



**David de Souza Zanon**

**Análise de exergia de refinis de aço em  
forno panela**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, de Materiais e Processos Ambientais, do Departamento de Engenharia Química e de Materiais da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Roberto Ribeiro de Avillez

Coorientadora: Prof. Sonia Letichevsky

Rio de Janeiro

Abril de 2024



**David de Souza Zanon**

**Análise de exergia de refinis de aço em  
forno panela**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, de Materiais e Processos Ambientais da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

**Prof. Roberto Ribeiro de Avillez**

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio

**Profa. Sonia Letichevsky**

Coorientadora

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio

**Prof. Rogério Navarro Correia de Siqueira**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio

**Prof. André Luiz Vasconcellos da Costa e Silva**

Universidade Federal Fluminense – UFF

Rio de Janeiro, 26 de abril de 2024

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

## **David de Souza Zanon**

Graduou-se em Engenharia Química (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2022. Durante a graduação, cursou o domínio adicional em processos metalúrgicos. Foi bolsista de iniciação científica, realizando o desenvolvimento de um fotocatalisador nanoestruturado de  $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{TiO}_5$  para obtenção de  $\text{H}_2$ .

## **Ficha Catalográfica**

Zanon, David de Souza

Análise de exergia de refinis de aço em forno panela / David de Souza Zanon; orientador: Roberto Ribeiro de Avillez; coorientadora: Sonia Letichevsky. – 2024.

53 f.: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química e de Materiais, 2024.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Química e de Materiais – Teses. 2. Exergia. 3. Balanço de massa. 4. Balanço exergético. 5. Refino. 6. Forno panela. I. Avillez, Roberto Ribeiro de. II. Letichevsky, Sonia. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Química e de Materiais. IV. Título.

CDD: 620.11

## **Agradecimentos**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O percurso do mestrado não foi uma trajetória linear. Em muitos momentos sinuosos, me vi perdido e enfrentei diversos desafios. Gostaria de expressar meus profundos agradecimentos aos meus orientadores, Roberto de Avillez e Sonia Letichevsky, pelo apoio incondicional ao longo dessa jornada, mesmo diante das adversidades.

Também sou grato ao Gabriel Evangelista Medeiros, cujo conhecimento foi fundamental para enriquecer meu projeto.

Agradeço à minha compreensiva mãe, Andrea Cristina, por sempre me ouvir nos momentos de aflição.

Não posso deixar de mencionar minha gratidão aos amigos Gabriel Vettorazzi e Lucas Miguel, que me ajudaram nos momentos difíceis e dos quais aprendi muito durante essa caminhada.

Um agradecimento especial aos amigos que fiz na PUC durante o mestrado. Um grande abraço aos amigos que fiz no LabSem, Labspectro, da VRC, das jogatinas, APG e às demais entidades estudantis comprometidas com as questões sociais.

No final, tudo deu certo e sou grato por toda a jornada!

## Resumo

Zanon, David de Souza; Avillez, Roberto Ribeiro de; Letichevsky, Sonia. **Análise de exergia de refinis de aço em forno panela**. Rio de Janeiro 2024. 53p. Dissertação de mestrado - Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A otimização de processos industriais é uma estratégia para mitigar o impacto ambiental das atividades produtivas. Isso envolve a aplicação de conhecimentos multidisciplinares para aprimorar a eficiência dos processos industriais, reduzindo assim o consumo de recursos naturais, as emissões de poluentes e o desperdício de materiais. A análise exergética tem sido abordada de maneira abrangente na literatura, com inúmeros estudos focados nesse tema. Áreas de pesquisa mais presentes incluem a análise de processos industriais, otimização de sistemas de geração e distribuição de energia, e avaliação da eficiência energética em sistemas de transporte e edifícios. A literatura oferece uma ampla gama de estudos de análise exergética realizados para o forno elétrico a arco (EAF) utilizado na produção de aço. No entanto, há uma necessidade de mais pesquisas voltadas para a aplicação da análise exergética do processo de refino em forno-panela (FP), que representa a segunda etapa do refino secundário na indústria do aço. Um programa em linguagem Python usando o Jupyter notebook foi desenvolvido para calcular o balanço de massa, energético e exergético do refino de aço em forno-panela. Os dados termodinâmicos foram obtidos da base de dados SSUB3 do Thermo-Calc. Os dados reais utilizados foram fornecidos por uma siderúrgica semi-integrada, garantindo a relevância e validade dos resultados. As eficiências energéticas e exergéticas encontradas foram de 92,9% e 90,1%. Os valores de eficiência são surpreendentes pois revelam que o forno em análise está otimizado. As otimizações foram conduzidas para examinar variações na massa de argônio, temperatura de entrada de argônio e potência ativa do eletrodo. As variações destes parâmetros revelaram pequenos impactos na eficiência do processo, proporcionando ideias para aprimoramentos efetivos.

## Palavras-chave:

Exergia, balanço de massa, balanço exergético, refino, forno panela, siderurgia

## Abstract

Zanon, David de Souza; Avillez, Roberto Ribeiro de; Letichevsky, Sonia.  
**Exergy analysis of steel refining in a ladle furnace.** Rio de Janeiro 2024. 53p.  
Dissertação de mestrado - Departamento de Engenharia Química e de  
Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The optimization of industrial processes is an interesting strategy to mitigate the environmental impact of productive activities. It involves applying multidisciplinary knowledge to improve the efficiency of industrial processes, thereby reducing the consumption of natural resources, pollutant emissions, and material waste. Exergy analysis has been extensively addressed in the literature, with numerous studies focused on this topic. The most prevalent research areas include analyzing industrial processes, optimizing energy generation and distribution systems, and assessing energy efficiency in transportation systems and buildings. The literature provides various exergy analysis studies conducted for electric arc furnaces (EAF) used in steel production. However, there is a need for more research focused on applying exergy analysis to the ladle furnace (LF) refining process, which represents the second stage of secondary steel refining in the industry. A Python program using Jupyter Notebook was developed to calculate steel refinement's mass, energy, and exergy balances in a ladle furnace. Thermodynamic data were obtained from the SSUB3 database of Thermo-Calc. A semi-integrated steel mill provided the actual data used, ensuring the results' relevance and validity. The energy and exergy efficiencies found were 92.9% and 90.1%, respectively. These efficiency values are surprising, as they reveal that the furnace under analysis is already optimized. Optimizations were conducted to examine variations in argon's mass and inlet temperature, as well as electrode active power. The parameters' variations revealed minor impacts on process efficiency, providing insights for effective improvements.

**Keywords:** Exergy, mass balance, exergy balance, refining, ladle furnace, steel industry

## Sumário

Agradecimentos .....	3
Resumo.....	4
Sumário.....	1
Lista de figuras.....	2
Lista de tabelas .....	3
Lista de abreviação .....	4
1. Introdução.....	0
1.1 Objetivo.....	3
2. Revisão bibliográfica.....	4
2.1 Exergia.....	4
2.2 Aplicações de Exergia .....	9
2.3 Forno Panela.....	11
2.4 Exergia na siderurgia.....	13
3. Materiais e métodos.....	15
4. Resultados e discussões.....	20
4.1 Análise de alteração de parâmetros .....	25
5. Conclusão.....	29
5.1 Propostas futuras .....	29
6. Referências Bibliográficas.....	31
Anexo 1 .....	34
Anexo 2 .....	36

Lista de figuras

FIGURA 1. 1 PRODUÇÃO DE AÇO BRASILEIRO. ADAPTADO DE (AÇO BRASIL, 2022).....0

FIGURA 1. 2 ETAPAS DO REFINO DO AÇO.....1

FIGURA 2. 1INTERAÇÃO DO SISTEMA COM O AMBIENTE. ADAPTADO DE [MORAN & SCIUBBA, 1994] ..... 5

FIGURA 2. 2 PUBLICAÇÕES SOBRE ENERGIA EM REVISTAS. ADAPTADO DE [ZHANG & JIN, 2022] ..... 9

FIGURA 2. 3 PUBLICAÇÕES NO ESTUDO DE EXERGIA. ADAPTADO DE [ZHANG E JIN, 2022] ..... 10

FIGURA 2. 4 FORNO PANELA (FP). ADAPTADO DE [TABATABAEI ET AL., 2018] ..... 12

FIGURA 3. 1 ALGORITMO DO PROGRAMA PRODUZIDO NESTE TRABALHO.15

FIGURA 4. 1 BALANÇO DAS CORRENTES DE ENTRADA E SAÍDA..... 23



## Lista de tabelas

TABELA 4.1 DADOS DOS SOMATÓRIOS DE MASSA, ENERGIA E EXERGIA.....	22
TABELA 4.2 BALANÇO DE ENTALPIA, ENTROPIA E EXERGIA. ....	22
TABELA 4. 3 VARIAÇÃO DA ENERGIA DO ELETRODO E AS EFICIÊNCIAS .....	25
TABELA 4. 4 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO BANHO METÁLICO. ....	26
TABELA 4. 5 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO ARGÔNIO E AS EFICIÊNCIAS.....	27
TABELA A1.1 DADOS TERMODINÂMICOS DO AQUECIMENTO DO $Al_2O_3$ .....	34
TABELA A1.2 DADOS TERMODINÂMICOS DA REAÇÃO DO $Al_2O_3$ .....	35
TABELA A2.1 DADOS DE ENTRADA DO ARGÔNIO.....	36
TABELA A2.2 DADOS DE ENTRADA DA ESCÓRIA PROVENIENTE DO FEA.....	36
TABELA A2.3 DADOS DE ENTRADA DA ESCÓRIA ADICIONAL FRIA.....	36
TABELA A2.4 DADOS DE ENTRADA DO AÇO PROVENIENTE DO FEA.....	37
TABELA A2.5 DADOS DE ENTRADA DAS FERROLIGAS.....	37
TABELA A2.6 DADOS DE ENTRADA DOS ELEMENTOS ADICIONAIS.....	37
TABELA A2.7 DADOS DE ENTRADA DO ELETRODO.....	37
TABELA A2.8 DADOS DE SAÍDA DOS GASES DE EXAUSTÃO.....	37
TABELA A2.9 DADOS DE SAÍDA DA ESCÓRIA.....	37
TABELA A2.10 DADOS DE SAÍDA DO AÇO REFINADO.....	38
TABELA A2. 11 DADOS DAS REAÇÕES.....	38
TABELA A2.12 DADOS TERMODINÂMICOS DO ARGÔNIO A 298,15K.....	38
TABELA A2.13 DADOS TERMODINÂMICOS DA ESCÓRIA PROVENIENTE DO FEA A 1877,15K.....	39
TABELA A2.14 DADOS TERMODINÂMICOS DA ESCÓRIA FRIA A 298,15K.....	39
TABELA A2.15 DADOS TERMODINÂMICOS DO BANHO METÁLICO FUNDIDO A 1877,15K.....	39
TABELA A2.16 DADOS TERMODINÂMICOS DAS FERROLIGAS A 298,15K.....	39
TABELA A2.17 DADOS TERMODINÂMICOS DOS ELEMENTOS ADICIONAIS A 298,15K.....	40
TABELA A2.18 DADOS TERMODINÂMICOS DO ELETRODO .....	40
TABELA A2.19 DADOS TERMODINÂMICOS DO GÁS DE EXAUSTÃO A 1893,15K.....	40
TABELA A2.20 DADOS TERMODINÂMICOS DA ESCÓRIA DE SAÍDA A 1893,15K.....	40
TABELA A2.21 DADOS TERMODINÂMICOS DO AÇO REFINADO A 1893,15K.....	41
TABELA A2.22 CÁLCULO DE ENTALPIA, ENTROPIA E EXERGIA DA ESCÓRIA DO FEA A 1877,15K.....	41
TABELA A2.23 CÁLCULO DE ENTALPIA, ENTROPIA E EXERGIA DO BANHO METÁLICO FUNDIDO A 1877,15K... 41	
TABELA A2.24 CÁLCULO DE ENTALPIA, ENTROPIA E EXERGIA DO ELETRODO A 298,15K.....	41
TABELA A2.25 CÁLCULO DE ENTALPIA, ENTROPIA E EXERGIA DO GÁS DE EXAUSTÃO A 1893,15K.....	41
TABELA A2.26 CÁLCULO DE ENTALPIA, ENTROPIA E EXERGIA DA ESCÓRIA DE SAÍDA 1893,15K.....	42
TABELA A2.27 CÁLCULO DE ENTALPIA, ENTROPIA E EXERGIA DO AÇO REFINADO 1893,15K.....	42
TABELA A2.28 CÁLCULO DE ENTALPIA, ENTROPIA E EXERGIA DAS REAÇÕES 1893,15K.....	42

## **Lista de abreviação**

FP- Forno Panela

FEA- Forno Elétrico a Arco

## 1. Introdução

O crescente aumento do consumo de energia pelas indústrias têm gerado uma série de problemas ambientais. O gasto excessivo de energia em processos produtivos não apenas contribui para o esgotamento dos recursos naturais, mas também resulta na emissão de gases de efeito estufa e na degradação do meio ambiente. O impacto negativo desses processos na qualidade de vida e na sustentabilidade do planeta tem sido objeto de intensa discussão na sociedade e nas políticas públicas. A busca por alternativas e soluções para a otimização do uso de energia nas indústrias é uma necessidade urgente para reduzir os danos causados ao meio ambiente.

