



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CAMPUS SOBRAL

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DA
COMPUTAÇÃO**

MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DA COMPUTAÇÃO

FRANCISCO WILSON OLIVEIRA DA FROTA

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE FONTE DE CORRENTE HOWLAND PARA
AVALIAÇÃO DA ELETRÓLISE PULSADA DA ÁGUA**

SOBRAL

2025

FRANCISCO WILSON OLIVEIRA DA FROTA

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE FONTE DE CORRENTE HOWLAND PARA
AVALIAÇÃO DA ELETRÓLISE PULSADA DA ÁGUA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica e da Computação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e da Computação do Campus Sobral da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica e da Computação. Área de Concentração: Eletrônica de Potência

Orientador: Dr. Edilson Mineiro Sá Júnior

SOBRAL

2025

FRANCISCO WILSON OLIVEIRA DA FROTA

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE FONTE DE CORRENTE HOWLAND PARA
AVALIAÇÃO DA ELETRÓLISE PULSADA DA ÁGUA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica e da Computação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e da Computação do Campus Sobral da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica e da Computação. Área de Concentração: Eletrônica de Potência

Aprovada em: 17 de Dezembro de 2025

BANCA EXAMINADORA

Dr. Edilson Mineiro Sá Júnior (Orientador)
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Dr. Vanessa Siqueira de Castro Teixeira (Membro Interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Kleber César Alves de Souza (Membro Interno)
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Dr. Francisco Murilo Tavares de Luna (Membro Externo)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Pedro de Lima Neto (Membro Externo)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pelo dom da vida e pela força concedida em todos os momentos desta caminhada.

À minha mãe, Luisa Cristina Sousa de Oliveira, e ao meu pai, José Eduardo da Frota Neto, pela educação, pelos valores e por todos os esforços que me formaram como pessoa e me permitiram chegar até aqui. Aos meus irmãos, Luis Eduardo e Evyne Krizia, pela convivência, pelo apoio e pela irmandade construída ao longo dos anos, que tornaram a vida mais leve e significativa. A minha madrastra, Luiza Melo pelo apoio diário. Às minhas irmãs, Yslaia Frota e Yasmin Frota, que, apesar da distância, permanecem sempre presentes em minhas lembranças e em meu coração.

Aos meus avós maternos, Francisca Matos e Luis França, que fizeram parte da minha vida e do meu crescimento pessoal. Em memória dos meus avós paternos, Antônio Wilson e Maria Marta, por todo o carinho e amor que me dedicaram, mesmo antes que eu pudesse compreender o valor de suas presenças.

À minha namorada, Liara Azevedo, pela paciência, carinho, apoio e amor. Pelos momentos de descontração e leveza que tornaram esta jornada mais suportável e feliz. Estendo meus agradecimentos à sua família, pelo acolhimento e pelo carinho com que sempre me receberam.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edilson Mineiro, pela confiança depositada em meu trabalho, pela paciência, pelos ensinamentos, pelas oportunidades concedidas e por cada conselho e orientação que tornaram possível o desenvolvimento desta pesquisa. Aos professores Dr. Pedro Lima Neto e Dr. Francisco Murilo Tavares de Luna pela parceria e disponibilidade da célula eletrolítica empregada nesse trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade, pelas valiosas contribuições e por dedicarem seu tempo à avaliação deste trabalho.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação (PPGEEC) da Universidade Federal do Ceará – Campus Sobral, pelo compartilhamento de conhecimento.

Ao Instituto Federal do Ceará (IFCE), pela base sólida de formação acadêmica e profissional. De modo especial, agradeço aos professores Kleber César, Aglailson Olivindo e Fabiano Carneiro, pela dedicação, amizade e inspiração.

Aos amigos conquistados ao longo da graduação e do mestrado, Joel Carneiro, Érica

Walesca, Rhuan Nunes, Iago Magalhães e Isaak Sousa, pela parceria, pelas conversas e pelos dias mais leves no campus.

Um agradecimento especial ao meu amigo Humberto Pontes, pelas horas compartilhadas em laboratório, pelos conselhos, conversas e ensinamentos, e pela colaboração constante neste e em outros trabalhos.

Aos amigos da vida, que tornaram os dias mais leves e cheios de significado, contribuindo com momentos de descontração, boas conversas, conselhos e apoio sincero. Em especial, à Millene Kelly, ao Paulo Lucas e ao Guilherme Rodrigues, pela amizade genuína e pela presença constante ao longo desta caminhada.

Aos colegas do grupo de pesquisa de Acionamentos de Eletrolisadores da Rede de Pesquisas RedeVerdes, em especial ao Prof. Me. Leonardo Tabosa, Prof. Me. Aglailson Olivindo e Prof. Me. Ronaldo Portela, pelas contribuições técnicas, discussões construtivas e pela parceria constante.

Aos colegas da UFC e do IFCE que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

A Universidade Federal do Ceará – Campus Sobral e ao Instituto Federal do Ceará – Campus Sobral, pela disponibilidade dos espaços, salas de aula e laboratórios, fundamentais para a execução das disciplinas, pesquisas e experimentos que sustentaram o desenvolvimento deste estudo.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUN-CAP) e à Secretaria da Ciência, Tecnologia e Educação Superior (SECITECE) pelo apoio financeiro e manutenção da bolsa mediante ao programa Rede VERDES.

“A ciência, meu rapaz, é feita de erros, mas de erros benéficos, já que conduzem pouco a pouco à verdade.”

(Júlio Verne)

RESUMO

A eletrólise pulsada da água tem se destacado como uma alternativa promissora para mitigar limitações inerentes à eletrólise convencional, especialmente aquelas relacionadas aos sobrepotenciais de ativação e ôhmico, aos efeitos de transporte de massa e à dinâmica da dupla camada elétrica. Entretanto, a investigação experimental desse regime exige fontes de corrente capazes de aplicar formas de onda precisas, estáveis e reprodutíveis sob variações dinâmicas da impedância da célula eletrolítica.

Neste contexto, esta dissertação apresenta o desenvolvimento, a implementação e a aplicação de uma fonte de corrente do tipo Howland, projetada especificamente para estudos de eletrólise pulsada. A topologia Howland foi selecionada por sua elevada impedância de saída, boa linearidade e capacidade de fornecer correntes moduladas com baixa dependência da carga, características essenciais para o controle rigoroso de pulsos elétricos.

O sistema desenvolvido foi empregado tanto na caracterização elétrica da célula, por meio da análise transitória da dupla camada elétrica, quanto na avaliação comparativa entre a eletrólise em regime contínuo e pulsado. Experimentalmente, a eletrólise pulsada apresentou ganho relativo máximo de 9,72% na eficiência energética, alcançando eficiência de até 31,1%, quando operada em frequências de 40 a 50 kHz e razões cíclicas entre 20% e 50%, sob densidade de corrente de aproximadamente 0,5 A/cm². Nessas condições, observou-se ainda redução da tensão média da célula de até 700 mV, indicando mitigação parcial dos sobrepotenciais eletroquímicos.

A fonte de corrente Howland demonstrou erro quadrático médio máximo de 0,053 em relação à forma de onda ideal, mantendo desempenho estável e reprodutível mesmo em frequências elevadas. Os resultados evidenciam o potencial da HCS como uma ferramenta de baixo custo e alta fidelidade para estudos experimentais em eletrólise pulsada da água e produção de hidrogênio verde.

Palavras-chave: eletrólise pulsada; fonte Howland; hidrogênio verde.

ABSTRACT

Pulsed water electrolysis has emerged as a promising strategy to mitigate limitations inherent to conventional electrolysis, particularly those associated with activation and ohmic overpotentials, mass transport phenomena, and the dynamic behavior of the electrical double layer. However, experimental investigation of pulsed regimes requires current sources capable of delivering precise, stable, and reproducible waveforms under dynamic variations of the electrolytic cell impedance.

In this context, this dissertation presents the development, implementation, and application of a Howland Current Source (HCS) specifically designed for pulsed electrolysis studies. The Howland topology was selected due to its high output impedance, linearity, and ability to supply modulated currents with minimal load dependence, which are essential features for accurate pulse control.

The developed system was employed both for electrical characterization of the electrolytic cell, through transient analysis of the electrical double layer, and for comparative evaluation between continuous and pulsed electrolysis. Experimentally, pulsed electrolysis achieved a maximum relative energy efficiency gain of 9.72%, reaching efficiencies up to 31.1% when operated at frequencies between 40 and 50 kHz and duty cycles ranging from 20% to 50%, under a current density of approximately 0.5 A/cm². Under these conditions, a reduction of up to 700 mV in the average cell voltage was observed, indicating partial mitigation of electrochemical overpotentials. The Howland current source exhibited a maximum mean squared error of 0.053 relative to an ideal waveform, demonstrating stable and reproducible dynamic performance even at high frequencies. These results highlight the HCS as a low-cost, high-fidelity experimental tool for advanced investigations of pulsed water electrolysis and green hydrogen production.

Keywords: pulsed electrolysis; Howland current source; green hydrogen; transconductance; electrical double layer

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva de polarização típica de uma célula eletrolítica.	23
Figura 2 – Modelo de Stern da EDL gerada em uma superfície de eletrodo carregada positivamente.	25
Figura 3 – Esquemático de uma célula AWE	27
Figura 4 – Esquemático de uma célula PEM	29
Figura 5 – Modelo elétrico estático.	34
Figura 6 – Formas de onda comumente utilizadas na eletrólise pulsada: (I) quadrada, (II) triangular, (III) dente de serra e (IV) senoidal.	37
Figura 7 – Forma de onda com ondulação	38
Figura 8 – Parâmetros característicos de um pulso elétrico na modulação.	38
Figura 9 – Esquemático da célula utilizada por Vincent <i>et al.</i> (2018), no fornecimento de corrente pulsada.	40
Figura 10 – Comparação entre eletrólise pulsada e corrente contínua sob a mesma potência média de entrada.	42
Figura 11 – Comparação entre o comportamento da camada de difusão sob tensão constante e sob tensão pulsada no cátodo.	46
Figura 12 – Diagrama elétrico do circuito HCS.	51
Figura 13 – Diagrama elétrico do circuito HCS utilizado.	56
Figura 14 – Célula eletrolítica utilizada	64
Figura 15 – Modelo elétrico dinâmico proposto por Sousa Sousa (2025).	65
Figura 16 – Bancada experimental utilizada.	68
Figura 17 – Esquemático da bancada experimental	70
Figura 18 – Processo de medição dos gases	72
Figura 19 – Curva de polarização da célula eletrolítica.	81
Figura 20 – Resposta de tensão da célula eletrolítica à aplicação de degrau de corrente. .	82
Figura 21 – Resposta de tensão da célula eletrolítica à interrupção de corrente.	83
Figura 22 – Comparação entre simulação e experimento	85
Figura 23 – Equivalência do processo de carga da célula eletrolítica no modelo elétrico. .	87
Figura 24 – Simulação das correntes nos componentes do ramo do sobrepotencial de ativação.	88

Figura 25 – Erro quadrático médio do pulso aplicado em relação a um formato de onda ideal.	89
Figura 26 – Influência da frequência na produção teórica de H_2	91
Figura 27 – Influência da frequência na tensão máxima da célula.	92
Figura 28 – Influência da frequência na eficiência.	93
Figura 29 – Influência do razão cíclica na produção teórica de H_2	94
Figura 30 – Influência do razão cíclica na tensão máxima da célula.	95
Figura 31 – Influência do razão cíclica na eficiência energética.	96
Figura 32 – Interdependência entre frequência e razão cíclica na eficiência energética. .	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela comparativa entre as tecnologias de eletrolise da água	31
Tabela 2 – Lista de componentes utilizados no circuito	60
Tabela 3 – Parâmetros obtidos para o modelo proposto	84
Tabela 4 – Resumo comparativo da eficiência	98

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização	14
1.2	Formulação do Problema	16
1.3	Justificativa	18
1.4	Objetivos	18
<i>1.4.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	<i>18</i>
<i>1.4.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>19</i>
1.5	Estrutura da Dissertação	19
2	ELETRÓLISE DA ÁGUA PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO . . .	21
2.1	Princípios Fundamentais da Eletrólise da Água	21
2.2	Termodinâmica da Eletrólise da Água	22
<i>2.2.1</i>	<i>Tensões Teóricas da Célula</i>	<i>22</i>
<i>2.2.1.1</i>	<i>Tensão reversível</i>	<i>23</i>
<i>2.2.1.2</i>	<i>Sobrepotencial Ôhmico</i>	<i>24</i>
<i>2.2.1.3</i>	<i>Sobrepotencial de Ativação</i>	<i>24</i>
2.3	Tipos de Eletrolisadores	26
<i>2.3.1</i>	<i>Eletrolisadores Alcalinos (AWE)</i>	<i>27</i>
<i>2.3.1.1</i>	<i>Princípio de funcionamento, vantagens e desvantagens</i>	<i>27</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Eletrolisadores com Membrana Trocadora de Prótons</i>	<i>29</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Outras Tecnologias Emergentes de Eletrolisadores</i>	<i>31</i>
<i>2.3.4</i>	<i>Modelo Elétrico</i>	<i>33</i>
<i>2.3.5</i>	<i>Conclusão do Capítulo</i>	<i>34</i>
3	ELETRÓLISE PULSADA	36
3.1	Fundamentos da Eletrólise Pulsada	37
<i>3.1.1</i>	<i>Definição e Conceitos Gerais</i>	<i>37</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Representação e Parâmetros de Controle do pulso</i>	<i>38</i>
3.2	Estudos Experimentais sobre Eletrólise Pulsada	39
<i>3.2.1</i>	<i>Demir et al. (2018) — Efeito do potencial de pulso no desempenho da eletrólise da água em meio alcalino</i>	<i>39</i>

3.2.2	<i>Vincent et al. (2018) — Ciclo Eletroquímico de Divisão da Água por Corrente Pulsada para Produção de Hidrogênio</i>	39
3.2.3	<i>Cheng et al. (2024) — Eletrólise de pulso otimizada para aumento da eficiência da produção de hidrogênio</i>	41
3.2.4	<i>Rocha e Proost (2021) — Avaliação dos efeitos da largura de pulso e do ciclo de trabalho no desempenho de eletrodos para produção de hidrogênio em eletrólise pulsada.</i>	42
3.2.5	<i>Shimizu et al. (2006) — Método de geração de hidrogênio por eletrólise da água usando uma fonte de alimentação de pulso ultracurto.</i>	44
3.2.6	<i>Zhang et al. (2025) — Eletrólise Dinâmica Pulsada em PEMWE</i>	44
3.3	Mecanismos de Melhorias Observados na Literatura	46
3.4	Conclusões do capítulo	47
4	FONTE DE ALIMENTAÇÃO PULSADA	49
4.1	Princípios de funcionamento da topologia	50
4.2	Modelagem Matemática e Princípio de Funcionamento	51
4.2.1	<i>Análise de Vantagens, Desvantagens e Desafios de Implementação da Topologia</i>	54
4.2.2	<i>Protótipo da Circuito</i>	55
4.2.2.1	<i>Interface de Controle e Programação dos Pulsos</i>	60
4.3	Conclusão do capítulo	60
5	METODOLOGIA	62
5.1	Planejamento Experimental	62
5.1.1	<i>Definição dos Parâmetros do Processo</i>	62
5.1.1.1	<i>Variáveis de Processo</i>	62
5.1.1.2	<i>Variáveis de Resposta</i>	62
5.1.2	<i>Delineamento dos Ensaios</i>	63
5.2	Sistema Experimental de Eletrólise	63
5.2.1	<i>Célula Eletrolítica</i>	63
5.2.1.1	<i>Caracterização elétrica de eletrolisadores</i>	64
5.2.2	<i>Sistema de Medição e Aquisição de Dados</i>	68
5.2.3	<i>Protocolo de Execução Experimental</i>	70
5.3	Obtenção da eficiência	74

