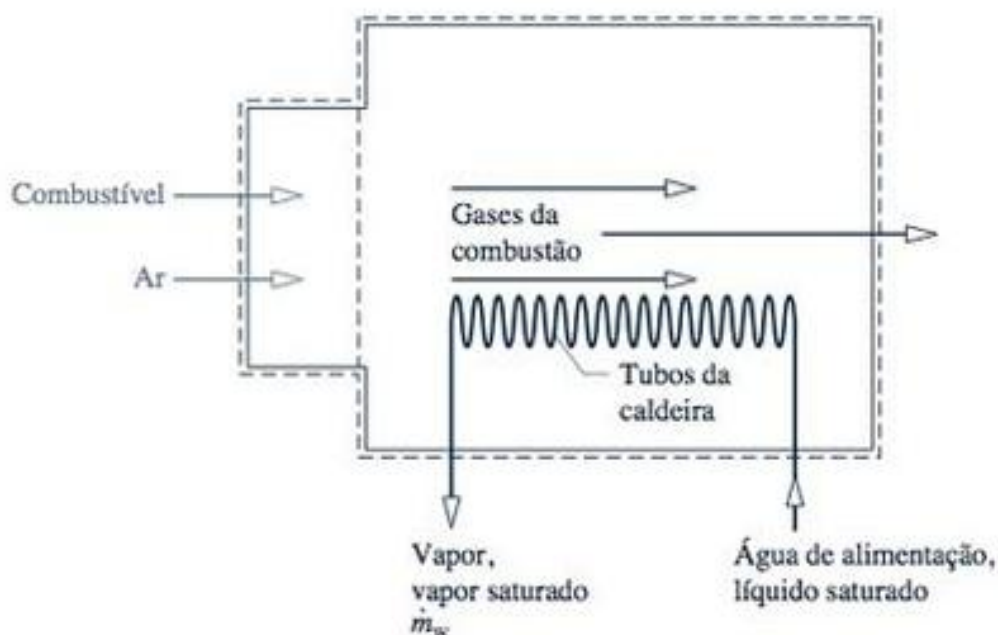
Consequentemente, na Termoeconomia, o levantamento de custos de aquisição, operação e manutenção dos equipamentos, além dos custos de combustível, é uma etapa importante de projetos de Engenharia Térmica. As variáveis principais incluem: custos e tempo para aquisição, instalação e manutenção; taxas de inflação; escalonamento do investimento; fontes de financiamento e as respectivas taxas de retorno; taxa de juros e receitas provenientes da venda dos produtos do sistema (Oliveira; Scalón; Modolo, 2020).

4 METODOLOGIA

Com as obras de expansão da refinaria, implantou-se um sistema de cogeração que elevou a produção de vapor e aumentou a confiabilidade do sistema elétrico, reduzindo significativamente a dependência desta das Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A (Eletronorte). O referido sistema é composto por duas caldeiras de alta pressão (8,0 MPa) e dois turbogeradores, oferecendo autonomia energética estimada em cerca de 60,0 MW de potência útil (Rocha, 2018).

Atualmente, a refinaria, situada na capital maranhense, opera com cinco caldeiras a carvão mineral para suprir a demanda de vapor, sendo duas do tipo Leito Fluidizado Circulante (LFC), fabricadas pela *Foster Wheeler*, e três caldeiras de grelha da *Babcock & Wilcox*. Porém, este estudo concentra-se na análise termoeconômica de uma caldeira LFC em operação, que utiliza carvão betuminoso de alta volatilidade de origem colombiano como combustível principal e funciona com circulação natural de água em câmaras de combustão atmosféricas, conforme ilustrado pela Figura 10 (Wheeler, 2006).

Figura 10. Esquemático ilustrativo da operação de uma caldeira de leito fluidizado circulante (LFC)

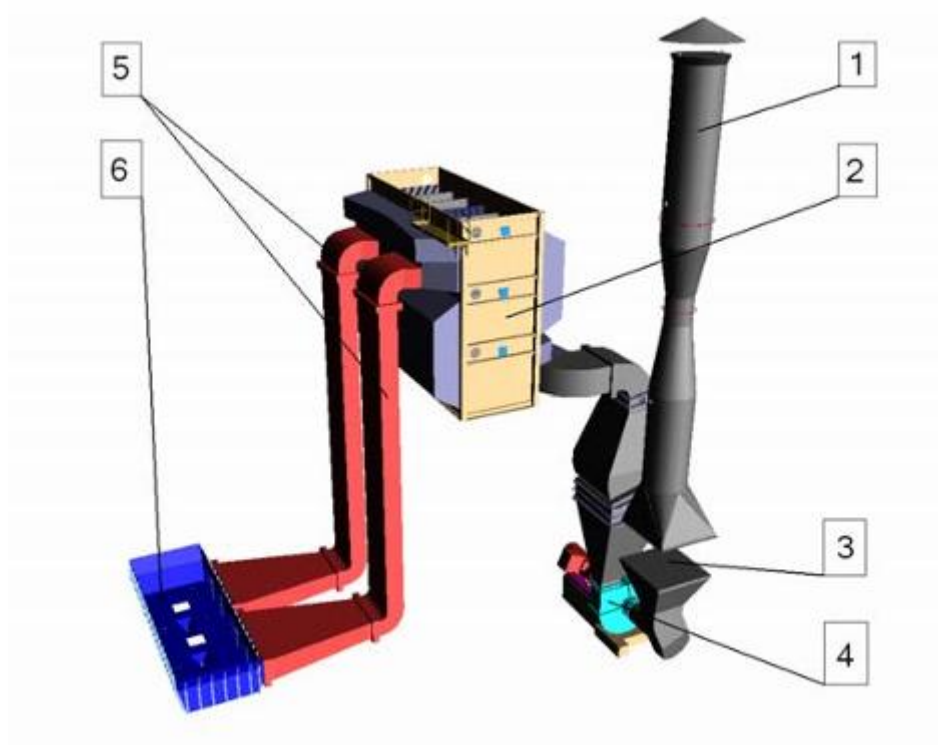


Fonte: Retirado de Moran *et al.* (2013)

Os principais componentes da caldeira LFC, descritos por Wheeler (2006), são:

- **Duto primário:** composto por uma câmara de combustão com dois separadores integrados, ambos resfriados a água, conforme mostrado na Figura 11;

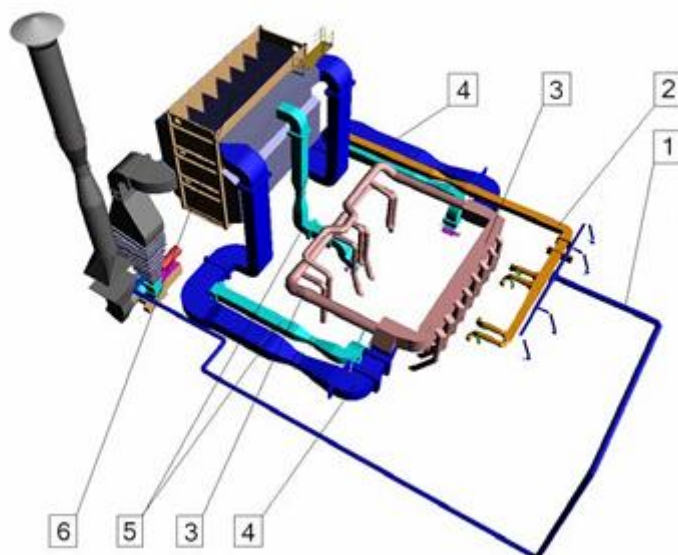
Figura 11. Duto do ar primário da caldeira LFC (vista direita): 1 - duto de sucção do pré-aquecedor; 2 - superaquecedor tubular de passagem do ar; 3 – aquecedor de condensado de água; 4 - ventilador de ar primário; 5 - dutos de ar primário; 6 - caixa de vento



Fonte: Retirado de Wheeler (2006)

- **Duto de passagem:** também resfriado a água, conecta os dutos primário e secundário;
- **Duto secundário:** constituído por uma caixa de convecção contendo economizador, superaquecedores e pré-aquecedores de ar, representado na Figura 12.