A indústria siderúrgica desempenha um papel fundamental na economia global, fornecendo o material para a construção de infraestruturas, maquinários e diversos setores industriais. Além de ser uma importante geradora de empregos e impulsionadora do desenvolvimento, a indústria siderúrgica desempenha um papel estratégico na segurança econômica de muitos países. No contexto brasileiro, a figura 1.1 ilustra a produção de aço nos últimos anos, reforçando seu papel como um setor-chave na economia nacional.

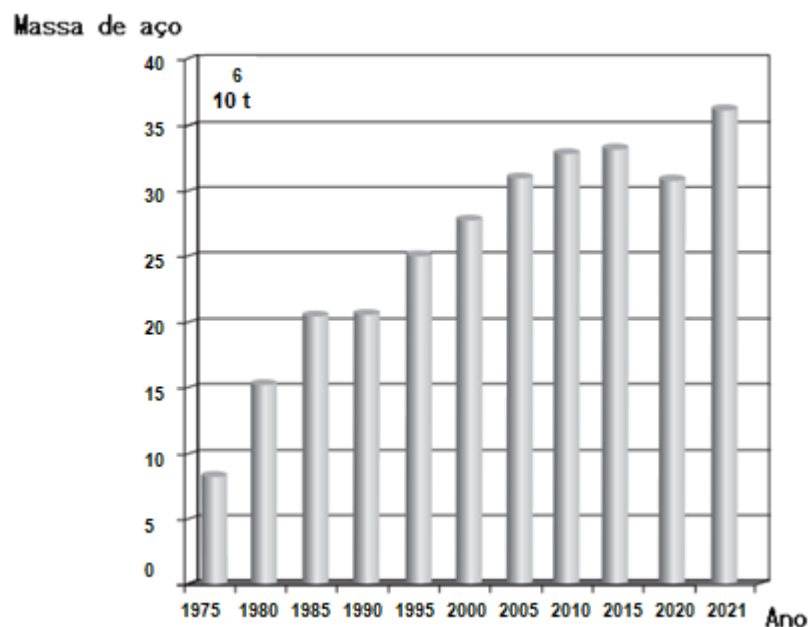


Figura 1.1: Produção de aço no Brasil. Adaptado de Aço Brasil (2022)

Sucata é um material reciclável obtido a partir de resíduos metálicos, como peças de automóveis, eletrodomésticos e estruturas metálicas descartadas. No entanto, a gestão inadequada da sucata de metal pode resultar em problemas ambientais. Uma solução viável para lidar com a sucata de metal é o processo de fusão, no qual a sucata é derretida em fornos adequados para a produção de aço.

O processo de refino do aço em usina semi-integrada possui dois estágios, sendo os principais o Forno Elétrico a Arco (Electric Arc Furnace - FEA) e o Forno Panela (Ladle Refining Furnace- FP). O FEA utiliza a energia elétrica para fundir a sucata de aço. Em seguida, o FP é responsável por remover impurezas e ajustar a temperatura e a composição do aço, garantindo as propriedades desejadas. Por fim, o Lingotamento Contínuo molda o aço em lingotes ou placas, permitindo sua posterior conformação em produtos como pregos e vergalhões. A figura 1.2 apresenta as etapas de refino e lingotamento. Varanasi et al. (2019)

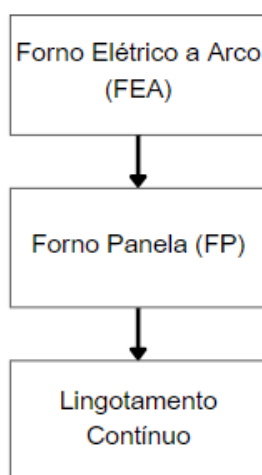


Figura 1.2: Etapas do refino do aço e seu lingotamento.

O uso do FP é útil para a produção de aços especiais, que possuem elevada resistência mecânica e à corrosão, e que são utilizados em aplicações de alta tecnologia. Assim sendo, o FP é capaz de produzir aços de alta qualidade, com propriedades específicas, que são utilizados em diversas aplicações, tais como construção civil, indústria automobilística, setor naval, entre outros.

Durante o processo de operação, os eletrodos consomem grande quantidade de energia e o processo emite uma grande quantidade de gases, tais como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) e óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), que são emitidos para a atmosfera.

Além disso, o FP também pode gerar resíduos sólidos, como escória e poeira, que precisam ser tratados adequadamente para minimizar seu impacto ambiental. Para evitar a poluição, as empresas siderúrgicas devem adotar tecnologias de controle de emissão, tais como sistemas de filtragem de gases e tratamento de resíduos, visando reduzir o impacto ambiental de suas operações. Maghool et al. (2017)

A análise exergética considera não apenas a quantidade de energia consumida pelo processo, mas também a qualidade dessa energia, levando em conta a disponibilidade do recurso energético e o impacto ambiental das perdas de energia. Com essa abordagem, é possível identificar oportunidades de melhoria no processo e otimizar o uso de recursos energéticos, reduzindo custos e emissões de gases prejudiciais ao meio ambiente. Macedo Costa et al. (2001)

A utilização da análise exergética pode proporcionar benefícios econômicos, ambientais e sociais para as empresas siderúrgicas, além de contribuir para o desenvolvimento sustentável do setor. Lu et al. (2016)

A eficiência energética do processo do forno panela pode ser avaliada através de uma análise exergética. (ÇAMDALI; TUNC, 2003) conduziram uma simulação detalhada da análise exergética do forno panela por meio de um programa específico. Embora o autor destaque potenciais melhorias para o programa em questão, essas sugestões não são aplicadas em otimizações efetivas no desempenho do programa. Isto posto, este presente trabalho se propõe a realizar simulações de alteração de parâmetros direcionadas ao aprimoramento do forno panela.

No que se refere às correntes de entrada e saída do FP, destacamos que o processo consome uma grande quantidade de energia, principalmente para manter a temperatura adequada durante o processo de refino. Além disso, a escória e os gases de exaustão gerados durante o processo contêm uma energia que pode ser recuperada através de processos de troca térmica.

Nesse sentido, a análise exergética permite identificar oportunidades de melhoria, como o uso de tecnologias mais eficientes, a recuperação de calor e a maximização da eficiência do refino, o que pode resultar em redução de custos e de impactos ambientais associados à produção de aço.

## 1.1 Objetivo

O presente estudo teve como objetivo principal a análise exergética e proposta de melhorias no forno panela em uma siderúrgica na análise de um aço 1010. Para isso, um programa em linguagem Python foi elaborado empregando Jupyter Notebook. Foram utilizados conceitos termodinâmicos para a avaliação das correntes de entrada e saída do processo, permitindo identificar os pontos críticos e oportunidades de aprimoramento.

Além do objetivo principal, temos como intenção aprofundar nossa compreensão sobre os balanços de massa no processo e buscar oportunidades de recuperação de energia de subprodutos visto a pequena quantidade de artigos publicados para análise exergética do forno panela. Espera-se que o presente estudo contribua para o avanço do conhecimento na área de processos siderúrgicos, assim como para aprimoramento da eficiência exergética, redução do impacto ambiental e aumento da competitividade. Esses objetivos serão alcançados por meio da análise detalhada dos processos envolvidos na indústria siderúrgica, incluindo a obtenção de dados reais da etapa de forno panela de uma empresa do setor siderúrgico.

## 2. Revisão bibliográfica

### 2.1 Exergia

Exergia, energia e anergia são conceitos fundamentais na termodinâmica e estão relacionados à qualidade da energia. A exergia é a parte da energia que pode ser convertida em trabalho, enquanto a anergia é a energia que não pode ser convertida em trabalho. A energia total em um sistema é a soma da exergia e da anergia. A equação 2.1 relaciona energia, anergia e exergia. Zanoni et al. (2004).

$$Energia = Exergia + Anergia$$

Equação 2.1

A análise tradicional de eficiência energética não é capaz de determinar efetivamente a qualidade da energia e dos recursos, porém a análise exergética, é uma ferramenta útil para medir a diferença qualitativa entre diferentes fontes de energia e formas de uso. Macedo Costa et al. (2001 e Ramakrishna et al. (2015a e Zhang; Jin (2022).

Segundo Terzi (2018) a aplicação da análise de exergia tem despertado um interesse crescente, principalmente em modelagem energética, visando alcançar economia energética e financeira. Alguns exemplos de aplicação da análise exergética para redução de emissões de gases de efeito estufa incluem a otimização de processos industriais, a melhoria do controle térmico de edificações e a avaliação do desempenho de sistemas de geração de energia renovável.

As leis da termodinâmica são indispensáveis na análise e compreensão do comportamento da energia em sistemas e processos. A primeira lei da termodinâmica ou lei da conservação de energia estabelece que a energia de um sistema isolado é constante, nunca se perdendo, embora se transforme em outra forma de energia. A segunda lei introduz o conceito de entropia. Essa lei informa que a entropia em um sistema tende a aumentar.

A análise da primeira lei da termodinâmica por si só é insuficiente para enfrentar o desafio energético, pois negligencia o aspecto da qualidade da energia. É assim que com base na segunda lei da termodinâmica entra o conceito

de exergia, que leva em consideração a qualidade da energia. Enquanto a primeira lei considera apenas a variação total da energia interna envolvida em um processo, a análise exérgica avalia a energia disponível para realizar trabalho, levando em conta as perdas associadas às irreversibilidades que ocorrem durante a transformação. Wang (2018 e Zanoni et al. (2004)

A exergia é uma grandeza que pode ser expressa em termos de funções de estado, desde que seja definida por meio de processos reversíveis. Isso significa que a exergia é uma função que depende apenas do estado termodinâmico do sistema, independentemente do caminho pelo qual o sistema alcançou esse estado. Kotas et al. (1985 e Satō (2004)

No contexto termodinâmico, o sistema é a parte específica do processo de interesse que está sendo estudado, podendo ser uma substância, um equipamento ou até mesmo o processo completo. O ambiente é uma entidade externa ao sistema de interesse. A vizinhança, por sua vez, é a região em torno do sistema onde ocorrem as interações com o ambiente. Ela representa a interface entre o sistema e o ambiente, onde são consideradas as transferências de energia e matéria. A figura 2.1 apresenta uma representação do ambiente e da vizinhança. A fronteira entre a vizinhança e o sistema é definida como adiabática.

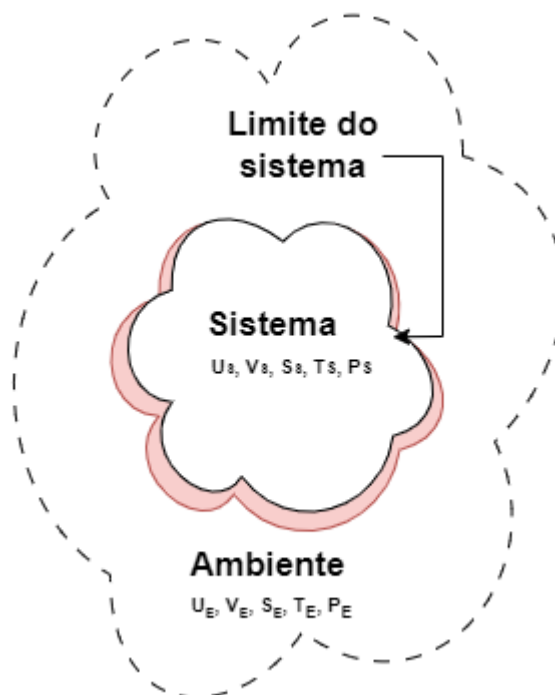


Figura 2.1: Interação do sistema com o ambiente. Adaptado de [Moran & Sciubba, 1994]



As referências dos processos são as condições do ambiente. Portanto existe um potencial entre o sistema e o ambiente. A variação do estado inicial do sistema até as condições do ambiente fornece todo o trabalho disponível. Quando o sistema entra em equilíbrio com o ambiente, atinge-se o estado morto, a força motriz cessa e a exergia é zero por definição. O estado morto é o estado em que o sistema e o ambiente estão em equilíbrio, ou seja, não há mais trocas de energia ou matéria entre eles. Kuczynski; Chliszcz (2023 e Moran; Sciubba (1994)

Debenedetti, (1984) define o conceito de disponibilidade de exergia sendo uma função termodinâmica cuja diferença entre dois estados de equilíbrio de um sistema consiste em uma medida do trabalho máximo passível de ser obtido a partir dessa mudança (ou o trabalho mínimo necessário para efetuar a mudança). A exergia é uma extensão do conceito de disponibilidade quando se torna necessário quantificar a capacidade de produzir trabalho útil, levando em consideração as condições do ambiente.