5.3.1	<i>Cálculo da Energia de Saída ($E_{saída}$)</i>	74
5.3.2	<i>Cálculo da Energia de Entrada</i>	75
5.3.3	<i>Etapa 1: Cálculo da Potência Instantânea Amostral</i>	76
5.3.4	<i>Etapa 2: Aplicação da Regra do Trapézio para Intervalos Discretos</i>	76
5.3.5	<i>Etapa 3: Cálculo da Energia Total por Somatório</i>	76
5.3.6	<i>Determinação Experimental da Energia Utilizando o Osciloscópio</i>	77
5.4	Conclusões do Capítulo	78
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
6.1	Caracterização Inicial	80
6.2	Análise da Forma de Onda Medida	88
6.3	Análise Paramétrica da Eletrólise Pulsada	90
6.3.1	<i>Influência da Frequência do Pulso</i>	90
6.3.2	<i>Influência do razão cíclica</i>	94
6.3.3	<i>Análise da Interdependência dos Parâmetros</i>	96
6.4	Análise Comparativa de Desempenho: EP vs. c.c.	97
6.4.1	<i>Análise Comparativa de Desempenho</i>	98
6.4.2	<i>Discussão dos Resultados e Análise Comparativa entre Corrente Contínua e Corrente Pulsada</i>	98
6.5	Discussão dos Mecanismos de Melhoria	99
6.5.1	<i>Redução de Sobrepotenciais</i>	99
6.6	Conclusões do Capítulo	99
7	CONCLUSÕES	102
7.1	Conclusões Gerais	103
7.2	Perspectivas Futuras	103
	REFERÊNCIAS	105
	APÊNDICES	109
	APÊNDICE A – Códigos-fontes utilizados para plotar os gráficos	109
	APÊNDICE B – Placa Montada	112
	APÊNDICE C – Layout da placa	113
	ANEXOS	113

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Nas últimas décadas, o sistema energético mundial tem sido sustentado majoritariamente por combustíveis fósseis, que impulsionaram o crescimento econômico e o desenvolvimento industrial global (IEA, 2023a). No entanto, essa dependência histórica trouxe severas consequências ambientais. A queima de combustíveis fósseis é hoje a principal fonte de emissões antrópicas de Gases de Efeito Estufa (GEE), diretamente associadas ao aquecimento global e às mudanças climáticas (IEA, 2023b).

Em resposta a este cenário, o Acordo de Paris mobilizou diversas nações a estabelecer metas de neutralidade de carbono e estratégias de transição energética (IEA, 2023b). Essa transição requer a substituição progressiva das fontes fósseis por alternativas de baixo carbono, garantindo segurança energética e sustentabilidade ambiental (IRENA, 2024). Tal urgência tem sido reforçada por crises energéticas recentes e instabilidades geopolíticas, que evidenciam a vulnerabilidade dos sistemas tradicionais de geração e distribuição (IEA, 2023a).

Nesse contexto de crescente pressão ambiental, econômica e política, destaca-se a relevância da Conferência das Partes, cuja 30ª edição (COP30) tem como eixos centrais a discussão do estado atual do clima, a revisão das metas previamente estabelecidas e a definição de novos compromissos internacionais. O objetivo maior da COP30 é reforçar o pacto global de redução das emissões de GEE, de forma compatível com a meta de limitar o aumento da temperatura média do planeta a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais. Além disso, a conferência busca ampliar os mecanismos de financiamento climático voltados aos países em desenvolvimento, promover ações de adaptação aos impactos já observados das mudanças climáticas e estimular a inovação em tecnologias de baixo carbono e fontes renováveis de energia (GOV.BR, 2025).

Entre seus objetivos específicos, a COP30 pretende: elevar o nível de ambição das Contribuições Nacionalmente Determinadas, alinhando-as ao limite de 1,5 °C; mobilizar recursos financeiros adicionais para apoiar países em desenvolvimento em ações de mitigação e adaptação; promover estratégias para enfrentar impactos climáticos inevitáveis, como elevação do nível do mar e eventos extremos; incentivar o desenvolvimento e a implementação de tecnologias de baixo carbono; fortalecer o diálogo e a cooperação internacional para soluções conjuntas; abordar desigualdades e impactos socioeconômicos que afetam populações vulneráveis; reconhecer

o papel essencial da biodiversidade e dos ecossistemas naturais nos processos de mitigação e adaptação; e fomentar soluções baseadas na natureza, como reflorestamento e restauração ecológica (GOV.BR, 2025).

O hidrogênio possui um potencial para a transição para um sistema de energia limpa, oferecendo uma solução viável para descarbonizar setores com alternativas limitadas, como transporte de longa distância, produtos químicos e produção de ferro e aço (ALSABA *et al.*, 2023). Contudo, 48% do gás hidrogênio (H_2) é produzido atualmente é por meio da reforma do gás natural, cerca de 30% por reforma do petróleo, aproximadamente 18% por gaseificação do carvão e cerca de 4% por eletrólise da água (ALSABA *et al.*, 2023). Logo, a grande maioria da produção de gás hidrogênio depende de combustíveis fósseis, com o gás natural contribuindo com aproximadamente três quartos, o carvão com cerca de um quarto (principalmente na China) e o petróleo e a eletricidade compondo o restante (International Energy Agency, 2020). Consequentemente, a produção de gás hidrogênio foi responsável pela emissão de mais de 800 milhões de toneladas de CO_2 em 2019, representando cerca de 2% das emissões globais de CO_2 do setor de energia (International Energy Agency, 2020). Contudo, o Cenário de Desenvolvimento Sustentável enfatiza a adoção de gás hidrogênio de baixo carbono, produzido a partir de combustíveis fósseis acoplado à captura e armazenamento de CO_2 ou através da eletrólise da água utilizando eletricidade de baixo carbono (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). Prevê-se que a utilização de gás hidrogênio de baixo carbono e combustíveis baseados em gás hidrogênio contribua com 8% das reduções de CO_2 no Cenário de Desenvolvimento Sustentável até 2070 (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025).

O gás hidrogênio verde, gerado a partir de fontes de energia renováveis, é caracterizado por emissões mínimas ou zero de carbono. Suas vantagens incluem ser uma fonte de energia sustentável com emissões zero de carbono (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). Quando a energia necessária para sua produção é proveniente de fontes renováveis, o gás hidrogênio resultante é considerado o portador de energia mais limpo, oferecendo um potencial significativo para várias aplicações (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). Uma de suas principais vantagens em relação à transmissão direta de energia elétrica é a capacidade de transportar energia por longas distâncias, permitindo o deslocamento de energia de regiões com abundância de recursos renováveis para centros com elevada demanda energética (MAYYAS *et al.*, 2020). Diferentemente da transmissão elétrica convencional, o hidrogênio possibilita o desacoplamento espacial entre geração e consumo, viabilizando o aproveitamento de recursos renováveis distantes dos

centros consumidores. No entanto, o gás hidrogênio verde enfrenta desafios como alto custo de produção, perdas de energia e falta de infraestrutura dedicada (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). As metas de custo de produção de hidrogênio estabelecidas pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos indicam valores inferiores a USD 2/kg de H_2 para o setor de transportes e inferiores a USD 1/kg de H_2 para aplicações industriais e de geração de energia em larga escala (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). Entretanto, as estimativas atuais para o custo de produção do hidrogênio verde situam-se, de modo geral, na faixa de 2,5 a 4,5 USD/kg, evidenciando a distância em relação às metas estabelecidas (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). Esse elevado custo está associado, principalmente, ao investimento requerido em eletrolisadores e ao custo da eletricidade, sendo este último responsável por aproximadamente 90% do custo total de produção (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025).

Com a crescente participação de fontes renováveis na geração de eletricidade, especialmente a solar fotovoltaica e a eólica, impulsionada pela redução de custos e pela escalabilidade tecnológica (IEA, 2021; IRENA, 2024), intensificam-se os desafios associados à variabilidade e à intermitência da geração. Nesse contexto, o hidrogênio surge como uma das alternativas disponíveis para o armazenamento de grandes quantidades de energia elétrica por longos períodos, por meio da conversão dos excedentes de geração renovável (MAYYAS *et al.*, 2020). Contudo, a natureza intermitente dessas fontes impõe desafios adicionais ao equilíbrio entre oferta e demanda no sistema elétrico.

A eletrólise da água é uma rota tecnológica consolidada para a produção de gás hidrogênio de alta pureza. Entretanto, a sua aplicação em larga escala ainda enfrenta entraves associados ao elevado consumo energético, à degradação dos eletrodos e à redução da eficiência (ABDALLA *et al.*, 2018). Tais limitações tornam-se mais críticas quando a eletrólise é acoplada a fontes intermitentes, como a solar e a eólica. A intermitência e a flutuação das fontes de energia renováveis determinam a potência de saída aplicada aos eletrolisadores de forma imprevisível. Consequentemente, os eletrolisadores não funcionam continuamente na potência nominal e de maior eficiência.

1.2 Formulação do Problema

A operação sob corrente contínua (c.c.) dos eletrolisadores apresenta limitações inerentes ao transporte de massa e à estabilidade da interface eletrodo–eletrólito (VINCENT *et al.*, 2018). Durante a eletrólise em c.c., a formação e aderência de bolhas gasosas sobre a superfície

ativa do eletrodo reduzem a área efetiva de contato com o eletrólito, elevando a resistência do eletrolisador. Adicionalmente, o acúmulo de espécies iônicas na interface eletrodo–eletrólito resulta na formação da dupla camada elétrica, contribuindo para o aumento dos sobrepotenciais e, conseqüentemente, da energia requerida para a eletrólise da água. Como resultado combinado desses efeitos interfaciais e resistivos, a eficiência energética global da eletrólise alcalina convencional é tipicamente limitada, situando-se na faixa de 56–73%, variando em função das condições operacionais e do tipo de eletrodo empregado (CHENG *et al.*, 2024; ZHANG *et al.*, 2024). Esse cenário motiva a investigação de técnicas capazes de promover o alívio dinâmico da interface eletrodo–eletrólito, favorecendo a remoção de bolhas e a recomposição da camada de difusão.

A eletrólise pulsada surge como uma alternativa para superar os entraves da eletrólise convencional (CHENG *et al.*, 2024; MASAUD *et al.*, 2023). Nessa técnica, o fornecimento de energia elétrica é modulado em pulsos de corrente ou tensão, ajustando-se a frequência e a razão cíclica.

Nos últimos anos, estudos experimentais têm demonstrado que a aplicação de correntes ou tensões pulsadas podem reduzir perdas eletroquímicas e melhorar a cinética de reação. Zhang *et al.* (2025) reportaram ganhos significativos na redução dos sobrepotenciais e uma melhora na liberação das bolhas que restringem a área efetiva do eletrodo. Cheng *et al.* (2024), por sua vez, reportaram aumento de eficiência em um sistema industrial de 10 kW sob regime pulsado, especialmente em baixas potências de operação. Shimizu *et al.* (2006) mostraram que pulsos de curta duração evitam a formação completa da dupla camada elétrica, reduzindo a resistência de difusão. Estudos recentes indicam que o regime pulsado pode melhorar significativamente o desempenho energético e a estabilidade do sistema (MASAUD *et al.*, 2023).

Apesar dos avanços reportados na literatura, observa-se que muitos estudos concentram-se nos efeitos eletroquímicos da modulação pulsada, dedicando menor atenção ao desenvolvimento e à validação de fontes de corrente capazes de aplicar pulsos controlados de forma precisa, estável e independente das variações dinâmicas da impedância do eletrolisador. Além disso, a correlação entre os parâmetros elétricos do pulso e o desempenho energético do sistema ainda carece de investigações experimentais sistemáticas.

1.3 Justificativa

A eletrólise convencional apresenta limitações inerentes ao seu próprio funcionamento, destacando-se a fixação de bolhas gasosas na superfície dos eletrodos e os efeitos associados à dupla camada elétrica. Esses fenômenos elevam os sobrepotenciais, reduzem a área ativa disponível para reação e, conseqüentemente, diminuem a eficiência do processo.

Apesar dos avanços recentes na literatura acerca da eletrólise pulsada, ainda existem lacunas importantes relacionadas aos circuitos empregados para gerar pulsos e à modelagem adequada da capacitância de dupla camada. Poucos estudos descrevem detalhadamente as topologias de acionamento utilizadas, e menos ainda realizam uma caracterização experimental completa dos parâmetros elétricos das células, especialmente a capacitância de dupla camada, que aparece em diversos trabalhos como o elemento dominante para definir os tempos que condicionam os parâmetros ótimos de modulação. Como resultado, ao comparar os dados reportados por diferentes autores, observam-se discrepâncias significativas nos valores de tempos de pulsos considerados ideais.

Nesse contexto, o presente trabalho revisa topologias de fontes de corrente com potencial de aplicação em eletrólise pulsada, avaliando seus princípios de funcionamento. Além disso, técnicas de caracterização elétrica foram revisadas e posteriormente aplicadas para determinar parâmetros da célula eletrolítica, como o valor e os tempos característicos de carga e descarga da capacitância de dupla camada.

Assim, este trabalho propõe não apenas a investigação sistemática da eletrólise pulsada, mas também a integração entre conceitos de eletrônica de potência e métodos de caracterização eletroquímica, fornecendo uma abordagem abrangente para análise e otimização do processo.

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo Geral*

Desenvolver e validar experimentalmente um sistema de eletrólise pulsada baseado em uma fonte de corrente dedicada, capaz de operar sob diferentes regimes de modulação, de modo a avaliar e quantificar os ganhos de eficiência energética e estabilidade operacional em comparação à eletrólise convencional em corrente contínua, com desempenho independente das

variações dinâmicas da impedância da célula eletrolítica.

1.4.2 *Objetivos Específicos*

- Identificar, os principais mecanismos eletroquímicos associados às limitações da eletrólise alcalina convencional e aos potenciais ganhos da eletrólise pulsada;
- Investigar a influência dos parâmetros de modulação elétrica (frequência, razão cíclica e amplitude) sobre o comportamento elétrico e a eficiência energética do processo de eletrólise da água;
- Avaliar experimentalmente o desempenho da eletrólise pulsada em diferentes regimes de operação, estabelecendo correlações entre os parâmetros do pulso e os indicadores de eficiência e estabilidade do sistema;
- Comparar quantitativamente o desempenho energético e operacional da eletrólise pulsada com a eletrólise em corrente contínua, identificando condições de operação mais favoráveis.