Figura 12. Duto do ar secundário da caldeira LFC (vista esquerda): 1 - ar frio para os transportadores de combustível; 2 - ar quente para a alimentação de combustível (tubo de ar); 3 - ar quente para bocais de ar secundário; 4 - ar quente para os dutos esquerdo e direito; 5 - ar quente para os queimadores; 6 - pré-aquecedor tubular de passagem de ar



Fonte: Retirado de Wheeler (2006)

Os parâmetros técnicos da caldeira foram organizados para fundamentar a análise, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros técnicos da caldeira LFC da marca *Foster Wheeler*

Parâmetros	Dados
Profundidade da câmara de combustão	6,29 m
Largura da câmara de combustão	10,69 m
Altura (total) da câmara de combustão	31,00 m
Volume da câmara de combustão	2084,00 m ³
Produção de vapor superaquecido (nominal)	280,00 t h ⁻¹
Temperatura de saída de vapor	480,00 °C
Pressão de vapor superaquecido na caldeira	8,10 MPa

Pressão de água de alimentação com 100% da capacidade máxima contínua projetada	9,72 MPa
Temperatura de água de alimentação com 100% da capacidade máxima contínua projetada	171,00 °C
Consumo contínuo máximo de óleo	7200 kg h ⁻¹
Água para resfriamento (capacidade nominal)	450,00 L min ⁻¹
Temperatura modelo de operação para caldeiras Foster Wheeler CFB	800,00-900,00 °C

Fonte: Adaptado de Wheeler (2006)

A Tabela 2 apresenta a composição do carvão mineral colombiano obtida por meio de análises elementar, imediata, composicional em base seca, expressa em percentual em massa (%-peso).

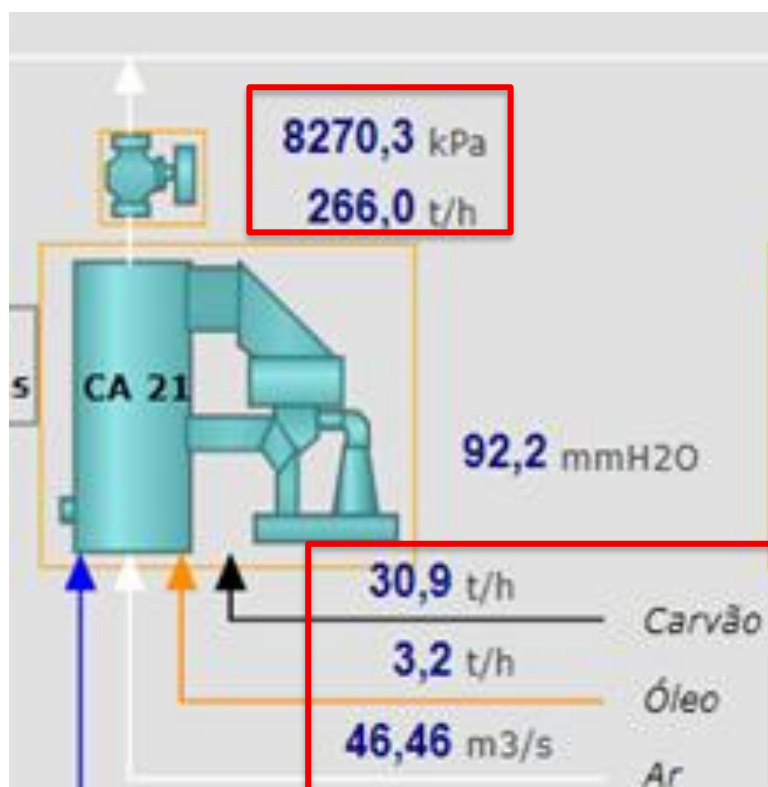
Tabela 2. Percentual em massa dos principais componentes físico-químicos do carvão betuminoso de origem colombiana em base seca

Composição	Unidades	Valores
Carbono, C	%	74,09
Hidrogênio, H	%	5,23
Oxigênio, O	%	9,01
Nitrogênio, N	%	1,48
Enxofre, S	%	0,83
Cinzas	%	9,36
Cloro, Cl	ppm	450,00
Flúor, F	ppm	100,00

Fonte: Adaptado de Wheeler (2006)

A coleta de dados foi realizada a partir da documentação técnica oficial da Foster Wheeler e do sistema *Honeywell Connected Plant*, que monitora em tempo real os processos e ativos da refinaria, conforme representado pela Figura 13. Ressalta-se que apenas a caldeira em estudo foi evidenciada por motivos de privacidade e confidencialidade industrial.

Figura 13. Vista simplificada do sistema de caldeira LFC por meio do *Connected Plant*



Fonte: Elaborado pela Autora (2025)

O *Honeywell Connected Plant* é uma plataforma digital que conecta ativos industriais e processos por meio de tecnologias como *machine learning*, análise de *big data*, sistemas de controle distribuído (DCS) e historiadores de processo. No caso desta planta, a versão utilizada é o *Uniformance PHD 2023*, que é um *software* proprietário, comercializado com licença profissional.

Por meio da Figura 13, é possível identificar os principais parâmetros acompanhados na operação da planta. Dentre os elementos mencionados na mesma, destaca-se a caldeira 21 (CA 21), cujos dados incluem pressão de operação, vazão de vapor e consumo de combustíveis (óleo, água e ar).

Para viabilizar a análise termoeconômica, os parâmetros operacionais previamente mencionados foram extraídos para o intervalo correspondente aos meses de janeiro a agosto de 2024. A extração foi conduzida por meio do sistema supervisorio *Connected Plant*, que viabiliza a seleção dos dados relevantes e exportação em formato de arquivo em Excel (.csv), permitindo o uso subsequente em ferramentas de processamento e avaliação técnica.

As variáveis termodinâmicas associadas ao processo de geração de vapor foram obtidas com base nos fundamentos teóricos estabelecidos por Çengel e Boles (2019), conforme sistematizado na Tabela 3.

Tabela 3. Propriedades termodinâmicas aplicadas à análise de produção de vapor em caldeira LFC

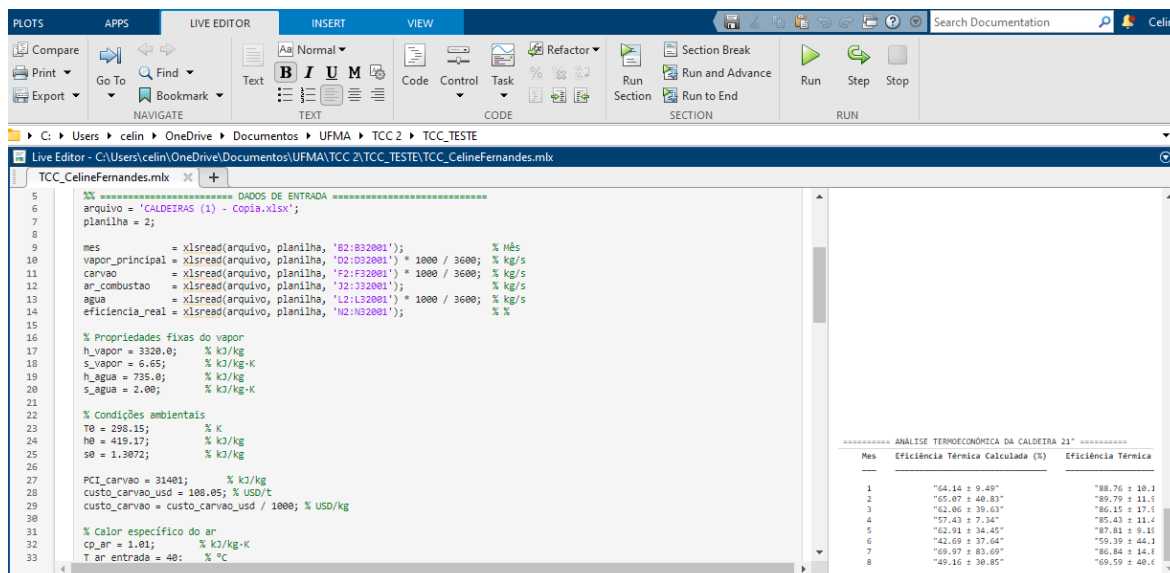
Condição	Temperatura (K)	Pressão (MPa)	Entalpia específica (kJ kg⁻¹)	Entropia específica (kJ kg K⁻¹)
Vapor superaquecido	753,15	8,10	3320,00	6,65
Água de alimentação	444,15	9,72	735,00	2,00
Condições ambientais padrão	298,15	--	419,17	1,31

Fonte: Adaptado de Cengel & Boles (2019)

Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (Brasil, 2024a), o poder calorífico inferior (PCI) do combustível fóssil utilizado, ou seja, o carvão mineral colombiano foi estimado em 31,40 MJ kg⁻¹ e um custo de 108,05 U\$D t⁻¹, refletindo o custo energético inicial associado à geração de vapor na referida planta.

