



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS**

**REGINNA MARJORYE CARVALHO BORGES**

**PRODUÇÃO DE BIOELETRICIDADE A PARTIR DO EFLUENTE DE ALTO-  
FORNO POR CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL MICROBIANAS**

**FORTALEZA**

**2026**

REGINNA MARJORYE CARVALHO BORGES

PRODUÇÃO DE BIOELETRICIDADE A PARTIR DO EFLUENTE DE ALTO-FORNO  
POR CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL MICROBIANAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energias Renováveis do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Fernanda Leite Lobo.  
Coorientador: Me. Kaline Araújo Soares.

FORTALEZA

2026

REGINNA MARJORYE CARVALHO BORGES

PRODUÇÃO DE BIOELETRICIDADE A PARTIR DO EFLUENTE DE ALTO-FORNO  
POR CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL MICROBIANAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energias Renováveis do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Energias Renováveis.

Aprovada em: 21/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Fernanda Leite Lobo (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. André Valente Bueno  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Me. Edgar Adrian de Oliveira  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

A Deus.

À minha mãe, que me ensinou a gostar de ler.

Ao meu pai, que me ensinou a gostar de cantar.

Ao meu gatinho Tom Zé, por também fazer parte da minha família.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus.

À minha família: minha querida mãe, a quem devo toda minha formação acadêmica e espiritual; ao meu pai, pelos beijos na testa, os sanduíches de jantar e o gosto por Raul Seixas; ao meu gato Tom Zé, pelo apoio emocional; e ao meu irmão. À todas as minhas tias, pelo exemplo de mulheres fortes e inspiradoras. À minha única avó, minha madrinha, que me deu a oportunidade de sorrir com ela por um longo tempo.

À Prof. Dr. Fernanda Leite Lobo, pela orientação, e aos participantes da banca examinadora, o Prof. Dr. André Valente Bueno e o Me. Edgar Adrian de Oliveira pelo tempo e pelas colaborações e sugestões.

Aos amigos de laboratório do lado do bem e do lado do mal, que me ajudaram e alegraram meu dia. Em especial, à Kaline, por ser uma pessoa inspiradora cuja opinião sincera moldou todo esse trabalho. A todos os amigos que construí no curso de Engenharia de Energias Renováveis, mais ainda à Carol, por ser uma das raras pessoas de bom coração que te ensinam a ser alguém melhor. A todos os amigos que a Universidade me ofereceu igual chaveiros barulhentos de mochila, como o Hélder, que talvez só esteja abaixo do meu gato na intensidade da gratidão, e Steph, a melhor companhia que faz as melhores roupas.

Para Clara, minha amiga mais antiga a quem amo com muito carinho.

“O resultado é importante, mas não é só o resultado que atinge as pessoas. O mundo não funciona só na base de resultados.” (Chica Umino, 2012).

## RESUMO

O emprego de fontes não renováveis para geração de energia e sua consequente emissão de gases de efeito estufa, além da escassez hídrica e do volume cada vez maior de águas residuais, vem gerando grande impacto negativo no meio ambiente nas últimas décadas. O setor siderúrgico, em específico, é reconhecido como uma das indústrias mais intensivas de energia e de geração de efluentes residuais complexos, necessitando cada vez mais de inovações tecnológicas e políticas públicas de incentivo à descarbonização. Nesse contexto, o desenvolvimento de sistemas bioeletroquímicos como Células de Combustível Microbianas (MFCs) tem ganhado visibilidade devido à capacidade de geração de eletricidade em conjunto ao tratamento de resíduos, permitindo uma integração econômica e sustentável com processos industriais. Este estudo visa avaliar a eficiência de MFCs no tratamento de um efluente advindo do processo de Alto-Forno (AF) da indústria siderúrgica, gerando simultaneamente energia a partir de dois reatores, MFC-1 e MFC-2, desenvolvidos na Universidade Federal do Ceará (UFC). Os experimentos duraram seis meses cada, com um aumento gradual da porcentagem do efluente AF em cada MFC, sendo realizados testes eletroquímicos e de demanda química de oxigênio (DQO) a cada mês. Os resultados demonstraram que, apesar dos componentes complexos do efluente, ambas as células conseguiram valores estáveis de tensão até os 60% de uso do efluente (entre 200 e 300 mV) e valores excelentes de remoção de matéria orgânica, com valores superando os 80% de DQO com concentrações até 40% de AF, demonstrando a viabilidade da tecnologia para eficiência elétrica e tratamento de águas residuais.

**Palavras-chave:** célula de combustível microbiana; eficiência energética; efluente industrial.

## ABSTRACT

The utilization of non-renewable energy sources for power generation, the consequent emission of greenhouse gases, the water scarcity and the large volume of wastewater have had a significant impact on the environment in recent decades. The steel industry, in particular, is recognized as one of the most energy-intensive industries and a generator of complex wastewater, requiring technological innovations and public policies to encourage decarbonization. In this context, the development of bioelectrochemical systems such as Microbial Fuel Cells (MFCs) has gained visibility due to its ability to generate electricity in conjunction with waste treatment, allowing an economical and sustainable integration with industrial processes. This study aims to evaluate the efficiency of Microbial Fuel Cells (MFCs) in the treatment of an effluent from the Blast Furnace (AF) process in the steel industry, while simultaneously generating energy from two reactors, MFC-1 and MFC-2, developed at the Federal University of Ceará (UFC). The experiments lasted six months each, with a gradual increase in the percentage of AF effluent in each MFC. Electrochemical and chemical oxygen demand (DQO) tests were performed monthly. The results demonstrated that, despite the complex components of the effluent, both cells achieved stable voltage values up to 60% effluent usage (between 200 and 300 mV) and excellent organic matter removal values, with COD values exceeding 80% at AF concentrations up to 40%, demonstrating the viability of the technology for electrical efficiency and wastewater treatment.

**Keywords:** microbial fuel cell; energy efficiency; industrial effluent.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rotas BF-BOF e EAF para a produção de aço .....	19
Figura 2 – Rotas BF-BOF: (a) integrada com produção de coque; (b) sem produção de coque.....	21
Figura 3 – Estrutura básica de uma MFC de câmara única.....	25
Figura 4 – Célula a Combustível Microbiana (MFC).....	28
Figura 5 – Testes de DQO: (a) Amostras do Kit Hanna Instrumentos de DQO HI93754B-25 e (b) Amostras aquecidas no bloco digestor .....	31
Figura 6 – Medição das amostras de DQO no espectrofotômetro HACH.....	32
Figura 7 – Entrada e Saída da MFC com efluente AF, (a) Efluente de Alto-Forno (b) Esgoto industrial antes do reator, e (c) Saída do reator.....	44

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Valores de Tensão para MFC-1.....	35
Gráfico 2 –	Valores de Tensão para MFC-2.....	35
Gráfico 3 –	Valores de temperatura de entrada e saída da MFC-1.....	37
Gráfico 4 –	Valores de temperatura de entrada e saída da MFC-2.....	37
Gráfico 5 –	Valores de pH de entrada e saída da MFC-1.....	38
Gráfico 6 –	Valores de pH de entrada e saída da MFC-2.....	39
Gráfico 7 –	Valores de condutividade de entrada e saída da MFC-1.....	40
Gráfico 8 –	Valores de condutividade de entrada e saída da MFC-2.....	40
Gráfico 9 –	Resultado do teste de LSV para MFC-1.....	41
Gráfico 10 –	Resultado do teste de LSV para MFC-2.....	42
Gráfico 11 –	Resultado do teste de CV para MFC-1.....	43
Gráfico 12 –	Resultado do teste de CV para MFC-2.....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características químicas do efluente de Alto-Forno .....	29
Tabela 2 – Remoção de DQO do Efluente Alto-Forno da MFC-1 .....	45
Tabela 3 – Remoção de DQO do Efluente Alto-Forno da MFC-1 .....	45
Tabela 4 – Eficiência Coulômbica da MFC-1 .....	46
Tabela 5 – Eficiência Coulômbica da MFC-2 .....	46

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AF	Efluente do processo de Alto-Forno
BF	Processo de Alto-Forno
BF-BOF	Forno Básico de Oxigênio de Alto-Forno
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CCHP	Sistemas Combinados de Refrigeração, Aquecimento e Energia
CE	Eficiência Coulômbica
CV	Voltametria Cíclica
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EAF	Forno a Arco Elétrico
EET	Transferência Extracelular de Elétrons
EOF	Forno Otimizador de Energia
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GEE	Gases de Efeito Estufa
LSV	Voltametria de Varredura Linear
MFC	Células de Combustível Microbianas
ORC	Ciclo Orgânico de Rankine
PBS	Solução Tampão-Fosfato
PEM	Membrana de Troca de Prótons
SST	Sólidos Suspensos Totais
UASB	Reator Anaeróbio de Leito de Lodo de Fluxo Ascendente
UFC	Universidade Federal do Ceará

## LISTA DE SÍMBOLOS

mV	Milivolt
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
MWh	Megawatt-hora
MWh <sub>th</sub> /tCS	Megawatt-hora térmico por tonelada de aço bruto
MWh <sub>el</sub> /tCS	Megawatt-hora elétrico por tonelada de aço bruto
kg/ton	Quilogramas por tonelada
HCN	Ácido cianídrico
H <sub>2</sub> S	Sulfeto de hidrogênio
mL	Mililitro
mg Pt/cm	Miligramas de Platina por centímetro
Ω	Ohms
g	Gramas
CH <sub>3</sub> COONa	Acetato de Sódio
NH <sub>4</sub> Cl	Cloreto de Amônio
KCl	Cloreto de Potássio
NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	Fosfato Monobásico de Sódio Dihidratado
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	Fosfato de Sódio Bibásico Dodecahidratado
mg/L	Miligramas por litro
μS/cm	Micro-siemens por centímetro
Ca	Cálcio
Mg	Magnésio
V/s	Volts por segundo
V	Volts
°C	Grau Celsius
M	Massa molecular do oxigênio
g/mol	Gramas por mol
$\int_0^t Idt$	Integral da corrente pela derivada do tempo (de zero até um tempo t)
C	Coulomb

F	Constante de Faraday
C/mol	Coulomb por mol
b	Número de elétrons trocados por mol de oxigênio
V	Volume da câmara do reator
L	Litro
$\Delta$ DQO	Diferença entre o DQO de entrada e de saída
ms/cm	Milisiemens por centímetro
A	Ampère
g/L	Grama por litro
mM	Milimol

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
2	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
2.1	<b>O consumo energético do setor siderúrgico</b> .....	18
2.1.1	<i>O papel da recuperação energética na siderurgia</i> .....	20
2.1.2	<i>Geração de resíduos e efluentes no processo siderúrgico</i> .....	21
2.2	<b>Caracterização do efluente de alto-forno</b> .....	22
2.3	<b>Energia gerada a partir de efluentes industriais</b> .....	23
2.4	<b>Célula a Combustível Microbiana (MFC)</b> .....	24
3	<b>METODOLOGIA</b> .....	27
3.1	<b>Fabricação e operação</b> .....	27
3.2	<b>Ensaio realizados</b> .....	28
3.2.1	<i>Diluição serial do efluente</i> .....	28
3.2.2	<i>Monitoramento das MFCs</i> .....	29
3.2.2.1	<i>Testes eletroquímicos</i> .....	30
3.2.2.2	<i>Eficiência do tratamento de água</i> .....	30
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	34
4.1	<b>Parâmetros gerais de operação</b> .....	34
4.1.1	<i>Voltagem</i> .....	34
4.1.2	<i>Temperatura</i> .....	36
4.1.3	<i>pH</i> .....	38
4.1.4	<i>Condutividade</i> .....	39
4.2	<b>Voltametria de Varredura Linear (LSV)</b> .....	40
4.3	<b>Voltametria Cíclica (CV)</b> .....	42
4.4	<b>Demanda Química de Oxigênio (DQO)</b> .....	44
4.5	<b>Eficiência Coulômbica (CE)</b> .....	45
5	<b>CONCLUSÃO</b> .....	48
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	50

## 1 INTRODUÇÃO

As metas globais de descarbonização estabelecidas pelo Acordo de Paris exigem uma transição no contexto brasileiro para tecnologias que reduzam substancialmente as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em 37% até 2025, e em 43% até 2030, com base nos níveis de 2005. Tais medidas possibilitam avanços na diversificação das fontes de energia no país para os próximos 30 anos associados a uma mitigação conservadora e rigorosa dos impactos das mudanças climáticas (Isah et al., 2023; Lima et al., 2025).

A redução na disponibilidade de recursos hídricos, combinada com os efeitos do aquecimento global e das mudanças climáticas, aumentou a pressão sobre as indústrias, especialmente a siderúrgica para reduzir sua pegada hídrica e de carbono (Conejo; Birat; Dutta, 2020). O Brasil está em 6º lugar no ranking mundial de emissões carbônicas independente de seus potenciais na realização das metas de desenvolvimento sustentável através de sua vantagem de energia renovável (Udemba; Tosun, 2022). A indústria siderúrgica é o setor com maiores emissões de carbono da indústria pesada, mesmo que produza insumos essenciais às tecnologias renováveis, e, portanto, sua transformação depende de um equilíbrio entre inovações tecnológicas e políticas públicas de incentivo à descarbonização (Fernandes et al., 2025).

Atualmente, também existem muitas desvantagens associadas aos métodos convencionais de tratamento de água, que geram enormes quantidades de lodo com uma série de impurezas e componentes tóxicos, tornando a etapa em uma grande consumidora de energia devido aos processos de aeração. Além disso, a água é um bem essencial para a sobrevivência da vida na terra e ela tem sido poluída devido a atividades antrópicas, corantes e elementos cancerígenos descarregados através de indústrias que afetam a saúde humana e o ecossistema em grande escala (Mohyudin et al., 2022).