A exergia pode ser dividida em quatro partes principais: cinética  $Ex_c$ , potencial  $Ex_p$ , química  $Ex_{ch}$  e física ou termomecânica  $Ex_{ph}$ . A equação 2.2 demonstra a exergia como a soma dos seus componentes. Taner (2018)

$$Ex = Ex_{ph} + Ex_{ch} + Ex_p + Ex_c \quad \text{Equação 2.2}$$

A exergia física é a parte da exergia relacionada às propriedades termodinâmicas de um sistema - entalpia (H) e entropia (S) - em relação às condições termodinâmicas ( $H_0$  e  $S_0$ ) com temperatura e pressão do ambiente de referência. Ela pode ser quantificada pela Equação 2.3, que envolve a diferença entre a entalpia e entropia do sistema e as condições de referência. Dinçer; Rosen (2020 e Ebrahimi; Houshfar (2022)

$$Ex_{ph} = (H - H_0) - T_f \cdot (S - S_0) \quad \text{Equação 2.3}$$

A exergia química é a quantidade mínima de energia necessária para produzir um composto químico a partir de seus elementos em uma concentração específica no ambiente de referência. O valor da exergia no estado morto restrito é o trabalho teórico máximo obtido à medida que o sistema atinge temperatura e pressão do ambiente com a mesma composição inicial do sistema. A exergia

química pode ser calculada pela equação 2.4, onde  $\mu_i^e$  são o potencial do ambiente inicial e  $\mu_i^0$  é o potencial do estado morto restrito. De Avillez (2024 e Szargut (1989)

$$Ex_{ch} = \sum N_i(\mu_i^0 - \mu_i^e) \quad \text{Equação 2.4}$$

De acordo com Dunbar et al. (1992), a exergia cinética de um fluido pode ser calculada através da sua velocidade média (v) e da sua massa (m). A exergia cinética, especificamente em um forno de refino, considera a vazão de gás (V), temperatura do banho metálico (T), tonelada de massa no banho (M), profundidade da injeção de gás (h) e pressão na superfície do banho metálico (P). A exergia potencial está relacionada ao posicionamento referencial e é calculada como o produto da gravidade (g), da altura (z) e da massa (m). As equações 2.5 e 2.6 apresentam as energias potencial e cinética, respectivamente. (Maghool et al., 2017; Zanoni et al., 2004 ; Fruehan R., 1998)

$$Ex_p = mgz \quad \text{Equação 2.5}$$

$$Ex_c = 14,23 * \left(\frac{VT}{M}\right) \log \left(\frac{1+h}{1,48P}\right) \quad \text{Equação 2.6}$$

Em grande parte dos estudos de análise exergética, as grandezas de exergia cinética e potencial costumam ser desprezadas, pois na maioria dos casos o sistema encontra-se em repouso e sem variação de altitude. Ao ignorar a exergia cinética e potencial, a exergia de um fluxo pode ser determinada calculando-se a exergia física e química desse fluxo, conforme a equação 2.7. Ebrahimi; Houshfar (2022 e Zanoni et al. (2004)

$$Ex = Ex_{ph} + Ex_{ch} \quad \text{Equação 2.7}$$

Um outro tipo de exergia é a elétrica. Essa forma representa uma medida da energia útil contida em um sistema elétrico, representando a capacidade do mesmo de realizar trabalho. É calculada pela integral no tempo (t) da potência (P),

ou seja, a soma das potências instantâneas multiplicadas pelo diferencial de tempo ao longo de um determinado intervalo. A exergia elétrica é contemplada na equação 2.8. De Avillez (2024)

$$Ex_{el} = \int_{t_0}^{t_f} P dt \quad \text{Equação 2.8}$$

A exergia de um sistema pode ser dividida em um balanço exergético, no qual a quantidade de exergia que entra no sistema ( $Ex_e$ ) é igual à quantidade que sai ( $Ex_s$ ) mais a quantidade de exergia que é destruída ( $Ex_d$ ) durante o processo. Ramakrishna et al. (2015b) Essa relação é representada pela equação 2.9.

$$Ex_e = Ex_s + Ex_d \quad \text{Equação 2.9}$$

(RAMAKRISHNA et al, 2015) calculam a eficiência exergética como a razão da energia utilizada para produzir o produto de interesse e o somatório das exergias de entrada. Onde  $Ex_s$  e  $M_s$  são a exergia e a massa do aço líquido nos produtos e  $Ex_e$  e  $M_e$  são a exergia e a massa na entrada. Essa eficiência diz o quanto de exergia realmente foi destinada ao produto, conforme a equação 10.

$$Exf = \frac{M_s Ex_s}{\sum M_e Ex_e} \quad \text{Equação 2.10}$$

De forma similar a energia pode ser definida como a razão entre a energia do aço refinado e a energia das energias de entrada em um processo termodinâmico. A eficiência energética é definida através da equação 2.11. Onde  $E_s$  e  $M_s$  são a energia e a massa do aço líquido nos produtos e  $E_e$  e  $M_e$  são a energia e a massa na entrada.

$$Ef = \frac{M_s E_s}{\sum M_e E_e} \quad \text{Equação 2.11}$$

## 2.2 Aplicações de Exergia

Na última década, pesquisadores têm desenvolvido métodos socioambientais, que combinam modelos e métodos oriundos da termodinâmica. Dentre os estudos publicados, a análise exergética tem se destacado como uma abordagem promissora. Zhang; Jin (2022) A Figura 2.2 apresenta uma representação gráfica dos dados de publicações sobre energia sustentável de 1997 até 2020, fornecendo uma visão abrangente das principais tendências e avanços nessa área de estudo.



Figura 2. 2: Publicações sobre energia em revistas. Adaptado de [Zhang & Jin, 2022]

A análise exergética foi desenvolvida na década de 1950, mas só se tornou um método convencional para melhorar a eficiência energética na década de 1980. Desde então, tem sido amplamente utilizada em diferentes níveis de sistemas, incluindo empresas, indústrias, regiões e, até mesmo, níveis nacionais e globais. O número de publicações sobre análise exergética tem aumentado ao longo do tempo, como pode ser observado no gráfico apresentado na figura 2.3.

**Total de publicações**

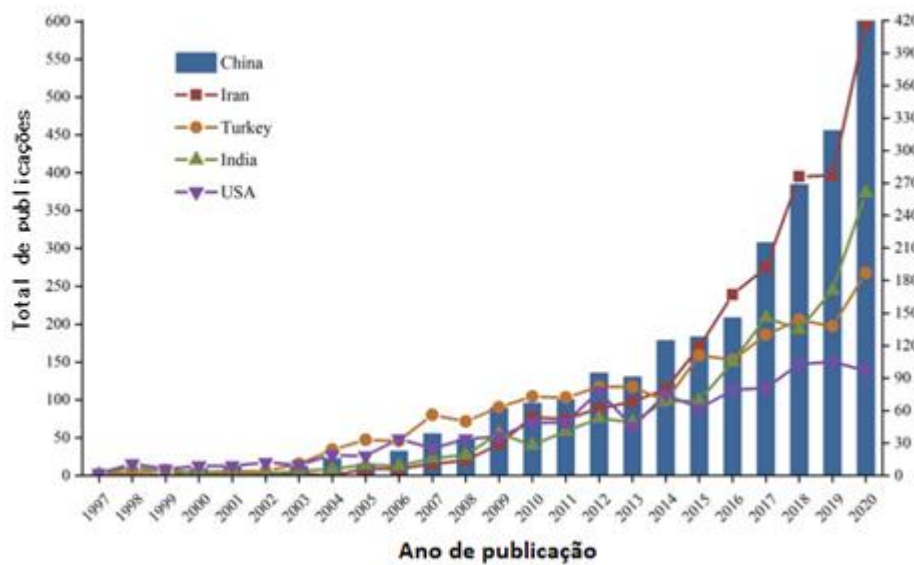


Figura 2. 3 Publicações no estudo de exergia. Adaptado de [Zhang e Jin, 2022]

O estudo realizado por Sahoo, (2008) apresentou a aplicação do conceito de exergoeconomia, que consiste na integração dos princípios de exergia, relacionados à análise termodinâmica, com a análise econômica. Os resultados obtidos propõem uma redução de custos de 9,9 % em uma usina de cogeração de energia estudada.

De forma similar, Behzadi et al., (2018) implementaram técnicas de gaseificação e digestão em uma usina de energia a partir de resíduos, visando uma abordagem econômica da geração de vapor e eletricidade. Nessa perspectiva, esse tipo de aplicação reforça a eficácia dos conceitos de exergia como uma abordagem multidisciplinar para a alteração de parâmetros de sistemas energéticos. Kwak; Uysal (2018)

Através da análise exergética, Sheng et al., (2023) identificaram potenciais de melhoria nos componentes e no sistema de processamento de gás off-Shore. Através da alteração de parâmetros dos componentes com maior potencial de economia exergética, foi possível alcançar uma redução de 14 % no consumo de energia durante um dia de produção analisado.

Bai et al. (2023) analisaram o sistema de energia de Beijing sob as perspectivas energética e exergética, com o objetivo de compreender suas mudanças entre o ano de 2008 e 2017. Ao aplicar essa análise às estatísticas nos anos de estudo, as mudanças energéticas da cidade foram compreendidas.

## 2.3 Forno Panela

Na década de 1950, a fusão e o refino de aços eram realizados em fornos básicos e ácidos de soleira aberta. A capacidade era limitada e a pureza dos aços produzidos não era boa, além de incorporar uma quantidade grande de hidrogênio. A partir da década de 1960, os fornos básicos e ácidos de soleira foram substituídos por fornos de arco elétrico (FEA) e foram instalados fornos de refino em panelas (FP), permitindo a redução de impurezas. O FP possui capacidade de produzir aço de alta qualidade com maior eficiência e menor impacto ambiental. Tanaka; Sato (2011)

Os componentes do FP incluem o recipiente do forno, os eletrodos de grafite, o extrator de gás, o injetor de substâncias químicas e o injetor de argônio. O recipiente do forno é feito de aço resistente ao calor e revestido internamente por um refratário. O forno que foi analisado nesse estudo possui capacidade de 100 ton por batelada de aço refinado. Os eletrodos de grafite são utilizados para fornecer energia elétrica ao forno e aquecer o aço líquido a temperaturas elevadas. O injetor de substâncias químicas é utilizado para adicionar elementos químicos, como ligas de cálcio e alumínio, ao aço líquido para remover impurezas e melhorar a qualidade do aço. Rocha (2011)

O uso de gás argônio na injeção em operações siderúrgicas secundárias é comum devido à sua inércia química, solubilidade insignificante e capacidade de remover inclusões, além de ajudar na homogeneização de temperatura e composição do aço líquido, garantindo, assim, a qualidade do produto. O duto de exaustão é responsável por remover o gás acumulado na panela. No gás de exaustão pode ser encontrado o argônio, dióxido e monóxido de carbono formados na oxidação do carbono no forno e poeira provenientes das reações que acontecem no FP. A figura 2.4 ilustra os principais componentes do FP. Tiwari et al. (2022)

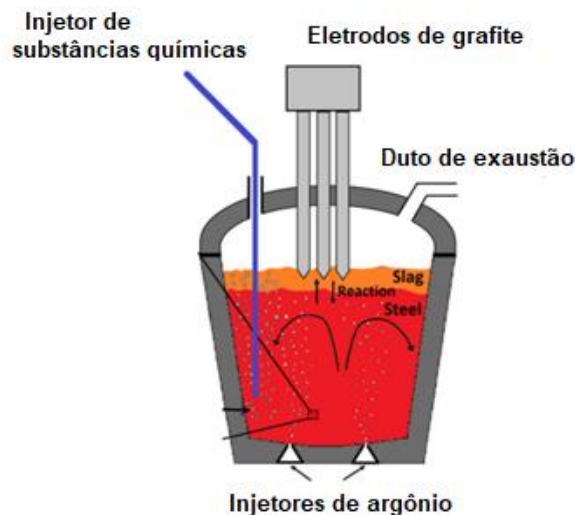


Figura 2.4: Forno Panela (FP). Adaptado de [Tabatabaei et al., 2018]

A utilização de diferentes materiais refratários nas paredes da panela altera as suas propriedades térmicas. O pré-aquecimento da panela pode durar até 18 horas, sendo necessário controlar a taxa de aquecimento para evitar tensões extremas. Fruehan R. (1998)

A desoxidação é uma técnica de refino em que se adicionam elementos químicos como ferromanganês, siliciomanganês ou alumínio sob condições específicas de temperatura e pressão para remover o oxigênio dissolvido no aço. Já a dessulfurização é realizada com a adição de escória de alta basicidade e capacidade redutora ou aluminato de cálcio ao reator para remover o enxofre dissolvido no aço. (Fruehan R., 1998; Rocha, 2011)

A produção de aço de qualidade superior para aplicações específicas demanda uma série de processos, incluindo a eliminação de inclusões não metálicas que podem comprometer a qualidade do produto. Com a finalidade de contornar essa situação, Tabatabaei et al. (2018) estudaram a adição de ligas de cálcio, pois assim como escórias de alta basicidade, é amplamente utilizado como abordagem para modificar inclusões não metálicas e melhorar a fundibilidade do aço, além de minimizar defeitos superficiais relacionados às inclusões, aumentando a usinabilidade do produto.