Em seguida, procedeu-se à modelagem matemática por meio do *MatLab* (versão R2024a, ano de 2024, licença acadêmica) para a modelagem dinâmica e simulação, como ilustrado na Figura 14, cujo detalhamento completo é apresentado no Anexo I.

Figura 14. Visualização da interface da modelagem matemática por meio do *MatLab* usada para análise termoeconômica da caldeira LFC



Fonte: Elaborado pela Autora (2025)

O *MatLab*, reconhecido pelas capacidades deste em cálculos numéricos e codificação, foi empregado com o suporte de parcerias acadêmicas com os Laboratórios de Engenharia de Processos Químicos e Biotecnológicos (LEPQBio/DEEQ/UFMA), Otimização, Projeto e Controle Avançado (FEQ/UNICAMP) e Sistemas e Processos Termoquímicos (LPSisTer) da Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica (CCEM/UFMA). Conforme destacado por Lima; Figueroa; Maciel Filho (2021), a simulação numérica favorece a análise e previsão de processos, contribuindo para a tomada de decisões e redução de perdas energéticas.

Apesar da evolução de plataformas computacionais para análise termoeconômica, observou-se uma escassez de ferramentas de acesso livre especificamente voltadas à formulação termoeconômica de caldeiras de leito fluidizado circulante (LFC). Neste cenário, o *MatLab* se destaca como ferramenta viável, permitindo customizações e integração com dados industriais. Em contrapartida, muitos trabalhos recentes optaram pelo uso do *Aspen Plus*, por exemplo, Zhang *et al.* (2023) modelaram a co-gaseificação de biomassa e lodo industrial petroquímico. Lan *et al.* (2018) simularam a geração de energia por gaseificação de biomassa e na combustão em turbina a gás. Kamolov *et al.* (2024) analisaram a viabilidade da captura de carbono atmosférico. Embora robusto, o *Aspen Plus* demanda uma licença acadêmica ou profissional de elevado custo, o que

reforça a relevância do uso do *MatLab* em pesquisas com foco na acessibilidade e replicabilidade, bem como na formação de futuros profissionais da Engenharia.

A partir dos dados coletados neste estudo, foi elaborada uma modelagem matemática baseada nos balanços de massa, energia e exergia. Esta modelagem permitiu a simulação do comportamento termodinâmico da caldeira na condição operacional atual desta, ao mesmo tempo em que foi concebida para viabilizar a variação de parâmetros — como temperatura, pressão e vazão — possibilitando a avaliação do desempenho do sistema em diferentes cenários. Com isto, foi possível identificar oportunidades de otimização voltadas para ganhos de eficiência energética e redução dos custos de produção. Esta etapa final forneceu uma visão abrangente das melhorias possíveis, bem como das estratégias mais eficazes para aprimorar o desempenho das caldeiras na refinaria.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação termoeconômica do sistema de geração de vapor da refinaria de alumina permitiu identificar ineficiências tanto energéticas quanto econômicas no processo. Estes indicadores são fundamentais para entender o desempenho real da caldeira e o impacto operacional na planta industrial.

Observa-se na Tabela 4 que, de janeiro a maio de 2024, a eficiência térmica média variou entre 85,43% e 89,79%, com baixos desvios-padrão (entre $\pm 10,00$ e $\pm 12,00\%$), indicando uma operação estável. Esta alta eficiência coincide com maiores médias de produção de vapor (entre 215,00 e 242,00 t h⁻¹). Notou-se que em junho de 2024, a produção de vapor diminuiu drasticamente para 135,56 t h⁻¹, com um desvio-padrão da ordem de $\pm 104,56$. Consequentemente, a eficiência decaiu para 59,39%, devido a falhas, paradas ou operação fora das condições operacionais determinadas. Porém, partir de julho/2024 houve uma recuperação parcial e, novamente, um decréscimo em agosto do mesmo ano, com uma eficiência que reduziu de 86,84 para 69,59%, respectivamente.

Tabela 4. Médias e desvios-padrão dos dados exportados da caldeira LFC por meio do *Connected Plant* durante os meses de janeiro a agosto de 2024

Meses (2024)	Vapor (t h ⁻¹)	Carvão (t h ⁻¹)	Ar (kg s ⁻¹)	Eficiência (%)
Janeiro	242,23 $\pm$ 32,64	28,28 $\pm$ 4,95	40,30 $\pm$ 6,14	88,76 $\pm$ 10,18
Fevereiro	228,02 $\pm$ 30,17	26,88 $\pm$ 4,35	38,31 $\pm$ 5,25	89,79 $\pm$ 11,90
Março	217,41 $\pm$ 45,23	26,48 $\pm$ 5,87	37,93 $\pm$ 5,74	86,15 $\pm$ 17,97
Abril	215,58 $\pm$ 25,25	28,00 $\pm$ 3,87	39,29 $\pm$ 4,52	85,43 $\pm$ 11,44
Maio	235,23 $\pm$ 34,95	28,39 $\pm$ 5,15	39,70 $\pm$ 6,14	87,81 $\pm$ 9,19
Junho	135,56 $\pm$ 104,56	15,45 $\pm$ 12,07	31,01 $\pm$ 6,85	59,39 $\pm$ 44,11
Julho	239,70 $\pm$ 50,10	27,42 $\pm$ 6,80	39,91 $\pm$ 7,24	86,84 $\pm$ 14,81
Agosto	193,35 $\pm$ 113,34	22,16 $\pm$ 13,29	38,88 $\pm$ 8,25	69,59 $\pm$ 40,60
Média mensal (8 meses)	213,39 $\pm$ 71,47	25,38 $\pm$ 8,87	38,17 $\pm$ 6,95	81,60 $\pm$ 26,09

Fonte: Elaborada pela Autora (2025)

Por meio da modelagem computacional realizada por meio do *MatLab*, conforme detalhamento apresentado no Anexo I, foram analisados parâmetros como eficiência térmica, eficiência exergética, destruição de exergia e custo total associado a produção de vapor. Os resultados calculados estão reunidos na Tabela 5.

Tabela 5. Resultados da análise termoeconômica da geração de vapor por caldeira LFC durante os meses de janeiro a agosto de 2024