Nesse contexto de responsabilidade energética e hídrica, as Células de Combustível Microbianas (MFCs) se mostram uma tecnologia bastante versátil, sendo um tipo de sistema bioeletroquímico capaz de converter energia química em elétrica por meio de reações catalíticas de microrganismos eletrogênicos, gerando energia ao mesmo tempo que é capaz de eliminar parte dos efluentes e resíduos lançados ao meio ambiente (Oliveira et al., 2016). Isso se deve ao processo de conversão direta de energia obtida do substrato para eletricidade, combinada com a produção de lodo ativado controlado, a insensibilidade ao ambiente operacional em baixas temperaturas, sua capacidade de ser usado sem tratamento de

gás ou entrada de energia para aeração e sua utilização em áreas com infraestruturas elétricas limitadas (Malik et al., 2023).

Tais sistemas bioeletroquímicos demonstram elevado potencial como uma solução eficiente e sustentável para o tratamento de lodos de efluentes industriais, mesmo que ainda sejam necessários avanços em pesquisa e desenvolvimento visando à otimização do desempenho e à ampliação da escala de aplicação. Mesmo assim, a capacidade de promover simultaneamente o tratamento do lodo e a geração de energia renovável torna as MFCs uma alternativa promissora para indústrias que buscam estratégias de gestão de resíduos ambientalmente adequadas e economicamente viáveis (Hidalgo; Martín-Marroquín; Corona, 2024). O desenvolvimento de processos que podem utilizar microrganismos representa uma excelente estratégia para a geração de bioenergia, pois os microrganismos são autorreplicantes e, portanto, os impulsos para a oxidação da matéria orgânica são autossustentáveis (Saravanan; Karthikeyan, 2018).

Neste trabalho, foi proposto o estudo da avaliação do desempenho eletroquímico de duas células de combustível microbianas (MFCs) com uso de efluentes industriais provenientes do processo de alto-forno da indústria do aço, os quais são compostos primordialmente de amônia e cianeto. Cada célula funcionou num período de 6 meses cada com o objetivo de avaliar em escala laboratorial tanto a consistência de sua geração elétrica quanto o potencial de remoção da matéria orgânica do efluente, conhecido por sua complexidade de componentes, além de monitorar parâmetros que possam influenciar esses aspectos como pH, temperatura e condutividade.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O consumo energético do setor siderúrgico

A indústria siderúrgica é uma das principais no uso intensivo de energia, correspondendo de 5 a 6% no consumo de energia industrial e produzindo aproximadamente 7% das emissões globais de CO<sub>2</sub>. Em 2020, a Agência Internacional de Energia propôs que, para atingir as metas climáticas globais, as emissões de CO<sub>2</sub> da indústria siderúrgica devem ser reduzidas em mais de 50% em relação aos níveis de 2019 até 2050 (Wang; Sun, 2024). A produção de aço libera cerca de 1,9 toneladas de CO<sub>2</sub> e necessita de 5,17 MWh de energia primária por tonelada produzida (Lopez; Farfan; Breyer, 2025). A produção siderúrgica é a principal fonte de emissões de gases de efeito estufa (GEE) entre os setores industriais brasileiros, correspondendo por aproximadamente um quarto das emissões industriais. Suas principais fontes de energia são o carvão (57%), o carvão vegetal (18%), e a eletricidade (10%). Além disso, o país é o segundo maior produtor de minério ferro do mundo, além de possuir uma das maiores reservas de minério de alta qualidade (Hebeda et al., 2023).

Em 2024, os três principais setores consumidores de aço foram: o setor de construção, que mais consome aço no país com 37,3%; em seguida, o setor automotivo, segundo maior consumidor com 24,8%; e o setor de bens de capital, terceiro maior com 19,2% de participação no consumo (Instituto Aço Brasil, 2025). Com isso, o Brasil atualmente está na nona colocação no total de produção de aço bruto no mundo e em primeiro lugar na América Latina. O Ceará despontou como o quarto estado com maior produção de aço do país, compondo cerca de 9,1% da produção nacional, ficando atrás de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo (World Steel Association, 2025).

No contexto brasileiro, aproximadamente 74% da produção de aço usou a rota Forno Básico de Oxigênio de Alto-Forno (BF-BOF), 24% usaram o Forno a Arco Elétrico (EAF), demonstrados na Figura 1, e o restante foi o Forno Otimizador de Energia (EOF) (Hebeda et al., 2023). O método de alto-forno da produção de ferro faz parte da produção primária de aço, que responde por 70% de toda a produção de aço do mundo (Neto et al., 2024).

Figura 1 – Rotas BF-BOF e EAF para a produção de aço.



beneficiamento de matéria-prima, sinterização, peletização, coqueamento, fundição de ferro, siderurgia, laminação de aço, e um sistema auxiliar público (Ren et al., 2021).

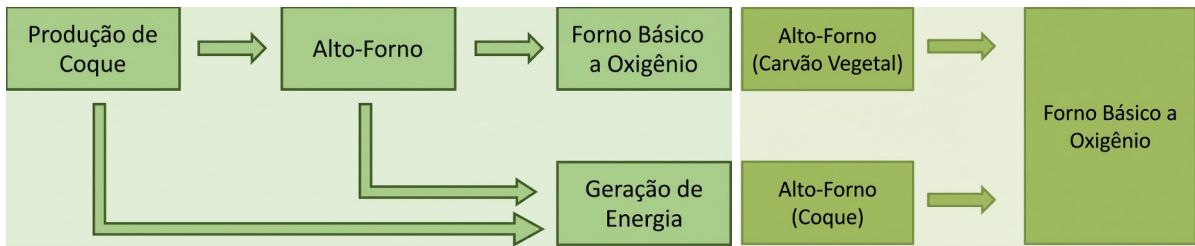
### ***2.1.1 O papel da recuperação energética na siderurgia***

A redução da demanda energética e consequentemente economia de recursos energéticos e redução de custos operacionais e emissões podem ser alcançadas utilizando tecnologias eficientes. As estimativas mostram que as emissões globais de carbono podem ser reduzidas em 44% em 2035 se processos eficientes em energia forem implementados em indústrias intensivas em energia (Ja'Fari et al., 2023). A fabricação de ferro de alto-forno é a principal fonte de emissões na indústria siderúrgica, com aproximadamente 70% do CO<sub>2</sub> emitido durante a fabricação em processos de BF-BOF, a sinterização contribuindo em 12% das emissões de carbono, e o coqueamento com cerca de 9%. As emissões de carbono por tonelada de aço bruto fundido para o processo BF-BOF são de 2,33 toneladas de CO<sub>2</sub> (Fang et al., 2025).

A redução da intensidade energética e de CO<sub>2</sub> no processo de fabricação de aço tem sido impulsionada principalmente pela inovação tecnológica. A principal configuração utilizada é o processo Conversor Básico de Oxigênio de Alto Forno, com aproximadamente 80% do consumo de energia da produção primária tradicional de aço provendo do coque. Dependendo do processo utilizado, a intensidade energética varia de 6,93 a 0,5 MWhth /tCS e de 3,72 a 0,13 MWhel/tCS (Lopez; Farfan; Breyer, 2025).

São divididas em duas categorias a rota BF-BOF: integrada com produção de coque e sem. A Siderurgia Integrada com Produção de Coque é subdividida em quatro processos principais: (a) Produção de Coque, com o consumo de energia da preparação de matéria-prima; (b) Alto-forno (BF); (c) Forno Básico de Oxigênio (BOF), com a preparação do produto final; e (d) Geração de energia, que converte os processos gases de exaustão em eletricidade. Já a Siderurgia Integrada sem Produção de Coque foi subdividida em três processos principais: (a) Alto-Forno usando Carvão; (b) Alto-Forno usando Coque; (c) Forno Básico de Oxigênio, sem nenhum sistema de geração de eletricidade (Pinto; Szklo; Rathmann, 2018). Ambas as rotas são esquematizadas na Figura 2.

Figura 2 – Rotas BF-BOF: (a) integrada com produção de coque; (b) sem produção de coque



Fonte: Adaptado de Pinto, Szklo e Rathmann (2018)

Algumas alternativas para reduzir o consumo de carvão já são implementadas como o uso de carvão vegetal ou bio-carvão, além do uso da auto-redução briquetes, que já contém carvão vegetal, vegetal ou mineral, que reduz as emissões de dióxido de carbono quando usado em métodos alternativos aos altos-fornos (Neto et al., 2024).

Em indústrias intensivas em energia, também são utilizados os Ciclos Orgânicos de Rankine (ORCs), capazes de aumentar notavelmente a eficiência energética e reduzir as emissões de carbono, convertendo fonte de calor de baixa, média e alta temperatura em eletricidade. As quantidades mais significativas do calor residual são produzidas e sendo perdidas nos processos industriais e térmicos. Uma melhor utilização do excesso de processo ou calor residual representa uma fonte significativa de economia de energia e fornece uma solução técnica acessível e confiável para aumentar a eficiência do setor industrial intensivo de energia, aumentando a autoprodução de eletricidade (Ja'Fari et al., 2023).

Ademais, sistemas de recuperação de calor residual são uma parte crítica dos sistemas combinados de refrigeração, aquecimento e energia (CCHP). Comparado com o sistema tradicional de geração de energia separada, um sistema CCHP pode reduzir o consumo de energia de forma evidente, pois utiliza o calor residual dos motores primários e está localizado próximo ao usuário final, evitando o desperdício de energia e as perdas de transmissão, além de proporcionar um fornecimento de eletricidade resiliente e permitir um despacho flexível das tecnologias de geração (Wang et al., 2020).

### ***2.1.2 Geração de resíduos e efluentes no processo siderúrgico***

Um dos principais desafios da indústria siderúrgica é continuar produzindo grandes quantidades de aço, mantendo-se alinhada com a mudança das regulamentações ambientais e mantendo o consumo de água doce sob controle. Todos esses fatores resultaram em uma crescente pressão sobre o setor em todo o mundo para reduzir seu consumo de água e melhorar a qualidade das águas residuais adotando novas tecnologias (Conejo; Birat; Dutta,

2020).

A produção de aço necessita de um alto consumo de água salobra e doce principalmente para fins de resfriamento. Outras finalidades da água no processo siderúrgico referem-se aos processos de decapagem e lavagem de gás (Trovão et al., 2022). Já na etapa de produção de coque nos países em desenvolvimento existe um aumento contínuo da descarga de águas residuais de coque, composta por altas concentrações de orgânicos como fenóis, além de nitrogênio, amônia e cianeto, capazes de induzir riscos potenciais à segurança ambiental e à saúde humana enquanto não tratados de forma eficaz (Fan et al., 2021).

Além dos resíduos líquidos, a produção de uma tonelada de aço em uma usina siderúrgica integrada gera cerca de meia tonelada de subprodutos sólidos, sendo eles escórias, poeiras e lamas. Embora a maioria das escórias de aço tenha aplicações, as poeiras e lamas são frequentemente vistas como resíduos, devido sua origem nos gases de exaustão produzidos nas instalações dos fornos. A poeira sai de um alto-forno através do gás de topo, que transporta as partículas através do filtro de gases, criando uma fração grossa chamada poeira de alto-forno (ou poeira primária) e uma fração fina, lavada a úmido, chamada lodo de alto-forno (ou poeira secundária). Cerca de 22 kg/ton de aço bruto corresponde à quantidade média de poeira e lodo de BOF (Binnemans et al., 2020).

## **2.2 Caracterização do efluente de alto-forno**

No processo siderúrgico, a mistura de carvão é aquecida em fornos sob atmosfera redutora para liberar compostos voláteis. Dois tipos de produtos são gerados a partir disso: o coque, obtido em estado sólido, e uma fração gasosa composta por gás de coqueria e produtos carboquímicos como benzeno, naftaleno, alcatrão, entre outros. O coque finalmente sai do forno a 1300 °C e é resfriado com água para cumprir suas funções no decorrer da produção de aço (Trovão et al., 2022). Durante o processo de coqueificação, o HCN passa para o gás do forno de coque em conjunto do H<sub>2</sub>S, amônia e matéria orgânica. O resfriamento desse gás do forno de coque produz o licor de carvão, que se torna o efluente bruto de coqueificação após a separação do alcatrão e da amônia, sendo composto por cianeto, fenóis, tiocianato e amônia (Martínková et al., 2023).

O licor de forno de coque é um dos fluxos líquidos mais contaminados gerados pela indústria de processamento de carvão, sendo primeiramente introduzido no departamento de separação de alcatrão, no qual os compostos orgânicos insolúveis em água são separados e direcionados para processamento posterior. A fase aquosa remanescente, a partir daqui

chamada licor amoníaco, é usada para o arrefecimento do gás do forno de coque (Kwiecinska-Mydlak et al., 2019).

Além do material aquoso obtido, o resfriamento rápido do coque quente gera efluentes com alta concentração de matéria em suspensão, enquanto a lavagem do gás produzido resulta em um líquido tóxico com alta concentração de compostos nitrogenados e moléculas orgânicas cíclicas. A composição dos efluentes de coqueria depende principalmente da qualidade dos carvões utilizados e dos parâmetros operacionais e tecnológicos dos fornos de coque (Felföldi et al., 2020).

Além disso, quando metais alcalinos vaporizados reagem com nitrogênio da explosão de ar e carbono do coque a temperaturas de mais de 1.000 °C, ocorre a formação de cianeto alcalino, o qual será transportado para cima pelo gás superior para deixar o alto-forno. Durante a purificação do gás superior e subsequente limpeza do lodo, esses cianetos alcalinos se dissolvem na água. A água do depurador também contém diferentes formas de cianeto, matéria em suspensão e quantidades de cloreto, amônia e outros materiais dissolvidos. A recirculação de água de depurador resulta em um aumento significativo na concentração de cloreto junto com cianeto e outros contaminantes dissolvidos na água soprada. Durante a descarga do alto-forno com soprador de água, o cianeto entra no ambiente se não for tratado adequadamente (Mondal et al., 2021).