1.5 Estrutura da Dissertação

No Capítulo 1, apresenta a motivação, o enquadramento energético e científico do tema, bem como a formulação do problema, os objetivos e a justificativa da pesquisa.

O Capítulo 2 reúne a fundamentação teórica necessária, descrevendo os princípios da eletrólise da água, os mecanismos eletroquímicos associados e os conceitos essenciais para compreender a operação em regime pulsado. Apresenta os tipos de eletrolisadores, bem como suas características de operação e construtivas.

Em seguida, o Capítulo 3 aprofunda-se nos estudos recentes da literatura dedicados à eletrólise pulsada, discutindo contribuições experimentais relevantes e identificando as lacunas que motivam e orientam este trabalho.

O Capítulo 4 apresenta a implementação da fonte de corrente Howland, detalhando os aspectos construtivos, os critérios de seleção da topologia e suas características elétricas aplicadas à modulação pulsada.

No Capítulo 5, a metodologia adotada, os materiais empregados, os procedimentos de ensaio, os parâmetros de operação e o processamento dos dados adquiridos são descritos.

O Capítulo 6 reúne e discute os resultados experimentais, comparando o desempenho da eletrólise contínua e pulsada e relacionando-os com os modelos teóricos e trabalhos

previamente revisados.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões gerais do estudo, destacando as contribuições alcançadas e apontando possíveis direções para pesquisas futuras.

2 ELETRÓLISE DA ÁGUA PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

A compreensão do desempenho eletroquímico de uma célula eletrolítica exige, antes de tudo, a análise dos fenômenos termodinâmicos que governam a eletrólise da água. Embora a reação global seja energeticamente bem definida, o comportamento real do sistema é condicionado por múltiplas contribuições de potencial que se manifestam na interface eletrodo–eletrólito e ao longo dos elementos condutores da célula. Assim, antes de avançar para a eletrólise pulsada, torna-se necessário estabelecer os parâmetros que determinam os fenômenos que ditam o comportamento de uma célula. Este capítulo, portanto, introduz a reação global da eletrólise e desenvolve, as relações termodinâmicas que definem a os componentes que compõem a curva de polarização, servindo de base conceitual para as análises experimentais e modelagens subsequentes.

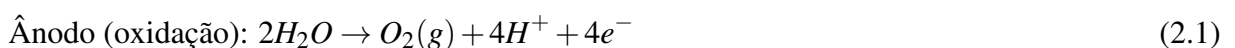
2.1 Princípios Fundamentais da Eletrólise da Água

A eletrólise da água é um processo eletroquímico que promove a decomposição das moléculas de água (H_2O) em gases hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2) mediante a aplicação de uma corrente elétrica contínua (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). Esse processo ocorre em uma célula eletrolítica, que é tipicamente composta, por dois eletrodos imersos em uma solução condutora, usualmente água contendo um eletrólito, como hidróxido de potássio (KOH) (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025).

Durante a eletrólise da água, as reações que ocorrem em cada eletrodo dependem diretamente do meio eletrolítico empregado. Em ambos os casos, há uma reação de redução no cátodo e uma reação de oxidação no ânodo, ocorrendo simultaneamente (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). A seguir, apresentam-se as meias-reações organizadas por tipo de meio.

Meio Ácido

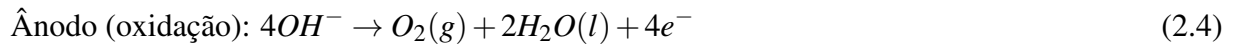
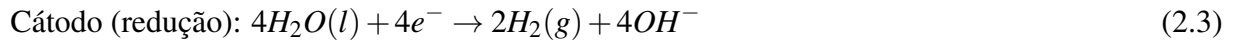
No meio ácido, a espécie reduzida no cátodo é o íon hidrogênio, enquanto a água é oxidada no ânodo. As respectivas meias-reações são (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025):





Meio Alcalino ou Neutro

Em meio alcalino ou neutro, a redução no cátodo ocorre diretamente a partir de moléculas de água, enquanto a oxidação no ânodo envolve íons hidroxila (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025):



Reação Global

Independentemente do meio empregado, a combinação das meias-reações resulta na reação global da eletrólise da água (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025):



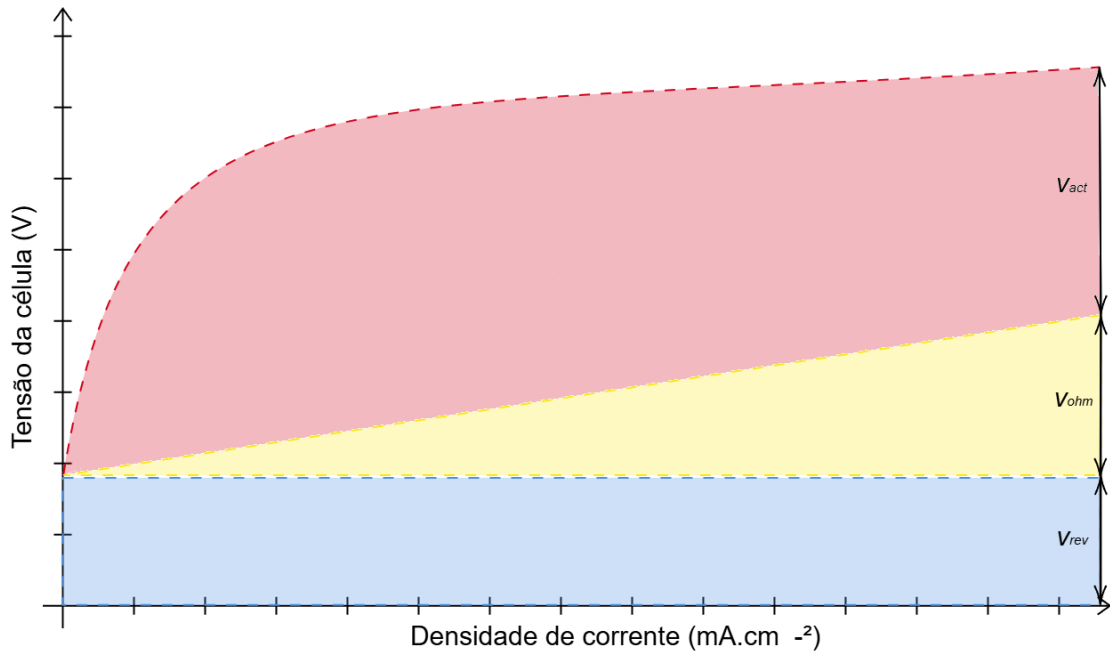
2.2 Termodinâmica da Eletrólise da Água

2.2.1 Tensões Teóricas da Célula

Termodinamicamente, a molécula de água apresenta elevada estabilidade química, o que torna a sua dissociação eletroquímica um processo energeticamente exigente (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). A tensão total da célula, representada por v_{cel} , é composta por três contribuições principais: a tensão reversível (v_{rev}), o sobrepotencial de ativação (v_{act}) e o sobrepotencial ôhmico (v_{ohm}), conforme expresso em (2.6). A Figura 1 apresenta a curva de polarização da célula eletrolítica, evidenciando a contribuição de cada componente de tensão.

$$v_{\text{cel}} = v_{\text{rev}} + v_{\text{act}} + v_{\text{ohm}} \quad (2.6)$$

Figura 1 – Curva de polarização típica de uma célula eletrolítica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.1.1 Tensão reversível

A tensão reversível (v_{rev}) representa o potencial elétrico mínimo, em condições de temperatura e pressão, necessário para que a eletrólise da água ocorra. Termodinamicamente, ela está associada à variação da energia livre de Gibbs (ΔG) da reação global, conforme descrito em (2.7), onde n é o número de elétrons transferidos (dois no caso da dissociação da água) e $F = 96490C$ é a constante de Faraday e $E = v_{rev}$ o potencial elétrico mínimo requerido (ZOSKI, 2007).

$$\Delta G = n \cdot F \cdot E \quad (2.7)$$

A variação da energia livre de Gibbs é determinada pela equação de Gibbs–Helmholtz, apresentada em (2.8) (SMOLINKA; GARCHE, 2022), onde ΔH é a variação de entalpia do sistema e o termo $(T \cdot \Delta S)$ representa a energia térmica trocada com o ambiente.

$$\Delta G = \Delta H(T, P) - T \cdot \Delta S(T, P) \quad (2.8)$$

Combinando as equações (2.7) e (2.8), obtém-se a expressão para o cálculo da tensão reversível em função das propriedades termodinâmicas do sistema:

$$v_{rev} = \frac{\Delta G}{n \cdot F} = \frac{\Delta H(T, P) - T \cdot \Delta S(T, P)}{n \cdot F} \quad (2.9)$$

Em condições padrão, correspondentes à pressão de 1 atm e à temperatura de 298,15 K, a tensão reversível teórica da eletrólise da água é de aproximadamente 1,23 V, conforme indicado na Equação (2.10).

$$v_{rev}(298,15 \text{ K}, 1 \text{ atm}) = 1,23 \text{ V} \quad (2.10)$$

2.2.1.2 Sobrepotencial Ôhmico

O sobrepotencial ôhmico (v_{ohm}) corresponde à queda de tensão associada às perdas resistivas nos componentes condutores da célula eletrolítica. Essa parcela exige uma tensão adicional da fonte de alimentação para compensar as perdas elétricas e manter o processo de eletrólise (DARBAND, G. B. *et al.*, 2019). As resistências ôhmicas podem ser classificadas em três categorias principais:

- Resistências do circuito elétrico que resultam do efeito Joule nos condutores, eletrodos, conectores e placas bipolares, dependendo da geometria e da condutividade dos materiais utilizados;
- Resistências de transporte associadas à condução iônica através do eletrólito e ao transporte de espécies pela membrana ou diafragma separador;
- Resistências associadas à reação eletroquímica que incluem efeitos variáveis durante a operação, como o aumento da concentração do eletrólito (r_{con}) e a formação de bolhas de gás (r_b) na superfície dos eletrodos. As bolhas reduzem a área ativa de reação e dificultam o transporte iônico, elevando significativamente a resistência e consequentemente as perdas (HUANG *et al.*, 2022; CAO *et al.*, 2023).

Dessa forma, o sobrepotencial ôhmico pode ser modelado como uma queda de tensão equivalente à soma de todas as resistências conectadas em série, refletindo as diversas fontes de perda elétrica e de transporte no sistema.

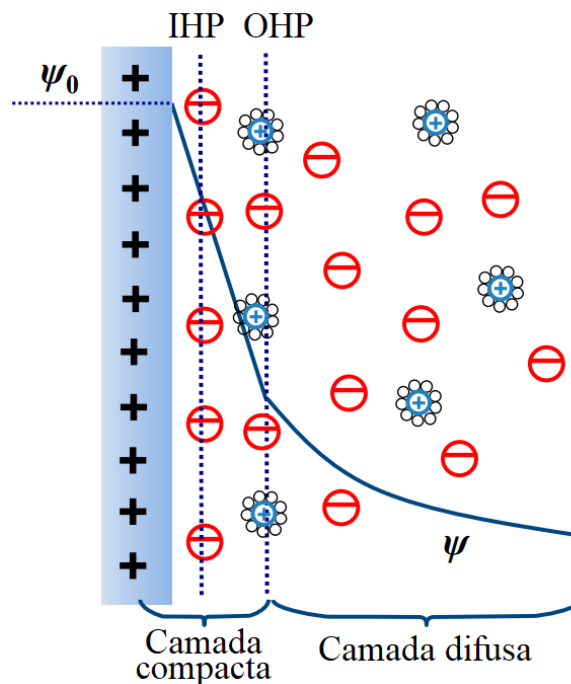
2.2.1.3 Sobrepotencial de Ativação

Na interface eletrodo/solução, o acúmulo de cargas elétricas cria um campo eletrostático que confere caráter capacitivo à região interfacial (CAVALIERE, 2023). Assim, para que

ocorra a transferência efetiva de elétrons e íons, é necessário aplicar uma diferença de potencial adicional capaz de vencer essa barreira energética (de Miranda, 2019; CARDOSO; PANOSSIAN, 2012). O sobrepotencial de ativação (v_{act}) representa essa energia adicional necessária para superar a barreira de ativação da reação eletroquímica na interface eletrodo–eletrólito. Esse fenômeno está diretamente relacionado à estrutura da Dupla Camada Elétrica (EDL, do inglês *Electrical Double Layer*), conceito introduzido por Helmholtz.

Após revisões, um modelo de EDL proposto por Stern tem sido amplamente adotado na investigação de capacitâncias de EDL. Tal modelo define a EDL como duas regiões de distribuição iônica, ou seja, uma camada compacta e uma camada difusa (ZHAO, 2009). Na camada compacta, os íons são fortemente adsorvidos pela superfície do eletrodo, consistindo em um plano interno de Helmholtz (OHP, do inglês *Outer Helmholtz Plane*) e um plano externo de Helmholtz (IHP, do inglês *Inner Helmholtz Plane*). O íons oxidados e reduzidos se movem na camada difusa sob a influência de um tensão denominada potencial eletrocinético $\Delta\psi$. A relação entre o potencial eletrocinético e o comprimento da dupla camada e a camada difusa é mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Modelo de Stern da EDL gerada em uma superfície de eletrodo carregada positivamente.



Fonte: Adaptado de (ZHAO, 2009).

De acordo com o modelo de Stern, a capacitância da EDL pode ser tratada como duas capacitâncias em série, ou seja, a capacitância da dupla camada compacta e a capacitância

da região de difusão. Tipicamente, a capacitância de uma EDL é governada pela capacitância da camada compacta (LIU *et al.*, 2019).

O sobrepotencial de ativação total, considerando as contribuições anódica e catódica, é descrito pela equação de Tafel, conforme (2.11).

$$v_{act,ac}(T, j) = 2.3 \cdot \frac{R \cdot T}{n \cdot \alpha_a \cdot F} \cdot \log \left(\frac{j}{j_{0,a}} \right) + 2.3 \cdot \frac{R \cdot T}{n \cdot \alpha_c \cdot F} \cdot \log \left(\frac{j}{j_{0,c}} \right) \quad (2.11)$$

Nessa expressão, j representa a densidade de corrente, definida pela razão entre a corrente da célula (i_{cel}) e a área de contato efetiva do eletrodo (A_{ef}). Os termos $j_{0,a}$ e $j_{0,c}$ são as densidades de corrente de troca nos eletrodos anódico e catódico, respectivamente, enquanto α_a e α_c são os coeficientes de transferência de carga. R a constante universal dos gases ideais ($8.314 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$). T a temperatura absoluta do gás no momento da medição, em Kelvin (K).

A equação (2.11) demonstra a relação entre o sobrepotencial de ativação, a densidade de corrente e a temperatura, refletindo o comportamento cinético e termodinâmico das reações de oxirredução. O termo logarítmico fornece uma descrição quantitativa do grau de afastamento do sistema em relação ao equilíbrio eletroquímico.