## 2.4 Exergia na siderurgia

Uma das aplicações da exergia é sua utilização na otimização de processos industriais. Akiyama et al, (1998) estudaram a redução das emissões de dióxido de carbono para a produção de ferro, utilizando a análise exergética.

ÇAMDALI; et al, (2001) realizaram uma análise detalhada de um forno panela usando linguagem de programação para comparar as energias e exergias dos principais fluxos do forno panela. Nessa ocasião, eficiência energética e exergética foram calculados. As principais perdas relatadas foram relacionadas as reações químicas e perda térmica.

Çamdali & Tunc, (2003) realizaram um estudo abrangente do forno panela, empregando conceitos de exergia para compreender seu funcionamento. Durante a análise, constatou-se que as perdas de exergia estão diretamente relacionadas às reações e às perdas de calor para o ambiente, representando aproximadamente 13% do total. Os autores destacaram a eficiência do processo, alcançando 81%, em contraste com o FEA que apresenta apenas 55 % de eficiência. Esta diferença foi atribuída ao tempo reduzido de permanência do aço no FP em comparação ao FEA.

A abordagem de Zanoni et al., (2004) ao estabelecer um roteiro para a elaboração do programa para cálculo de exergia em forno elétrico a arco (FEA) demonstra sua visão estruturada e metodológica, permitindo uma implementação organizada e eficiente. Sua proposta enfatiza a importância de considerar diferentes etapas, como a obtenção e manipulação dos dados, a aplicação de cálculos termodinâmicos e a análise dos resultados.

Min & Jiang, (2010) investigaram a perda de exergia em um forno panela aquecido por eletrodos a arco. Foi constatado que perdas de energia estavam relacionadas às perdas de calor pela parede da panela. No estudo foi utilizado um programa de computador com estrutura semelhante ao desenvolvido no trabalho atual e melhor detalhado no capítulo seguinte. Verificou-se que a utilização de uma escória com espuma foi eficiente para reduzir o consumo de energia de 19,45 MJ para 11,07 MJ por tonelada de aço.

No estudo realizado por Yetisken et al., (2013), foi conduzida uma análise exergética em forno panela, considerando tanto o FEA e FP, como um sistema integrado. Para realizar a análise de exergoeconomia, foi utilizado o programa



WinQSB, que permite a realização de análises lineares para o cálculo de custos. Durante a análise, foi observado que o argônio apresenta um volume de uso significativo, resultando em maiores gastos associados a esse insumo.

Çamdali et al., (2020) aplicaram uma análise exergética com um balanço de massa e energia em um forno elétrico a arco (FEA). Foram determinados os valores de energia e exergia dos componentes químicos em diferentes temperaturas e constatou-se que 42,6 % da exergia é perdida devido a reações químicas, transferência de calor e outros fatores. Além disso, verificou-se que os gases de exaustão podem ser utilizados para aquecer a sucata que será utilizada na próxima fundição, reduzindo significativamente o consumo de energia elétrica.

### 3. Materiais e métodos

Utilizando dados reais de uma siderúrgica, a programação em Python foi realizada, por meio do Jupyter Notebook, para analisar o balanço de massa, energético e exergético do sistema. Dessa forma, este trabalho buscou fornecer um guia prático para a implementação da análise exergética em fornos panela. A Figura 3.1 apresenta um fluxograma que ilustra o algoritmo utilizado no desenvolvimento do programa.

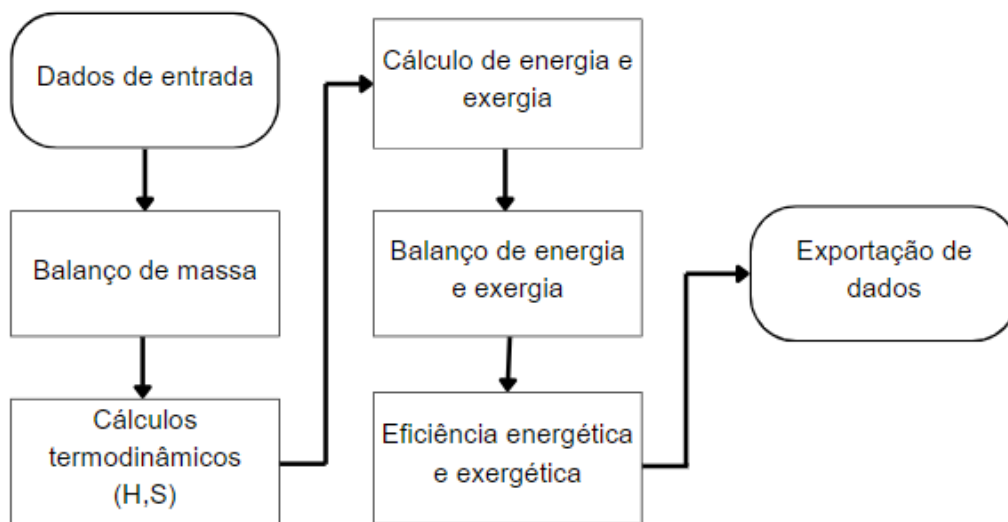


Figura 3.1: Algoritmo do programa produzido neste trabalho.

O processo de coleta e organização dos dados das composições utilizados neste estudo foi conduzido em etapas bem definidas. Inicialmente, foram obtidos os dados necessários junto a uma empresa do setor siderúrgico, os quais foram compilados e organizados em uma tabela no formato Excel. Em seguida, para facilitar a análise e o processamento desses dados, eles foram importados para o programa Python por meio da criação de um dataframe.

De forma geral, um forno panela possui correntes de entrada e saída, cada uma contribuindo de maneira única para o processo global. As correntes de entrada definidas no programa são o argônio, banho metálico fundido proveniente do Forno Elétrico a Arco (FEA), escória do FEA, escória adicional fria e ferroligas. Já as correntes de saída que foram definidas incluem os gases de exaustão, a escória e o aço refinado. Assim, cada uma dessas correntes entra no programa

com os dados de composição, temperatura, massa e massa molar dos componentes.

Para corrigir a quantidade de carbono adicionada ao forno e as reações com oxigênio é criada uma corrente chamada elementos adicionais. A corrente conhecida como potência do eletrodo serve para determinar a quantidade média de carbono perdida pelo eletrodo no cálculo do balanço de energia e exergia.

No desenvolvimento do programa foi realizado o chamamento e utilização de bibliotecas específicas voltadas para operações com dataframes, cálculos matemáticos e visualização gráfica. A inclusão do pacote 'Pandas' se deu por conta da manipulação e análise de dados. O pacote 'Numpy', para manipulação de arrays e cálculos numéricos. A funcionalidade de integração numérica foi aprimorada pelo pacote 'Scipy', pela função 'quad'. A visualização foi eficientemente abordada pelo pacote 'matplotlib', permitindo a criação de gráficos informativos.

Além da obtenção dos dados brutos, o estudo envolveu a aplicação de conceitos termodinâmicos, como entalpia e entropia. Para obter as informações termodinâmicas, foi utilizado o software Thermo-Calc através da base de dados SSUB3. O programa em questão foi concebido para receber como entrada um dataframe contendo os dados reais a serem analisados, bem como uma série de arquivos de texto (formato .txt) contendo os valores termodinâmicos individuais de entalpia e entropia de cada componente envolvido.

Os dados termodinâmicos das reações tanto para entalpia e entropia obtidas no Thermo-Calc receberam as correções dos valores de dissolução de O<sub>2</sub> no ferro conforme a equação 3.1 antes da entrada no programa. A discussão das reações consideradas nesse trabalho é apresentada no capítulo 4. Fruehan R. (1998)

$$\Delta G(O, T) = -115750 - 4.63T \text{ J/mol de O} \quad \text{Equação 3.1}$$

Foi desenvolvida uma função interpoladora como parte integrante do programa, cujo propósito foi atribuir valores de entalpia e entropia ao dataframe, levando em consideração os valores de entalpia e entropia por mol individuais para cada corrente. Para isso, uma temperatura alvo é definida com base na

temperatura da corrente. O programa ao receber essa temperatura, faz uma busca pelo arquivo de mesmo nome das composições das correntes e retorna os dados termodinâmicos.

No Anexo 1, está disponível um exemplo de entrada de dados para o processo de aquecimento e reação, incluindo tabelas específicas para  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . O programa também recebe dados da entalpia e entropia de formação e automaticamente os desconta dos valores de entalpia e entropia de cada componente de uma corrente.

Ainda na parte inicial do programa, é reservado um espaço dedicado à inclusão de possíveis alterações nas variáveis de entrada, visando avaliar e otimizar o processo. Entre as variáveis manipuláveis, destacam-se a temperatura de entrada do argônio, a potência ativa do eletrodo e a temperatura do banho metálico proveniente do FEA. O programa, portanto, ao receber novos valores para as variáveis das correntes, os atualiza de forma a manter o balanço de massa adequado.

Na etapa de balanços, as massas provenientes de cada corrente são somadas para a realização do balanço de massa. Essa etapa é aplicada para a verificação dos dados do processo. Esse balanço é efetuado pela diferença entre a massa de saída ( $M_s$ ) e a massa de entrada ( $M_e$ ), proporcionando uma avaliação das variações de massa no sistema, conforme a equação 3.2.

$$M_b = \sum M_s - \sum M_e \quad \text{Equação 3.2}$$

Uma tabela individual para cada corrente é gerada, exibindo os valores de massa de cada componente em quilogramas. Além disso, um gráfico comparativo é construído para visualização e compreensão mais clara das massas de saída e entrada.

Através da equação 3.3 o número de mol é calculado.  $N$  é o número de mol,  $M$  é a massa do componente e  $MM$  é o valor da massa molar.

$$N = \frac{M}{MM} \quad \text{Equação 3.3}$$

Após a aplicação da função de cálculo do número de mol para cada corrente, uma função específica para o cálculo da entalpia é chamada. Esta função atribui a cada componente da corrente seu valor de entalpia de aquecimento com base nos cálculos de mol, considerando também o desconto da entalpia de formação a 298,15 K. Para isso, o número de mol multiplica a entalpia e entropia por mol de cada componente que entra e sai do forno panela.