### **2.3 Energia gerada a partir de efluentes industriais**

A recuperação de energia líquida em processos industriais é um dos meios mais importantes de economia de energia e redução de emissões (Ji et al., 2023). Utilizar as águas residuais como fonte alternativa de energia pode mitigar impactos ambientais e cobrir certas demandas energéticas, podendo gerar produtos de recuperação como metano, hidrogênio e eletricidade com uso de reatores anaeróbios de leito de lodo de fluxo ascendente (UASB) para os dois primeiros e células a combustível microbiana (MFCs) para o último (Ortiz-Sanchez; Cuevas-Rodriguez, 2023).

A utilização de efluentes industriais em aplicações de biorrefinaria enfatiza também a transformação deles em recursos valiosos, como biocombustíveis, bioquímicos e bioplásticos, por meio de processos biotecnológicos avançados, incluindo digestão anaeróbica, fermentação, conversão enzimática e produção de biomassa microbiana. Ao utilizar esses efluentes como matéria-prima, as biorrefinarias podem reduzir efetivamente a poluição e contribuir para a gestão sustentável de resíduos (Castellanos et al., 2024).

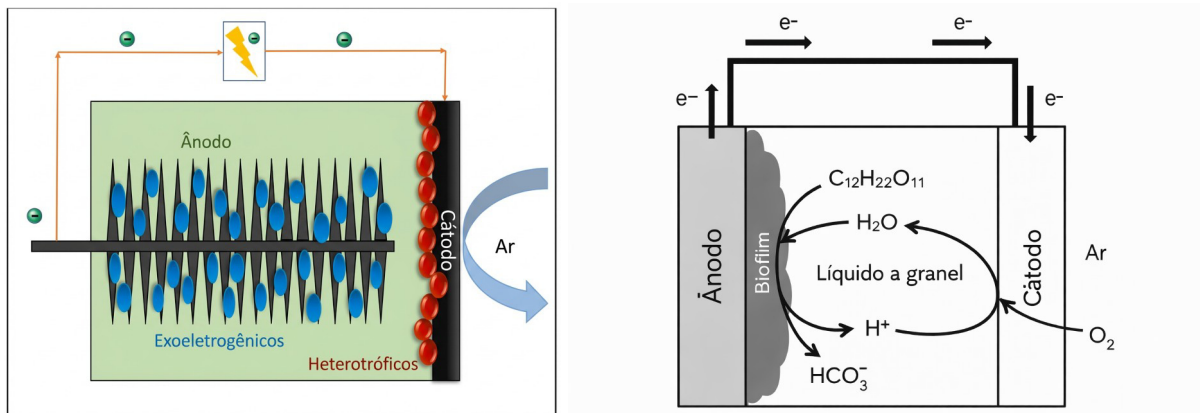
Na Conversão de Resíduos em Energia, sistemas e técnicas de gestão são desenvolvidas para reduzir o impacto ambiental da produção de resíduos e, ao mesmo tempo, explorar as possibilidades de conversão de resíduos em energia. Como exemplo, no descarte de resíduos orgânicos em aterros sanitários, a produção de metano pode ser minimizada por meio de captura e posterior utilização como combustível para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, oferecendo uma possibilidade viável para a produção de energia (Fodor; Klemeš, 2012).

## **2.4 Célula a Combustível Microbiana (MFC)**

As Células de Combustível Microbianas (MFCs) são dispositivos que utilizam microorganismos para converter energia química em energia elétrica. Eles empregam microorganismos eletroquimicamente ativos como biocatalisadores para degradar compostos orgânicos em águas residuais enquanto produzem eletricidade (Zhong et al., 2024). Tais microorganismos decompõem a matéria orgânica no ânodo, produzindo elétrons que são transferidos para o cátodo através de um circuito externo. Os ânodos precisam de boa condutividade, propriedades eletrocatalíticas e biocompatibilidade para um aumento de sua densidade de potência (Qiao et al., 2024). As MFCs também produzem prótons no ânodo, que passam através de uma membrana de troca de prótons (PEM) para o cátodo para se combinar com elétrons coletados por um circuito externo e um aceitador de elétrons, geralmente oxigênio, onde ocorre a principal reação de redução de oxigênio (Benzaouak et al., 2022).

A quantidade de energia gerada através de MFCs depende principalmente de diversos fatores como escolhas de projeto (câmara simples, câmara dupla, empilhados, de fluxo ascendente, etc), distância entre eletrodos, o tipo de eletrodo utilizado, a membrana de troca de prótons (PEM), mediadores, o substrato e os microorganismos envolvidos (Malik et al., 2023). Os principais componentes funcionais das células de combustível microbianas incluem o cátodo, o ânodo, a membrana de troca de prótons (PEM), o microrganismo eletroativo, o solvente orgânico, etc. Para garantir que as bactérias estejam em um ambiente anaeróbico, a câmara anódica deve ser selada. A câmara catódica é continuamente aerada para fornecer oxigênio dissolvido (Zhang, 2024). As MFCs do tipo câmara dupla possuem compartimentos separados para o ânodo e cátodo, normalmente com uma membrana permeável a íons separando-os para permitir maior eficiência de operação. Nas MFCs de câmara única (Figura 3), o ânodo e o cátodo são normalmente colocados dentro da mesma câmara, separados por uma membrana ou separador (Kwofie et al., 2024).

Figura 3 – Estrutura básica de uma MFC de câmara única



Fonte: Adaptado de Sirinutsomboon, 2014 e Mohyudin et al., 2022.

As Células de Combustível Microbianas oferecem certas vantagens sobre outros métodos convencionais de produção de energia, pois são capazes de converter diretamente o substrato em eletricidade, aumentando assim a eficiência; além de poderem operar em temperatura ambiente ou baixa temperatura. A eletricidade gerada a partir de águas residuais pode equivaler ao gasto energético necessário para operar uma estação de tratamento (Sreelekshmy et al., 2020). Adicionalmente, as MFCs apresentam menor demanda por área física em relação aos sistemas tradicionais de tratamento, o que as torna especialmente adequadas para instalações industriais com limitações de espaço, favorecendo a adoção de sistemas descentralizados de tratamento, reduzindo a necessidade de infraestrutura extensiva e o transporte de lodos por longas distâncias, obtendo uma consequente diminuição dos custos operacionais associados (Hidalgo; Martín-Marroquín; Corona, 2024).

Os ânodos nos sistemas de MFC fornecem habitat para o crescimento microbiano e o enriquecimento regular de microrganismos, a transferência extracelular de elétrons (EET) está intimamente relacionada ao desempenho e à natureza do ânodo, o que também contribui para o alto desempenho das MFCs (Yang et al., 2022).

A transferência extracelular de elétrons é um mecanismo pelo qual os microrganismos obtêm energia para crescimento e manutenção a partir do seu ambiente/substrato e transferem os elétrons gerados metabolicamente para o ânodo para gerar energia elétrica. A EET ocorre de duas maneiras diferentes: a transferência direta de elétrons e a transferência indireta de elétrons (Amadu; Miadonye, 2024). A transferência direta de elétrons ocorre através de uma cadeia de transportadores de elétrons. Os elétrons são

transportados de transportadores com menor potencial redox para transportadores com maior potencial redox. No caso da transferência indireta de elétrons, os mediadores atuam como lançadeiras que transportam elétrons do microrganismo para o eletrodo usando lançadeiras de elétrons solúveis, como fenazinas e flavinas (Palanivel et al., 2025).

As espécies bacterianas mais eficazes em MFCs são relatadas como sendo *Shewanella* spp. e *Geobacter* spp. Essas duas bactérias têm sido extensivamente estudadas devido ao seu grande potencial no tratamento de águas residuais e à maior taxa de transporte de elétrons. O uso de uma cultura mista foi mais eficaz do que a cultura pura devido à formação natural de uma combinação microbiana ideal, que aprimora a reação eletroquímica, oxidando de forma mais eficiente os compostos orgânicos complexos presentes nas águas residuais. Mesmo em estações de tratamento de águas residuais em escala real com estabilidade funcional, as comunidades bacterianas demonstraram ser variáveis e dinâmicas (Apollon et al., 2024).

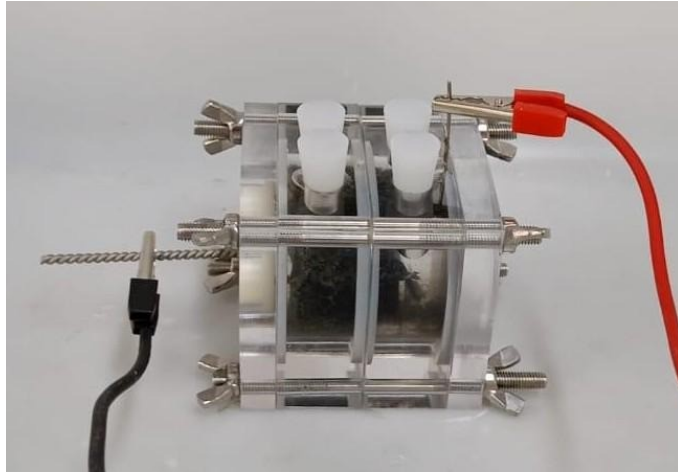
### 3 METODOLOGIA

As atividades desenvolvidas nesse estudo foram a concepção e o monitoramento de Células a Combustível Microbianas (MFCs), analisando sua eficiência tanto na geração de energia quanto no potencial de remoção de matéria orgânica, utilizando um resíduo líquido advindo do processo de Alto-Forno da indústria do aço, comparando o desenvolvimento de duas células com ele. Os experimentos duraram seis meses cada, com um aumento gradual na porcentagem do efluente de alto-forno (AF) em cada MFC, sendo realizados testes de operação e eficiência a cada 10 dias. Inicialmente, as MFCs foram operadas em modo batelada e alimentadas com lodo sintético por cerca de um mês. Em seguida, as células foram alimentadas com o efluente de alto-forno. A tensão de saída de todos reatores foi monitorada para avaliar a estabilidade e o desempenho dos sistemas.

#### 3.1 Fabricação e operação

Nesse estudo, duas Células a Combustível Microbianas, nomeadas MFC-1 e MFC-2, com volume de 50 mL cada, foram empregadas como dispositivos experimentais. A base das células foi montada em formato de câmara única, com placas de policarbonato com aberturas na superfície para entrada e saída do efluente trabalhado. Cada reator continha um ânodo (uma escova de fibra de carbono tratada termicamente), com uma cultura microbiana mista, e um cátodo feito com tecido de carbono impermeável. Esse cátodo apresentava uma camada base de carbono, quatro camadas de difusão de politetrafluoretileno (PTFE) e uma camada catalítica contendo 0,5 mg Pt/cm, também era recoberto com platina, carbon black e PTFE, para uma melhor condução e estabilidade eletroquímica. Além disso, foi equipado um coletor de corrente de titânio e um resistor externo de 1000  $\Omega$  foi conectado às MFCs. A configuração da célula pode ser vista na Figura 4.

Figura 4 – Célula a Combustível Microbiana (MFC)



Fonte: elaborado pelo autor.

As MFCs foram operadas em modo batelada e inoculadas por cerca de um mês com lodo de digestão anaeróbia. O inóculo da MFC-1 foi realizado com um lodo proveniente dos reatores UASB da Estação de Tratamento de Esgoto Acarape (CAGECE), enquanto que da MFC-2 do reator UASB da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do Centro de Eventos, ambos localizados em Fortaleza, Ceará, Brasil. A câmara inicialmente era preenchida com 100% de esgoto sintético na concentração de 1 g/L acetato de sódio, como fonte de carbono, em complemento de 50 mM de uma solução tampão-fosfato (PBS), atingindo um volume total de 50 mL. O meio de crescimento utilizado continha, por litro: 1,0 g de  $\text{CH}_3\text{COONa}$ , 0,31 g de  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , 0,13 g de  $\text{KCl}$ , 3,32 g de  $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e 10,32 g de  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ . Em seguida, houve o aumento gradual do efluente de alto-forno até que se completasse 100% ou ocorresse uma redução drástica de tensão elétrica nas células.

### 3.2 Ensaios realizados

Ao longo do experimento, vários parâmetros foram registrados e analisados com a diluição serial dos efluentes em busca de atestar o funcionamento e a eficiência dos sistemas bioeletroquímicos.

#### 3.2.1 Diluição serial do efluente

Após as células atingirem a eficiência máxima possível com uso de acetato, iniciou-se o processo gradual de aumento do uso do chamado efluente de alto-forno (AF) em

20%, 40%, 60%, 80% e 100%, com uma mistura com esgoto sintético para controlar a carga orgânica. Cada concentração era colocada dentro da câmara em conjunto ao PBS e sua voltagem era monitorada de 20 a 30 dias, a depender dos ciclos de cada célula e da condição dos biofilmes.

O efluente industrial utilizado nas MFCs foi advindo do processo de Alto-Forno da indústria siderúrgica. Foi utilizado o resíduo do arrefecimento do sistema, que contém diferentes formas de cianeto, matéria em suspensão e quantidades de cloreto, amônia e entre outros materiais. As características químicas do efluente de Alto-Forno podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características químicas do efluente de Alto-Forno

<b>Parâmetro</b>	<b>Média aproximada</b>
Alcalinidade	1,113 mg/L
Amônia Total	213 mg/L
Cianeto Livre	7,9 mg/L
Cianeto Total	8,0 mg/L
Cloreto	3,978 mg/L
Condutividade	17,060 $\mu$ S/cm
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	697 mg/L
Fluoreto	38,8 mg/L
Metais	141,6 mg/L
Dureza Total (Ca + Mg)	308 mg/L
pH	8,08
Fenol	0,96 mg/L
Sólidos Suspensos Totais (SST)	54,6 mg/L

Fonte: elaborada pelo autor.