2.3 Tipos de Eletrolisadores

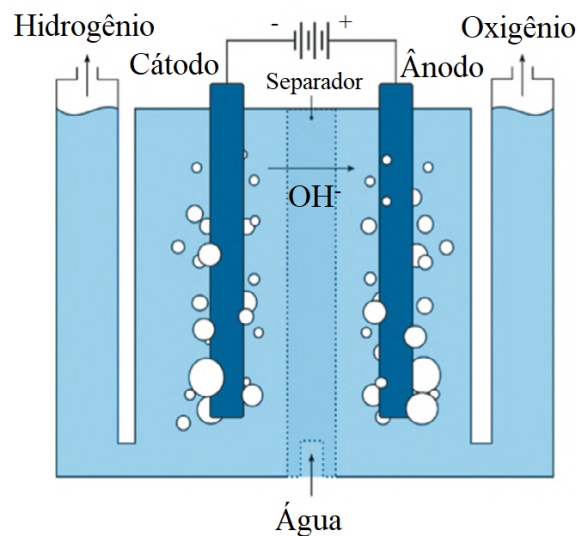
Embora o princípio de dissociação da água seja comum a todas as arquiteturas, a compreensão dos diferentes tipos de eletrolisadores é necessária para avaliar as possibilidades tecnológicas disponíveis na produção de hidrogênio e para estabelecer critérios adequados de seleção conforme as demandas de eficiência, custo, pureza de gás e integração operacional. Cada configuração emprega materiais, mecanismos de transporte iônico e condições de operação específicas, que influenciam diretamente o desempenho eletroquímico e a viabilidade econômica do processo. Assim, esta seção apresenta uma análise das principais tecnologias de eletrólise, bem como os métodos emergentes, destacando seus princípios de funcionamento, características construtivas, vantagens e limitações e tendências atuais de desenvolvimento.

2.3.1 Eletrolisadores Alcalinos (AWE)

2.3.1.1 Princípio de funcionamento, vantagens e desvantagens

A eletrólise alcalina da água (AWE, do inglês *Alkaline Water Electrolysis*) foi introduzida pela primeira vez em 1789 por Troostwijk e Diemann (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). Os eletrolisadores deste tipo são constituídos, por dois eletrodos imersos em uma solução eletrolítica alcalina líquida, normalmente composta por hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH) (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). Entre os eletrodos, há um diafragma central que permite o transporte seletivo dos íons hidróxido (OH^-) e impede a mistura dos gases produzidos durante a eletrólise (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). A Figura 4 apresenta o esquemático de uma célula do tipo AWE.

Figura 3 – Esquemático de uma célula AWE



Fonte: Adaptado de (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025)

No cátodo, ocorre a reação de redução, em que moléculas de água são convertidas em gás hidrogênio (H_2) e íons hidroxila (OH^-):



No ânodo, ocorre a reação de oxidação, responsável pela geração de gás oxigênio (O_2) e água:



Os eletrolisadores alcalinos operam, tipicamente, em temperaturas moderadas, variando entre 40 e 90 °C (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). O funcionamento ocorre sob tensões de célula na faixa de 1,8 a 2,4 V, correspondentes a densidades de corrente entre 200 e 500 mA·cm⁻², resultando em eficiências elétricas que variam de 51 a 60% (BUTTLER; SPLIETHOFF, 2018). O diafragma empregado nesses sistemas não impede completamente a difusão cruzada dos gases, o que faz com que o hidrogênio produzido apresente uma pureza típica igual ou superior a 99,5% (BUTTLER; SPLIETHOFF, 2018).

Em condições comerciais, os eletrolisadores alcalinos apresentam operação estável a partir de aproximadamente 20% da potência nominal, alcançando seu ponto ótimo de desempenho entre 60% e 80% da potência total (FRANCO; GIOVANNINI, 2023).

As principais vantagens dos sistemas AWE incluem o baixo custo de capital, o uso de catalisadores não nobres, como níquel (Ni), a elevada durabilidade e a operação estável (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). Por essas razões, a eletrólise alcalina é considerada a tecnologia mais viável para a produção de hidrogênio em larga escala a partir de fontes de energia renováveis (CHENG *et al.*, 2024).

Entre as limitações estão o caráter corrosivo do sistema, a menor pureza do gás produzido e o maior consumo energético em comparação a outros tipos de eletrólise (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). Além disso, as densidades de corrente limitadas (0,200-500 mA·cm⁻²), a baixa pressão operacional e a eficiência energética relativamente inferior constituem desafios técnicos relevantes (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025).

Os eletrolisadores alcalinos modernos utilizam materiais otimizados para aumentar a durabilidade e a eficiência do processo. O níquel é amplamente empregado como material base para os eletrodos, devido à sua boa condutividade elétrica e resistência à corrosão (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). O eletrólito, uma solução alcalina geralmente de hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH), com concentração entre 20% e 40%, é utilizada como eletrólito (SHIVA KUMAR; LIM, 2022).

O separador geralmente é composto por dióxido de zircônio (ZrO₂) estabilizado, associado a uma malha de polímero de sulfeto de fenileno (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). Tanto o eletrodo do ânodo quanto o do cátodo são formados por aço inoxidável perfurado revestido com níquel. A camada de transporte poroso do ânodo, quando presente, é uma malha

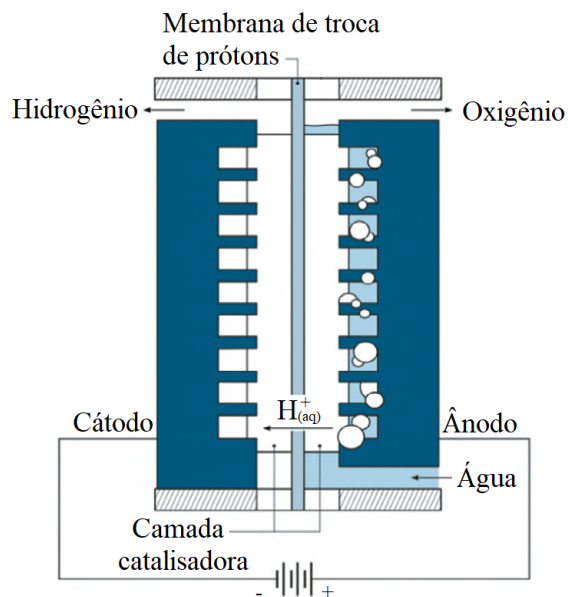
de níquel, e as placas bipolares de ambos os eletrodos são igualmente constituídas de aço inoxidável revestido de níquel (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025).

2.3.2 Eletrolisadores com Membrana Trocadora de Prótons

A eletrólise com membrana trocadora de prótons (PEMEL, do inglês *Proton Exchange Membrane Electrolysis*) teve seu conceito inicial desenvolvido por Grubb na década de 1950 e posteriormente aprimorado pela *General Electric Co.* em 1966, com o objetivo de superar as limitações da eletrólise alcalina convencional (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025).

O princípio de funcionamento da PEMEL é análogo ao das células a combustível do tipo PEM, porém operando de forma inversa: a membrana sólida atua como eletrólito, conduzindo seletivamente prótons (H^+) enquanto impede a difusão cruzada dos gases gerados (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). A Figura 4 apresenta um esquema representativo de uma célula de eletrólise PEM.

Figura 4 – Esquemático de uma célula PEM



Fonte: Adaptado de (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025)

As reações eletroquímicas que ocorrem durante o processo são descritas pelas seguintes equações:





As células de eletrólise do tipo PEM operam, tipicamente, em temperaturas entre 20 e 100 °C e podem atingir pressões de até 200 bar (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025; BUTTLER; SPLIETHOFF, 2018). Esses sistemas suportam densidades de corrente significativamente superiores às da eletrólise alcalina, variando entre 0,6 e 2 A·cm⁻², para tensões de operação de 1,8 a 2,2 V, apresentando eficiência de aproximadamente 50 a 60% (BUTTLER; SPLIETHOFF, 2018).

Devido à alta seletividade das membranas, o hidrogênio produzido possui pureza elevada, em torno de 99,99% (BUTTLER; SPLIETHOFF, 2018). Os eletrolisadores PEM comerciais operam com maior eficiência a partir de cerca de 40% da potência nominal, atingindo seu ponto ótimo de desempenho entre 70% e 90% da capacidade total (FRANCO; GIOVANNINI, 2023).

Nos eletrolisadores PEM, os eletrodos são usualmente compostos por metais nobres. O cátodo é constituído de platina (Pt) ou paládio (Pd), enquanto o ânodo é formado por óxidos de irídio (IrO₂) ou rutênio (RuO₂) (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). O eletrólito é uma membrana polimérica sólida PFSA (*Perfluorosulfonic Acid*), sendo o material mais amplamente utilizado o Nafion[®], devido à sua elevada condutividade protônica e estabilidade química (BESSARABOV *et al.*, 2015).

As membranas empregadas nos eletrolisadores PEM apresentam elevada condutividade protônica, baixa permeabilidade a gases e excelente estabilidade sob altas pressões e temperaturas próximas à ambiente (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). A membrana atua simultaneamente como eletrólito e separador, permitindo a condução seletiva de prótons e evitando a mistura dos gases produzidos. A camada de transporte poroso (PTL, do inglês *Porous Transport Layer*) do ânodo é geralmente composta de titânio sinterizado revestido com platina, enquanto a do cátodo pode ser fabricada em titânio sinterizado ou em tecido de carbono (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). As placas bipolares, responsáveis pela condução elétrica e pela gestão térmica, são tipicamente fabricadas em titânio revestido com platina (no ânodo) e titânio revestido com ouro (no cátodo), garantindo alta condutividade e resistência à corrosão (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025).

Entre as principais vantagens dessa tecnologia, destacam-se a pureza do hidrogênio produzido, o design compacto, a alta eficiência energética e a operação em regime pressurizado

sem necessidade de purificação adicional dos gases (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). No entanto, a PEMEL ainda enfrenta limitações econômicas significativas, especialmente devido ao uso de materiais nobres e ao ambiente eletroquímico ácido, que exige componentes metálicos de alta resistência à corrosão e elevado custo (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025).

Tabela 1 – Tabela comparativa entre as tecnologias de eletrólise da água

Características	AWE	PEM
Métricas das condições operacionais		
Temperatura (°C)	49-90	20-100
Pressão (bar)	<30	<200
Densidade de corrente (A/cm²)	0,2-0,5	0,6-2,0
Tensão (V)	1,8-2,4	1,8-2,2
Eletrólito	Hidróxido de potássio (KOH)	
Separador	Estabilizado com ZrO com malha PPS	Eletrólito sólido (PFSA)
Eletrodo/catalisador (Ânodo)	Aço inoxidável perfurado revestido de níquel	Óxido de irídio
Eletrodo/catalisador (Cátodo)	Aço inoxidável perfurado revestido de níquel	Nanopartículas de platina em carbono negro
Camada de transporte porosa ânodo	Malha de níquel (nem sempre presente)	Revestido com platina titânio poroso sinterizado
Camada de transporte porosa cátodo	Malha de níquel	Tecido de titânio ou carbono sinterizado poroso
Ânodo de placa bipolar	Aço inoxidável revestido com níquel	Titânio revestido com platina
Cátodo de placa bipolar	Aço inoxidável revestido com níquel	Revestido de ouro titânio
Molduras e vedação	PSU, PTFE e EPDM	PTFE, PSU e ETFE
Métricas de desempenho do eletrolisador		
Área da célula (m²)	<4,0	<0,13
Taxa de produção (m³/h)	<1400	<400
Pureza do gás (%)	>99,50	99,99
Detalhes do sistema		
Consumo de energia (kWh/m³)	-5,55	-5,40
Eficiência (%)	51-60	46-60
Tempo de vida da pilha (kh)	60-120	60-100
Degradação (%/ano)	0,25-1,50	0,5-2,50
Métricas de avaliação de tecnologia		
Vantagens	Baixo custo de capital; catalisadores baratos; alta durabilidade e operação estável.	Pureza máxima; design compacto e alta taxa de produção.
Desvantagens	Sistema corrosivo; baixa pureza e alto consumo de energia.	Alto custo de componentes raros; ambiente ácido e alta pressão.

Fonte: Adaptado de (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025).

2.3.3 Outras Tecnologias Emergentes de Eletrolisadores

Embora AWE e PEMEL continuem sendo os principais métodos para eletrólise da água, pesquisas em andamento exploram técnicas para aumentar a eficiência e reduzir os custos.

A tecnologia de eletrólise de óxido sólido (SOEL, do inglês *Solid Oxide Electrolysis*) surgiu na década de 1980, a partir dos trabalhos pioneiros de Dönitz e Erdle, destacando-se por

sua elevada eficiência na conversão de energia elétrica em energia química, particularmente na produção de hidrogênio de alta pureza (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025).

Os sistemas SOEL operam em condições de alta temperatura e pressão, utilizando vapor d'água como reagente e íons óxido (O^{2-}) como principais portadores de carga (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). O princípio de funcionamento é análogo ao da eletrólise alcalina, porém com diferenças fundamentais nas meias-reações envolvidas (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025):



Entre as principais vantagens da tecnologia SOEL destacam-se a alta eficiência energética, a operação em baixa pressão, o reduzido consumo elétrico e a ausência de necessidade de catalisadores de metais nobres (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). Além disso, a operação em alta temperatura favorece a cinética das reações eletroquímicas e permite a integração com processos industriais de cogeração de calor.

Apesar dessas vantagens, a tecnologia enfrenta desafios significativos que limitam sua aplicação comercial em larga escala. Entre os principais entraves estão a degradação dos materiais cerâmicos em ambientes oxidantes e redutores alternados, a baixa estabilidade mecânica e química dos eletrodos, e a necessidade de operação em temperaturas elevadas (700–1000°C) (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). Dessa forma, a SOEL tem se mostrado mais adequada para integração com sistemas de geração contínua de calor, como usinas nucleares ou de ciclo combinado, do que com fontes de energia intermitentes (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). As limitações adicionais incluem a baixa durabilidade dos componentes, o elevado custo de fabricação das células e o design volumoso do sistema (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025).

Nos eletrolisadores de óxido sólido, o eletrólito é usualmente composto por zircônia estabilizada com ítria (YSZ, do inglês *Yttria-Stabilized Zirconia*), responsável pela condução de íons óxido (O^{2-}) (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). Este material apresenta elevada condutividade iônica e boa estabilidade química em altas temperaturas, sendo, portanto, amplamente empregado em dispositivos de eletrólise e células a combustível de óxido sólido.

O separador e o eletrólito coincidem estruturalmente, ambos compostos por YSZ densa (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). O eletrodo do lado do oxigênio (ânodo) é geralmente formado por materiais de estrutura perovskita, como LSCF ($La_{1-x}Sr_xCo_{1-y}Fe_yO_3$) ou LSM ($La_{1-x}Sr_xMnO_3$), enquanto o eletrodo do lado do hidrogênio (cátodo) é composto por uma matriz porosa de Ni/YSZ, que atua simultaneamente como catalisador e condutor elétrico (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025).

A camada de transporte poroso do ânodo é comumente constituída por uma malha metálica de níquel ou espuma metálica, e a placa bipolar do cátodo é fabricada em aço inoxidável revestido de cobalto para melhorar a resistência à corrosão (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025).