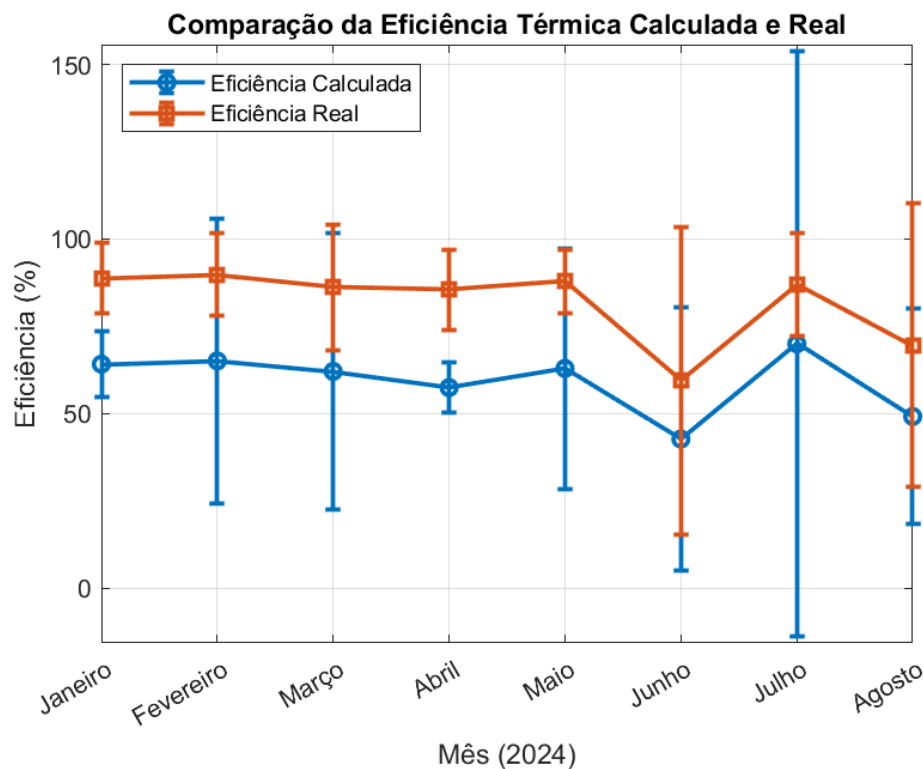
Meses (2024)	Eficiência Térmica Calculada (%)	Eficiência Térmica Real (%)	Eficiência Exergética (%)	Exergia Útil (MW)	Destruição de Exergia (MW)	Custo Combustível (USD s ⁻¹)	Consumo de Carvão (t h ⁻¹)	Produção de Vapor (t h ⁻¹)	Custo do Vapor (USD t ⁻¹)
Janeiro	64,14 ± 9,49	88,76 ± 10,18	32,45 ± 4,80	88,00 ± 11,86	187,59 ± 40,29	0,85 ± 0,15	28,28 ± 4,95	242,23 ± 32,64	12,67 ± 1,92
Fevereiro	65,07 ± 40,83	89,79 ± 11,9	32,92 ± 20,66	82,84 ± 10,96	179,12 ± 36,81	0,81 ± 0,13	26,88 ± 4,35	228,02 ± 30,17	12,88 ± 2,36
Março	62,06 ± 39,63	86,15 ± 17,97	31,40 ± 20,05	78,98 ± 16,43	179,19 ± 45,64	0,79 ± 0,18	26,48 ± 5,87	217,41 ± 45,23	---
Abril	57,43 ± 7,34	85,43 ± 11,44	29,06 ± 3,71	78,32 ± 9,17	194,06 ± 32,01	0,84 ± 0,12	28,00 ± 3,87	215,58 ± 25,25	14,09 ± 1,76
Maiο	62,91 ± 34,45	87,81 ± 9,19	31,83 ± 17,43	85,46 ± 12,70	190,63 ± 39,90	0,85 ± 0,15	28,39 ± 5,16	235,23 ± 34,95	13,06 ± 1,67
Junho	42,69 ± 37,64	59,39 ± 44,11	21,60 ± 19,04	49,24 ± 37,98	107,75 ± 72,82	0,46 ± 0,36	15,45 ± 12,08	135,53 ± 104,55	---
Julho	69,97 ± 83,69	86,84 ± 14,81	35,40 ± 42,34	87,09 ± 18,20	180,69 ± 51,36	0,82 ± 0,20	27,42 ± 6,80	239,71 ± 50,10	12,44 ± 2,14
Agosto	49,16 ± 30,85	69,59 ± 40,60	24,87 ± 15,61	70,13 ± 41,24	150,77 ± 81,77	0,66 ± 0,40	22,13 ± 13,31	193,03 ± 113,52	---
Média mensal (8 meses)	59,18 ± 42,59	81,72 ± 26,11	29,88 ± 21,54	76,82 ± 26,48	171,23 ± 59,30	0,76 ± 0,27	25,65 ± 8,56	213,34 ± 71,52	---

Fonte: Elaborado pela Autora (2025)

Para o cálculo da eficiência térmica foram empregadas as Equações de 7 a 11, com o objetivo de comparar os valores obtidos por meio da modelagem matemática com aqueles fornecidos pelo sistema *Connected Plant*. Observou-se a partir das Tabela 5 e Figura 15, que a eficiência térmica calculada apresentou um valor inferior à eficiência imputada, ou seja, de 42,69 a 69,97%, respectivamente, o que pode ser atribuído às simplificações do modelo, hipóteses conservadoras e limitações nos parâmetros adotados.

Tal discrepância, no entanto, é considerada aceitável, uma vez que perdas térmicas são inerentes a processos industriais, como destacado por Çengel e Boles (2020) e Marini *et al.* (2022), os quais indicaram faixas típicas de eficiência variando entre 65,00% e 85,00%, a depender do tipo de combustível e das condições operacionais. Ressalta-se, contudo, a ocorrência de valores anormalmente baixos para a eficiência térmica calculada nos meses de junho e agosto (42,69 e 49,16%, respectivamente), com diferença média de 17,67% em relação aos oito meses avaliados, os quais, conforme discutido anteriormente, podem indicar a presença de anomalias operacionais.

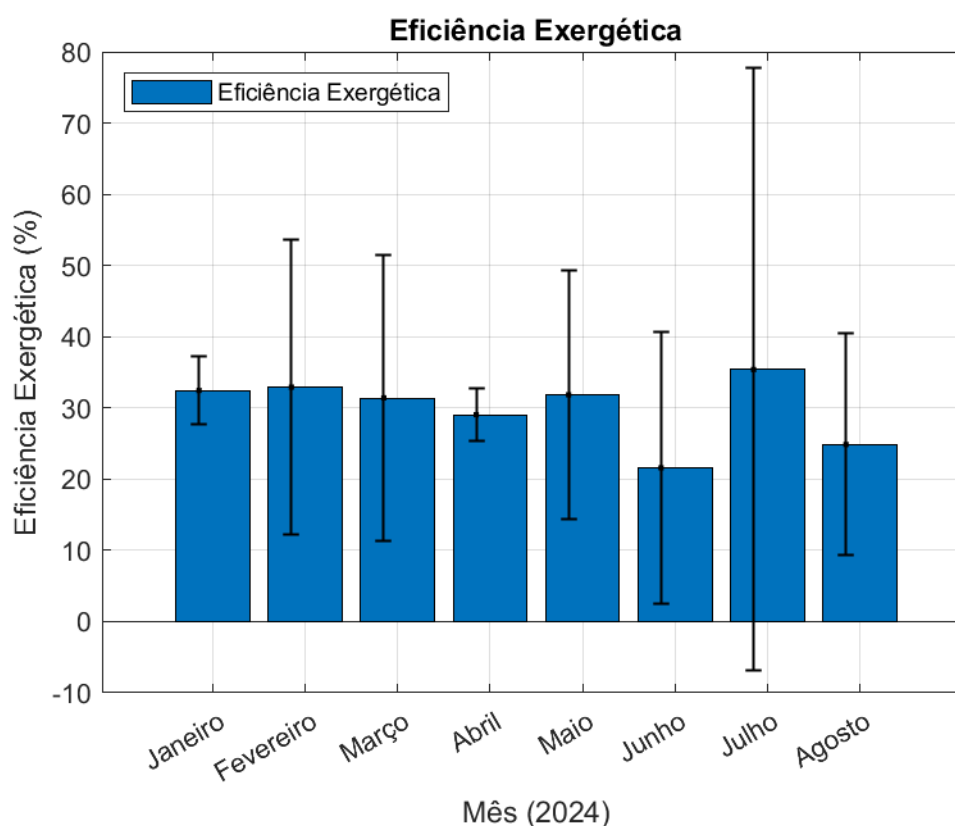
Figura 15. Comparação entre as eficiências térmicas calculada e real da caldeira LCF nos meses de janeiro a agosto de 2024



Fonte: Elaborado pela Autora (2025)

A eficiência exergetica, obtida pela Equação 21, ao longo do período analisado variou entre 21,60% e 35,40%, evidenciando que menos da metade da energia disponível no combustível foi efetivamente convertida em trabalho útil, principalmente, em razão das irreversibilidades presentes no processo (Almeida, 2018), como demonstrado na Figura 16. Destaca-se o mês de junho cujo valor de eficiência foi da ordem de 21,60%, apontando para perdas significativas de qualidade energética, reforçadas pelo alto valor da destruição de exergia (205,75 MW). Estes resultados estão em consonância com os dados apresentados por Martínez-Rodríguez e Abánades (2020), que constataram eficiências exergeticas típicas entre 30,00% e 50,00% para caldeiras de leito circulante que operam com carvão mineral (combustível sólido) com um teor de umidade de $\approx 12,00\%$.