### 3.2.2 Monitoramento das MFCs

Foram realizadas medições de voltagem, corrente e potência com as MFCs em circuito externo, além de testes eletroquímicos para compreender os mecanismos de transferência de elétrons e identificar possíveis limitações no sistema. Ademais, era feita uma captação da tensão das células de 10 em 10 minutos e eram obtidos com um medidor multiparâmetro os parâmetros de pH, temperatura e condutividade da entrada e da saída dos reatores quando feita a alimentação.

#### 3.2.2.1 Testes eletroquímicos

Para as análises eletroquímicas, foi utilizado o Potenciostato/Galvanostato PGSTAT204 (módulo FRA32M, Metrohm) para observar a variação do potencial do eletrodo de trabalho de ambas MFCs a uma determinada taxa de varredura (expressa em V/s). A partir disso, os testes de voltametria eram usados para avaliar a atividade eletroquímica de comunidades microbianas e testar o desempenho das células.

Para o teste de Voltametria de Varredura Linear (LSV) tanto para MFC-1 quanto MFC-2, foram colocados valores padrões do sistema do software NOVA para LSV com: potencial inicial a 0 V, potencial de parada a 0 V, taxa de varredura de 0,001 V/s e passo de resolução de 0,001 V.

Na análise de Voltametria Cíclica (CV), foi utilizada uma solução tampão PBS como eletrólito e um eletrodo de Ag/AgCl, que ficava imerso em KCl saturado, como eletrodo de referência. A análise empregou uma faixa potencial de -0,7 V a 0,7 V. A avaliação das propriedades eletroquímicas relevantes envolveu a determinação da área sob a curva CV e a magnitude da densidade de corrente. Para a MFC-1, foram colocados valores padrões do sistema do *software* NOVA para voltametria cíclica com a faixa potencial escolhida com: potencial inicial a 0 V, potencial de parada a 0 V, taxa de varredura de 0,001 V/s, número de ciclos igual a 1 e passo de resolução de 0,01 V. Porém, após um estudo mais aprofundado, foram corrigidos esses valores para a MFC-2 visando melhor visualização gráfica, sendo considerados: potencial inicial a - 0,7 V, potencial de parada a - 0,7 V, taxa de varredura de 0,005 V/s, número de ciclos igual a 3 e passo de resolução de 0,001 V.

### 3.2.2.2 Eficiência do tratamento de água

A análise da remoção da Demanda Química de Oxigênio (DQO) permitiu avaliar a eficiência do sistema das MFCs na degradação da matéria orgânica presente nos efluentes do Alto-Forno, determinada pelo método espectrofotométrico padrão HACH (DR 3900, Hach Co., Loveland, CO, EUA).

Para cada análise de DQO, eram preparadas três amostras com uso do Kit Hanna Instrumentos de DQO HI93754B-25. Para a primeira, a Amostra Branco, utilizada como zero de referência no espectrofotômetro, eram adicionados aos frascos do kit 2 mL de água destilada. Para as posteriores, o mesmo volume era adicionado, dessa vez, com o líquido de entrada e de saída das MFCs. Em seguida, todas as amostras eram aquecidas num bloco digestor (CIENLAB, Modelo CE-350/25) até atingir 150 °C por duas horas (Figura 5). Após o

período de aquecimento, as amostras eram resfriadas até uma temperatura de 120 °C, em que ocorria a retirada delas do bloco digestor para terminar o processo de resfriamento à temperatura ambiente.

Figura 5 – Testes de DQO: (a) Amostras do Kit Hanna Instrumentos de DQO HI93754B-25 e (b) Amostras aquecidas no bloco digestor



Fonte: elaborado pelo autor.

Com as amostras prontas, era selecionado o protocolo 435 de DQO no espectrofotômetro HACH. Para cada amostra de entrada e saída das MFCs, eram feitas três medições de DQO em relação ao zero de referência, obtendo valores em mg/L (Figura 6). O equipamento era devidamente calibrado, passando por um breve período ligado para aquecer, e cada frasco era limpo antes de ser colocado nele para evitar alterações de valores.

Figura 6 – Medição das amostras de DQO no espectrofotômetro HACH



Fonte: elaborado pelo autor.

A eficiência de remoção de DQO foi então calculada como a razão entre a DQO removida e a de entrada (Equação 1), permitindo medir quanto da matéria orgânica removida foi convertida em corrente elétrica por meio da eficiência coulômbica (CE).

$$\text{Remoção de DQO} = \frac{DQO_{\text{entrada}} - DQO_{\text{saída}}}{DQO_{\text{entrada}}} \quad (1)$$

A eficiência coulômbica foi usada para avaliar quanto da matéria orgânica removida foi realmente transformada em eletricidade nas células de combustível microbianas (MFC) alimentadas com efluente de alto-forno. A eficiência coulombiana é definida como a razão entre o total de Coulombs efetivamente transferidos do substrato para o ânodo e o máximo de Coulombs possível caso toda a remoção do substrato produzisse corrente. Esse parâmetro é importante pois indica a eficiência do processo eletroquímico nas MFCs, em que valores mais altos de CE podem indicar que mais elétrons foram aproveitados para gerar corrente elétrica e menos foram perdidos em outros processos como produção de metano, respiração aeróbia residual ou crescimento celular.

$$CE \% = \frac{M \int_0^t Idt}{F \times b \times V \times \Delta DQO} \cdot 100 \quad (2)$$

Em que M equivale à massa molecular do oxigênio (32 g/mol);  $\int_0^t Idt$  representa a carga elétrica total gerada ao longo do tempo (C); F sendo a constante de Faraday (96.485

$C/\text{mol}$ );  $b$  igual ao número de elétrons trocados por mol de oxigênio, sendo assumido o valor de 4;  $V$  igual ao volume da câmara do reator (L); e  $\Delta\text{DQO}$  a diferença entre o DQO de entrada e o de saída (mg/L).

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

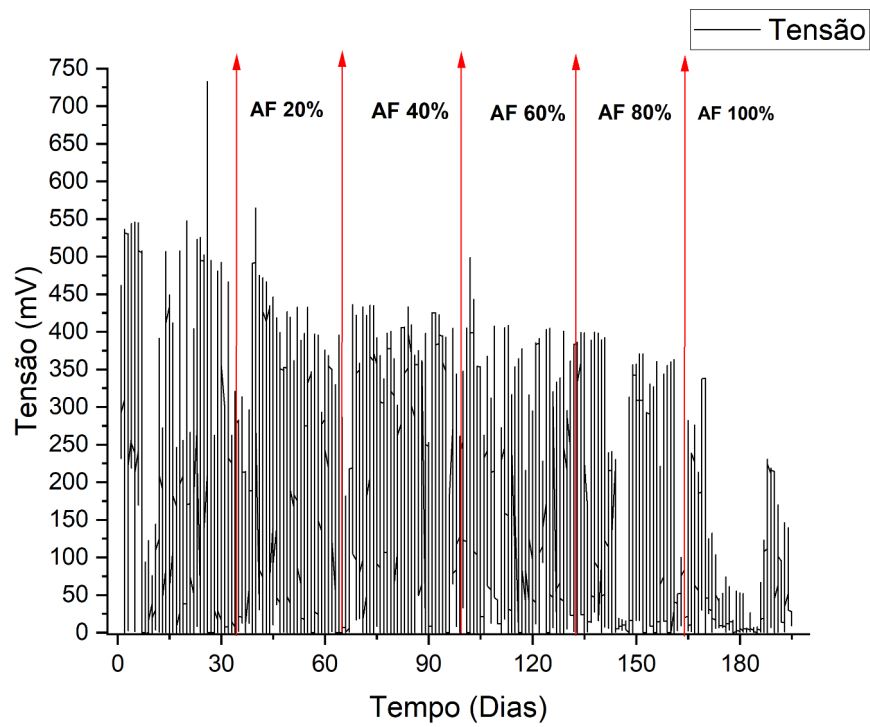
Os resultados obtidos consideraram a operação de duas células de combustível microbianas: MFC-1, de dezembro de 2024 até maio de 2025; e MFC-2, de setembro de 2025 até janeiro de 2026. Os ensaios realizados possibilitaram analisar a eficiência dos sistemas tanto na degradação de poluentes orgânicos por ação microbiana quanto na produção de energia elétrica.

### **4.1 Parâmetros gerais de operação**

#### ***4.1.1 Voltagem***

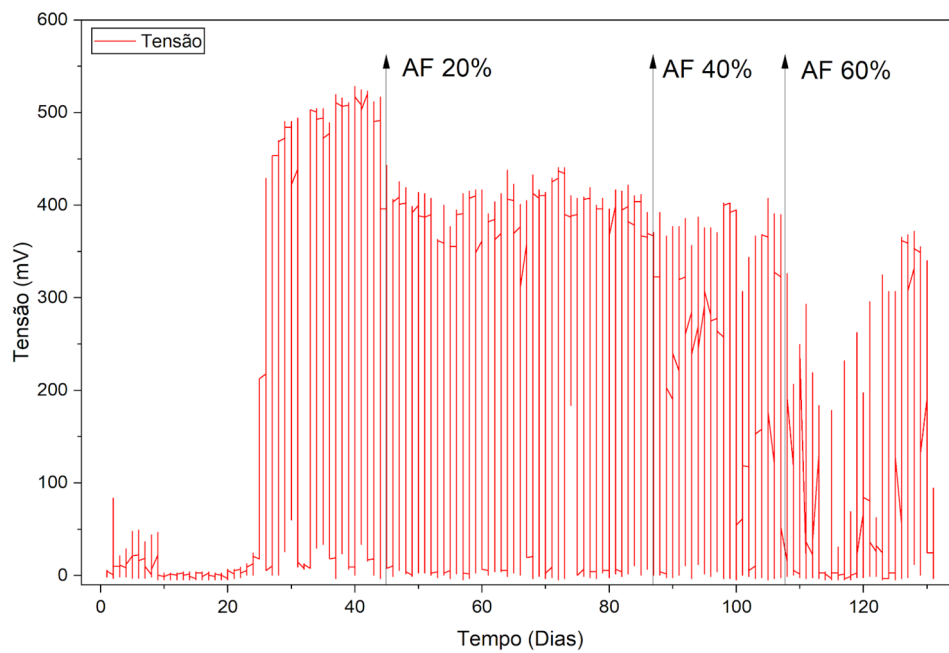
Ambas MFCs operaram durante o primeiro mês com uso de esgoto sintético, em que apresentavam valores de tensão relativamente estáveis, por volta de 500 mV, ao longo de todo esse período experimental, indicando bom desempenho eletroquímico dos sistemas. Após essa fase, teve o início da primeira diluição (20% de AF), em que foi possível verificar um decréscimo no desempenho elétrico de ambas MFCs, seguido pela segunda diluição (40% de AF) e a terceira (60% de AF), visíveis nos Gráficos 1 e 2. Para a MFC-1, ainda ocorreu uma quarta diluição (80% de AF), enquanto que a MFC-2 não conseguiu manter uma tensão estável o suficiente para alcançar essa concentração.

Gráfico 1 – Valores de Tensão para MFC-1



Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 2 – Valores de Tensão para MFC-2



Fonte: elaborado pelo autor.

No início de cada etapa de diluição das MFCs, a tensão aumentava de forma expressiva até atingir um platô, indicando a colonização microbiana estável nos ânodos, até diminuir devido ao esgotamento do acetato. A partir disso, o nutriente e o católito no ponto de tensão mais baixo eram trocados para fornecer uma nova fonte de carbono, aumentando a tensão novamente e iniciando um novo ciclo.

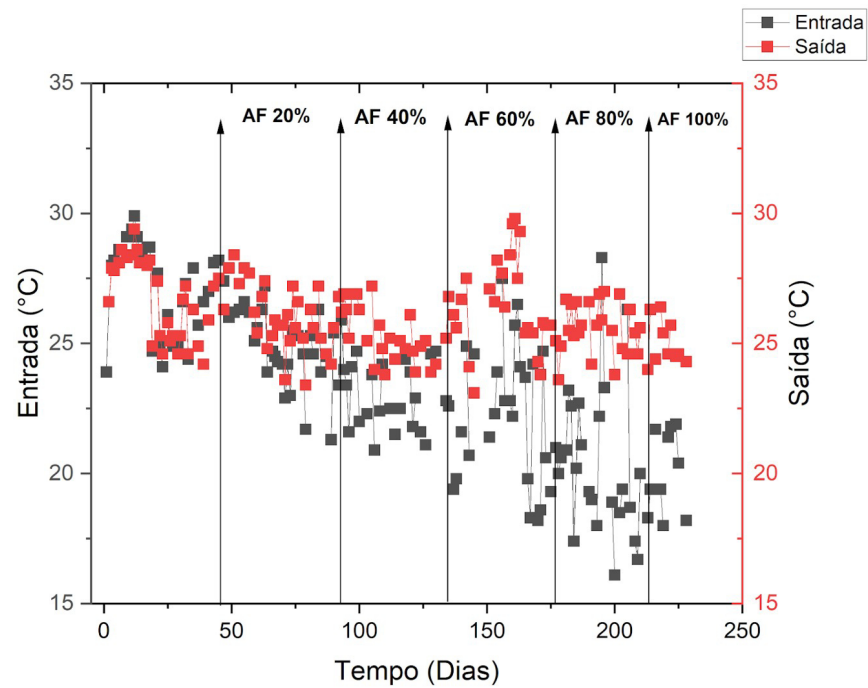
Tanto a MFC-1 quanto a MFC-2 apresentaram valores de tensão estáveis em cada etapa, assumindo valores de voltagens de 400 mV com uso de 20 e 40% do efluente e caindo drasticamente a partir dos 60% devido ao caráter inibitório dos componentes do resíduo. A MFC-2, apresentou também uma baixa voltagem logo no início da operação com acetato, devido ao uso do mesmo inóculo da MFC-1, proveniente dos reatores UASB da CAGECE. Após ocorrer a troca para um novo inóculo, do reator UASB da ETE do Centro de Eventos, a MFC-2 começou a operar com 500 mV com uso de acetato.