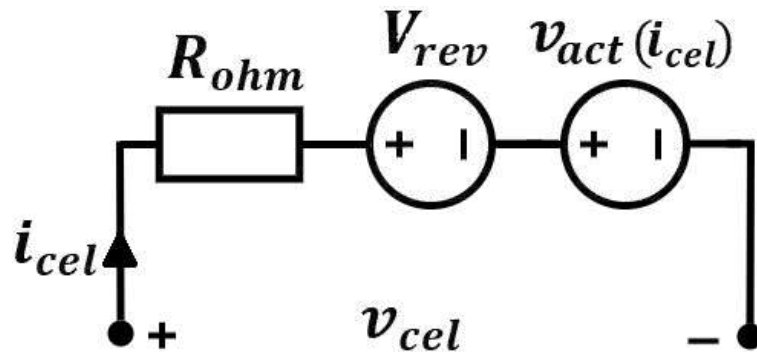
Além da eletrólise de óxido sólido, a atenção tem sido direcionada à AEM, que busca combinar o baixo custo da eletrólise alcalina (AEL) com a alta eficiência da eletrólise PEM (PEMEL) (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025). Nessas células, as membranas poliméricas com condutividade aniônica substituem os diafragmas tradicionais de amianto, melhorando a condutividade iônica e reduzindo as perdas de energia. Essa abordagem híbrida representa uma alternativa promissora para a eletrólise de baixa temperatura, capaz de operar de forma eficiente e econômica em sinergia com fontes de energia renováveis (MEROUANI; HAMDAOUI, 2025).

2.3.4 Modelo Elétrico

Os eletrolisadores, em geral, apresentam três componentes principais em seu comportamento elétrico: uma característica de fonte de tensão, associada à tensão reversível; uma característica resistiva, relacionada ao sobrepotencial ôhmico; e uma característica capacitiva, atribuída ao sobrepotencial de ativação e ao efeito de dupla camada.

Para representar o comportamento elétrico de um eletrolisador, diversos autores empregam diferentes técnicas de modelagem e circuitos elétricos equivalentes. Ulleberg desenvolveu um modelo estático considerando sua operação sob condições constantes de temperatura e pressão. Como ilustrado na Figura 5, o eletrolisador pode ser representado por uma fonte de tensão constante, correspondente à tensão reversível, em série com uma resistência fixa associada às perdas ôhmicas, além de uma fonte de tensão não linear controlada pela corrente, responsável por representar os efeitos do sobrepotencial de ativação.

Figura 5 – Modelo elétrico estático.



Fonte: Adaptado de (ULLEBERG, 2003).

2.3.5 Conclusão do Capítulo

O presente capítulo dedicou-se a estabelecer o referencial teórico para a compreensão da produção de hidrogênio por meio da eletrólise da água. O objetivo central foi detalhar os princípios eletroquímicos e termodinâmicos que governam o processo de eletrólise, bem como as tecnologias de eletrolisadores consolidadas e emergentes e um método de caracterização elétrica para células eletrolíticas.

Inicialmente, a análise abordou os princípios da eletrólise da água, descrevendo as reações que ocorrem nos meios ácidos e alcalinos/neutros. A discussão sobre a termodinâmica do processo elucidou a necessidade de superar a tensão reversível, tensão mínima necessária para iniciar a eletrólise da água, governada pela temperatura e pressão de operação. A adição de uma potencial para compensar as perdas inerentes dos componentes do eletrolisador, relacionadas ao sobrepotencial ôhmico. E o sobrepotencial de ativação, responsável por vencer a barreira de potencial elétrico da dupla camada e elevar as taxas de produção.

Posteriormente, uma revisão das principais tecnologias de eletrólise da água, destacando suas características, vantagens e limitações foram abordados.

Os eletrolisadores alcalinos, são reconhecidos por sua maturidade tecnológica, robustez e baixo custo operacional. Os eletrolisadores com membrana trocadora de prótons, que se destacam pela alta pureza do hidrogênio produzido e pelo design compacto, embora com custos mais elevados devido ao uso de metais nobres. Por fim, tecnologias emergentes como os eletrolisadores de óxido sólido, que operam em altas temperaturas e apresentam elevadas eficiências energéticas, mas ainda enfrentam desafios de aplicação industrial.

Os fundamentos eletroquímicos até a análise comparativa das tecnologias existentes, fornecem a base teórica necessário para a compreensão e interpretação dos resultados

experimentais apresentados nas etapas subsequentes deste trabalho.

Diante da análise das tecnologias de eletrolisadores apresentadas, o eletrolisador alcalino foi selecionado para ser o objeto de análise sob eletrolise pulsada. A escolha dessa tecnologia foi fundamentada na maturidade, baixo custo em comparação com outras tecnologias e maior durabilidade.

Apesar do grau de maturidade alcançado pela eletrólise alcalina convencional, a eficiência energética ainda é limitado pelos sobrepotenciais de ativação e o acúmulo de bolhas gasosa na superfície dos eletrodos, que aumentam a resistência ôhmica e reduzem a eficiência do processo. Em resposta a essas limitações, estudos recentes têm explorado a aplicação de pulsos elétricos controlados como estratégia para otimizar o transporte de massa, reduzir perdas resistivas e promover a renovação dinâmica da interface eletrodo-eletrólito.

O próximo capítulo apresenta uma revisão sobre o estado da arte da eletrólise pulsada, abordando os resultados experimentais mais relevantes, os principais parâmetros de controle.

3 ELETRÓLISE PULSADA

No método convencional de eletrólise em corrente contínua, a reação de evolução de hidrogênio ocorre na interface eletrodo-eletrólito. À medida que a reação avança, forma-se uma camada de difusão na superfície do eletrodo, a qual retarda o fluxo de íons H que migram da solução a granel para a interface eletrodo/solução, tornando-se a etapa controladora da taxa. Isso leva ao aumento dos sobrepotenciais, elevando o consumo de energia para a produção de hidrogênio (VINCENT *et al.*, 2018). Além disso, as moléculas de hidrogênio produzidas no cátodo e as moléculas de oxigênio produzidas no ânodo, na forma de bolhas, aderem à superfície do eletrodo reduzindo a área efetiva da interface eletrodo/solução, aumentando a resistência e energia necessárias para a reação (MONK; WATSON, 2016).

A eletrólise pulsada tem se destacado como uma abordagem capaz de superar limitações intrínsecas da operação convencional em corrente contínua, oferecendo ganhos significativos em eficiência energética e desempenho eletroquímico.

Como demonstram os estudos recentes, a eletrólise pulsada altera os fenômenos interfaciais da célula eletrolítica, influenciando a dinâmica da dupla camada elétrica, o transporte de massa e o comportamento das bolhas gasosas. Diante desse cenário, este capítulo apresenta uma análise estruturada dos fundamentos da modulação, dos parâmetros que governam o comportamento pulsado e das principais evidências experimentais que sustentam seu potencial de aplicação.

A eletrólise pulsada da água tem emergido como uma estratégia promissora para aumentar a eficiência energética, otimizar o transporte de massa e reduzir perdas associadas a fenômenos capacitivos e de sobrepotencial. Diferente da eletrólise convencional, alimentada por corrente contínua, a Eletrólise Pulsada (EP) utiliza correntes ou tensões variáveis no tempo, geralmente na forma de pulsos periódicos ou modulações controladas (MASAUD *et al.*, 2023; CHENG *et al.*, 2024; ZHANG *et al.*, 2025).

A motivação para o uso da eletrólise pulsada está na dinâmica intrínseca da interface eletrodo-eletrólito. Sob corrente contínua, essa interface rapidamente alcança um estado quase estacionário, no qual o acúmulo de bolhas e a formação de uma camada de difusão limitam a transferência de massa e aumentam os sobrepotenciais (DEMIR *et al.*, 2018). A aplicação de pulsos interrompe periodicamente essa condição estacionária, promovendo uma descarga da dupla camada, ocasionando em um reabastecimento de espécies reativas e destacamento mais eficiente das bolhas de gases presas aos eletrodos.

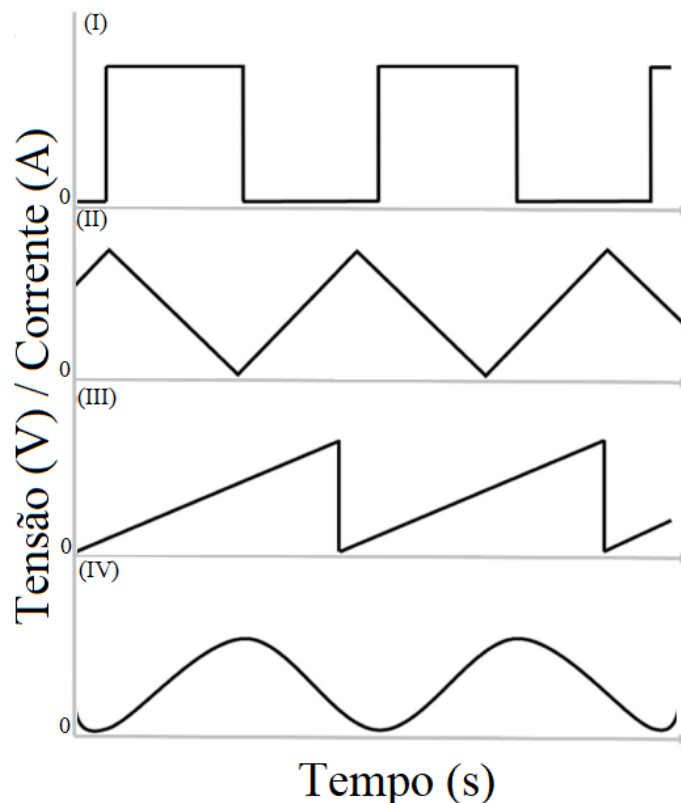
Neste capítulo são abordados os fundamentos físicos e eletroquímicos da eletrólise pulsada modulação, seus parâmetros de controle, os mecanismos associados aos ganhos de desempenho e uma análise crítica dos estudos mais recentes sobre eletrólise pulsada aplicada à produção de hidrogênio verde.

3.1 Fundamentos da Eletrólise Pulsada

3.1.1 Definição e Conceitos Gerais

A eletrólise pulsada pode ser definida como o processo eletroquímico em que a tensão ou a corrente aplicada à célula varia periodicamente no tempo (MASAUD *et al.*, 2023). A fonte de alimentação fornece um sinal que alterna entre períodos de atividade (*on-time*) e de repouso ou polarização reversa (*off-time*), caracterizando um ciclo de pulso.

Figura 6 – Formas de onda comumente utilizadas na eletrólise pulsada: (I) quadrada, (II) triangular, (III) dente de serra e (IV) senoidal.

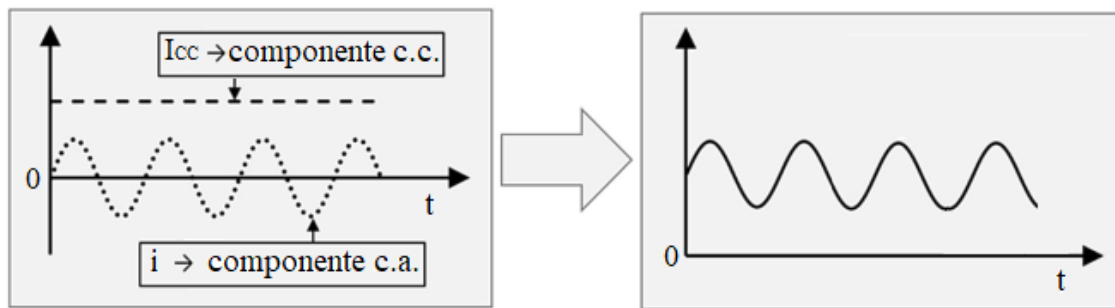


Fonte: Adaptado de (MASAUD *et al.*, 2023).

Diversas formas de onda podem ser utilizadas, incluindo pulsos quadrados, triangulares, dente de serra e senoidais. Entretanto, o pulso quadrado é o mais empregado na produção

de hidrogênio, pois mantém potenciais constantes durante os períodos ativo e inativo, permitindo melhor controle do potencial efetivo aplicado (DEMIR *et al.*, 2018; ROCHA; PROOST, 2021). A EP não deve ser confundido com modulação com ondulação (sinal c.a. sobreposto a um sinal c.c., ilustrado na Figura 7). Enquanto a ondulação representa uma flutuação contínua de corrente, a modulação pulsada consiste em pulsos discretos e controlados, com intervalos definidos de repouso. Essa distinção é importante, pois os comportamentos são diferentes e a ondulação na corrente ou tensão, podem aumentar o consumo energético sem oferecer os benefícios de relaxamento e difusão obtidos na EP (DOBÓ; PALOTÁS, 2017).

Figura 7 – Forma de onda com ondulação

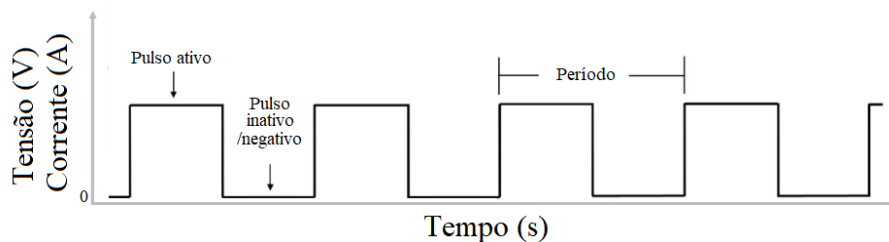


Fonte: Adaptado de (DOBÓ; PALOTÁS, 2017)

3.1.2 Representação e Parâmetros de Controle do pulso

Os principais parâmetros de um pulso são:

Figura 8 – Parâmetros característicos de um pulso elétrico na modulação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Período do pulso (T):** tempo total de um ciclo completo.
- **Tempo ativo (t_{on}) e tempo inativo (t_{off}):** durações das fases ligadas e desligadas.
- **Razão cíclica (D):**

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \times 100 (\%) \quad (3.1)$$

- **Frequência (f):** inverso do período total ($f = 1/T$).

3.2 Estudos Experimentais sobre Eletrólise Pulsada

3.2.1 *Demir et al. (2018) — Efeito do potencial de pulso no desempenho da eletrólise da água em meio alcalino*

Demir *et al.* (2018) investigaram os efeitos da aplicação de tensão pulsada em um eletrolisador alcalino operando com soluções de KOH a 10% e 15%. O sistema experimental era composto por eletrodos cilíndricos de platina, com área superficial de aproximadamente 31,4 mm² e espaçamento fixo de 10 mm entre os eletrodos.

Para a geração dos pulsos, foi empregado um circuito com driver MOSFET associado a um gerador de funções, o que permitiu o ajuste da razão cíclica e da frequência do sinal. Devido às elevadas frequências utilizadas, o consumo energético foi monitorado com o auxílio de um osciloscópio.

Os experimentos foram conduzidos aplicando pulsos de forma de onda quadrada, com amplitudes de 6 V, 8 V e 9 V, frequências variando entre 0,1 Hz e 1,2 MHz e razões cíclicas de 10% a 50%. Os testes compararam o desempenho da operação pulsada com o regime convencional de corrente contínua, com a mesma tensão de alimentação.