Figura 16. Eficiência exergetica na caldeira LFC durante os meses de janeiro a agosto de 2024



Fonte: Elaborado pela Autora (2025)

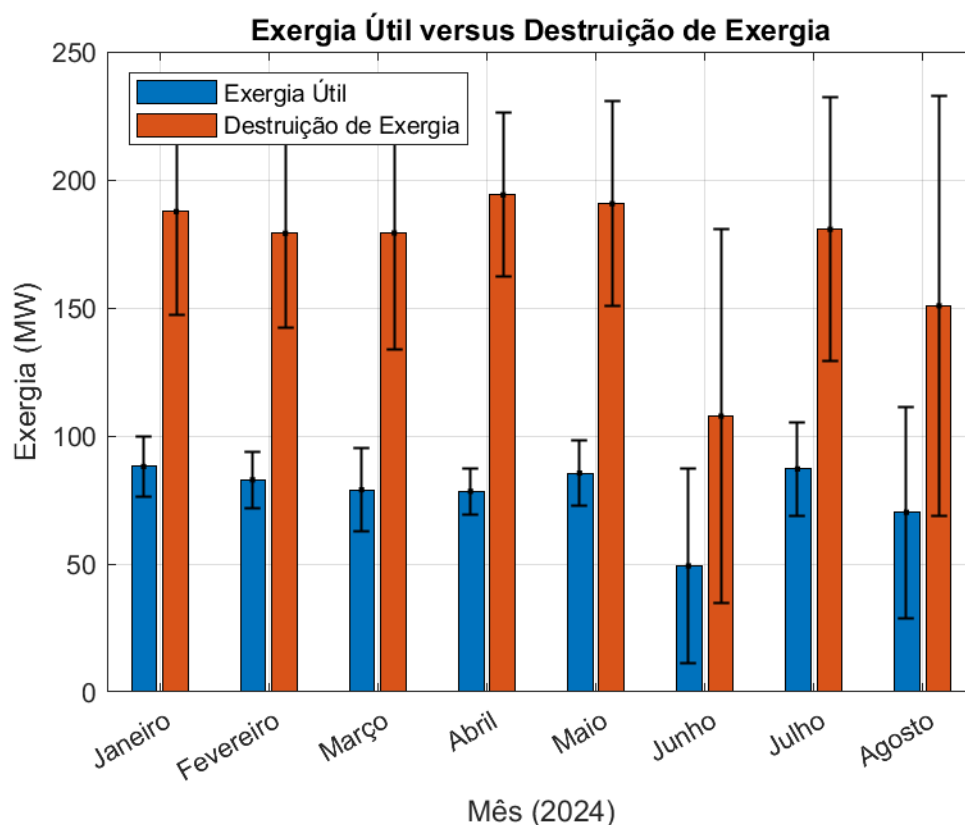
Na Figura 17 observa-se a exergia útil, obtida pela Equação 20, que representa a capacidade real do vapor produzido em realizar trabalho, sendo um indicativo do

potencial energético do sistema e a destruição desta. Evidenciou-se que grande parte do potencial de trabalho do combustível foi perdido devido às irreversibilidades no processo termodinâmico. Conforme Moran *et al.* (2013), a exergia é destruída por dois fatores, a saber: a transferência de calor de forma irreversível entre os gases resultantes do processo de combustão e a água que circula pelos tubos, e a própria combustão propriamente dita.

A análise dos dados apresentados revelou que a destruição de exergia supera sistematicamente a exergia útil, sugerindo que o sistema opera com eficiências exergéticas inferiores a 50,00%, como evidenciado na Figura 16. Tal desempenho é condizente com o observado em sistemas térmicos industriais, nos quais as irreversibilidades comprometem significativamente o aproveitamento energético (Bejan, 2016; Çengel; Boles, 2013). Neste estudo, a destruição de exergia situou-se entre 107,75 MW e 194,06 MW, evidenciando valores compatíveis com as perdas típicas de processos reais, cujas taxas podem atingir de 50,00% a 70,00% da exergia disponível no combustível, conforme descrito por Bouchard *et al.* (2021).

Nos meses de janeiro, fevereiro e maio, os valores de exergia útil foram mais elevados, ou seja, 88,00; 82,84 e 85,46 MW, respectivamente, o que sugere um melhor aproveitamento da energia do combustível, apesar da destruição de exergia continuar alta. Isto pode estar relacionado a condições operacionais mais estáveis e eficientes, como uma adequada mistura ar-combustível ($5,18 \text{ kg s}^{-1}$) e controle ótimo da temperatura de combustão (750°C).

Figura 17. Comparação mensal entre exergia útil e destruição de exergia na caldeira LFC durante os meses de janeiro a agosto de 2024



Fonte: Elaborada pela Autora (2025)

O elevado custo do vapor produzido na caldeira LFC coincide com as maiores destruição de exergia, como nos meses de abril e maio (14,09 e 13,06 USD t^{-1} , respectivamente). Isto reforça que o desempenho econômico está fortemente atrelado à qualidade da conversão energética, conforme destacado por Tsatsaronis (2024) na abordagem exergoeconômica. Alguns meses, como março, junho e agosto de 2024, estão sem custo reportado devido às condições operacionais.

Para a caldeira especificamente, a geração de vapor ocorre predominantemente por transferência de calor via mecanismos de radiação e convecção no interior da fornalha, além da condução nas superfícies metálicas da própria caldeira (Bejan, 2016). Desse modo, a revisão de estratégias como a recuperação de calor residual, sugerida por Mariani *et al.* (2020), por meio da integração de ciclos complementares, como o de Rankine pode aumentar a eficiência global do sistema.

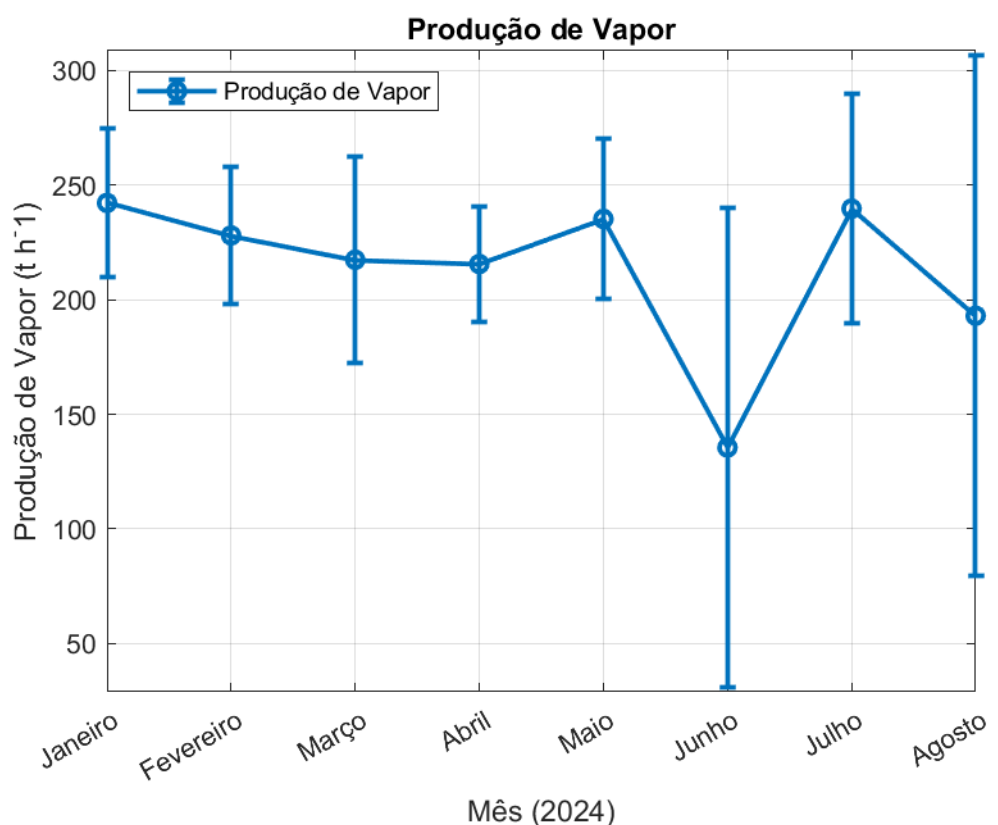
O custo do combustível (em USD s^{-1}) apresenta uma flutuação inferior em comparação com o custo do vapor, indicando que as variações nos custos unitários estão

mais relacionadas à eficiência do sistema do que ao preço do insumo energético propriamente dito. De acordo com Nakaten e Kempka (2019), a escolha do carvão mineral como uma fonte de energia industrial está diretamente ligada a aspectos econômicos e técnicos, reforçando a importância de uma gestão eficiente do consumo para manter a competitividade da planta térmica.

Nos meses com maior exergia útil (*i.e.*, janeiro e fevereiro/2024), observaram-se eficiências exergéticas superiores e um menor custo médio por tonelada de vapor, ou seja, USD 12,77, apontando para uma correlação positiva entre aproveitamento energético e desempenho econômico, conforme argumentado por Rosen (2001).