Foram registradas também pequenas flutuações de tensão, associadas a mudanças na composição do substrato ou a falhas pontuais no fornecimento de energia, impossibilitando temporariamente a leitura do sistema de aquisição de dados. Segundo Guo et al. (2022), a baixa taxa de transferência elétrica também pode levar a uma baixa atividade metabólica microbiana, o que limita a eficiência dos bioprocessos anaeróbicos.

#### ***4.1.2 Temperatura***

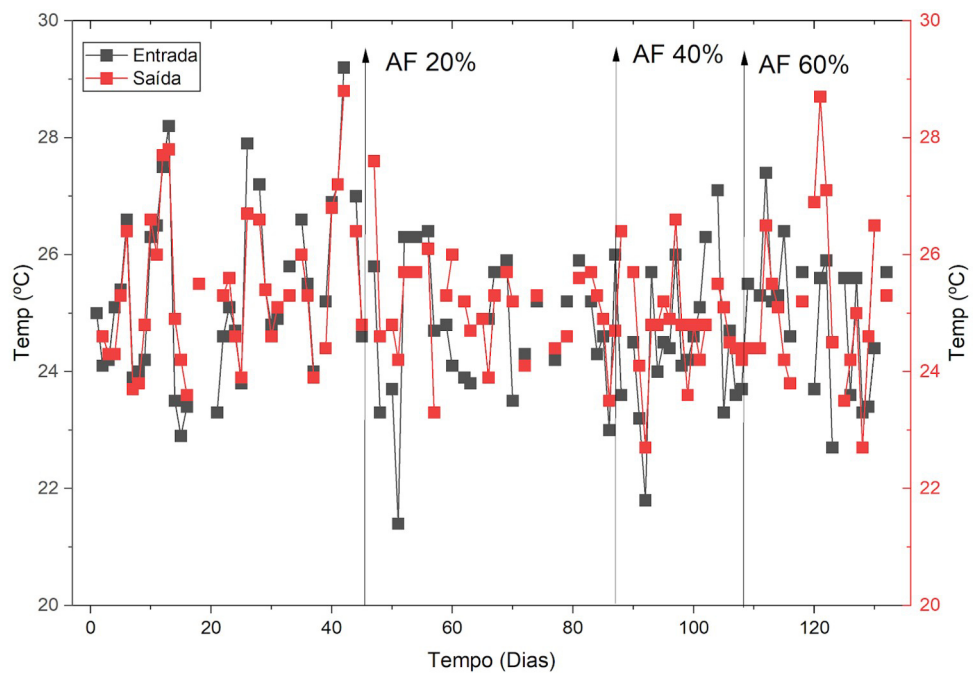
As MFCs operavam em temperatura ambiente, com as entradas de efluente nos reatores variando entre 15 °C e 25 °C e as saídas das células entre 25 °C e 30 °C. Os valores de temperatura para a MFC-1 (Gráfico 3) se mostraram mais constantes que os apresentados pela MFC-2 (Gráfico 4), porém foi observado que a temperatura não influenciou nos processos biológicos das células, conseguindo operar normalmente nas condições ambientes.

Gráfico 3 – Valores de temperatura de entrada e saída da MFC-1



Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 4 – Valores de temperatura de entrada e saída da MFC-2

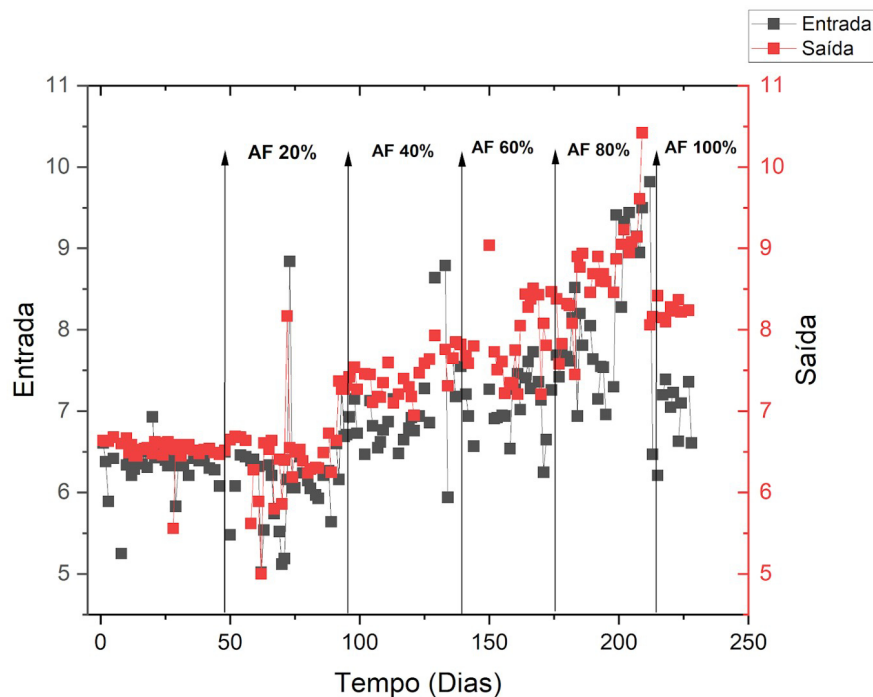


Fonte: autoria própria.

### 4.1.3 pH

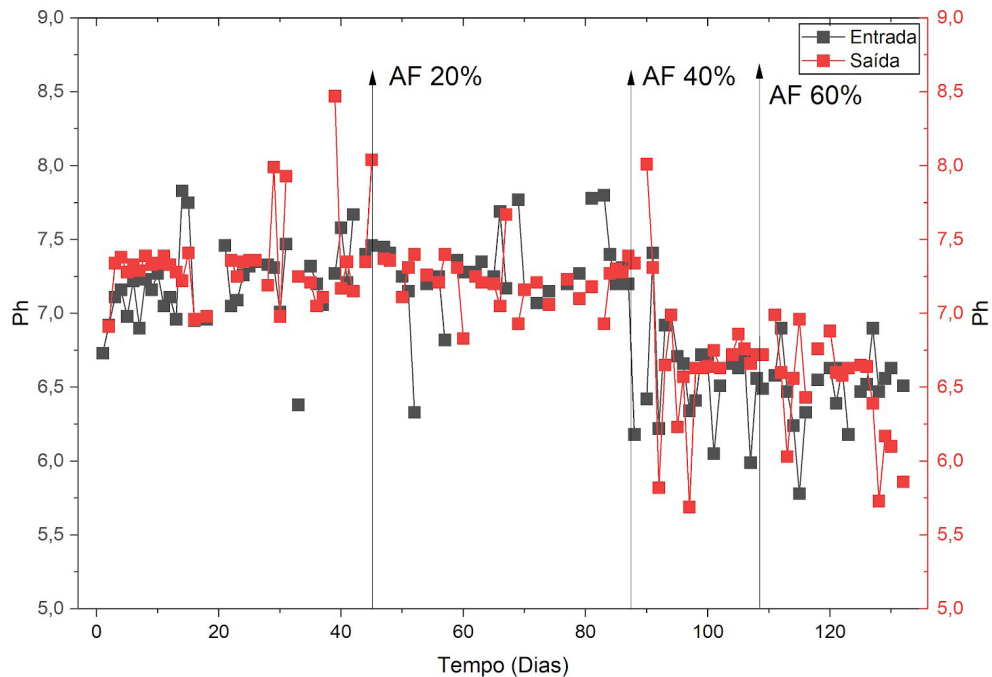
Os valores de pH apresentaram-se inicialmente entre 6 e 7 para a MFC-1 e entre 7 e 7,5 para a MFC-2, sendo as medições de saída de ambas as células consistentemente maiores às de entrada. Conforme a concentração do efluente de alto-forno aumentava, obteve-se um crescimento gradual do pH, resultando na inibição da comunidade microbiana a partir de 80% de AF para a MFC-1 (Gráfico 5). Isso está de acordo com as observações de Kwiecinska-Mydlak et al. (2019) de que a eficiência do processo depende fortemente das propriedades das águas residuais, especialmente em relação ao pH. Entretanto, para a MFC-2, a partir dos 60% (Gráfico 6), houve uma diminuição do pH e, mesmo assim, ocorreu um comportamento inibitório em decorrência das características do efluente.

Gráfico 5 – Valores de pH de entrada e saída da MFC-2



Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 6 – Valores de pH de entrada e saída da MFC-2

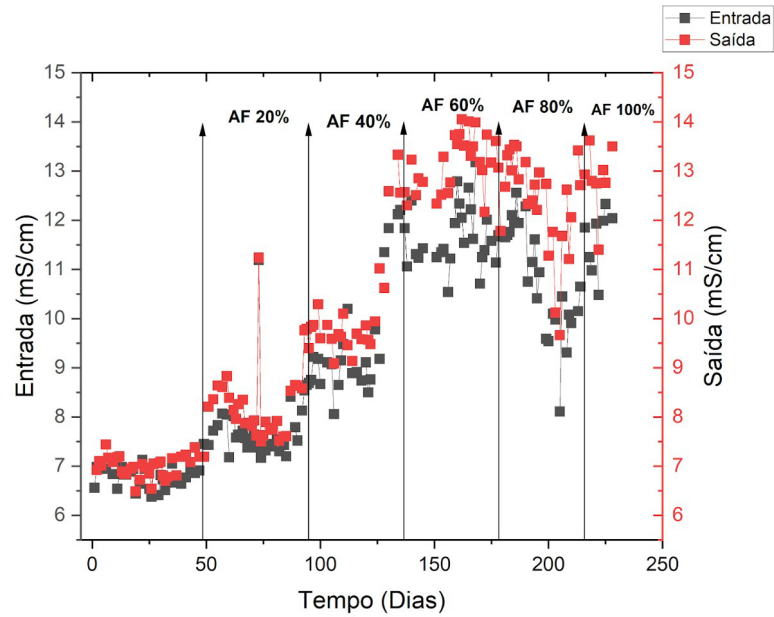


Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.1.4 Condutividade

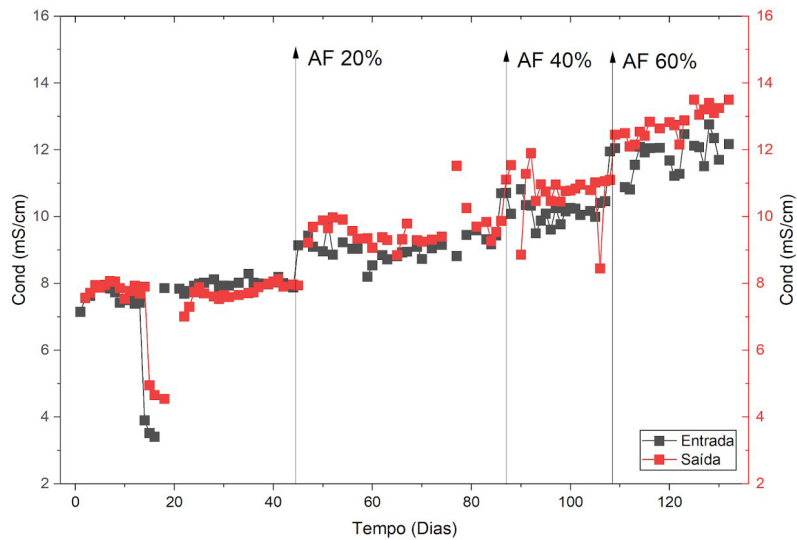
O aumento de pH permitiu também o aumento de condutividade, que inicialmente apresentou valores entre 6,5 e 7,5 ms/cm para a MFC-1 (Gráfico 7) e entre 7 e 8 ms/cm para a MFC-2 (Gráfico 8), sendo novamente as medições de saída de ambas as células maiores às de entrada. Conseqüentemente, o aumento da concentração do efluente também provocou uma elevação na condutividade, levando à inibição completa da comunidade microbiana nas células a partir dos 60% de AF, com medidas entre 10 e 14 ms/cm. Tais resultados são esperados para águas residuais de coque, segundo Fan et al. (2021), pois são uma água residual salina com alta resistência iônica e sua condutividade muitas vezes atinge 10 ms/cm.

Gráfico 7 – Valores de condutividade de entrada e saída da MFC-1



Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 8 – Valores de condutividade de entrada e saída da MFC-2



Fonte: autoria própria.

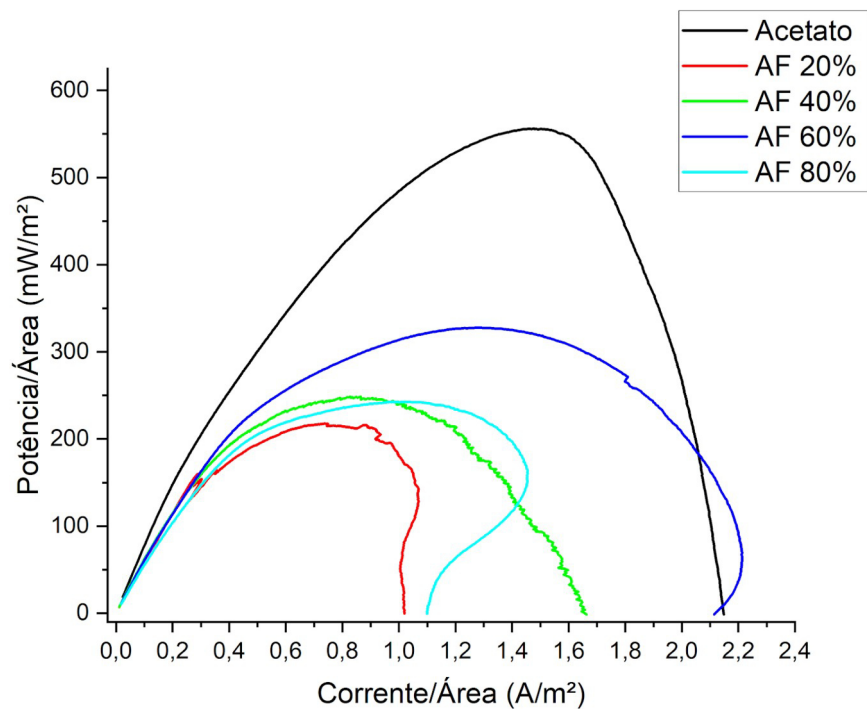
## 4.2 Voltametria de Varredura Linear (LSV)

Os testes de Voltametria de Varredura Linear (LSV) demonstraram que, com o aumento da concentração do efluente de alto-forno, ocorreu uma redução progressiva da

eficiência eletroquímica das células, quando comparadas à operação com acetato como substrato, que apresentou a maior potência máxima, indicando que é o substrato mais fácil de ser metabolizado pelos microrganismos eletrogênicos.