Em seguida, foi conduzido um balanço de energia de forma análoga ao balanço de massa. Contudo, neste caso, as correntes foram analisadas em termos de energia, conforme a equação 3.4. A equação realiza um balanço das entalpias fazendo a subtração da entalpia de saída ( $E_s$ ) pela de entrada ( $E_e$ ). Tabelas individuais foram, então, geradas para cada corrente, exibindo os valores energéticos. Adicionalmente, um gráfico foi construído para ilustrar e comparar as variações de energia.

$$E_b = \sum E_s - \sum E_e \quad \text{Equação 3.4}$$

Posteriormente, uma função dedicada ao cálculo de entropia foi adicionada. Essa função realiza o cálculo da entropia com base na quantidade de mol de cada componente presente no sistema e considera uma entropia de mistura ideal. Uma função para calcular a entropia de mistura foi criada usando suas frações molares ( $N_i$ ) e a constante universal dos gases ( $R$ ). O programa realiza os cálculos para entropia de mistura dos gases de exaustão e das escórias conforme a equação 3.5. De Avillez (2024)

$$S = \sum_i -R \cdot N_i \cdot \ln \left( \frac{N_i}{\sum N_i} \right) \quad \text{Equação 3.5}$$

Após os cálculos de entropia, as exergias, foram determinadas. Para o cálculo dessas exergias foram usadas as equações 2.5 e 2.6. Para calcular a exergia química das reações, utilizamos os dados disponíveis na tabela presente de (Lundberg et al., 1996) para os elementos e compostos envolvidos. Esses valores foram então integrados à Equação 2.4.

Os dados das exergias foram atribuídos à variável de entrada (Exe), ou saída (Exs), como realizado para os balanços de energia e massa. As respectivas exergias foram atribuídas às tabelas específicas correspondentes e, em seguida, foi gerado um gráfico comparativo, de forma similar ao processo realizado para energia e massas. O balanço de exergia foi realizado pela equação 3.6.

$$Ex_b = \sum Ex_s - \sum Ex_e \quad \text{Equação 3.6}$$

Após a realização dos cálculos de entalpia, entropia e exergia, procedeu-se ao cálculo da eficiência exergética e energética do sistema, conforme a equação 2.10 e 2.11.

## 4. Resultados e discussões

No contexto desta investigação, as tabelas A2.1 a A2.7 possuem dados iniciais reais provenientes de uma siderúrgica, focada no processo de refino de aço no forno panela, para um aço 1010. Esses dados dizem respeito a massa, temperatura de entrada e sua massa molar para as correntes de argônio, aço fundido do Forno Elétrico a Arco (FEA), escória do FEA, escória adicional fria e ferroligas.

De maneira análoga, os dados iniciais das correntes de saída apresentam a mesma abordagem. Os dados referentes às características de composição, massa, temperatura e massa molar dos produtos do gás de exaustão, aço refinado e escória de saída, são incorporados ao programa com base nas tabelas A2.8-A2.10.

Ainda no escopo do método utilizado, destaca-se que os dados referentes às reações no processo siderúrgico são integrados de maneira sistemática na tabela A2.11. No que concerne à corrente de reação, é relevante destacar que esta já engloba seus componentes de massa presentes em outras correntes, ou seja, o balanço de massa desconsidera as massas formadas na corrente reação. Toda a massa do sistema é contemplada na sua entrada ou em sua saída. Em particular, são considerados apenas os valores de entalpia, entropia e exergia de reação, os quais são avaliados à temperatura do banho metálico (1893,15 K).

É válido ressaltar que, para o componente  $P_2O_5$ , os dados termodinâmicos tabelados são utilizados apenas até a temperatura de 1080 K, refletindo a limitação do banco de dados empregado. Os compostos  $N_2$ , B,  $V_2O_5$ , S, P, e  $N_2$ ,  $SO_2$  não foram incluídos com dados termodinâmicos no estudo. As tabelas A2.12 a A2.21 apresentam o número de mol, a entalpia de formação e entalpia por mol e entropia por mol de componente.

Os gases de exaustão são os produtos gasosos resultantes do processo que são emitidos para a atmosfera. No contexto do processo siderúrgico, os gases de exaustão incluem uma variedade de componentes, como dióxido de carbono ( $CO_2$ ), monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre ( $SO_x$ ) e possivelmente partículas de poeira e outros subprodutos.

As condições operacionais do forno panela analisado, onde a concentração de oxigênio ( $O_2$ ) é baixa, a reação preferencial é a formação de CO em vez de

dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). A areia de vedação da panela é a base de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , por isso, uma quantidade de óxido de cromo foi considerada na corrente definida como escória fria. A areia preenche o canal da válvula do FEA. A gaveta que mantém o canal fechado é feita de material metálico, e para conter o banho de aço refinado líquido, a areia é colocada no canal acima da válvula, em contato com o banho. Quando a gaveta é aberta, a areia cai e o aço desce.

É possível observar que o balanço de massa estimado, baseado nos dados fornecidos pela empresa, apresenta uma concordância notável. Os valores exatos das correntes de saída não são conhecidos, então foi encontrada uma diferença de 200 kg entre as massas de entrada e saída. Os elementos do balanço de massa da escória foram ajustados para obtenção de um adequado fechamento. Para entender e resolver essa diferença, foi analisado cuidadosamente as correntes envolvidas no processo, considerando a quantidade de cada elemento presente em cada uma delas.

A ausência de consideração da poeira no cálculo decorre principalmente da falta de dados disponíveis sobre sua massa e comportamento durante o processo. O cálculo da exergia física para cada componente é realizado mediante a equação 2.3. Vale ressaltar que, no âmbito desta análise, a exergia potencial é desconsiderada. Isso se justifica pela insignificante variação de altura ao longo do processo, tornando a contribuição da exergia potencial praticamente nula.

Para avaliar os resultados obtidos, a consideração das reações no processo está intrinsecamente ligada à exergia química, conforme expresso pela equação 2.4. Na análise de exergia química, a influência das frações molares foi desconsiderada devido à atividade reduzida de cada elemento na escória em relação à massa total. O valor de exergia química encontrado foi de 96800,0KJ.

Outro resultado, a exergia cinética, foi determinado utilizando a Equação 2.6, que considera os efeitos associados à velocidade dos componentes. O valor calculado da energia cinética foi de 40,9KJ, valor pequeno comparado a ordem de grandeza da exergia das demais correntes.

A entalpia e a entropia por mol de cada componente são multiplicadas pelo respectivo número de mol. Os dados termodinâmicos de entalpia, entropia e exergia estão apresentados nas tabelas A2.22 à A2.28. A energia e a exergia das correntes de Argônio, elementos adicionais, escória fria e ferroligas são nulas pois a entalpia é igual à entalpia de referência.



Na Tabela A2.25, o cálculo da entropia dos gases de exaustão leva em conta a mistura ideal desses gases. Isso significa que as propriedades termodinâmicas estão sendo avaliadas considerando-se o comportamento teórico dos gases quando estão misturados em condições ideais, conforme a equação 3.5.

A fim de obter uma visão global e quantitativa do processo, os componentes de massa são agregados para cada corrente, culminando em uma soma total de massa para cada uma delas. De maneira análoga, o mesmo princípio é aplicado para a energia e exergia, onde os componentes associados a cada corrente são somados, resultando em totais respectivos para essas grandezas termodinâmicas, conforme os resultados da tabela 4.1.

Corrente	Massa (kg)	Energia (J)	Exergia (J)	Temperatura das correntes (K)
Argônio	1247	0,00E+00	0,00+00	298,15
Escória fria	1136	0,00E+00	0,00E+00	298,15
Escória do FEA	1977	3,01E+09	2,01E+09	1887,15
Elementos adicionais	146	0,00E+00	0,00E+00	298,15
Ferroligas	781	0,00E+00	0,00E+00	298,15
Aço fundido	97831	1,06E+11	7,19E+10	1887,15
Potência eletrodo	20	6,48E+09	6,48E+09	298,15
Gás de exaustão	1499	1,29E+09	8,49E+08	1893,15
Escória de saída	2782	4,53E+09	3,03E+09	1893,15
Aço refinado	98860	1,09E+11	7,42E+10	1893,15
Reação	0	1,60E+09	1,86E+09	1893,15

Tabela 4.1 Dados dos somatórios de massa, energia e exergia.

Para assegurar a consistência do modelo e proporcionar uma avaliação abrangente do sistema siderúrgico, as correntes de entrada e saída são agregadas, resultando no fechamento dos balanços de massa, energia e exergia, conforme pode ser observada na tabela 4.2.

Corrente	Massa (kg)	Energia (J)	Exergia (J)
Entrada	103127	1,09E+11	7,40E+10
Potência do Eletrodo	0	6,48 E+9	6,48 E+9
Reação	0	1,60E+09	1,86E+09
Saída	103127	1,15E+11	7,80E+10
Balanco	0	-2,39E+09	-4,26E+09

Tabela 4.2 Balanço de Massa, Energia e Exergia.

Para visualizar de forma clara e abrangente o desempenho do sistema siderúrgico estudado, foi gerado um gráfico representativo dos balanços de energia e exergia conforme a figura 4.1.

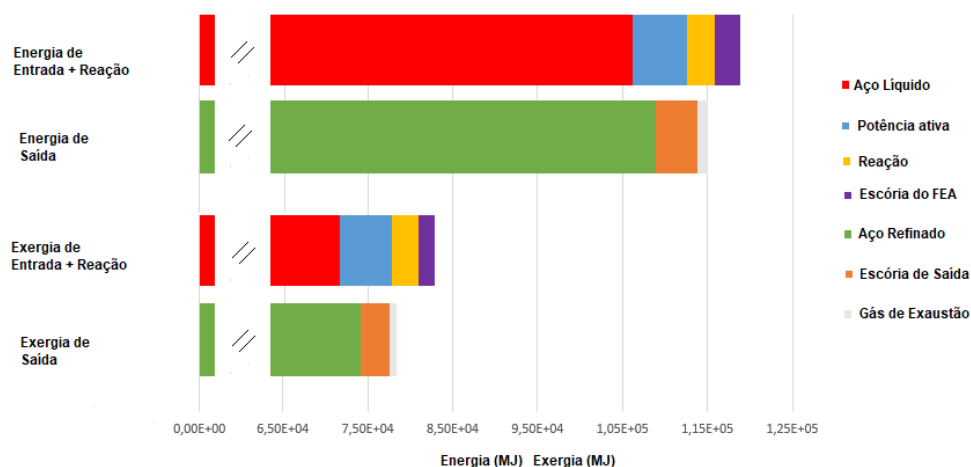


Figura 4.1: contribuição de cada corrente para a entalpia e exergia

A energia e exergia do eletrodo correspondem a aproximadamente 6% e 9% da energia e exergia do aço de entrada, respectivamente. Os gases de exaustão ganham energia e exergia apreciáveis ao interagir com o aço líquido.

Na figura 4.1 a maior parte da energia e exergia corresponde ao nosso produto de interesse: o aço fundido na entrada e ao aço refinado na saída. O aumento da energia e exergia dos produtos de interesse ao comparar a entrada com a saída diz respeito a um aumento de temperatura de 16 °C que o ferro fundido que sai do FEA e entra FP recebe de calor do eletrodo até a sua saída como aço refinado.

As correntes de gás de exaustão e escória na saída do FP carregam uma quantidade significativa de exergia. É valido destacar que no forno panela em estudo, o calor dessas correntes não é aproveitado para outros processos. Nesse sentido, os gases de exaustão poderiam ser aproveitados para aquecer correntes de entrada no processo.

As eficiências energéticas e exergética foram calculadas com base nas equações 2.10 e 2.11, respectivamente. Os valores obtidos demonstram uma eficiência energética de 92,9% e uma eficiência exergética de 90,1%. Os valores obtidos são surpreendentes por conta da alta eficiência. Isso nos indica que o forno estudado está otimizado.

A queda de temperatura no forno panela é conhecida pela empresa siderúrgica e ocorre a uma taxa de 1 a 3 °C por minuto. O refino do aço leva um tempo total

de 48 minutos. Realizamos uma análise mínima e máxima das perdas de temperatura, considerando uma variação de 1 °C e 3 °C usando a aba de alteração de parâmetros que permite variações no programa. O programa calculou o efeito de tal variação de temperatura na panela no tocante às energias e exergias do processo dessas perdas, resultando em uma redução de eficiência de 3% e 4%, respectivamente, para a variação de 1 °C, e de 12% e 14% para a variação de 3°C.

Ao analisar o trabalho de (ÇAMDALI et al., 2001) é possível deduzir que a quantidade de energia perdida por trocas térmicas é de cerca de 3%. Esse valor faz sentido ao comparar com os valores simulados no trabalho atual. Além disso, o total de energia usado para o aço refinado foi de cerca 87%, valor próximo ao encontrado para eficiência energética do trabalho presente 92,9%. Por outro lado, a eficiência exergética encontrado no trabalho analisado (50%), foi muito distinta da encontrada no trabalho presente (90,1%).