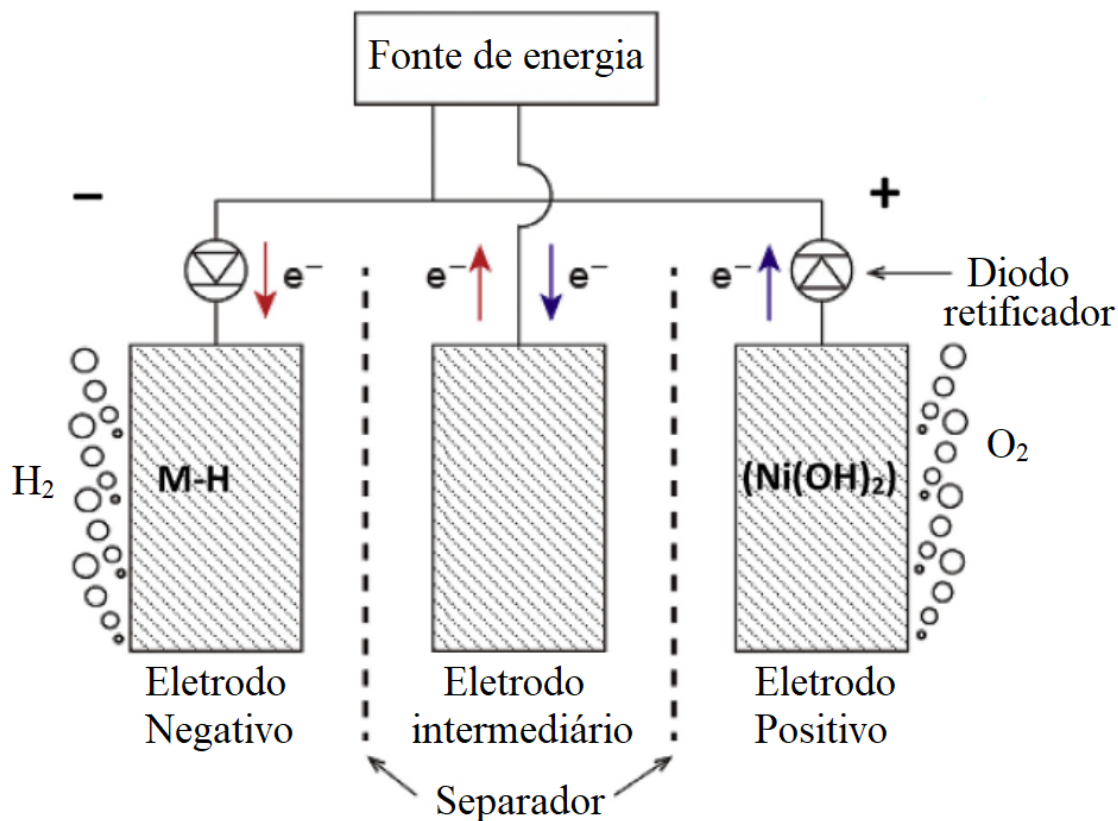
Os resultados indicaram que a aplicação da tensão pulsada reduziu o consumo de energia em até 25% em relação à eletrólise em corrente contínua, com o melhor desempenho observado para a condição de 6 V, razão cíclica de 50% e frequência de 1,2 MHz.

O mecanismo proposto pelos autores para explicar o ganho de eficiência, baseia-se no comportamento dinâmico das bolhas de gás na superfície do eletrodo. A variação periódica da tensão, promove um alívio na bolha presente na superfície do eletrodo, permitindo maior difusão do gás dissolvido. Esse fenômeno, gera um efeito que favorece a renovação do eletrólito na interface e reduz as resistências associadas ao processo de eletrólise (DEMIR *et al.*, 2018).

3.2.2 *Vincent et al. (2018) — Ciclo Eletroquímico de Divisão da Água por Corrente Pulsada para Produção de Hidrogênio*

Vincent *et al.* (2018) propôs e avaliou um ciclo eletroquímico baseado na aplicação de corrente pulsada em uma célula alcalina convencional, com o objetivo de investigar os efeitos da modulação de corrente sobre o desempenho da eletrólise da água. O sistema experimental foi composto por um conjunto de três eletrodos: um cátodo de $Ni(OH)_2$, um ânodo de hidreto metálico (MH) e um eletrodo intermediário de MnO_2 , todos com área efetiva de 4 cm².

Figura 9 – Esquemático da célula utilizada por Vincent *et al.* (2018), no fornecimento de corrente pulsada.



Fonte: Adaptado de (VINCENT *et al.*, 2018).

Os pulsos de **corrente controlada** foram gerados por meio de um gerador de sinais, variando entre 0 e 0,6 A/cm², com frequências compreendidas entre 0,05 Hz e 500 Hz. O comportamento eletroquímico do sistema foi avaliado por meio de curvas de polarização experimentais, nas quais a densidade de corrente foi aumentada progressivamente de 0 a 0,6 A/cm², em incrementos de 0,1 A/cm².

Os resultados experimentais mostraram que, em frequências elevadas (como 50 Hz e acima), o tempo durante o qual o pulso permanece ligado é curto demais para que a camada de difusão atinja o estado estacionário (VINCENT *et al.*, 2018). Em condições normais de eletrólise contínua, espécies reagentes próximas ao eletrodo, como moléculas de água, H, OH ou íons presentes no eletrólito, são consumidas mais rapidamente do que conseguem ser repostas por difusão, formando um gradiente de concentração. No regime pulsado, cada interrupção momentânea da corrente permite que essas espécies se difundam de volta para a interface eletrodo–eletrólito, restaurando sua concentração local antes do início do pulso seguinte (VINCENT *et al.*, 2018). Esse “retorno” não significa movimento ativo dos íons, mas sim uma ação natural da difusão, que tende a nivelar regiões de concentração mais baixa próximas ao

eletrodo. Como resultado, a concentração superficial é continuamente renovada, diminuindo a espessura e a intensidade dos gradientes de concentração que normalmente se formariam em regime contínuo. A redução desses gradientes diminui as limitações de transporte de massa e, conseqüentemente, reduz a tensão total exigida pela célula durante a eletrólise pulsada (VINCENT *et al.*, 2018).

O estudo demonstrou que o desempenho da célula de evolução de hidrogênio, da célula de evolução de oxigênio e da célula total melhorou com o aumento da frequência, atribuindo-se esse efeito à mitigação das perdas associadas à camada de difusão. O melhor desempenho foi observado para uma densidade de corrente de $0,2 \text{ A/cm}^2$, onde a tensão da célula alcançou 1,69 V a 25 °C sob operação a 500 Hz (VINCENT *et al.*, 2018).

Segundo Vincent *et al.* (2018), esses resultados evidenciam que a modulação por corrente pulsada, favorece a renovação das espécies reativas na interface eletrodo–eletrólito e reduz as limitações difusivas, contribuindo diretamente para o aumento da eficiência energética do processo de eletrólise da água.

3.2.3 Cheng *et al.* (2024) — Eletrólise de pulso otimizada para aumento da eficiência da produção de hidrogênio

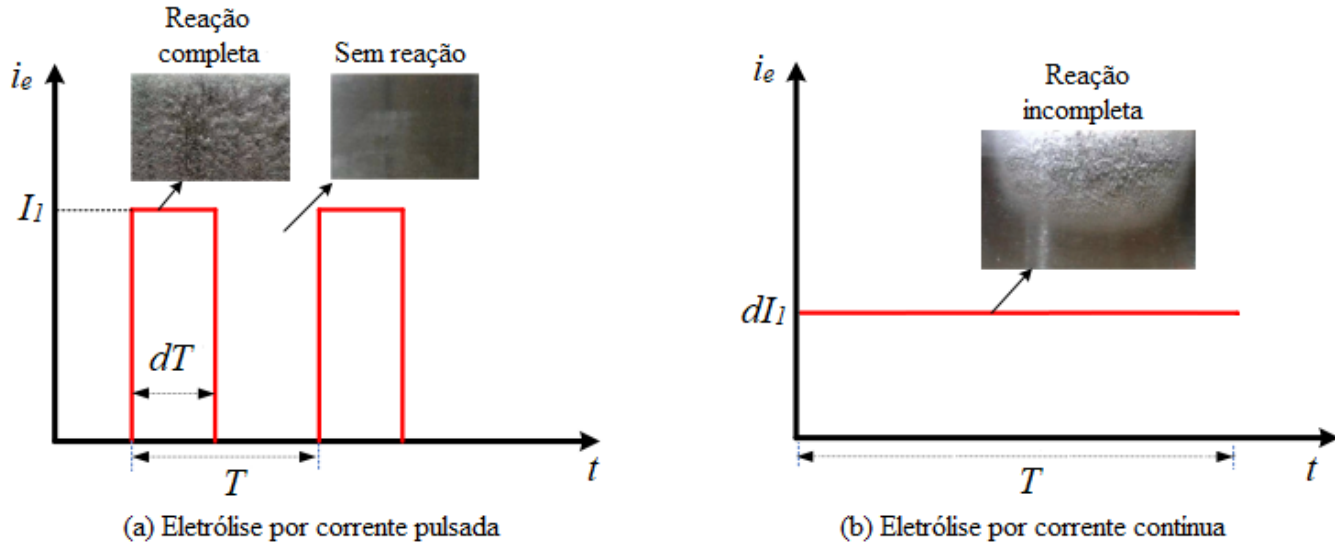
Cheng *et al.* (2024) realizaram uma análise sobre os efeitos da modulação de corrente pulsada em um eletrolisador alcalino de 10 kW, com foco na otimização dos parâmetros de pulso e na relação entre a dupla camada elétrica e a eficiência global do processo.

O estudo demonstrou que a eficiência da eletrólise pulsada está correlacionada à razão entre o tempo de carregamento da capacitância de dupla camada (DLC, do inglês *Double Layer Capacitance*) e o tempo efetivo de produção de hidrogênio. Quando essa relação é devidamente ajustada, o processo se aproxima de uma condição de operação ideal, na qual a energia elétrica aplicada é utilizada de forma mais eficiente para promover a eletrólise da água.

Na plataforma experimental, foram aplicados pulsos de corrente controlada com diferentes magnitudes e razões cíclicas, mantendo-se a mesma potência média de entrada observada na operação em corrente contínua. Os resultados evidenciaram que, sob baixa potência, a eletrólise contínua não é capaz de manter uma reação completa, devido à insuficiência de energia para superar os sobrepotenciais e manter o transporte de massa adequado. Entretanto, a operação pulsada, com pulsos de maior corrente e em baixa frequência, permite que o eletrolisador alcance uma reação completa de forma intermitente, alternando entre períodos de atividade e repouso,

conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Comparação entre eletrólise pulsada e corrente contínua sob a mesma potência média de entrada.



Fonte: Adaptado de (CHENG *et al.*, 2024).

Os autores concluíram que o princípio da eletrólise pulsada consiste em promover reações completas em regime intermitente, com pulsos de baixa frequência e alta intensidade (maiores valores de densidades de correntes), permitindo um melhor aproveitamento da energia aplicada. Constatou-se que valores menores de capacitância de dupla camada favorecem a eficiência, pois reduzem o tempo necessário para o carregamento da capacitância da dupla camada e ampliam o intervalo efetivo destinado à produção de hidrogênio.

Além disso, verificou-se que pulsos de maior magnitude resultam em uma eficiência significativamente superior, uma vez que reduzem o tempo de carga da DLC e prolongam o período produtivo. De forma geral, o estudo concluiu que o controle adequado da amplitude do pulso e da razão cíclica é determinante para maximizar o desempenho do sistema, estabelecendo uma correlação direta entre a dinâmica da dupla camada elétrica e a eficiência energética global do processo de eletrólise alcalina (CHENG *et al.*, 2024).

3.2.4 Rocha e Proost (2021) — Avaliação dos efeitos da largura de pulso e do ciclo de trabalho no desempenho de eletrodos para produção de hidrogênio em eletrólise pulsada.

Rocha e Proost (2021) investigaram os efeitos da aplicação de pulsos de tensão e de corrente na eletrólise alcalina da água empregando eletrodos à base de níquel. Os eletrodos

utilizados consistiam em uma espuma metálica 3D fabricada em liga Inconel 625, com dimensões planas de 2×2 cm. Duas folhas, cada uma com espessura de 1,6 mm, posicionadas em paralelo e separadas por uma membrana de troca aniônica. O eletrólito empregado foi uma solução aquosa de KOH.

A modulação foi aplicada por meio de um potenciostato (Solartron Modulab XM), configurado para gerar pulsos quadrados de tensão e corrente. No modo de tensão, os pulsos apresentavam valores base e de pico de 1,2 V e 2,0 V e no modo de corrente, a amplitude variava entre 0 e 0,3 A. Os períodos de pulso aplicados eram de 100 s a 1 ms (0,01 Hz a 1 kHz).

Os autores observaram que, uma vez estabelecido o regime estacionário de carga e descarga da dupla camada elétrica, pulsos de tensão de curta duração não eram capazes de sustentar correntes suficientemente elevadas para promover a geração significativa de hidrogênio. Como consequência, os pulsos de tensão não apresentaram vantagem mensurável em relação ao modo convencional de corrente contínua.

Por outro lado, a aplicação de pulsos de corrente revelou uma redução do sobrepotencial da célula (avaliado ao longo de 10 min) da ordem de 30 mV em comparação ao regime c.c., tanto sob convecção natural quanto sob fluxo forçado de eletrólito, o que representa aproximadamente 4% de diminuição da sobretensão global.

Para um ciclo de trabalho de 50%, a maior redução de sobretensão (17%) foi obtida com períodos de pulso mais curtos (2 ms). Esse efeito tornou-se ainda mais evidente ao diminuir o ciclo de trabalho para 20%, atingindo reduções de até 28%. De acordo com os autores, esses ganhos decorrem da diminuição da espessura da camada de difusão e da remoção facilitada das bolhas gasosas aderidas à superfície eletroquímica.

Assim, os resultados de Rocha e Proost (2021) indicam que pulsos de corrente com curta duração (na faixa de milissegundos) e baixos ciclos de trabalho (10–20%) constituem uma estratégia promissora para aprimorar o desempenho da eletrólise alcalina.

Em síntese, Rocha e Proost (2021) concluíram que aplicação dos pulsos de corrente apresentam desempenho superior ao dos pulsos de tensão e que a redução do ciclo de trabalho é benéfica em toda a faixa de períodos avaliados, principalmente para pulsos mais curtos (frequências mais elevadas).

3.2.5 Shimizu *et al.* (2006) — Método de geração de hidrogênio por eletrólise da água usando uma fonte de alimentação de pulso ultracurto.

Shimizu *et al.* (2006) examinaram a possibilidade de eletrólise da água por pulsos ultracurtos. O eletrolisador alcalino continha eletrodos de placas de platina de 3,3cm² dispostas 3cm uma da outra e 3,4 L de solução de KOH 1 M.

Uma fonte de alimentação c.c. convencional e uma fonte de alimentação de pulsos ultracurtos foram utilizadas para comparação. A abordagem adotada, consistia na aplicação de pulsos ultracurtos (300 ns–5 μ s).

Os autores reportaram, que no regime c.c., o aumento da tensão aplicada eleva a corrente e a taxa de produção de hidrogênio, porém reduz a eficiência, que decaía de 40% a 2,2 V para 8% a 12,6 V. Esse comportamento foi atribuído a perda da maior parte da energia adicional, essa não é convertida em reação, mas dissipada como calor, em decorrência do acúmulo da dupla camada elétrica e das limitações impostas pela difusão iônica.