Observou-se que a caldeira LFC operou abaixo da meta de 280,00 t h⁻¹ em todos os meses analisados, como evidenciado na Figura 18. O desempenho máximo, registrado no mês de janeiro (242,23 ± 32,64 t h⁻¹), ainda se manteve aproximadamente 13,00% inferior à meta estabelecida. Destacaram-se que os meses de junho e agosto apresentaram não apenas os menores valores médios (135,53 e 193,03 t h⁻¹, respectivamente), mas também as maiores variações limiares, com desvios-padrão superiores a 100,00 t h⁻¹, indicando uma grande instabilidade operacional. A operação em cargas parciais compromete a eficiência energética do sistema e aumenta os custos específicos, conforme demonstrado por Bejan (2016) e Tsatsaronis (2024) na literatura termoenergética, justificando a necessidade de ajustes operacionais e estratégicos na caldeira para otimização e melhorias no processo.

Figura 18. Produção de vapor na caldeira LFC durante os meses de janeiro a agosto de 2024



Fonte: Elaborado pela Autora (2025)

Além das questões de termoeeficiência, destaca-se também a importância dos aspectos ambientais por meio do rigoroso controle das emissões gasosas provenientes da queima do carvão mineral, como apontado por Marcantonio *et al.* (2021). A queima do carvão gera uma emissão gasosa média da ordem de 2,42 toneladas de CO₂ por tonelada de carvão queimado (IPCC, 2019; EPE, 2025). Portanto, a planta térmica analisada apresentou uma emissão diária estimada de cerca de 60,50 t dia⁻¹ de CO₂, o que reforça a necessidade de uma revisão imediata da estratégia de manutenção referente ao sistema de controle e tratamento de gases poluentes, como os filtros de manga existentes ou a diluição dos gases de exaustão liberados na chaminé para atmosfera.

De acordo com o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), a Resolução nº 506, de 5 de julho de 2024, estabelece os padrões nacionais de qualidade do ar e fornece diretrizes para aplicação no território brasileiro. Esta resolução define limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas, com foco em

substâncias que afetam diretamente a saúde humana, como material particulado (MP), óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxidos de enxofre (SO_x). No entanto, não estabelece um limite específico para as emissões de dióxido de carbono (CO₂), uma vez que este gás, apesar de ser o principal responsável pelo agravamento do efeito estufa, não é classificado como um poluente tóxico de impacto imediato sobre a saúde humana (BRASIL, 2024b).

Por outro lado, a Política Climática Nacional orienta-se por compromissos internacionais, como o Acordo de Paris, refletidos no Plano Clima, publicado pelo Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. O documento apresenta metas de mitigação e adaptação do Brasil até 2035, estabelecendo o compromisso de reduzir entre 59,00% e 67,00% das emissões líquidas de gases de efeito estufa em relação aos níveis de 2005. Isto corresponde a um volume absoluto entre 850,00 milhões e 1,05 bilhão de toneladas de CO₂ equivalente até 2035 (BRASIL, 2024c).

Além disso, a Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006 que permanece vigente, estabelece a obrigatoriedade do monitoramento contínuo de poluentes como CO, NO_x e CO₂ em fontes fixas industriais (BRASIL, 2006). Este monitoramento é viabilizado por tecnologias de automação industrial como o *Connected Plant*, que permite a coleta, registro e análise em tempo real dos parâmetros de emissão, assegurando conformidade ambiental e transparência regulatória.

Sob a perspectiva social, a geração de vapor em caldeiras LFC impacta diretamente as comunidades situadas no entorno das unidades industriais. A emissão de poluentes atmosféricos resultante da queima de carvão mineral pode comprometer significativamente a qualidade do ar, contribuindo para o agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares, especialmente, entre as populações vulneráveis, como crianças, idosos e pessoas em situação de vulnerabilidade socioeconômica (WHO, 2021). Neste contexto, a modernização tecnológica e adoção de sistemas mais eficientes e menos poluentes transcendem as metas ambientais, configurando-se como um dever ético e social. Ao mitigar os efeitos da poluição e reduzir os riscos à saúde pública, estas medidas promovem uma maior equidade ambiental e reforçam o papel da indústria como agente de desenvolvimento sustentável e responsável em nível regional (Lima, 2024).

Por fim, destaca-se a relevância de se considerar, no futuro, alternativas energéticas renováveis e economicamente viáveis, mesmo em um cenário ainda fortemente dependente do carvão mineral, por exemplo, *biochar*, peletes ou briquetes fabricados por diferentes biomassas, conforme discutido por Shaner *et al.* (2016).

6 CONCLUSÃO

A avaliação termoeconômica realizada sobre o sistema de geração de vapor da refinaria de alumina permitiu compreender, de forma integrada, o desempenho energético, exergético, ambiental e socioeconômico da caldeira em operação. A modelagem matemática aplicada e as análises desenvolvidas mostraram-se ferramentas eficazes para diagnosticar ineficiências e apontar oportunidades de melhoria no processo.

Os resultados obtidos reforçaram que, embora a eficiência térmica real se mantenha dentro dos padrões esperados para as caldeiras industriais, a eficiência exergética apresentou valores significativamente inferiores (21,60 e 29,06%), refletindo as irreversibilidades associadas à combustão, transferência de calor e dinâmica de operação do sistema de leito fluidizado circulante. A elevada destruição de exergia e o consumo expressivo de carvão mineral evidenciaram a necessidade de ações voltadas para a otimização do uso do combustível fóssil e para o aproveitamento do calor residual, visando não apenas a melhoria da eficiência global, mas também a redução dos diversos custos operacionais.

Além dos aspectos técnicos, o impacto ambiental relacionado às emissões de CO₂ se mostrou relevante, reiterando a importância de uma gestão contínua das emissões gasosas e do funcionamento dos sistemas de controle ambiental.

Acrescenta-se que a análise permite identificar as perdas de exergia e associar a custos reais, orientando a intervenções específicas para aumentar a eficiência, como o aproveitamento do calor residual. Ademais compara alternativas tecnológicas para direcionar investimentos eficientes, evitando desperdício de capital.

Dessa forma, este estudo confirmou que a integração de análises energéticas, exergéticas, ambientais e socioeconômicas são fundamentais para o aprimoramento do desempenho de sistemas térmicos industriais reais. Também reforçou a necessidade de buscar soluções tecnológicas que incorporem eficiência operacional, competitividade econômica e responsabilidade socioambiental.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar a análise em cenários de cogeração, implementar estudos de recuperação energética e avaliar alternativas viáveis de transição energética justa para fontes renováveis, contribuindo para um modelo industrial mais eficiente e sustentável.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Bruno Seixas Gomes de. **ANÁLISE EXERGoeCONômICA AVANÇADA DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO OTIMIZADO**. 2018. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/12123/3/BrunoSeixasGomesDeAlmeida.pdf>. Acesso em: 1 jul. 2025.
- BABISK, Michelle Pereira; RIBEIRO, Larissa da Silva; VIEIRA, Carlos Maurício Fontes; PRADO, Ulisses Soares do; AGUIAR, Mariane Costalonga de; GADIOLI, Monica Castoldi Borlini. **Uso de planejamento experimental no aproveitamento de resíduo do processo Bayer em cerâmica vermelha**. 2023.
- BASU, P. **Combustion and gasification in fluidized beds**. Taylor & Francis Group: United States of America, 2006.
- BEJAN, A. **Advanced Engineering Thermodynamics**. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2016.
- BLASZCZUK, Artur; JAGODZIK, Szymon. **Investigation of Heat Transfer in a Large-Scale External Heat Exchanger with Horizontal Smooth Tube Bundle**. 2021. DOI <https://doi.org/10.3390/en14175553>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/17/5553>. Acesso em: 20 jul. 2025.
- BORGNAKKE, Claus; SONNTAG, Richard E. **Fundamentos da Termodinâmica**. 8. ed. 2018.
- BOUCHARD, J.; RIVEST, J.; RIVARD, M. **Thermodynamic assessment of industrial heat systems: exergy losses and improvement strategies**. Energy Conversion and Management, v. 244, p. 114484, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114484>. Acesso em: 03 jan. 2025.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2023**. 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt->

br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/balanco-energetico-nacional/ben2023/relatorio-final/ben2023.pdf/view. Acesso em: 13 jul. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006**. Dispõe sobre os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 27 dez. 2006. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=510. Acesso em: 26 jul. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 506, de 5 de julho de 2024**. Estabelece os padrões nacionais de qualidade do ar e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 08 jul. 2024b. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=827. Acesso em: 26 jul. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Plano Clima – Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil**. Brasília, 2024c. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/smc/plano-clima>. Acesso em: 26 jul. 2025.