Na comparação dos resultados obtidos com os dados disponíveis no artigo de (ÇAMDALI; TUNC, 2003) com as informações do trabalho atual, observamos uma consistência na ordem de grandeza das variáveis analisadas. Ao analisar os gases, por exemplo, notamos que as entalpias do argônio e do gás de exaustão apresentam a mesma ordem de grandeza dos valores encontrados no trabalho. Embora o valor da eficiência exergética (81%) seja diferente do encontrado no trabalho atual (92,9%), foi indicado que a perda exergética total pelo forno panela é de 13%, valor próximo ao encontrado para as perdas calculadas no trabalho atual (4 a 14%).

O material refratário está em contato direto com o banho metálico e a escória, na camada mais externa o material isolante térmico envolve o refratário. Tanto o refratário quanto o isolamento são óxidos, entretanto, o material de isolamento é um óxido muito poroso para melhorar o isolamento.

Min; Jiang (2010) elaboraram a análise de um forno panela com capacidade para 150 toneladas de aço. A eficiência exergética encontrada foi de 98,27%. Essa eficiência considera a energia de aço refinado e de escória que sai do FEA. De toda maneira, essa eficiência consiste em um valor muito elevado e não parece condizer com a realidade. A diferença surpreendente encontrada na eficiência entre as duas análises pode levar em consideração o tamanho da panela e a qualidade do refratário.

## 4.1 Análise de alteração de parâmetros

O estudo de (ÇAMDALI; TUNC, 2003) oferece uma perspectiva interessante ao realizar uma simulação detalhada da análise exérgica do forno panela, utilizando um programa específico. Apesar de simular o refino do aço, potenciais melhorias para o processo não foram exploradas. Outra crítica pertinente ao trabalho reside na forma que estão dispostos os dados fornecidos para a análise exérgica do forno panela. A falta de informações detalhadas sobre as composições das correntes e os dados termodinâmicos específicos utilizados na base de dados empregada representa um obstáculo para a reprodução efetiva do estudo.

A variação da energia elétrica fornecida ao eletrodo, a temperatura de entrada do banho metálico fundido, a temperatura do argônio e o seu volume na entrada do processo não foram incluídos nas otimizações do trabalho de Min; Jiang (2010). Estes são elementos que desempenham papéis no desempenho do forno panela e destacam áreas que o nosso estudo se propôs a abranger e compreender em sua plenitude.

Assim como a temperatura de saída do aço, as variáveis de temperatura de banho metálico, massas e temperaturas das correntes de entrada mantiveram seus valores originais informados pela empresa siderúrgica. A observação de que a eficiência aumenta à medida que menos potência ativa é fornecida ao eletrodo destaca uma oportunidade no processo siderúrgico, conforme a tabela 4.3.

Energia elétrica (J)	Ef. energética (%)	Ef. exérgica (%)
4,50E+09	94,5	92,3
5,00E+09	94,2	91,7
5,50E+09	93,7	91,2
6,00E+09	93,4	90,6
6,48E+09	92,9	90,1
7,00E+09	92,6	89,5
7,50E+09	92,2	89,0
8,00E+09	91,8	88,5
8,50E+09	91,4	87,9

Tabela 4. 3 Variação da potência do eletrodo e as eficiências (ÇAMDALI; et al., 2001) ao verificarem diferentes condições para temperatura de saída do aço, descobriram que o trabalho disponível aumenta à medida que a temperatura do aço líquido aumenta. Portanto, remover o aço na temperatura adequada pode ser uma oportunidade de melhoria. Contudo, o forno de panela é

um forno de refino. Nessa perspectiva, a temperatura adequada de saída no presente trabalho não foi alterada para evitar qualquer problema relacionado a qualidade do aço.

É preciso reconhecer a necessidade da potência ativa do eletrodo para manter uma temperatura de banho metálico adequada. A manutenção dessa condição é necessária para as operações do forno panela, e qualquer tentativa de reduzir a potência do eletrodo deve ser feita cuidadosamente para não comprometer a qualidade do aço.

Através da tabela 4.4 surge a possibilidade de trabalhar com temperaturas ligeiramente diferentes de entrada do banho metálico, aço fundido e escória, se possível, para alcançar economia de energia, contribuindo diretamente para a redução de custos por corrida. A potência do eletrodo foi constante, valendo 6,48.109J. A temperatura de entrada do aço fundido em uma corrida típica é de 1877,15K.

<b>Temperatura (K)</b>	<b>Ef. energética (%)</b>	<b>Ef. exergética (%)</b>
1847,15	95,0	92,4
1857,15	94,3	91,7
1867,15	93,6	90,8
1877,15	92,9	90,1
1887,15	92,3	89,4
1897,15	91,7	88,6
1907,15	91,0	87,8

Tabela 4. 4 Variação da temperatura do banho metálico.

É possível notar que a eficiência aumenta quando diminuimos a temperatura de entrada do ferro fundido e da escória no sistema. Entretanto, conforme apresentado anteriormente na discussão do eletrodo, entende-se que apesar de ser uma variável de otimização, é preciso que a temperatura de produção do aço seja adequada para manter a sua qualidade

Além disso, nesse trabalho não consideramos as perdas térmicas das transferências do aço e da escória do FEA para o FP. Outros trabalhos não deixam claro como o sistema foi abordado. Dessa maneira, é válido salientar que em nossa definição de sistema consideramos as entradas como condições do ambiente. Ou seja, as perdas de calor de transferência entre o FEA e o FP que acontecem nas correntes de aço fundido e a escória proveniente não são considerados em nossa análise.

Essa discussão levanta a hipótese de tentar diminuir as perdas de transferências. O aço é vazado do FEA em apenas dois minutos. Nesse tempo,

as correntes em contato com o gás atmosférico podem baixar a temperatura do banho em até 50 °C.

A massa de argônio usado nessa análise foi o valor padrão informado pela empresa de 1247 Kg. Ao aumentar a temperatura do argônio, observa-se uma pequena piora na eficiência do sistema. A alteração da temperatura de entrada do argônio, sem modificar a massa e a temperatura do banho metálico apresenta uma oportunidade estratégica para aprimorar a eficiência do processo siderúrgico como pode ser contemplado na tabela 4.5.

Temperatura (K)	Ef. energética (%)	Ef. exergética (%)
298,15	92,9	90,1
500,15	92,8	90,0
700,15	92,7	90,0
900,15	92,6	89,9
1100,15	92,5	89,8
1300,15	92,4	89,7
1500,15	92,3	89,6

Tabela 4. 5 Variação da temperatura do argônio e as eficiências.

A ação homogeneizadora do argônio evita gradientes térmicos e composicionais indesejados no banho, resultando em um produto de aço com composição mais homogênea. Portanto, qualquer alteração de massa de argônio deve ser cuidadosamente avaliada para garantir que não comprometa a eficácia da função de homogeneização.

No entanto, a análise de energia e exergia na variação da massa de entrada de argônio é desprezível quando a temperatura é mantida em 298.15 K. Isso se deve ao fato de que essa temperatura foi escolhida como padrão de referência, tornando as entalpias e exergias nesse ponto igual a zero.

É preciso ressaltar também que a agitação por argônio é favorecida por conta da expansão do gás que ocorre quando ele aumenta sua temperatura. Nesse sentido, mudanças de temperatura de entrada precisam ser bem avaliadas pois podem prejudicar a homogeneização do banho metálico.

As pequenas variações na eficiência energética e exergética encontradas na proposta de variação da temperatura do gás argônio apresentam pequenas variações assim como as variações de eficiência de cerca de 1% do valor total encontrado por (ÇAMDALI et al, 2001) para temperatura dos gases de exaustão. O gás argônio é junto ao CO o principal componente da corrente de gases de

exaustão e a mudança de sua temperatura no início do processo não afeta de forma significativa a perda de calor pelo aquecimento do gás.

A sutil diminuição da eficiência com o aumento da temperatura está intrinsecamente relacionada às equações 2.10 e 2.11, que calculam as eficiências energética e exérgica. Essas equações consideram a razão entre a energia ou exergia do aço refinado e a energia total que entra e sai do sistema. Por outro lado, o argônio aquecido na entrada pelo calor das correntes de saída poderia potencialmente reduzir o consumo de energia vindo do eletrodo, proporcionando melhorias no sistema.

Nessa perspectiva, para otimizar o processo, poderia ser realizada a implementação de trocas térmicas entre correntes que, de outra forma, teriam sua energia descartada. A escória, o aço lingotado exposto à atmosfera para esfriamento que não possuem aproveitamento na siderurgia estudada.

A conformação apresenta um gasto considerável de energia ao queimar gás natural. Uma proposta para aproveitar a energia do aço e da escória expostos ao ambiente seria diminuir o espaço entre a saída do lingotamento e a etapa de conformação. Dessa forma, o aço não precisaria ter o mesmo aumento de temperatura uma vez que já estaria em temperaturas mais próximas a temperatura de conformação. Além disso, a escória poderia ser usada para aquecer os lingotes que ficam reservados para uma das três linhas de laminação que funcionam sobre demanda.

O gás de exaustão é outra corrente sem aproveitamento na planta estudada. No contexto do processo siderúrgico, o monóxido de carbono (CO) presente no gás de exaustão surge como um potencial fonte de combustível, abrindo oportunidades para otimizações térmicas. A reação exotérmica entre o CO e o oxigênio, liberando calor, oferece a possibilidade de explorar esse subproduto como uma valiosa fonte térmica. Outra vantagem é que correntes gasosas são relativamente mais simples de se aplicar em trocas térmicas.

No processo em análise foi observada uma produção de 135 kg de CO por batelada. Uma outra aplicação estratégica desse conceito seria a utilização do monóxido de carbono para o pré-aquecimento de argônio ou da escória adicional no processo. Além disso, uma análise de retorno econômico utilizando conceitos de termodinâmico e economia pode ser desenvolvido para estimar custos, assim como foi realizado por Yetisken et al., (2013), ao analisar o FP e o FEA.

## **5. Conclusão**

Ao analisar o processo de refino do forno panela com o uso do programa desenvolvido, os valores de eficiência energética e exergética encontrados para o processo foi de 92,9% e 90,1% respectivamente. Esses valores de eficiência são condizentes com as perdas térmicas e demonstram que o forno é bem otimizado.

O programa desenvolvido pode ser aplicado em diversos processos. Os valores de exergia cinética e exergia química foram 40,9KJ e 96800,0KJ; respectivamente. Esses valores são pequenos quando comparados aos valores de exergia de cada corrente que entra ou sai do forno panela.

As otimizações não provocaram mudança significativa na eficiência do forno. No entanto, é possível explorar integrações energéticas e aproveitar energia das correntes de saída.

As propostas de alteração de parâmetros informaram possíveis modificações que podem ser benéficas para otimizar a eficiência do refino de aço 1010. Entre elas, destaca-se a potência do eletrodo. Quanto menos potência o eletrodo libera, mais eficiente o processo se torna pela análise de alteração de parâmetros proposta nesse estudo, apresentando para uma mudança de 1,5.109 J uma variação de cerca de 2% nas eficiências energéticas e exergéticas.

Além disso, fica entendido que para o sistema ser mais eficiente, temperaturas mais baixas de entrada de ferro líquido podem ser exploradas. Da mesma forma, podemos perceber que pequenas mudanças nas temperaturas de entrada de gás argônio não mudam significativamente os valores de energia e exergia, conforme apresentado em análises de casos anteriores.

### **5.1 Propostas futuras**

A incorporação de estudos para refrigeração com água no contexto da abóboda do forno panela pode oferecer informações sobre a dissipação energética. Nas próximas análises é sugerido melhorar modelo, considerando-se o relaxamento das severas condições restritivas impostas.



A inclusão de análises econômicas representa uma possível expansão para compreender o impacto financeiro das propostas de alteração de parâmetros. Avaliar o custo-benefício das intervenções propostas, considerando investimentos, retorno sobre o investimento e economias operacionais a longo prazo, contribuirá para a tomada de decisões.

Explorar oportunidades para o aproveitamento da escória e dos gases de exaustão, como o monóxido de carbono, é uma proposta para os próximos trabalhos. Nesse trabalho, não foi estudada a poeira que deixa o forno junto aos gases de exaustão. Recomenda-se que nos trabalhos a influência termodinâmica da poeira seja avaliada.

## 6. Referências Bibliográficas

AÇO BRASIL. **A Siderurgia em Números**. Rio de Janeiro, 2022.