Em contraste, a eletrólise pulsada, apresenta um comportamento distinto. Enquanto no regime c.c. a taxa de produção se desvia da taxa ideal com o aumento da potência, a operação pulsada mantém uma relação quase proporcional entre potência de entrada e geração de hidrogênio. Observou-se também que para potências maiores as tensões na células diminuem, consequentemente, a eficiência aumenta. Isso decorre da menor dissipação de energia por elétron e da natureza mais "eficiente" da forma de onda pulsada, que reduz perdas capacitivo-difusivas Shimizu *et al.* (2006).

Em síntese, a eletrólise c.c. é um processo de difusão limitado com queda de eficiência em altas tensões, enquanto a eletrólise pulsada ultracurta opera em regime dominado pela transferência, mantendo ou até ampliando a eficiência mesmo com o aumento da potência. Essa distinção evidencia o elevado potencial da modulação pulsada como alternativa tecnológica para eletrolisadores de alto desempenho Shimizu *et al.* (2006).

3.2.6 Zhang *et al.* (2025) — Eletrólise Dinâmica Pulsada em PEMWE

Zhang *et al.* (2025) investigaram os efeitos da aplicação de tensão pulsada em uma célula eletrolítica de membrana trocadora de prótons, com o objetivo de compreender como a modulação elétrica influencia a dinâmica interfacial e o desempenho eletroquímico do sistema.

No estudo, foram aplicados pulsos de tensão controlados em baixas frequências para

avaliar a influência da frequência (0,0125 Hz, 0,025 Hz, 0,05 Hz, 0,1 Hz e 0,2 Hz) e da razão cíclica (20%-90%) sobre os fenômenos de transporte de massa, o comportamento das bolhas gasosas e a eficiência global da célula.

As análises de imagem em alta velocidade revelaram que a aplicação da modulação pulsada, promove a formação de bolhas menores e o seu destacamento precoce da superfície do eletrodo. Esse fenômeno reduz o bloqueio de área ativa causado pelo acúmulo de gás e aumenta a disponibilidade de sítios catalíticos expostos ao eletrólito. Em termos energéticos, essa otimização interfacial resultou em uma redução média de sobrepotencial entre **180 e 220 mV**, e consequentemente, em ganhos de eficiência de até **28%** com base no poder calorífico superior (HHV, do inglês *High Heating Value*). O ponto ótimo de operação foi na frequência de 0,1 Hz com uma razão cíclica de 50%.

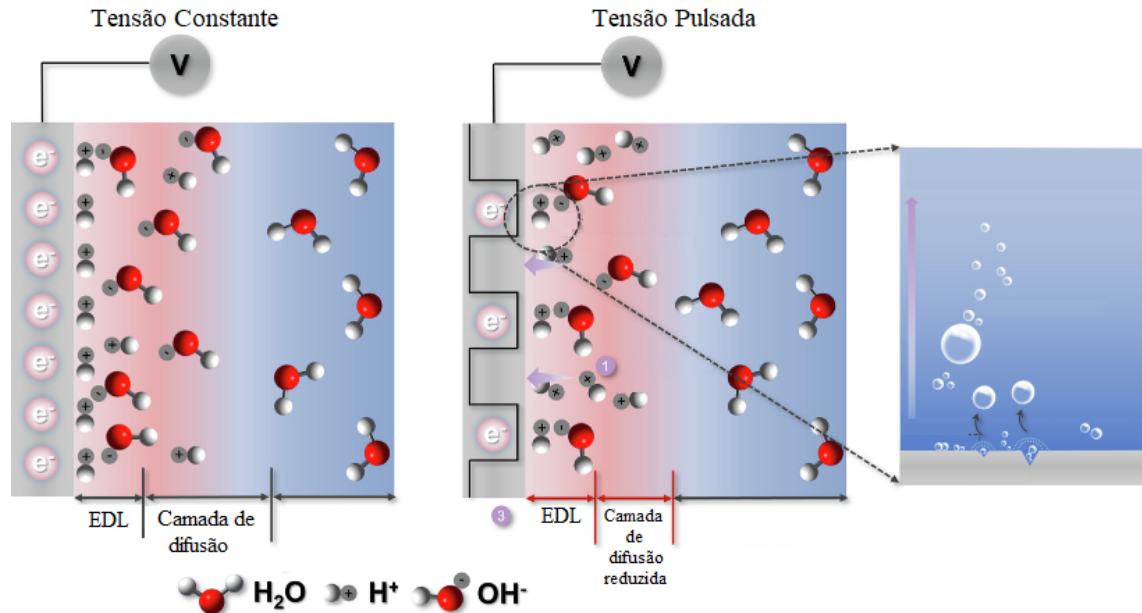
O estudo mostrou que a aplicação de pulsos provoca alterações na dinâmica de transporte e na organização interfacial da célula eletrolítica. Um dos efeitos observados é a redução da espessura da camada de difusão. Sob tensão constante, essa camada tende a crescer progressivamente, à medida que os reagentes são consumidos na superfície do eletrodo e os produtos se acumulam, o que dificulta o transporte de prótons e elétrons e impõe uma limitação. Já no regime pulsado, o período *off* permite que essa região "relaxe", criando tempo para que o eletrólito renove o suprimento de H. A tensão aplicada de forma intermitente, força o sistema a alternar entre momentos de forte campo elétrico e momentos de repouso, o que facilita a dispersão de íons acumulados e impede a formação de gradientes de concentração mais espessos. Como resultado, a camada de difusão é constantemente renovada, elevando a disponibilidade de prótons na interface e acelerando a taxa de reação. Outro fenômeno é a perturbação da dupla camada elétrica. Quando a frequência dos pulsos coincide com o tempo característico de estabelecimento da dupla camada, a eletrolise pulsada impede que o sistema alcance o regime estacionário típico (ZHANG *et al.*, 2025).

Além disso, as análises complementares de evolução de bolhas e de ângulo de contato, demonstraram que o estado de descarga dielétrica induzido pelos pulsos elétricos facilita a liberação das bolhas da superfície catalítica. Esse mecanismo, nomeado pelos autores de “bombeamento”, expõe os sítios ativos ao eletrólito, restaurando a reatividade da interface e reduzindo os efeitos de polarização.

A Figura 11 ilustra o contraste entre o comportamento da camada de difusão sob tensão constante e sob regime de tensão pulsada, evidenciando a influência da modulação sobre

o transporte de massa e a remoção de bolhas gasosas, elementos-chave para o aumento da eficiência do processo.

Figura 11 – Comparação entre o comportamento da camada de difusão sob tensão constante e sob tensão pulsada no cátodo.



Fonte: Adaptado de (ZHANG *et al.*, 2025).

3.3 Mecanismos de Melhorias Observados na Literatura

Com base na revisão dos estudos, podem ser identificados quatro mecanismos principais que explicam o desempenho aprimorado da eletrólise pulsada:

- **Controle da carga e descarga da dupla camada:** Pulsos de corrente permitem uma recarga parcial e controlada da dupla camada, mantendo a reação ativa e minimizando perdas capacitivas. Esse efeito é destacado por Vincent *et al.* (2018), Cheng *et al.* (2024), Zhang *et al.* (2025)
- **Remoção de bolhas gasosas e renovação da área ativa:** A aplicação dos pulsos favorece um alívio na geração das bolhas e promove sua liberação e evita o bloqueio da superfície do eletrodo, como observado por Zhang *et al.* (2025), Demir *et al.* (2018).
- **Redução dos sobrepotenciais de ativação e ôhmicos:** A alternância entre períodos de alta corrente e repouso permite relaxação térmica e redução de resistências de contato, conforme apontado por Shimizu *et al.* (2006), Demir *et al.* (2018).

Em geral, a revisão apresentou um consenso de que o desempenho ótimo ocorre quando a largura de pulso (t_{on}) é da mesma ordem de grandeza do tempo característico de

resposta da dupla camada ($\tau_{duplacamada}$). Entretanto, apenas Cheng *et al.* (2024) apresentou uma proposta para modelar o comportamento dinâmico e quantificar a dupla camada como um capacitância. Contudo, o modelo elétrico apresentado por ele não descreve a resposta dinâmica natural da célula (SOUSA, 2025).

3.4 Conclusões do capítulo

Este capítulo apresentou uma breve revisão sobre eletrólise pulsada. O conjunto de estudos analisados demonstra que a aplicação de pulsos de corrente ou tensão modifica significativamente a dinâmica interfacial entre eletrodo e eletrólito, impactando de forma direta a eficiência energética e a taxa de produção de hidrogênio.

Os trabalhos revisados revelaram que a eficiência da eletrólise pulsada depende da relação entre os tempos característicos de carga e descarga da dupla camada elétrica. Quando a razão cíclica e a frequência são ajustadas de forma a respeitar essa relação, obtém-se um regime de operação em que os sobrepotenciais são minimizados e a área efetiva dos eletrodos é maximizada.

De modo geral, observa-se um consenso de que a eletrólise pulsada atua simultaneamente sobre o controle dinâmico da dupla camada elétrica, a mitigação dos sobrepotenciais de ativação e ôhmico, e na melhora do transporte de massa e da liberação de gás. O estudo de Zhang *et al.* (2025), demonstrou experimentalmente que a modulação pulsada favorece a liberação precoce das bolhas de hidrogênio no eletrodo, reduzindo as limitações de difusão e o bloqueio da superfície ativa, o que se traduz em menor resistência de transporte e maior eficiência global. Esses mecanismos ocorrem de forma interdependente e explicam os ganhos de eficiência relatados na literatura, que variam entre 10 e 30% em condições otimizadas.

Embora a maior parte dos estudos revisados tenha sido conduzida em escalas de baixa potência, com exceção de Cheng *et al.* (2024), os resultados demonstraram o potencial da modulação pulsada como uma técnica eficaz para o aprimoramento da eletrólise da água.

Um ponto a observar, é que apenas uma das literaturas, propôs uma caracterização elétrica de um eletrolisador. Entretanto, o modelo proposto por Cheng *et al.* (2024), não descreve com precisão as respostas de um eletrolisador em operação dinâmica (SOUSA, 2025).

Na Seção 2.2, foi apresentado que as características construtivas das células, afetam diretamente a resposta de tensão. Logo, as dimensões, concentração do eletrólito, materiais e processos de preparação dos eletrodos, influenciam diretamente nos tempos de respostas.

Esse comportamento fica evidente quando se observam os resultados obtidos para diferentes combinações de parâmetros de pulso, especialmente no que diz respeito à frequência de operação. Cada célula eletrolítica analisada apresentou uma faixa de frequências ótimas bastante distinta, o que reforça a forte dependência da eletrólise pulsada em relação às características construtivas e dinâmicas de cada dispositivo. Essa discrepância é ainda mais pronunciada quando se compara a amplitude das densidades de correntes resultantes do uso de pulsos de tensão, com as amplitudes das densidades de correntes dos pulsos de corrente. Essas diferenças de abordagem, amplitudes de densidades de correntes distintas (resultantes ou diretas), afetam os mecanismos de transporte e as respostas transitórias da célula, contribuindo para a variabilidade observada nos parâmetros ótimos de operação.

Logo, torna-se necessária a utilização de equipamentos capazes de operar em uma ampla faixa de frequências e amplitudes, permitindo realizar uma varredura completa dos parâmetros de pulso permitindo identificar o ponto ótimo de operação da eletrólise pulsada. No entanto, poucos estudos detalham o projeto dos circuitos eletrônicos capazes/utilizados para gerar pulsos adequados para aplicações experimentais.

Diante dos resultados apresentados por Rocha e Proost (2021), pulsos de corrente apresentaram uma performance superior ao pulsos de tensão. Além de apresentar desempenho superior em termos de eficiência, a aplicação de pulsos de corrente mostra-se mais adequada do ponto de vista físico, uma vez que a corrente elétrica é a grandeza que atua diretamente no carregamento e na descarga da dupla camada elétrica, a qual governa o sobrepotencial de ativação descrito na Seção 2.2 (2.11). Dessa forma, a adoção de pulsos de corrente permite atuar diretamente sobre o mecanismo eletroquímico dominante, justificando sua escolha em detrimento da modulação por pulsos de tensão.

4 FONTE DE ALIMENTAÇÃO PULSADA

A escolha da topologia de fonte de corrente constitui uma etapa inicial no desenvolvimento de sistemas destinados à eletrólise pulsada, uma vez que a forma de onda, a estabilidade e a precisão da corrente aplicada influenciam diretamente o comportamento eletroquímico da célula. Embora a literatura apresente uma ampla variedade de arquiteturas capazes de operar como fontes de corrente, nem todas atendem simultaneamente aos requisitos impostos por aplicações experimentais que demandam controle fino, flexibilidade de modulação e simplicidade de implementação.

Dessa forma, antes da definição da topologia adotada neste trabalho, realizou-se uma análise de diferentes arquiteturas de fontes de corrente descritas na literatura, com o objetivo de delimitar o espaço de soluções tecnicamente viáveis para operação em regime pulsado. Essa análise avaliou as vantagens, limitações e faixas típicas de aplicação de cada topologia, e não apenas selecionar uma solução por conveniência.

Arquiteturas multiestágio, híbridas ou voltadas a aplicações industriais de alta potência demonstram desempenho superior em termos de corrente máxima, dinâmica extrema e recuperação de energia. No entanto, tais soluções introduzem elevada complexidade de controle, maior custo, necessidade de sistemas digitais avançados, exigências térmicas rigorosas e um número significativo de componentes, tornando-as incompatíveis com o escopo experimental e os objetivos deste trabalho, que prioriza a investigação controlada dos efeitos da corrente pulsada em escala de laboratório.

Nesse contexto, fontes de corrente baseadas em amplificadores operacionais destacam-se por oferecerem um compromisso adequado entre precisão, flexibilidade e simplicidade. Em particular, a topologia conhecida como *Howland Current Pump*, apresenta características que a tornam apropriada para a aplicação estudada. Trata-se de uma fonte de transcondutância linear, capaz de operar de forma bidirecional e simétrica, preservando fielmente a forma de onda imposta pelo sinal de controle e mantendo elevada impedância de saída mesmo diante de variações dinâmicas da carga.

Além disso, a realimentação inerente à topologia Howland confere estabilidade ao sistema frente às mudanças de impedância típicas da carga, situação comum em células eletrolíticas durante a aplicação de pulsos, conforme discutido no Capítulo 3. Essa característica permite a geração de correntes contínuas, alternadas ou pulsadas com boa previsibilidade. Estudos recentes demonstram, ainda, que, quando adequadamente projetada e balanceada, essa

topologia pode ser estendida para faixas de corrente da ordem de ampères, mantendo níveis satisfatórios de precisão, o que amplia sua aplicabilidade para além de contextos tradicionalmente associados a baixas correntes.

Diante desses aspectos, a topologia Howland foi selecionada não por ser a única solução possível, mas por representar a alternativa mais adequada ao escopo, à escala experimental e aos objetivos deste trabalho. As seções seguintes deste capítulo apresentam o princípio de funcionamento da fonte de corrente Howland, suas condições de projeto, limitações práticas e adaptações necessárias para sua aplicação em sistemas de eletrólise pulsada.