CASISI, Melchiorre; KHEDR, Sobhy; REINI, Mauro. **The Thermoeconomic Environment and the exergy-based cost accounting of technological and biological systems**. 2022. Disponível em: [The+Thermoeconomic+Environment+and+the+exergy-based+cost+accounting+of+technological+and+biological+systems-Post_print.pdf](#). Acesso em: 11 jan. 2025.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. 7ª edição. Porto Alegre: AMGH, 2013.

CUNHA, RENATA AVELAR. **Otimização do aquecimento de ar de combustão em caldeiras de leito fluidizado circulante de uma refinaria de alumina**. 2020. Trabalho

de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís. Disponível em: <https://monografias.ufma.br/jspui/handle/123456789/4343>. Acesso em: 3 fev. 2025.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL: Ano base 2024.** 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025>. Acesso em: 19 jul. 2025.

FARIA, Pedro Rosseto de; BARONE, Marcelo Aiolfi; SANTOS, Rodrigo Guedes dos; SANTOS, José Joaquim C.S. **The environment as a thermoeconomic diagram device for the systematic and automatic waste and environmental cost internalization in thermal systems.** 2022.

FERREIRA, Luiz Fernando Rodrigues. **Avaliação energética e exergética de uma central de cogeração em uma refinaria de petróleo - um estudo de caso.** Campinas, SP. 2023.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **INTRODUÇÃO À MECÂNICA DOS FLUIDOS.** 8. ed. 2010.

GOIS, Cristiane Corradi; LIMA, Rosa Malena Fernandes; MELO, Antônio Cardoso. **Sedimentação de resíduo Bayer utilizando floculantes hidroxamatos e poliacrilamida.** 2003. DOI <https://doi.org/10.1590/S0370-44672003000200010>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/ztjk8xpRD8B3JDjYp7BWfsm/>. Acesso em: 19 jul. 2025.

GUINOA, Javier Sáez; FRANCO, Enrique García; SASTRESA, Eva Llera; ROMEO, Luis M. **The effects of energy consumption of alumina production in the environmental impacts using life cycle assessment.** The International Journal of Life Cycle Assessment. 2023. DOI <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02257-8>. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11367-023-02257-8.pdf>. Acesso em: 6 jan. 2025.

IBP. **Guia de Inspeção: Inspeção de caldeiras**. 3. ed. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. 2020. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2020/09/guia-de-inspecao-de-caldeiras-2020.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2024.

IMTAB. **Qual a importância da eficiência energética em caldeiras?** 25 mar. 2024. Disponível em: <https://blog.imtab.com.br/eficiencia-energetica-em-caldeiras/>. Acesso em: 26 ago. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Brazil – Countries & Regions - IEA. 2024. Disponível em: [Brazil - Countries & Regions - IEA](#). Acesso em: 15 jan. 2025.

IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2019.

Kamolov, A.; Turakulov, Z.; Furda, P.; Variny, M.; Norkobilov, A.; Fallanza, M. **Techno-Economic Feasibility Analysis of Post-Combustion Carbon Capture in an NGCC Power Plant in Uzbekistan**. Clean Technol. 2024, 6, 1357-1388. DOI <https://doi.org/10.3390/cleantechnol6040065>. Acesso em: 17 mar. 2025.

LAN, Weijuan; CHEN, Guanyi; ZHU, Xinli; WANG, Xuetao; LIU, Chunmei; XU, Bin. **Biomass gasification-gas turbine combustion for power generation system model based on ASPEN PLUS**. Science of The Total Environment, v. 628–629, p. 1278-1286, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.159. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718305515>. Acesso em: 15 mar. 2025.

LIMA, Bruna Karoline de Sousa; FIGUEROA, Jaiver Efren Jaimes; MACIEL FILHO, Rubens. **OBTENÇÃO DE BIO-ÓLEO A PARTIR DA CASCA DE COCO VERDE PARA USO POTENCIAL COMO BIOCOMBUSTÍVEL: SIMULAÇÃO DO PROCESSO USANDO ASPEN PLUS®**. In: Anais do I Web Encontro Nacional de Engenharia Química. Anais...Diamantina (MG) online, 2021. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/wendeq2021/350306-OBTENCAO-DE-BIO-OLEO-A-PARTIR-DA-CASCA-DE-COCO-VERDE-PARA-USO-POTENCIAL-COMO-BIOCOMBUSTIVEL--SIMULACAO-DO-PROCESS>. Acesso em: 13/02/2025.

LIMA, Naiane. **A importância da sustentabilidade tecnológica para o meio ambiente.** Sunne – Central de Conhecimento, 15 maio 2024. Disponível em: <https://conhecimento.sunne.com.br/importancia-da-sustentabilidade-tecnologica>. Acesso em: 26 jul. 2025.

LUCIA, Umberto. **Gouy-Stodola Theorem as a variational principle for open systems.** 2012. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1208.0177>. Acesso em: 20 jul. 2025.

MARCANTONIO, Vera; BOCCI, Enrico; OUWELTJES, Jan Pieter; ZOTTO, Luca Del; MONARCA, Danilo. **Evaluation of sorbents for high temperature removal of tars, hydrogen sulphide, hydrogen chloride and ammonia from biomass-derived syngas by using Aspen Plus.** 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031991934710X>. Acesso em: 4 mar. 2025.

MARIANI, Antonio; MASTELLONE, Maria Laura; MARRONE, Biagio; PRATI, Maria Vittoria; UNICH, Andrea. **An Organic Rankine Cycle Bottoming a Diesel Engine Powered Passenger Car.** 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/2/314>. Acesso em: 12 maio 2025.

Martínez-Rodríguez, A.; Abánades, A. **Comparative Analysis of Energy and Exergy Performance of Hydrogen Production Methods.** Entropy 2020, 22, 1286. DOI <https://doi.org/10.3390/e22111286>. Acesso em: 21 jun. 2025.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N.; BOETTNER, Daisie D.; BAILEY, Margaret B. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia.** 7. ed. 2013.

MOREIRA, José Luciano Batista; MARQUES, Adriano da Silva; LAGO, Taynara Geysa Silva do; ARRUDA, Victor Carlos de Lima; CARVALHO, Monica. **Thermoeconomic Evaluation of a High-Performance Solar Biogas Polygeneration System.** 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/16/4172>. Acesso em: 16 abr. 2025.

Nakaten, N.; Kempka, T. **Techno-Economic Comparison of Onshore and Offshore Underground Coal Gasification End-Product Competitiveness**. *Energies* 2019, 12, 3252. DOI <https://doi.org/10.3390/en12173252>. Acesso em: 07 abr. 2025.

OLIVEIRA, Aysla Caroline Sousa. **Implementação de estratégia de manutenção em caldeira aquatubular**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís.

OLIVEIRA, Santiago del Rio; SCALON, Vicente Luiz; MODOLO, Delson Luiz. **Thermoeconomics as a tool for allocating costs in an energy system**. 2020. DOI - 10.34140/bjbv2n2-031. Disponível em: <https://zendy.io/title/10.34140/bjbv2n2-031>. Acesso em: 14 mar. 2025.

ONU. **Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development**. New York: United Nations, 2018. Acesso em: 10 set. 2024.

ROCHA, Luiz. **DESCRITIVO DO PROCESSO BAYER E DA REFINARIA**. 2018.
Rosen, M. A. **Energy- and exergy-based comparison of coal-fired and nuclear steam power plants**. 2001.

SHANER, Matthew R.; ATWATER, Harry A.; LEWIS, Nathan S.; MCFARLAND, Eric W. **A comparative technoeconomic analysis of renewable hydrogen production using solar energy**. *Energy Environ. Sci.*, 2016,9, 2354-2371: 2016. DOI <https://doi.org/10.1039/C5EE02573G>. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/ee/c5ee02573g#!divAbstract>. Acesso em: 13 maio 2025.

SILVA FILHO, E.B.; ALVES, M.C.M.; DA MOTTA, M. **Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas**. *Revista Matéria*, v. 12, n. 2, pp. 322-338, 2007.

TOGAWA, Victor. **Os Principais Tipos de Caldeiras**. 2020. Disponível em: <https://togawaengenharia.com.br/blog/os-principais-tipos-de-caldeiras/>. Acesso em: 20 jul. 2025.