AKIYAMA, T.; YAGL, J.-I. Methodology Emission and to Evaluate Reduction Limit of Minimum Exergy Consumption Carbon Dioxide tor Ironmaking. **J International**, v. 38, n. 8, p. 896–903, 1998. Tohoku.

DE AVILLEZ, R. R. **Termodinâmica Dos Materiais e Processos**. 2º ed. Rio de Janeiro: Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil, 2024.

BAI, JING; TU, C.; BAI, JIMING. Measuring and decomposing Beijing's energy performance: an energy- and exergy-based perspective. **Environment, Development and Sustainability**, 2023. Springer Science and Business Media B.V.

BEHZADI, A.; HOUSHFAR, E.; GHOLAMIAN, E.; ASHJAEI, M.; HABIBOLLAHZADE, A. Multi-criteria optimization and comparative performance analysis of a power plant fed by municipal solid waste using a gasifier or digester. **Energy Conversion and Management**, v. 171, p. 863–878, 2018. Elsevier Ltd.

ÇAMDALI, U.; MURAT, T.; FERIDUN, D. A thermodynamic analysis of a steel production step carried out in the ladle furnace. **Applied Thermal Engineering**, v. 21, p. 643–655, 2001. Istanbul.

ÇAMDALI, U.; TUNC, M. ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF A LADLE FURNACE. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v. 42, n. 4, p. 439–446, 2003. Maney Publishing.

ÇAMDALI, U.; TUNC, M.; ARASIL, G. Analysis of an Electric Arc Furnace Used for Casting of Steel: An Exergy Approach. **Metallurgist**, v. 64, n. 5–6, p. 483–495, 2020. Springer.

DEBENEDETTI, P. G. THE THERMODYNAMIC FUNDAMENTALS OF EXERGY. **CHEMICAL ENGINEERING EDUCATION**, v. 3, p. 116–121, 1984.

DİNÇER, I.; ROSEN, M. (MARC A. ). **Exergy: energy, environment and sustainable development**. 3º ed. Oshawa, Ontario, Canada: Elsevier Science, 2020.

DUNBAR, W. R.; LIOR, N.; GAGGIOI, R. A. The component equations of energy and exergy. **Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME**, v. 114, n. 1, p. 75–83, 1992.

EBRAHIMI, A.; HOUSHFAR, E. Thermodynamic analysis and optimization of the integrated system of pyrolysis and anaerobic digestion. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 164, p. 582–594, 2022. Institution of Chemical Engineers.

FRUEHAN R. **The Making, Shaping and Treating of Steel**. 11º ed. United States Steel Corp, 1998.

KOTAS, T. J.; BOSTON, L.; SINGAPORE, D.; WELLINGTON, S. T. **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis**. 1º ed. London: Anchor Brendon Ltd, 1985.

KUCZYNSKI, W.; CHLISZCZ, K. Energy and exergy analysis of photovoltaic panels in northern Poland. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 174, n. C, p. 1–25, 2023. Elsevier Ltd.

KWAK, H.-Y.; UYSAL, C. Exergetic Costs for Thermal Systems. **Application of Exergy**, p. 126–148, 2018. InTech.

LU, B.; CHEN, G.; CHEN, D.; YU, W. An energy intensity optimization model for production system in iron and steel industry. **Applied Thermal Engineering**, v. 100, p. 285–295, 2016. Elsevier Ltd.

LUNDBERG, B.; ABRAM-NILSSON, K.; JAMES, CLARE.; TUNA TR. **Exergetics**. Bucaramanga: Utbildningsradion, 1996.

MACEDO COSTA, M.; SCHAEFFER, R.; WORRELL, E. Exergy accounting of energy and materials flows in steel production systems. **Energy**, v. 26, p. 363–384, 2001. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/energy](http://www.elsevier.com/locate/energy)>. .

MAGHOOL, F.; ARULRAJAH, A.; HORPIBULSUK, S.; DU, Y.-J. Laboratory Evaluation of Ladle Furnace Slag in Unbound Pavement-Base/Subbase Applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 2, 2017. American Society of Civil Engineers (ASCE).

MIN, Y.; JIANG, M.-F. Exergy Analysis and Optimization of Ladle Furnace Refining Process. **Journal of iron and steel research, Internacional**, p. 24–28, 2010.

MORAN, M. J.; SCIUBBA, E. Exergy analysis: Principles and practice. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 116, n. 2, p. 285–290, 1994.

RAMAKRISHNA, G.; KADROLKAR, A.; SRIKAKULAPU, N. G. Exergy and Its Efficiency Calculations in Ferrochrome Production. **Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science**, v. 46, n. 2, p. 1073–1081, 2015a. Springer Boston.

RAMAKRISHNA, G.; KADROLKAR, A.; SRIKAKULAPU, N. G. Exergy and Its Efficiency Calculations in Ferrochrome Production. **Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science**, v. 46, n. 2, p. 1073–1081, 2015b. Springer Boston.

ROCHA, B. P. **ESTUDO DA VIABILIDADE DA REUTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DO REFINO SECUNDÁRIO NO FORNO ELÉTRICO A ARCO**, fev. 2011. Dissertação, Rio de Janeiro: Universidade federal do Rio de Janeiro.

SAHOO, P. K. Exergoeconomic analysis and optimization of a cogeneration system using evolutionary programming. **Applied Thermal Engineering**, v. 28, n. 13, p. 1580–1588, 2008.

SATŌ, N. **Chemical energy and exergy: an introduction to chemical thermodynamics for engineers**. Sapporo, Japan: Elsevier Science & Technology books, 2004.

SHENG, J.; VOLDSUND, M.; ERTESVÅG, I. S. Advanced exergy analysis of the oil and gas processing plant on an offshore platform: A thermodynamic cycle approach. **Energy Reports**, v. 9, p. 820–832, 2023. Elsevier Ltd.

SZARGUT, J. Chemical Exergies of the Elements. **Applied Energy**, v. 32, p. 269–268, 1989.

TABATABAEI, Y.; COLEY, K. S.; IRONS, G. A.; SUN, S. Model of Inclusion Evolution During Calcium Treatment in the Ladle Furnace. **Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science**, v. 49, n. 4, p. 2022–2037, 2018. Springer Boston.

TANAKA, Y.; SATO, I. Development of high purity large forgings for nuclear power plants. *Journal of Nuclear Materials*. **Anais...** . v. 417, p.854–859, 2011.

TANER, T. Introductory Chapter: Application of Exergy for All Energy Field and New Technologies. **Application of Exergy**, p. 3–11, 2018. InTech.

TERZI, R. Application of Exergy Analysis to Energy Systems. **Application of Exergy**, p. 110–123, 2018. InTech.

TIWARI, R.; GIRARD, B.; LABRECQUE, C.; ISAC, M. M.; GUTHRIE, R. I. L. CFD Flow Modeling and Mixing in an Elliptical Ladle. 8th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking, ICS 2022. **Anais...** . p.63–74, 2022. Association for Iron and Steel Technology, AISTECH.

VARANASI, S. S.; MORE, V. M. R.; RAO, M. B. V.; et al. Recycling Ladle Furnace Slag as Flux in Steelmaking: A Review. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 5, n. 4, p. 449–462, 2019. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.

WANG, L.-S. Application of Exergy: A Low-Exergy Solution to Building Heating and Cooling. **Application of Exergy**, p. 15–37, 2018. InTech.

YETISKEN, Y.; ÇAMDALI, U.; EKMEKCI, I. COST AND EXERGY ANALYSIS FOR OPTIMIZATION OF CHARGING MATERIALS FOR STEELMAKING IN EAF AND LF AS A SYSTEM. **Metallurgist**, v. 57, n. 5, p. 1133–1140, 2013. Karabuk.

ZANONI, C.; WAGNER MACIEL KAEHLER CO-ORIENTADOR, D.; CARLOS DA SILVA FERREIRA, V. **PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL FACULDADE DE ENGENHARIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA ANÁLISE EXERGÉTICA DE UM FORNO ELÉTRICO A ARCO**, dez. 2004. Porto Alegre: PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

ZHANG, P.; JIN, Q. Evolution, status, and trends of exergy research: a systematic analysis during 1997–2020. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 49, p. 73769–73794, 2022. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.

## Anexo 1

Temperatura (K)	Entalpia (J)	Entropia (J/K)
298,00	-1,68E+06	50,90
308,00	-1,67E+06	53,60
318,00	-1,67E+06	56,20
328,00	-1,67E+06	58,80
338,00	-1,67E+06	61,40
348,00	-1,67E+06	64,00
358,00	-1,67E+06	66,50
368,00	-1,67E+06	69,00
378,00	-1,67E+06	71,50
388,00	-1,67E+06	73,90
398,00	-1,67E+06	76,30
408,00	-1,67E+06	78,70
418,00	-1,66E+06	81,10
428,00	-1,66E+06	83,40
438,00	-1,66E+06	85,70
448,00	-1,66E+06	88,00
458,00	-1,66E+06	90,30
468,00	-1,66E+06	92,50
478,00	-1,66E+06	94,70
488,00	-1,66E+06	96,90
498,00	-1,66E+06	99,00
508,00	-1,66E+06	101,00
518,00	-1,65E+06	103,00
528,00	-1,65E+06	105,00
...	...	...

Tabela A1.1 Dados termodinâmicos do aquecimento do  $\text{Al}_2\text{O}_3$

Temperatura (K)	Entalpia (J)	Entropia (J/K)
298,15	-1,33E+06	-299,00
300,00	-1,33E+06	-299,00
350,00	-1,33E+06	-301,00
400,00	-1,33E+06	-301,00
450,00	-1,33E+06	-301,00
500,00	-1,33E+06	-301,00
550,00	-1,33E+06	-300,00
600,00	-1,33E+06	-299,00
650,00	-1,33E+06	-299,00
700,00	-1,33E+06	-298,00
750,00	-1,33E+06	-297,00
800,00	-1,33E+06	-297,00
850,00	-1,33E+06	-296,00
900,00	-1,33E+06	-296,00
950,00	-1,35E+06	-319,00
1000,00	-1,35E+06	-318,00
1050,00	-1,35E+06	-318,00
1100,00	-1,35E+06	-317,00
1150,00	-1,34E+06	-317,00
1200,00	-1,34E+06	-316,00
1250,00	-1,34E+06	-316,00
1300,00	-1,34E+06	-316,00
1350,00	-1,34E+06	-315,00
1400,00	-1,34E+06	-314,00
...	...	...

Tabela A1.2 Dados termodinâmicos da reação de formação do  $\text{Al}_2\text{O}_3$

## Anexo 2

Composição	Massa (Kg)	Temperatura (K)	Massa Molar (g/mol)
Ar	1248	298,15	39,9

Tabela A2.1 Dados de entrada do argônio.

Composição	Massa (Kg)	Temperatura (K)	Massa Molar (g/mol)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	49	1877,15	102,0
CaO	621	1877,15	56,1
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4	1877,15	152,0
FeO	595	1877,15	71,8
MgO	179	1877,15	40,3
MnO	66	1877,15	70,9
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	35	1877,15	283,9
SiO <sub>2</sub>	416	1877,15	60,1
TiO <sub>2</sub>	3	1877,15	79,9
CaF <sub>2</sub>	6	1877,15	78,1
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3	1877,15	181,9

Tabela A2.2 Dados de entrada da escória proveniente do FEA.

Composição	Massa (Kg)	Temperatura (K)	Massa Molar (g/mol)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6	298,15	102,0
CaO	754	298,15	56,1
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9	298,15	152,0
MgO	155	298,15	40,3
SiO <sub>2</sub>	45	298,15	60,1
CaF <sub>2</sub>	166	298,15	78,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2	298,15	159,7

Tabela A2.3 Dados de entrada da escória adicional fria.

Composição	Massa (Kg)	Temperatura (K)	Massa Molar (g/mol)
C	54	1877,15	12,0
Mn	42	1877,15	54,9
Si	5	1877,15	28,1
S	41	1877,15	32,1
P	13	1877,15	31,0
Cu	138	1877,15	63,5
Cr	83	1877,15	52,0
Ni	67	1877,15	58,7
Mo	6	1877,15	96,0
Sn	17	1877,15	118,7
Nb	5	1877,15	92,9

V	1	1877,15	50,9
N2	5	1877,15	28,0
B	1	1877,15	10,8
Fe	97356	1877,15	56,0

Tabela A2.4 Dados de entrada do aço proveniente do FEA.