No caso da MFC-1, observou-se essa tendência de diminuição da eficiência com exceção da operação com concentração de 60% de efluente, em que a célula apresentou melhor desempenho elétrico em relação às condições com 20% e 40% (Gráfico 9), explicitando maior estabilidade e atividade eletroativa nesse ponto operacional. Cada curva no gráfico indica um mês de operação com o substrato utilizado.

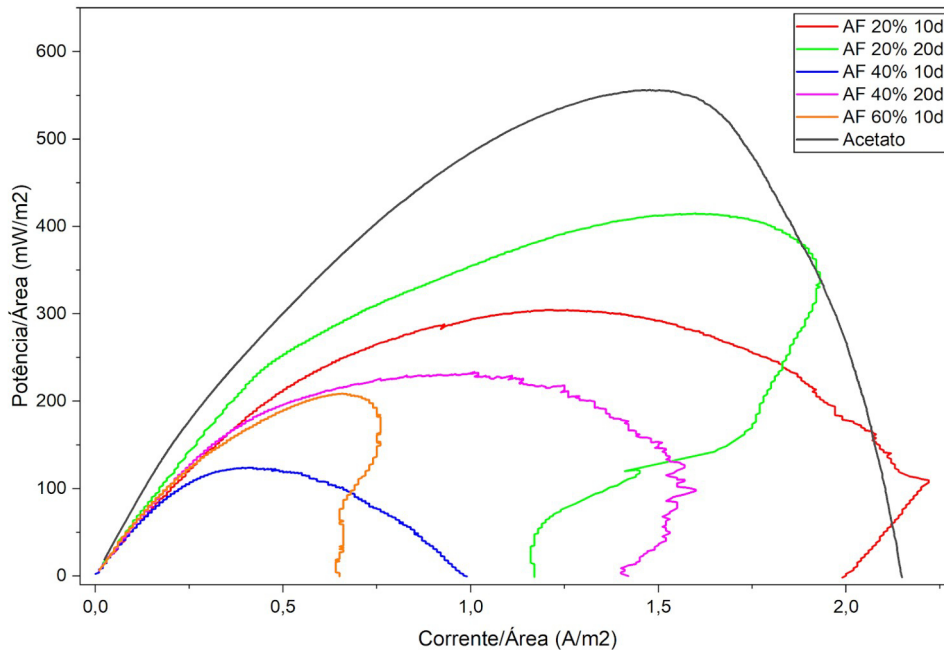
Gráfico 9 – Resultado do teste de LSV para MFC-1



Fonte: elaborado pelo autor.

Para a MFC-2, foram feitos dois testes de LSV em cada mês de operação do efluente, sendo observado que, para a mesma concentração de efluente, a eficiência eletroquímica melhora com o tempo, indicando que as bactérias nos primeiros ciclos precisam se adaptar ao ambiente do ânodo, resultando em uma tensão mais baixa. A eficiência reduzia conforme a concentração, sendo o maior pico depois da curva de operação com acetato, a com uso de 20% de AF por 20 dias (Gráfico 10).

Gráfico 10 – Resultado do teste de LSV para MFC-2



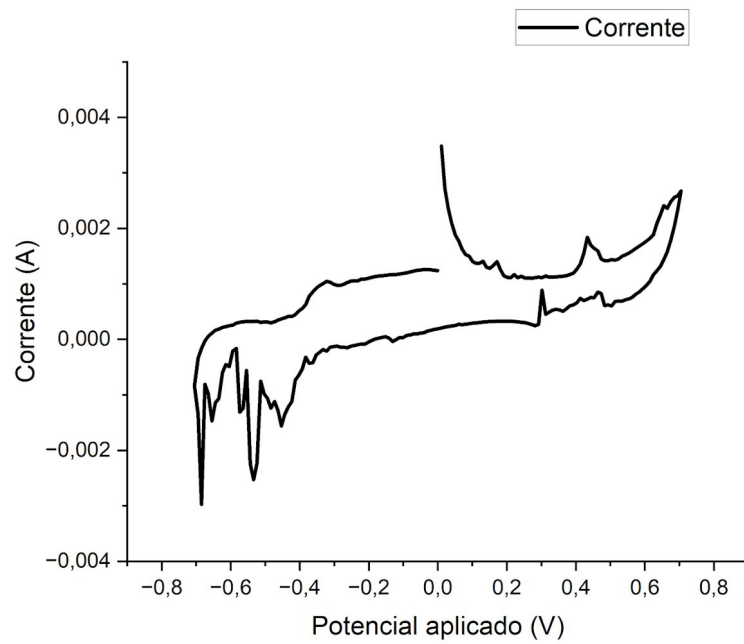
Fonte: elaborado pelo autor.

Essa diminuição da potência máxima nos testes de LSV conforme o aumento da fração de AF sugere uma maior complexidade do substrato, com possível presença de compostos inibidores. Mesmo assim, os gráficos demonstram que as MFCs continuam gerando eletricidade, comprovando a viabilidade do uso do efluente. No entanto, Yang et al. (2022) afirma que as MFCs em geral sofrem com a baixa geração de energia, o que limita sua aplicação industrial prática.

### 4.3 Voltametria Cíclica (CV)

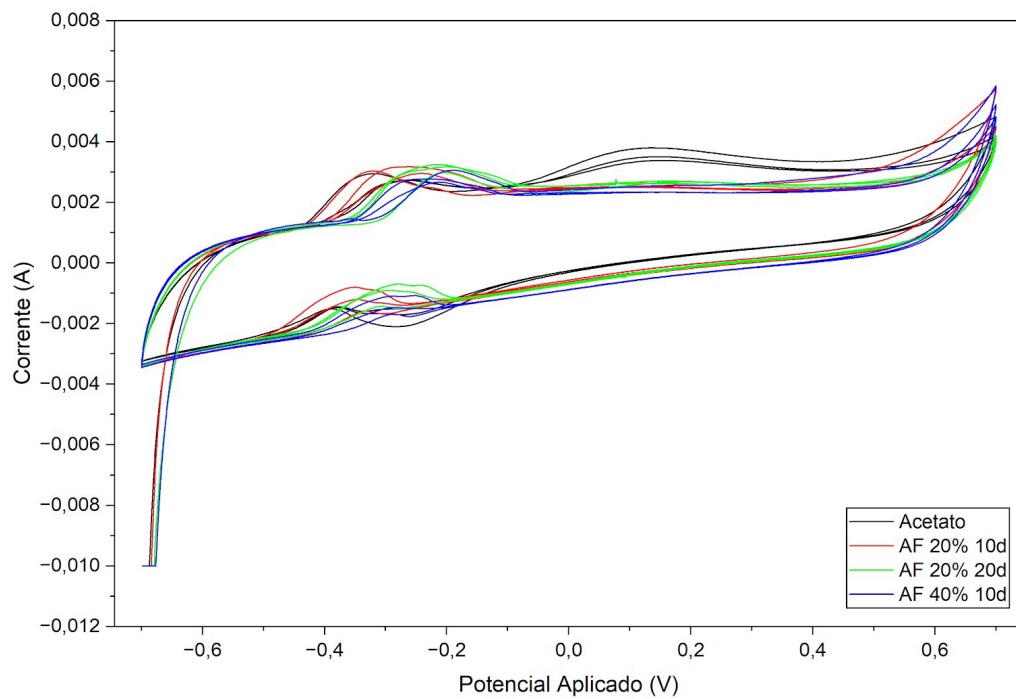
A análise de Voltametria Cíclica (CV) evidenciou as respostas de corrente nas MFCs alimentadas com efluente de alto-forno: a MFC-1 apresentou potencial aplicado de 0,23 V e corrente de 0,0037 A (Gráfico 11), enquanto a MFC-2 registrou 0,12 V e 0,003 A (Gráfico 12), respectivamente. Esses resultados reforçam a eletroatividade e eficiência dos sistemas como uma alternativa mais promissora para o tratamento de águas residuais e a geração de bioeletricidade no contexto industrial. Para a MFC-1 foram utilizados parâmetros padrões do sistema NOVA que foram adaptados para a MFC-2, devido à inconsistência dos gráficos obtidos, gerando diferenças expressivas na visualização dos testes.

Gráfico 11 – Resultado do teste de CV para MFC-1



Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 12 – Resultado do teste de CV para MFC-2



Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.4 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A análise da remoção da Demanda Química de Oxigênio (DQO) tem como objetivo avaliar a capacidade das MFCs na remoção de matéria orgânica do efluente de alto-forno, em diferentes proporções, permitindo comparar a eficiência de tratamento dos sistemas a partir da entrada e da saída do efluente na célula (Figura 5). De acordo com Apollon et al. (2024), uma correlação positiva é encontrada entre a eficiência de remoção de DQO e a geração de eletricidade, em que um nível mais elevado de oxidação da matéria orgânica resulta em uma maior transferência de elétrons para o ânodo e, conseqüentemente, em um aumento da densidade de potência.

Figura 7 – Entrada e Saída da MFC com efluente AF, (a) Efluente de Alto-Forno (b) Esgoto industrial antes do reator, e (c) Saída do reator.



Fonte: elaborado pelo autor.

Foram calculados os percentuais de remoção de DQO obtidos nas diferentes concentrações usadas para a MFC-1 e a MFC-2, além de uma amostra controle contendo apenas esgoto sintético 1 g/L de acetato de sódio e PBS de 50 mM para fazer a comparação. O acetato puro apresentou para as duas células uma alta remoção de DQO de aproximadamente 85%, confirmando sua alta biodegradabilidade e fácil assimilação pelos microrganismos.

Considerando a MFC-1, as misturas com 20% e 40% de AF demonstraram resultados de remoção próximos aos do acetato, com 81,73 e 85,24%, respectivamente (Tabela 2), indicando que, em baixas concentrações, o efluente de alto-forno não interfere significativamente no desempenho do sistema. Em contrapartida, para 60% e 80% de efluente, ocorreu uma redução acentuada na remoção de DQO (21,35% e 26,33%), evidenciando a maior complexidade do efluente, um caráter inibitório e consequente limitação da atividade microbiana nessas condições, comprometendo a eficiência de remoção de matéria orgânica.

Tabela 2 – Remoção de DQO do Efluente Alto-Forno da MFC-1

<b>Concentração de Efluente AF</b>	<b>Remoção de DQO (%)</b>
Acetato Puro	85,26
20 % AF	81,73
40 % AF	85,24
60 % AF	21,35
80 % AF	26,33

Fonte: elaborada pelo autor.

No caso da MFC-2, de maneira equivalente à MFC-2, as condições com 20 e 40% de AF apresentaram uma alta remoção semelhante com 85,02 e 80,58%, respectivamente (Tabela 3), demonstrando boa adaptação microbiana e estabilidade do sistema. Entretanto, com o uso de 60% do efluente de alto-forno, a operação da MFC-2 se tornou inviável devido à baixa tensão e problemas nos eletrodos, indicando adversidades na ação dos microrganismos e impossibilitando a realização de testes a partir dessa concentração.

Tabela 3 – Remoção de DQO do Efluente Alto-Forno da MFC-2

<b>Concentração de Efluente AF</b>	<b>Remoção de DQO (%)</b>
Acetato Puro	85,29
20 % AF	85,02
40% AF	80,58

Fonte: elaborada pelo autor.

#### 4.5 Eficiência Coulômbica (CE)

A eficiência coulômbica (CE) é um parâmetro que indica a fração da matéria orgânica removida ( $\Delta$ DQO) que foi efetivamente convertida em corrente elétrica no circuito

externo da MFC. Nos primeiros meses de operação, em que a concentração foi de acetato puro até 40% de efluente alto-forno, a MFC-1 apresentou valores relativamente baixos de eficiência coulômbica, variando entre 8% e 18% (Tabela 4). Isso indica que, mesmo com uma alta remoção de DQO, apenas uma pequena parcela da matéria orgânica removida foi convertida em corrente elétrica, sendo esse comportamento explicado pelo período de adaptação microbiana e de formação do biofilme eletroativo no ânodo, além da possível predominância de vias metabólicas não eletrogênicas.

Tabela 4 – Eficiência Coulômbica da MFC-1

<b>Concentração de Efluente AF</b>	<b>CE (%)</b>
Acetato Puro	8
20 % AF	18
40 % AF	13
60 % AF	84
80% AF	30

Fonte: elaborada pelo autor.

A partir do aumento de concentração de efluente para 60%, ocorreu o máximo desempenho observado para a MFC-1 de aproximadamente 84%, mesmo com uma menor remoção de DQO. Isso se deve a uma melhor adaptação do biofilme eletroativo com o decorrer do tempo. Entretanto, a CE voltou a diminuir, para valores em cerca de 30%, com uso de 80% de AF, possivelmente relacionada à sobrecarga orgânica ou à presença de compostos tóxicos, que provocam inibição parcial da atividade microbiana e afetam o equilíbrio eletroquímico do sistema.