TSAI, David; POTENZA, Renata; QUINTANA, Gabriel; CARDOSO, Anderson Matheus; ALVES, Priscila; SILVA, Felipe Barcellos e; GRACES, Ingrid; SOUSA, Helen; COLUNA, Iris; OLIVEIRA, Joice; ZIMBRES, Bárbara; SHIMBO, Julia; SILVA, Camila; SILVA-JUNIOR, Celso; SILVA, Wallace; ALENCAR, Ane; ANGELO, Claudio. **Emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil**. 2024. Disponível em: <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2025.

TSATSARONIS, George. **The future of exergy-based methods**. Energy, v. 302, n. C, 2024. DOI: 10.1016/j.energy.2024.131881. Acesso em: 15 abr. 2025.

TUNA, Celso Eduardo. **Análise exergética e termoeconomia: Sistematização crítica da produção científica**. 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/4ce30686-a20e-4990-ac32-d493617d58be/content>. Acesso em: 27 jul. 2024.

WHEELER, Foster. **MANUAL DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO**. 2006.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Air pollution**. Geneva: WHO, 2021. Disponível em: <https://www.who.int/health-topics/air-pollution>. Acesso em: 26 jul. 2025

XAVIER, Henrique Claro; ZANUTTO, Cesar Augusto Maria; GIRARDI, Vitor Franco; NUNES, Jessica Martha. **ANÁLISE DE FALHA DAS TUBULAÇÕES DO GRELHADO DA FORNALHA DE UMA CALDEIRA INDUSTRIAL A VAPOR.**, 2024. DOI 10.5747/ce.2024.v16.e425. Disponível em: <https://journal.unoeste.br/index.php/ce/article/view/5029/3712>. Acesso em: 20 jul. 2025.

ZHANG, Wenqi; GU, Yangguang; FANG, Hua; CHEN, Jianbiao; CHEN, Haijun; ZHU, Yuezhao; MU, Lin. **Thermodynamic modeling and performance analysis on co-gasification of *Chlorella vulgaris* and petrochemical industrial sludge via Aspen Plus combining with response surface methodology.** 2023.

ANEXO I

**MODELAGEM MATEMÁTICA PARA CÁLCULO TERMoeCONÔMICO
POR MEIO DO *MATLAB***

```

clear;
clc;
close all;

%% ===== DADOS DE ENTRADA
=====
arquivo = 'CALDEIRAS (1) - Copia.xlsx';
planilha = 2;

mes = xlsread(arquivo, planilha, 'B2:B32001');
% Mês
vapor_principal = xlsread(arquivo, planilha, 'D2:D32001') * 1000 / 3600;
% kg/s
carvao = xlsread(arquivo, planilha, 'F2:F32001') * 1000 / 3600;
% kg/s
ar_combustao = xlsread(arquivo, planilha, 'J2:J32001');
% kg/s
agua = xlsread(arquivo, planilha, 'L2:L32001') * 1000 / 3600;
% kg/s
eficiencia_real = xlsread(arquivo, planilha, 'N2:N32001');
% %

% Propriedades fixas do vapor
h_vapor = 3320.0; % kJ/kg
s_vapor = 6.65; % kJ/kg·K
h_agua = 735.0; % kJ/kg
s_agua = 2.00; % kJ/kg·K

% Condições ambientais
T0 = 298.15; % K
h0 = 419.17; % kJ/kg
s0 = 1.3072; % kJ/kg

PCI_carvao = 31401; % kJ/kg
custo_carvao_usd = 108.05; % USD/t
custo_carvao = custo_carvao_usd / 1000; % USD/kg

% Calor específico do ar
cp_ar = 1.01; % kJ/kg·K
T_ar_entrada = 40; % °C
T_combustao = 750; % °C

```

```

%% ===== CÁLCULOS GERAIS =====
Q_ar = ar_combustao .* cp_ar .* (T_combustao - T_ar_entrada); % kW
Q_comb = carvao .* PCI_carvao; % kW
Q_total_fornecida = Q_comb + Q_ar; % kW
Q_util = vapor_principal .* (h_vapor - h_agua); % kW

eficiencia_calc = (Q_util ./ Q_total_fornecida) * 100; % %
e_vapor = (h_vapor - h0) - T0 * (s_vapor - s0); % kJ/kg
exergia_vapor = vapor_principal .* e_vapor; % kW
exergia_comb = Q_total_fornecida; % kW
destr_exergia = exergia_comb - exergia_vapor; % kW
eficiencia_exerg = (exergia_vapor ./ exergia_comb) * 100; % %

custo_combustivel = carvao * custo_carvao; % USD/s

vapor_ton_h = vapor_principal * 3600 / 1000; % t/h
carvao_ton_h = carvao * 3600 / 1000; % t/h

custo_vapor = (custo_combustivel * 3600) ./ vapor_ton_h; % USD/t

%% ===== CÁLCULO MENSAL (MÉDIA E DESVIO) =====
meses_unicos = unique(mes);
tabela_resultados = table;
tabela_resultados.Mes = meses_unicos;

% Funções auxiliares
calc_media_dp = @(x, m) arrayfun(@(i) mean(x(m == i), 'omitnan'),
meses_unicos);
calc_std_dp = @(x, m) arrayfun(@(i) std(x(m == i), 'omitnan'),
meses_unicos);

% Lista de parâmetros para calcular
parametros = {
    eficiencia_calc, 'Ef_Term_Calc';
    eficiencia_real, 'Ef_Term_Real';
    eficiencia_exerg, 'Ef_Exerg';
    exergia_vapor / 1000, 'Exergia_Util_MW'; % MW
    destr_exergia / 1000, 'Destr_Exergia_MW'; % MW
    custo_combustivel, 'Custo_Comb_USD_s';
    carvao_ton_h, 'Consumo_Carvao_t_h';
    vapor_ton_h, 'Prod_Vapor_t_h';
    custo_vapor, 'Custo_Vapor_USD'
};

for k = 1:size(parametros,1)
    dados = parametros{k,1};
    nome = parametros{k,2};

```


1	"64.14 ± 9.49"	"88.76 ± 10.18"
"32.45 ± 4.8"	"88 ± 11.86"	"187.59 ± 40.29"
"0.85 ± 0.15"	"28.28 ± 4.95"	"242.23 ± 32.64"
"12.67 ± 1.92"		
2	"65.07 ± 40.83"	"89.79 ± 11.9"
"32.92 ± 20.66"	"82.84 ± 10.96"	"179.12 ± 36.81"
"0.81 ± 0.13"	"26.88 ± 4.35"	"228.02 ± 30.17"
"12.88 ± 2.36"		
3	"62.06 ± 39.63"	"86.15 ± 17.97"
"31.4 ± 20.05"	"78.98 ± 16.43"	"179.19 ± 45.64"
"0.79 ± 0.18"	"26.48 ± 5.87"	"217.41 ± 45.23"
<missing>		
4	"57.43 ± 7.34"	"85.43 ± 11.44"
"29.06 ± 3.71"	"78.32 ± 9.17"	"194.06 ± 32.01"
"0.84 ± 0.12"	"28 ± 3.87"	"215.58 ± 25.25"
"14.09 ± 1.76"		
5	"62.91 ± 34.45"	"87.81 ± 9.19"
"31.83 ± 17.43"	"85.46 ± 12.7"	"190.63 ± 39.9"
"0.85 ± 0.15"	"28.39 ± 5.16"	"235.23 ± 34.95"
"13.06 ± 1.67"		
6	"42.69 ± 37.64"	"59.39 ± 44.11"
"21.6 ± 19.04"	"49.24 ± 37.98"	"107.75 ± 72.82"
"0.46 ± 0.36"	"15.45 ± 12.08"	"135.53 ± 104.55"
<missing>		
7	"69.97 ± 83.69"	"86.84 ± 14.81"
"35.4 ± 42.34"	"87.09 ± 18.2"	"180.69 ± 51.36"
"0.82 ± 0.2"	"27.42 ± 6.8"	"239.71 ± 50.1"
"12.44 ± 2.14"		
8	"49.16 ± 30.85"	"69.59 ± 40.6"
"24.87 ± 15.61"	"70.13 ± 41.24"	"150.77 ± 81.77"
"0.66 ± 0.4"	"22.13 ± 13.31"	"193.03 ± 113.52"
<missing>		

```
%% ===== EXPORTAÇÃO =====
writetable(tabela_resultados, 'Resultados_Mensais_Caldeira.xlsx');
writetable(tabela_formatada, 'Resultados_Mensais_Formatado.xlsx');
```