Composição	Massa (Kg)	Temperatura (K)	Massa Molar (g/mol)
Si	243	298,15	28,1
C	20	298,15	12,0
P	2	298,15	31,0
Mn	361	298,15	54,9
Fe	151	298,15	56,0
Ca	3	298,15	40,1
Al	2	298,15	27,0

Tabela A2.5 Dados de entrada das ferroligas.

Composição	Massa (Kg)	Temperatura (K)	Massa Molar (g/mol)
Coque (C)	67	298,15	12,0
O2	79	298,15	32,0

Tabela A2.6 Dados de entrada dos elementos adicionais.

Composição	Massa (Kg)	Temperatura (K)	Massa Molar (g/mol)
C	20	0	12,0

Tabela A2.7 Dados de entrada do eletrodo.

Composição	Massa (Kg)	Temperatura (K)	Massa Molar (g/mol)
Ar	1248	1893,15	39,9
CO	135	1893,15	28,0
F2	84	1893,15	38,0
SO2	33	1893,15	64,1

Tabela A2.8 Dados de saída dos gases de exaustão.

Composição	Massa (Kg)	Temperatura (K)	Massa Molar (g/mol)
Al2O3	64	1893,15	102,0
CaO	1503	1893,15	56,1
Cr2O3	8	1893,15	152,0
FeO	169	1893,15	71,8
MgO	334	1893,15	40,3
MnO	15	1893,15	70,9
SiO2	682	1893,15	60,1
TiO2	5	1893,15	79,9
CaF2	2	1893,15	78,1



Tabela A2.9 Dados de saída da escória.

Composição	Massa (Kg)	Temperatura (K)	Massa Molar (g/mol)
C	104	1749	12,0
Mn	442	1749	54,9
Si	107	1749	28,1
S	25	1749	32,1
P	18	1749	31,0
Cu	138	1749	63,5
Cr	84	1749	52,0
Ni	67	1749	58,7
Mo	6	1749	96,0
Sn	17	1749	118,7
Nb	5	1749	92,9
V	1	1749	50,9
N2	6	1749	28,0
B	1	1749	10,8
Fe	97841	1749	56,0

Tabela A2.10 Dados de saída do aço refinado.

Reação	Massa (kg)	Massa Molar (g/mol)
$2\text{Al} + 3/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$	9	1893,15
$2\text{P} + 5/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{P}_2\text{O}_5$	-35	1080
$\text{C} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$	135	1893,15
$\text{Mn} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{MnO}$	-51	1893,15
$\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$	221	1893,15
$\text{Fe} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{FeO}$	-426	1893,15

Tabela A2. 11 Dados das reações.

Composição	Entalpia/mol (J/mol)	Entropia/mol (J/Mol)	N mol
Ar	0,00E+00	1,55E+02	31232

Tabela A2.12 Dados termodinâmicos do argônio a 298,15K.

Composição	Entalpia/mol (J/mol)	Entropia/mol (J/Mol)	N mol
Al2O3	-1,48E+06	2,63E+02	484
CaO	-5,54E+05	1,30E+02	11079
Cr2O3	-9,39E+05	3,08E+02	24
FeO	-1,78E+05	1,66E+02	8280
MgO	-5,22E+05	1,16E+02	4450
MnO	-2,99E+05	1,55E+02	925
P2O5	0,00E+00	0,00E+00	125
SiO2	-8,00E+05	1,63E+02	6929

TiO <sub>2</sub>	-8,27E+05	1,80E+02	37
CaF <sub>2</sub>	-1,04E+06	2,51E+02	81
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00E+00	0,00E+00	15

Tabela A2.13 Dados termodinâmicos da escória proveniente do FEA a 1877,15K.

Composição	Entalpia/mol (J/mol)	Entropia/mol (J/Mol)	N mol
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-1,68E+06	5,09E+01	56
CaO	-6,35E+05	3,81E+01	13440
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-1,14E+06	8,12E+01	58
MgO	-6,02E+05	2,70E+01	3841
SiO <sub>2</sub>	-9,11E+05	4,15E+01	747
CaF <sub>2</sub>	-1,23E+06	6,85E+01	2127
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-8,25E+05	8,75E+01	15

Tabela A2.14 Dados termodinâmicos da escória fria a 298,15K.

Composição	Entalpia/mol (J/mol)	Entropia/mol (J/Mol)	N mol
C	3,24E+04	3,92E+01	4480
Mn	8,01E+04	1,11E+02	766
Si	9,14E+04	9,45E+01	174
S	0,00E+00	0,00E+00	1281
P	0,00E+00	0,00E+00	411
Cu	5,89E+04	9,40E+01	2171
Cr	5,47E+04	8,08E+01	1594
Ni	7,14E+04	9,94E+01	1133
Mo	4,61E+04	7,97E+01	61
Sn	5,20E+04	1,18E+02	140
Nb	4,52E+04	8,69E+01	53
V	4,94E+04	8,48E+01	19
N <sub>2</sub>	0,00E+00	0,00E+00	179
B	0,00E+00	0,00E+00	58
Fe	6,07E+04	9,28E+01	1738496

Tabela A2.15 Dados termodinâmicos do banho metálico fundido a 1877,15K.

Composição	Entalpia/mol (J/mol)	Entropia/mol (J/Mol)	N mol
Si	0,00E+00	1,88E+01	8639
C	0,00E+00	5,74E+00	1675
P	0,00E+00	0,00E+00	48
Mn	0,00E+00	3,22E+01	6570
Fe	0,00E+00	2,73E+01	2701
Ca	0,00E+00	0,00E+00	68
Al	0,00E+00	0,00E+00	84

Tabela A2.16 Dados termodinâmicos das ferroligas a 298,15K.

Composição	Entalpia/mol (J/mol)	Entropia/mol (J/Mol)	N mol
Coque (C)	0,00E+00	5,74E+00	5584
O2	0,00E+00	2,05E+02	2481

Tabela A2.17 Dados termodinâmicos dos elementos adicionais a 298,15K.

Composição	Entalpia/mol (J/mol)	Entropia/mol (J/Mol)	N mol
C	0,00E+00	5,74E+00	1694

Tabela A2.18 Dados termodinâmicos do eletrodo

Composição	Entalpia/mol (J/mol)	Entropia/mol (J/Mol)	N mol
Ar	3,32E+04	1,93E+02	31232
CO	-5,77E+04	2,57E+02	4813
F2	0,00E+00	0,00E+00	2207
SO2	0,00E+00	0,00E+00	512

Tabela A2.19 Dados termodinâmicos do gás de exaustão a 1893,15K.

Composição	Entalpia/mol (J/mol)	Entropia/mol (J/Mol)	N mol
Al2O3	-1,48E+06	2,63E+02	624
CaO	-5,53E+05	1,30E+02	26795
Cr2O3	-9,37E+05	3,09E+02	54
FeO	-1,77E+05	1,67E+02	2353
MgO	-5,22E+05	1,16E+02	8291
MnO	-2,99E+05	1,56E+02	213
SiO2	-7,99E+05	1,64E+02	11355
TiO2	-8,26E+05	1,80E+02	67
CaF2	-1,04E+06	2,51E+02	31

Tabela A2.20 Dados termodinâmicos da escória de saída a 1893,15K.

Composição	Entalpia/mol (J/mol)	Entropia/mol (J/Mol)	N mol
C	2,93E+04	3,74E+01	8621
Mn	7,40E+04	1,07E+02	8048
Si	8,79E+04	9,25E+01	3800
S	0,00E+00	0,00E+00	769
P	0,00E+00	0,00E+00	584
Cu	5,48E+04	9,18E+01	2171
Cr	4,84E+04	7,73E+01	1623
Ni	6,58E+04	9,63E+01	1133
Mo	4,17E+04	7,73E+01	61
Sn	4,83E+04	1,16E+02	140
Nb	4,10E+04	8,46E+01	53
V	4,44E+04	8,20E+01	19
N2	0,00E+00	0,00E+00	229
B	0,00E+00	0,00E+00	58

Fe	5,43E+04	8,94E+01	1747157
----	----------	----------	---------

Tabela A2.21 Dados termodinâmicos do aço refinado a 1893,15K.

Composição	Entalpia (J)	Entropia (J/K)	Exergia (J)
Al2O3	9,67E+07	1,02E+05	6,62E+07
CaO	8,97E+08	1,02E+06	5,94E+08
Cr2O3	4,83E+06	5,46E+03	3,20E+06
FeO	7,84E+08	8,71E+05	5,25E+08
MgO	3,55E+08	3,95E+05	2,37E+08
MnO	7,93E+07	8,81E+04	5,30E+07
P2O5	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
SiO2	7,69E+08	8,42E+05	5,18E+08
TiO2	4,30E+06	4,75E+03	2,88E+06
CaF2	1,54E+07	1,47E+04	1,10E+07
V2O5	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Tabela A2.22 Cálculo de entalpia, entropia e exergia da escória do FEA a 1877,15K.

Composição	Entalpia (J)	Entropia (J/K)	Exergia (J)
C	1,45E+08	1,50E+05	1,01E+08
Mn	6,14E+07	6,02E+04	4,34E+07
Si	1,59E+07	1,32E+04	1,20E+07
S	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
P	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Cu	1,28E+08	1,32E+05	8,84E+07
Cr	8,72E+07	9,13E+04	5,99E+07
Ni	8,09E+07	7,89E+04	5,74E+07
Mo	2,82E+06	3,13E+03	1,89E+06
Sn	7,29E+06	9,33E+03	4,51E+06
Nb	2,38E+06	2,67E+03	1,58E+06
V	9,49E+05	1,04E+03	6,41E+05
N2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
B	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Fe	1,06E+11	1,14E+08	7,16E+10

Tabela A2.23 Cálculo de entalpia, entropia e exergia do banho metálico a 1877,15K.

Composição	Entalpia (J)	Entropia (J/K)	Exergia (J)
C	6480	0	6480

Tabela A2.24 Cálculo de entalpia, entropia e exergia do eletrodo a 298,15K.

Composição	Entalpia (J)	Entropia (J/K)	Exergia (J)
Ar	1,04E+09	1,20E+06	6,78E+08
CO	2,56E+08	2,84E+05	1,72E+08

F2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
SO2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Tabela A2.25 Cálculo de entalpia, entropia e exergia do gás de exaustão a 1893,15K.

Composição	Entalpia (J)	Entropia (J/K)	Exergia (J)
Al2O3	1,25E+08	1,33E+05	8,52E+07
CaO	2,20E+09	2,47E+06	1,46E+09
Cr2O3	1,10E+07	1,23E+04	7,28E+06
FeO	2,26E+08	2,50E+05	1,51E+08
MgO	6,66E+08	7,38E+05	4,46E+08
MnO	1,83E+07	2,05E+04	1,22E+07
SiO2	1,28E+09	1,39E+06	8,60E+08
TiO2	7,95E+06	8,72E+03	5,35E+06
CaF2	5,90E+06	5,68E+03	4,21E+06

Tabela A2.2622 Cálculo de entalpia, entropia e exergia da escória de saída 1893,15K.

Composição	Entalpia (J)	Entropia (J/K)	Exergia (J)
C	2,83E+08	2,90E+05	1,97E+08
Mn	6,51E+08	6,36E+05	4,62E+08
Si	3,49E+08	2,88E+05	2,63E+08
S	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
P	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Cu	1,29E+08	1,33E+05	8,93E+07
Cr	9,00E+07	9,36E+04	6,21E+07
Ni	8,17E+07	7,93E+04	5,80E+07
Mo	2,85E+06	3,15E+03	1,92E+06
Sn	7,35E+06	9,37E+03	4,56E+06
Nb	2,41E+06	2,68E+03	1,61E+06
V	9,62E+05	1,04E+03	6,51E+05
N2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
B	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Fe	1,07E+11	1,15E+08	7,30E+10

Tabela A2.27 Cálculo de entalpia, entropia e exergia do aço refinado 1893,15K.

Reação	Entalpia (J)	Entropia (J/K)	Exergia (J)
2Al+3/2 O2 -> Al2O3	-1,12E+08	-2,60E+04	-1,04E+08
2P+ 5/2 O2 ->P2O5	1,39E+08	5,23E+04	1,23E+08
C+1/2 O2 ->CO	-1,11E+07	4,27E+05	-1,38E+08
Mn+ 1/2 O2->MnO	2,07E+08	5,98E+04	1,90E+08
Si+O2->SiO2	-2,63E+09	-6,92E+05	-2,42E+09
Fe+1/2 O2->FeO	8,00E+08	2,67E+05	7,20E+08

Tabela A2.28 Cálculo de entalpia, entropia e exergia das reações 1893,15K.