Em paralelo, na MFC-2, os valores de CE (Tabela 5) apresentaram um comportamento mais estável, indo de valores próximos a 9% com uso de acetato para um aumento significativo da CE para 24,20% e uma subsequente queda para 18,44%, indicando um sistema relativamente estável, porém ainda com perdas eletrônicas relevantes. Esse comportamento sugere melhor adaptação microbiana ao longo do tempo, embora sem atingir valores tão elevados quanto o pico observado na MFC-1.

Tabela 5 – Eficiência Coulômbica da MFC-2

<b>Concentração de Efluente AF</b>	<b>CE (%)</b>
Acetato Puro	9
20 % AF	24
40% AF	18

Fonte: elaborada pelo autor.

O tempo de ciclo é um fator importante no desempenho das células. Na MFC-1, o maior valor de eficiência coulômbica ocorreu em um período com ciclo mais longo, favorecendo a probabilidade de um maior contato entre o substrato e o biofilme eletroativo, intensificando a oxidação eletrogênica da matéria orgânica. Por outro lado, ciclos mais curtos, como os registrados em alguns momentos da MFC-2, podem restringir o tempo necessário para a transferência completa de elétrons ao ânodo, resultando em menores valores de eficiência coulômbica.

## 5 CONCLUSÃO

Com base nos valores obtidos, foi possível avaliar o desempenho das células de combustível microbianas MFC-1 e MFC-2 quanto a geração de eletricidade, remoção de matéria orgânica e eficiência de conversão eletroquímica ao utilizar o efluente de alto-forno numa diluição serial gradativa. Ambas as células demonstraram um desempenho promissor, com alta remoção de matéria orgânica e geração de eletricidade estável.

A caracterização eletroquímica confirmou um bom desempenho tanto da MFC-1 quanto da MFC-2 para valores baixos de concentração do efluente AF, enquanto que, a partir da faixa de 60 a 80% de efluente, foi observado uma natureza inibitória do efluente sobre as comunidades microbianas. Ambas MFCs demonstraram valores de voltagem relativamente estáveis ao longo do período experimental, com pequenas flutuações atribuídas a variações na composição do substrato ou a interrupções ocasionais de energia. Do ponto de vista eletroquímico, os testes de LSV e CV demonstraram que ambas as MFCs foram capazes de gerar eletricidade, com curvas características de potência bem definidas. Nos testes de LSV da MFC-2, especificamente, foi visto que, para uma mesma concentração, obtinham-se valores de potência máximas maiores ao longo do tempo, indicando a existência de um período de aclimação microbiana ao biofilme eletroativo submetido a um substrato complexo.

Quanto à remoção de DQO, ambas as MFCs demonstraram maior capacidade quando operadas com acetato puro ou com baixas proporções de efluente de alto-forno, evidenciando a viabilidade do uso desse efluente como substrato. No entanto, concentrações mais elevadas de AF, observadas principalmente na MFC-1, resultaram em queda acentuada da remoção de DQO, sugerindo limitações associadas à maior complexidade do efluente e à possível presença de compostos inibidores da atividade microbiana. Em contraposto, na análise da eficiência coulômbica (CE), mesmo com altos valores de remoção de DQO, parte significativa dos elétrons liberados durante a degradação do substrato era desviada para rotas metabólicas não eletrogênicas. A MFC-1 apresentou grande variabilidade de CE ao longo do tempo, com excessão para um pico específico em que a eficiência atingiu valores elevados. Já a MFC-2 apresentou valores de CE mais consistentes, porém com perdas eletrônicas relevantes.

Em síntese, os resultados demonstraram que a MFC-1 e a MFC-2 são tecnicamente viáveis para a remoção de matéria orgânica e geração de eletricidade a partir do efluente de alto-forno. A MFC-2 obteve uma maior estabilidade operacional e

comportamento eletroquímico mais consistente, mas a MFC-1 alcançou maiores valores de eficiência coulômbica sob condições operacionais favoráveis.

O estudo de MFCs possibilitou um entendimento aprofundado de uma tecnologia nova e pouco usual em território brasileiro a partir dos testes de desempenho eletroquímico e de remoção de matéria orgânica, favorecendo o avanço de soluções ambientais na região do nordeste brasileiro. Como trabalhos futuros, é recomendado que ocorram ensaios com períodos de tempo mais longos visando encontrar uma faixa de operação ótima; a realização de testes de componentes químicos como amônia e cianeto, para descobrir a causa do comportamento inibitório e como reduzi-lo; e, por último, uma análise mais aprofundada sobre a comunidade microbiana dos biofilmes, a fim de entender seu funcionamento conforme o experimento.

## REFERÊNCIAS

AMADU, Mumuni; MIADONYE, Adango. **Interrelationship of electric double layer theory and microfluidic microbial fuel cells: a review of theoretical foundations and implications for performance.** *Energies*, v. 17, n. 6, p. 1472, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/6/1472>. Acesso em: 6 jan. 2026.

APOLLON, Wilgince et al. **An overview of agro-industrial wastewater treatment using microbial fuel cells: Recent advancements.** *Journal of Water Process Engineering*, v. 58, p. 104783, 2024. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714424000138?casa\\_token=Tm4sn1G6CY4AAAAA:zrNjdO9hLmTXkkv-ksOBdm1sK27oFxn69ziYRckP1s-s3\\_3IrDwCAnQCK2oTDDwOuk5po2Wlq20](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714424000138?casa_token=Tm4sn1G6CY4AAAAA:zrNjdO9hLmTXkkv-ksOBdm1sK27oFxn69ziYRckP1s-s3_3IrDwCAnQCK2oTDDwOuk5po2Wlq20). Acesso em: 8 jan. 2026.

BATAILLE, Chris et al. **Towards net-zero emissions concrete and steel in India, Brazil and South Africa.** *Climate Policy*, p. 1-16, 2023. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14693062.2023.2187750>. Acesso em: 8 dez. 2025.

BENZAOUAK, Abdellah et al. **ZrP2O7 as a cathodic material in single-chamber MFC for bioenergy production.** *Nanomaterials*, v. 12, n. 19, p. 3330, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-4991/12/19/3330>. Acesso em: 3 jan. 2026.

BINNEMANS, Koen et al. **Hydrometallurgical processes for the recovery of metals from steel industry by-products: a critical review.** *Journal of Sustainable Metallurgy*, v. 6, n. 4, p. 505-540, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40831-020-00306-2>. Acesso em: 15 dez. 2025.

CACCIUTTOLO, Carlos; NAVARRETE, Martin; CANO, Deyvis. **Advances, Progress, and Future Directions of Renewable Wind Energy in Brazil (2000–2025–2050).** *Applied Sciences*, v. 15, n. 10, p. 5646, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/10/5646>. Acesso em: 1 dez. 2025.

CASTELLANOS, Humberto Garcia et al. **Characterization and utilization of industrial wastewater in biorefinery systems: A comprehensive approach.** *Environmental Progress & Sustainable Energy*, v. 43, n. 4, p. e14399, 2024. Disponível em: [https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ep.14399?casa\\_token=UpUND4tEkEkAAAAA:p3Yjld3Cjr9nb5H3TSH7R9bwmd1QVnREtInzOUpQjihq9U62kohFO0qpSwYUwY6jLcC8syxpwHzm7FJg](https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ep.14399?casa_token=UpUND4tEkEkAAAAA:p3Yjld3Cjr9nb5H3TSH7R9bwmd1QVnREtInzOUpQjihq9U62kohFO0qpSwYUwY6jLcC8syxpwHzm7FJg). Acesso em: 19 dez. 2025.

CONEJO, Alberto N.; BIRAT, Jean-Pierre; DUTTA, Abhishek. **A review of the current environmental challenges of the steel industry and its value chain.** *Journal of environmental management*, v. 259, p. 109782, 2020. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479719315002?casa\\_token=6KiqHIvZO9sAAAAA:FtJCEO8JK9Y6XEGi-Ujl4IxCU1kQ325Qm2aoOg75BzO83mzfUnXhdp-OAz0BsUKK1yCsC-KWil4](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479719315002?casa_token=6KiqHIvZO9sAAAAA:FtJCEO8JK9Y6XEGi-Ujl4IxCU1kQ325Qm2aoOg75BzO83mzfUnXhdp-OAz0BsUKK1yCsC-KWil4). Acesso em: 2 dez. 2025.

FAN, Liru et al. **Performance and microbial community dynamics relationship within a step-feed anoxic/oxic/anoxic/oxic process (SF-A/O/A/O) for coking wastewater treatment.** *Science of the Total Environment*, v. 792, p. 148263, 2021. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721033349?casa\\_token=hAxTSMNvQdsAAAAA:FYDjfs\\_zEDDAM2Cu6KVzsDy08Emb5HO\\_cfvTTT3VGwFg7KDCeWK4iVH8\\_Yov9ORWoUpBzU7gSW0](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721033349?casa_token=hAxTSMNvQdsAAAAA:FYDjfs_zEDDAM2Cu6KVzsDy08Emb5HO_cfvTTT3VGwFg7KDCeWK4iVH8_Yov9ORWoUpBzU7gSW0). Acesso em: 11 dez. 2025.

FANG, Mengxiang et al. **Development of carbon capture absorbents for top gas recycling-oxygen blast furnace in the steel industry.** *Separation and Purification Technology*, v. 355, p. 129616, 2025. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586624033550?casa\\_token=rsTgqewhdjYAAAAA:-vELCtIJfSsqIB-bapGov0QVUTvv80I\\_\\_XqCR4BwFThSGdsnbMRS3TUwazEb6kFN4EGaLtovlqA](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586624033550?casa_token=rsTgqewhdjYAAAAA:-vELCtIJfSsqIB-bapGov0QVUTvv80I__XqCR4BwFThSGdsnbMRS3TUwazEb6kFN4EGaLtovlqA). Acesso em: 10 dez. 2025.

FELFÖLDI, Tamás et al. **Biological treatment of coke plant effluents: from a microbiological perspective.** *Biologia Futura*, v. 71, n. 4, p. 359-370, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42977-020-00028-2>. Acesso em: 22 dez. 2025.

FERNANDES, Patrícia Dias et al. **Descarbonização na indústria siderúrgica: oportunidade para agregar valor e aumentar a competitividade.** Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/29067>. Acesso em: 2 dez. 2025.

FODOR, Zsófia; KLEMEŠ, Jiří Jaromír. **Waste as alternative fuel—Minimising emissions and effluents by advanced design.** *Process safety and environmental protection*, v. 90, n. 3, p. 263-284, 2012. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582011000991?casa\\_token=GaKIBKdSs8AAAAA:TRx2E4PRTAjoG-71oOO6YzvjiBGK7igDqtHtStuY03FMersAA6K2ZDd9J6UWnKcpNI8WUpAxHsE](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582011000991?casa_token=GaKIBKdSs8AAAAA:TRx2E4PRTAjoG-71oOO6YzvjiBGK7igDqtHtStuY03FMersAA6K2ZDd9J6UWnKcpNI8WUpAxHsE). Acesso em: 18 dez. 2025.

GUO, Tingting et al. **Bioinspired facilitation of intrinsically conductive polymers: mediating intra/extracellular electron transfer and microbial metabolism in denitrification.** *Chemosphere*, v. 295, p. 133865, 2022. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653522003587?casa\\_token=ZkUMXKu\\_I9wAAAAA:vDr3Qr1XsVcb5dIRUpfgUfXSpDM6YdrzH--F9JNAeQs4af9ZzPXStULX6a9VbPFmJvulO5nCOSE](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653522003587?casa_token=ZkUMXKu_I9wAAAAA:vDr3Qr1XsVcb5dIRUpfgUfXSpDM6YdrzH--F9JNAeQs4af9ZzPXStULX6a9VbPFmJvulO5nCOSE). Acesso em: 9 jan. 2026.

HEBEDA, Otto et al. **Pathways for deep decarbonization of the Brazilian iron and steel industry.** *Journal of Cleaner Production*, v. 401, p. 136675, 2023. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623008338?casa\\_token=Ew23cWbAxSoAAAAA:C5iWq6LMfGruiDpxcxEsT2lzBQQJ7Vcz23duBpcoIPpiE0SN1Ns6ZzjAuT5wZNMz0c8y\\_KRyZR4](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623008338?casa_token=Ew23cWbAxSoAAAAA:C5iWq6LMfGruiDpxcxEsT2lzBQQJ7Vcz23duBpcoIPpiE0SN1Ns6ZzjAuT5wZNMz0c8y_KRyZR4). Acesso em: 7 dez. 2025.

HIDALGO, Dolores; MARTÍN-MARROQUÍN, Jesús M.; CORONA, Francisco. **Production of Microbial Fuel Cell Material from Industrial Wastewater Sludge: Recent Trends and Development.** *Recent Trends in Management and Utilization of Industrial Sludge*, p. 149-175, 2024. Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-58456-5\\_6](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-58456-5_6). Acesso em: 2 jan. 2026.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Mercado Brasileiro do Aço: Análise Setorial e Regional Séries Históricas até 2024**. Rio de Janeiro, RJ: Instituto Aço Brasil, 2025. Disponível em: [https://www.acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2025/09/MBA\\_Edicao-2025.pdf](https://www.acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2025/09/MBA_Edicao-2025.pdf). Acesso em: 5 dez. 2025.

ISAH, Abdulrasheed et al. **Financing renewable energy: policy insights from Brazil and Nigeria**. *Energy, Sustainability and Society*, v. 13, n. 1, p. 2, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s13705-022-00379-9>. Acesso em: 2 dez. 2025.

JA'FARI, Mohammad et al. **Waste heat recovery in iron and steel industry using organic Rankine cycles**. *Chemical Engineering Journal*, v. 477, p. 146925, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894723056565>. Acesso em: 4 dez. 2025.

Jl, Yunguang et al. **A review of the energy recovery and energy pressure of liquid**. *Energy Science & Engineering*, v. 11, n. 10, p. 3907-3927, 2023. Disponível em: <https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ese3.1528>. Acesso em: 23 dez. 2025.

KWIECIŃSKA-MYDLAK, Anna et al. **The role of a chemical loop in removal of hazardous contaminants from coke oven wastewater during its treatment**. *Open Chemistry*, v. 17, n. 1, p. 1288-1300, 2019. Disponível em: <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/chem-2019-0142/html>. Acesso em: 22 dez. 2025.

KWOFIE, Matthew et al. **Comprehensive Analysis of Clean Energy Generation Mechanisms in Microbial Fuel Cells**. *International Journal of Energy Research*, v. 2024, n. 1, p. 5866657, 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2024/5866657>. Acesso em: 4 jan. 2026.

LIMA, M. A. et al. **Renewable energy in reducing greenhouse gas emissions: Reaching the goals of the Paris agreement in Brazil**. *Environmental Development*, v. 33, p. 100504, 2020. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211464520300191?casa\\_token=dOmSVdnTf94AAAAA:m\\_kEtSU9PHerVPe7LLr2by3ajFhbp9zf-jy7-fTsaQgzZqh-ZGafu3aFQK1Nb7sAvyQj4XSTTls](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211464520300191?casa_token=dOmSVdnTf94AAAAA:m_kEtSU9PHerVPe7LLr2by3ajFhbp9zf-jy7-fTsaQgzZqh-ZGafu3aFQK1Nb7sAvyQj4XSTTls). Acesso em 29 nov. 2025.

LOPEZ, Gabriel; FARFAN, Javier; BREYER, Christian. **Trends in the global steel industry: Evolutionary projections and defossilisation pathways through power-to-steel**. *Journal of Cleaner Production*, v. 375, p. 134182, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622037544>. Acesso em: 7 dez. 2025.

MALIK, Sumira et al. **A perspective review on microbial fuel cells in treatment and product recovery from wastewater**. *Water*, v. 15, n. 2, p. 316, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/2/316>. Acesso em: 3 jan. 2026.

MARTÍNKOVÁ, Ludmila et al. **Recent trends in the treatment of cyanide-containing effluents: Comparison of different approaches**. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 53, n. 3, p. 416-434, 2023. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643389.2022.2068364>. Acesso em: 22 dez.

2025.

MOHYUDIN, Sidra et al. **Microbial fuel cells a state-of-the-art technology for wastewater treatment and bioelectricity generation**. *Environmental research*, v. 204, p. 112387, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935121016881?via%3Dihub>. Acesso em: 4 jan. 2026.

MONDAL, Amit; SARKAR, Supriya; NAIR, Udayabhanu G. **Comparative characterization of cyanide-containing steel industrial wastewater**. *Water Science and Technology*, v. 83, n. 2, p. 322-330, 2021. Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/83/2/322/78421>. Acesso em: 23 dez. 2025.

NETO, Lucio Rosso et al. **Sustainable steel production: Evaluating the reduction kinetics of iron ore self-reducing briquettes with eucalyptus charcoal**. *Journal of Cleaner Production*, v. 457, p. 142426, 2024. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652624018742?casa\\_token=sTPzcyEC13YAAAAA:IOcTQgRjmw7IXy-5VEj5LxIUki8c3DQrriJPsVejbiNVIMDZ90\\_ioDn1JAuuROqR\\_jqdZ52Sl\\_w](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652624018742?casa_token=sTPzcyEC13YAAAAA:IOcTQgRjmw7IXy-5VEj5LxIUki8c3DQrriJPsVejbiNVIMDZ90_ioDn1JAuuROqR_jqdZ52Sl_w). Acesso em: 8 dez. 2025.

OLIVEIRA, C. T. et al. **Células a combustível microbianas como tecnologia sustentável de conversão energética de efluentes**. Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, ENGEMA, 2016. Disponível em: <http://engemasp.submissao.com.br/18/anais/arquivos/179.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2025.

ORTIZ-SANCHEZ, M. Fabrizio; CUEVAS-RODRIGUEZ, German. **Energy recovery from wastewater in Mexico: A systematic review**. *Frontiers in Environmental Science*, v. 11, p. 1116053, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2023.1116053/full>. Acesso em: 27 nov. 2025.

PALANIVEL, Priya Dharshini et al. **An insight on energy production using microbial fuel cell: A microbiological perspective and electron transfer improvement**. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, v. 100, n. 4, p. 672-687, 2025. Disponível em: [https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jctb.7788?casa\\_token=JR2y05uV3twAAAAA:cviGTbOiy-14okxbcVgIw1mnBGlsQbQDWaLHWF82GvMXBDMTw0zw7\\_L32qH-WYYQ314\\_2SSFwB3mUgRp](https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jctb.7788?casa_token=JR2y05uV3twAAAAA:cviGTbOiy-14okxbcVgIw1mnBGlsQbQDWaLHWF82GvMXBDMTw0zw7_L32qH-WYYQ314_2SSFwB3mUgRp). Acesso em: 6 jan. 2026.

PINTO, Raphael Guimaraes D.; SZKLO, Alexandre S.; RATHMANN, Regis. **CO2 emissions mitigation strategy in the Brazilian iron and steel sector—From structural to intensity effects**. *Energy Policy*, v. 114, p. 380-393, 2018. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421517307875?casa\\_token=VE45DWtgwvgAAAAA:jR1FYiPil5tf68KKzFqxJjR-BfEq-g9uFqAlb2t-VL6\\_Qs7KKF5tLs8sC3uG38Yx-pBnGVV7uU](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421517307875?casa_token=VE45DWtgwvgAAAAA:jR1FYiPil5tf68KKzFqxJjR-BfEq-g9uFqAlb2t-VL6_Qs7KKF5tLs8sC3uG38Yx-pBnGVV7uU). Acesso em: 8 dez. 2025.

QIAO, Desong et al. **Enhancing microbial extracellular electron transfer efficiency through increased configuration entropy of bioanodes**. *Ceramics International*, v. 50, n. 6, p. 9016-9028, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884223041494?>

casa\_token=ZsG7z3c2h6QAAAAA:BdJ-0c8ohpQ8ku1DWN5MNY4BXlNo4Ze1\_NqmigJfWfjnhOIMfbIu73k72zp0Amp4nwSjqacOWvU. Acesso em: 5 jan. 2026.

REN, Lei et al. **A review of CO<sub>2</sub> emissions reduction technologies and low-carbon development in the iron and steel industry focusing on China.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 143, p. 110846, 2021. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121001404?](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121001404?casa_token=tWRAHSmm4JYAAAAA:AfwrP5T1Y0fLQ8C-74gt_e_Qbbu7rfILaVkh9sPhxyEdY-LYLHsTLpDIazSOaWOnREnZ_Od1OJM)  
casa\_token=tWRAHSmm4JYAAAAA:AfwrP5T1Y0fLQ8C-74gt\_e\_Qbbu7rfILaVkh9sPhxyEdY-LYLHsTLpDIazSOaWOnREnZ\_Od1OJM. Acesso em: 7 dez. 2025.

SHEN, Jialin et al. **Future CO<sub>2</sub> emission trends and radical decarbonization path of iron and steel industry in China.** Journal of Cleaner Production, v. 326, p. 129354, 2021. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621035381?](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621035381?casa_token=2TbwNbrNZowAAAAA:XXN6tmHF0bxJhPBhe0dAeTUTz7h_U6fIjinRI8DCVL7JBiE60b21qM48wJNYVGf8WjnvUQHA8jw)  
casa\_token=2TbwNbrNZowAAAAA:XXN6tmHF0bxJhPBhe0dAeTUTz7h\_U6fIjinRI8DCVL7JBiE60b21qM48wJNYVGf8WjnvUQHA8jw. Acesso em: 7 dez. 2025.

SARAVANAN, N.; KARTHIKEYAN, M. **Study of single chamber and double chamber efficiency and losses of wastewater treatment.** Int Res J Eng Technol, v. 5, p. 1225-1230, 2018. Disponível em: <http://lacc-terryb.com/files/IRJET-V5I3279.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2025.

SIRINUTSOMBOON, Bunpot. **Modeling of a membraneless single-chamber microbial fuel cell with molasses as an energy source.** International Journal of Energy and Environmental Engineering, v. 5, n. 2, p. 93, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40095-014-0093-5>. Acesso em: 2 jan. 2026.

SREELEKSHMY, Bhuvanendran Revamma et al. **Sustainable electric power generation from live anaerobic digestion of sugar industry effluents using microbial fuel cells.** Journal of Materials Chemistry A, v. 8, n. 12, p. 6041-6056, 2020. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/ta/d0ta00459f>. Acesso em: 2 jan. 2026.

TROVÃO, Renata S. et al. **Verifying the environmental and energy feasibility of potential improvement actions in the steel production chain in Brazil.** Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, v. 10, n. 1, p. 1-22, 2022. Disponível em: <https://hrcak.srce.hr/274929>. Acesso em: 2 dez. 2025.

UDEMBA, Edmund Ntom; TOSUN, Merve. **Energy transition and diversification: A pathway to achieve sustainable development goals (SDGs) in Brazil.** Energy, v. 239, p. 122199, 2022. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221024476?casa\\_token=5LH6wJ-i7o0AAAAA:6VR59V6eykTaAXxRvNsKD5SMJV-eRQbvaUvwQabYTSu-8SjZwZgbYP3lu6cs14Ve2CIUg21B8YQ](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221024476?casa_token=5LH6wJ-i7o0AAAAA:6VR59V6eykTaAXxRvNsKD5SMJV-eRQbvaUvwQabYTSu-8SjZwZgbYP3lu6cs14Ve2CIUg21B8YQ). Acesso em: 30 nov. 2025.

WANG, Jiayang; SUN, Wenqiang. **Decomposition of the site-level energy consumption and carbon dioxide emissions of the iron and steel industry.** Environmental Science and Pollution Research, v. 31, n. 11, p. 16511-16529, 2024. Disponível em: [https://idp.springer.com/authorize/casa?redirect\\_uri=https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-024-32162-](https://idp.springer.com/authorize/casa?redirect_uri=https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-024-32162-)

y&casa\_token=2lwIDuRMM0MAAAAA:XXxazVCiv8UrTbZvFNQSkAWZx74IFeOlKIZKqbuMjp0QOgmK32GdOaZazIWE-MP8UsfqudUZfBHU0Z0BUw. Acesso em: 7 dez. 2025.

WANG, Xuan et al. **Operation performance comparison of CCHP systems with cascade waste heat recovery systems by simulation and operation optimisation**. *Energy*, v. 206, p. 118123, 2020. Disponível em:  
[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220312305?casa\\_token=G-OV92FfaMAAAAA:mq0ZT4IBFMhzLFog\\_99g\\_FMVJpIjQdK5OYHdo2Gx0G6OEgihk671HOSAzYohy4aLejF10n1cxg](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220312305?casa_token=G-OV92FfaMAAAAA:mq0ZT4IBFMhzLFog_99g_FMVJpIjQdK5OYHdo2Gx0G6OEgihk671HOSAzYohy4aLejF10n1cxg). Acesso em: 10 dez. 2025.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **Annual production steel data**. Brussels, Belgium: World Steel Association AISBL, 2025. Disponível em: [https://worldsteel.org/data/annual-production-steel-data/?ind=P1\\_crude\\_steel\\_total\\_pub/CHN/IND/JPN](https://worldsteel.org/data/annual-production-steel-data/?ind=P1_crude_steel_total_pub/CHN/IND/JPN). Acesso em: 5 dez. 2025.

YANG, Liuqingying et al. **2D layered structure-supported imidazole-based metal-organic framework for enhancing the power generation performance of microbial fuel cells**. *Electrochimica Acta*, v. 428, p. 140959, 2022. Disponível em:  
[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468622011161?casa\\_token=5xQBL4chPQcAAAAA:X4Jum7CYzL3BnEuIoLv\\_30dqqMrcvD0X8BtswpCRx8bj2QlA82bTGs8VMoP0SzWOWagB0wSY0S8](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468622011161?casa_token=5xQBL4chPQcAAAAA:X4Jum7CYzL3BnEuIoLv_30dqqMrcvD0X8BtswpCRx8bj2QlA82bTGs8VMoP0SzWOWagB0wSY0S8). Acesso em: 8 jan. 2026.

ZHANG, Mingyan. **Microbial Fuel Cell Technology and Its Research Progress**. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, [S. l.], v. 96, p. 90–94, 2024. DOI: 10.54097/47fqg62. Disponível em:  
<https://drpress.org/ojs/index.php/HSET/article/view/20156>. Acesso em: 4 jan. 2026.

ZHONG, Linhan et al. **Enhancing diversified extracellular electron transfer (EET) processes through N-MXene-modified non-adhesive hydrogel bioanodes**. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, v. 47, n. 1, p. 105-117, 2024. Disponível em:  
[https://idp.springer.com/authorize/casa?redirect\\_uri=https://link.springer.com/article/10.1007/s00449-023-02950-w&casa\\_token=3Eo-ybKRzTwAAAAA:MyEGfOuRNZ9MihlF1YCn3TTC4z0HRvvytnGII7FBmqmCiHFKldikGwf\\_e8JRL11C4aNHoKO4GQ41lah4dw](https://idp.springer.com/authorize/casa?redirect_uri=https://link.springer.com/article/10.1007/s00449-023-02950-w&casa_token=3Eo-ybKRzTwAAAAA:MyEGfOuRNZ9MihlF1YCn3TTC4z0HRvvytnGII7FBmqmCiHFKldikGwf_e8JRL11C4aNHoKO4GQ41lah4dw). Acesso em: 5 jan. 2026.