4.1 Princípios de funcionamento da topologia

A investigação da Eletrólise Pulsada (EP) da água demanda um controle sobre os parâmetros elétricos aplicados à célula eletrolítica. A corrente, em particular, é uma variável de processo que governa diretamente a cinética das reações de desprendimento de hidrogênio e oxigênio, influenciando a eficiência energética, a taxa de produção de gás e a degradação dos eletrodos (ROCHA; PROOST, 2021).

Para conduzir um estudo dos efeitos da frequência, razão cíclica e forma de onda, é imperativo dispor de uma fonte de alimentação com ampla faixa de operação.

Diante dessa necessidade, este projeto adota a topologia Fonte de Corrente Howland (HCS, do inglês *Howland Current Source*) como base para a fonte de alimentação pulsada. A escolha desta arquitetura é fundamentada em um conjunto de características para a aplicação em questão:

- **Característica de Fonte de Corrente Real:** A principal vantagem da topologia HCS. Quando devidamente balanceada, sua impedância de saída é altíssima (BATISTA *et al.*, 2023). Isso garante que a corrente fornecida à célula seja definida exclusivamente pelo sinal de controle e permaneça constante, mesmo diante de variações na impedância da carga (BATISTA *et al.*, 2023), que pode flutuar durante o processo de eletrólise devido à formação de bolhas e mudanças na concentração do eletrólito.
- **Flexibilidade de Operação e Formas de Onda:** A HCS é uma fonte linear e bipolar, capaz de fornecer tanto correntes positivas quanto negativas com transições pelo ponto de corrente zero (LAM, 2023; TEXAS INSTRUMENTS, 2013). Essa capacidade permite explorar os efeitos de pulsos. Além disso, por ser controlada por uma tensão de entrada (v_i), sendo possível gerar uma vasta gama de formas de onda (quadrada, senoidal, triangular,

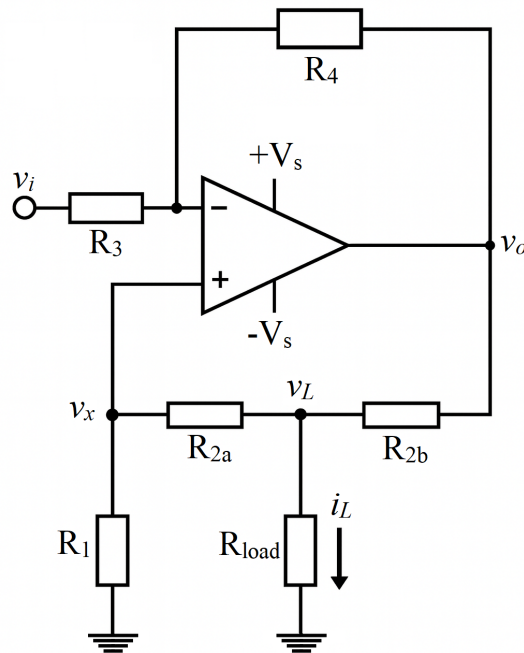
etc.), limitadas pela capacidade do gerador de sinal que a comanda.

- **Variabilidade de Parâmetros:** A arquitetura permite um controle fácil e programável da frequência e da razão cíclica dos pulsos. Esses parâmetros são ajustados diretamente no sinal de controle de entrada, permitindo uma varredura precisa das condições experimentais (LAM, 2023; TEXAS INSTRUMENTS, 2013).

4.2 Modelagem Matemática e Princípio de Funcionamento

O circuito apresentado na Figura 12 ilustra a topologia conhecida como *Howland Current Source*. Projetada para operar como uma Fonte de Corrente Controlada por Tensão. Sua função é fornecer uma corrente de carga (i_L) que seja linearmente proporcional a uma tensão de entrada (v_i), de forma independente da impedância da carga (Z_L) (TEXAS INSTRUMENTS, 2013).

Figura 12 – Diagrama elétrico do circuito HCS.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A funcionalidade do circuito é fundamentada em três características intrínsecas dos amplificadores operacionais (AmpOps) ideais:

1. **Ganho de Malha Aberta Infinito:** Em malha fechada com realimentação negativa, o AmpOp ajusta sua tensão de saída (v_o) para forçar que a diferença de tensão entre suas entradas inversora e não-inversora seja nula. Este princípio é conhecido como "curto-

circuito virtual".

2. **Impedância de Entrada Infinita:** As entradas do AmpOp não drenam corrente. Essa característica é a premissa para as análises de corrente nas malhas do circuito.
3. **Impedância de Saída Nula:** A saída do AmpOp se comporta como uma fonte de tensão ideal.

A topologia HCS emprega simultaneamente malhas de realimentação negativa e positiva. A realimentação negativa (via R_4) busca estabilizar o circuito, enquanto a realimentação positiva (via R_{2a} e R_1) tem a função de elevar a impedância de saída vista pela carga a um nível teoricamente infinito. Este balanço preciso entre as malhas garante o comportamento de fonte de corrente.

A dedução da corrente de carga (i_L) inicia-se pela análise da malha de realimentação negativa. Considerando a alta impedância de entrada do AmpOp, o terminal inversor não drena corrente. Consequentemente, a corrente que flui através de R_3 é a mesma que flui por R_4 , o que pode ser expresso pela seguinte relação:

$$\frac{v_o - v_x}{R_4} = \frac{v_x - v_i}{R_3} \quad (4.1)$$

Na malha de realimentação positiva, a tensão no nó v_x é determinada pelo divisor de tensão formado por R_1 e R_{2a} , visto que a entrada não-inversora do AmpOp também apresenta impedância de entrada elevada. Assim, a relação entre v_x e a tensão na carga v_L é:

$$v_x = v_L \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{2a}} \quad (4.2)$$

Substituindo a expressão para v_x de (4.2) em (4.1), e isolando a tensão de saída do amplificador (v_o), obtém-se:

$$v_o = v_L \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{2a}} + v_L \cdot \frac{R_4 \cdot R_1}{R_3 \cdot (R_1 + R_{2a})} - \frac{R_4}{R_3} \cdot v_i \quad (4.3)$$

A corrente na carga (i_L) pode ser expressa aplicando-se a Lei de Kirchhoff das Correntes no nó v_L . A corrente fornecida pela saída do AmpOp através de R_{2b} se divide entre a carga (Z_L) e a malha de realimentação positiva. A equação resultante é:

$$i_L = \frac{v_L}{Z_L} = \frac{v_o - v_L}{R_{2b}} - \frac{v_L}{R_1 + R_{2a}} \quad (4.4)$$

Para obter a função de transferência geral do circuito, (4.3) é substituída n(4.4), O primeiro passo é rearranjar (4.4) para obter uma expressão para v_o .

$$i_L = \frac{v_o}{R_{2b}} - \frac{v_L}{R_{2b}} - \frac{v_L}{R_1 + R_{2a}} \quad (4.5)$$

Isolando o termo $\frac{v_o}{R_{2b}}$, (4.6) é obtida.

$$\frac{v_o}{R_{2b}} = i_L + \frac{v_L}{R_{2b}} + \frac{v_L}{R_1 + R_{2a}} \quad (4.6)$$

Multiplicando toda a equação por R_{2b} e colocando o termo v_L em evidencia.

$$v_o = i_L \cdot R_{2b} + v_L \cdot \left(1 + \frac{R_{2b}}{R_1 + R_{2a}}\right) \quad (4.7)$$

Igualando as duas expressões, (4.7) e (4.3), para v_o .

$$i_L \cdot R_{2b} + v_L \cdot \left(1 + \frac{R_{2b}}{R_1 + R_{2a}}\right) = v_L \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{2a}} + v_L \cdot \frac{R_4 \cdot R_1}{R_3 \cdot (R_1 + R_{2a})} - \frac{R_4}{R_3} \cdot v_i \quad (4.8)$$

Isolando o termo $i_L \cdot R_{2b}$ e utilizando a relação $v_L = i_L \cdot Z_L$, o termo v_L é substituído.

$$i_L \cdot R_{2b} = (i_L \cdot Z_L) \cdot \left[\frac{R_1}{R_1 + R_{2a}} + \frac{R_4 \cdot R_1}{R_3 \cdot (R_1 + R_{2a})} - \left(1 + \frac{R_{2b}}{R_1 + R_{2a}}\right) \right] - \frac{R_4}{R_3} \cdot v_i \quad (4.9)$$

Isolando i_L e simplificando os termos entre colchetes.

$$i_L = \frac{-\frac{R_4}{R_3} \cdot v_i}{R_{2b} - Z_L \cdot \left[\frac{R_4 \cdot R_1 - R_3 \cdot (R_{2a} + R_{2b})}{R_3 \cdot (R_1 + R_{2b})} \right]} \quad (4.10)$$

Para eliminar as frações, é possível multiplicar o numerador e denominador por $-R_3 \cdot (R_1 + R_{2b})$, (4.11) representa a função de transferência geral do circuito, descrevendo a corrente de saída i_L em função da tensão de entrada v_i e de todos os componentes do circuito, incluindo a impedância da carga Z_L .

$$i_L = \frac{R_4 \cdot (R_1 + R_{2a})}{Z_L \cdot (R_4 \cdot R_1 - R_3 \cdot (R_{2a} + R_{2b})) - R_3 \cdot R_{2b} \cdot (R_1 + R_{2a})} \cdot v_i \quad (4.11)$$

Para que o circuito opere como uma fonte de corrente ideal, i_L deve ser independente da impedância da carga Z_L . Analisando (4.11), esta condição é satisfeita quando o termo que multiplica Z_L no denominador é nulo (BATISTA *et al.*, 2023):

$$Z_L \cdot (R_4 \cdot R_1 - R_3 \cdot (R_{2a} + R_{2b})) = 0 \quad (4.12)$$

Isso leva à condição de balanço fundamental para a operação do circuito Howland:

$$R_4 \cdot R_1 = R_3 \cdot (R_{2a} + R_{2b}) \quad (4.13)$$

Quando (4.13) é satisfeita, (4.11) é simplificada, resultando na equação de transcondutância ideal do circuito. Esta equação define a relação linear entre a tensão de entrada e a corrente de saída (BATISTA *et al.*, 2023):

$$i_L = -\frac{R_4}{R_3 \cdot R_{2b}} \cdot v_i \quad (4.14)$$

A equação (4.11) permanece relevante para a análise de erros, pois demonstra que qualquer desvio da condição de balanço na equação (4.13) reintroduz uma dependência da carga (Z_L), o que pode gerar não-linearidades na corrente de saída, especialmente se Z_L ou R_{2b} variarem durante a operação (BATISTA *et al.*, 2023; LAM, 2023; TEXAS INSTRUMENTS, 2013).

Nesse contexto, o resistor R_{2b} funciona como o elemento sensor de corrente (*sense resistor*). A queda de tensão sobre este componente é utilizada pela malha de realimentação para regular a corrente de saída. Como a corrente de carga i_L flui majoritariamente através de R_{2b} , a precisão e a estabilidade térmica deste resistor determinam o desempenho e a linearidade da fonte de corrente (BATISTA *et al.*, 2023).

4.2.1 Análise de Vantagens, Desvantagens e Desafios de Implementação da Topologia

A topologia *Howland Current Source* (HCS) apresenta um conjunto de características que a tornam adequada em aplicações que demandam geração de corrente controlada. Uma de suas vantagens reside na simplicidade construtiva do projeto. O circuito HCS clássico exige apenas um único amplificador operacional associado a um conjunto de resistores, resultando em uma solução de baixo custo e fácil implementação (BATISTA *et al.*, 2023). Outro ponto favorável é sua capacidade intrínseca de operação bipolar, permitindo fornecer correntes positivas e negativas sem a necessidade de circuitos auxiliares. Além disso, a relação linear entre a tensão

de entrada (v_i) e a corrente de saída (I_L) simplifica substancialmente o projeto dos sistemas de controle, tornando a HCS uma topologia de uso direto em aplicações que exigem resposta previsível e ajustável.

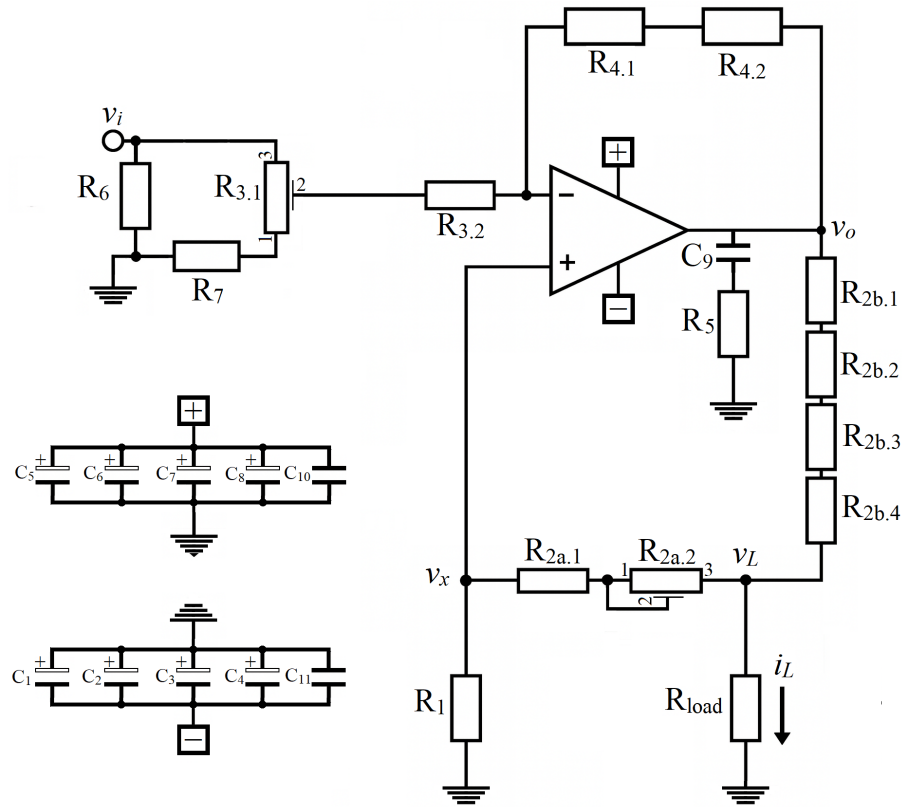
Apesar de suas vantagens, a implementação prática da HCS envolve uma série de desafios que exigem atenção cuidadosa. O mais crítico deles está relacionado à sensibilidade ao descasamento dos resistores. A precisão e a estabilidade do circuito dependem da condição de balanço entre as resistências; porém, mesmo resistores discretos de alta precisão (0,1%) podem apresentar variações suficientes para degradar a rejeição de modo comum e reduzir a impedância de saída, comprometendo a independência da corrente em relação à impedância da carga (BATISTA *et al.*, 2023). Como consequência, a corrente aplicada à célula pode tornar-se sensível à tensão do eletrolisador, o que prejudica a confiabilidade dos ensaios de eletrólise pulsada.

Outro desafio consiste na gestão térmica do circuito. Durante a operação em regime, tanto o amplificador operacional quanto o resistor sensor (R_{2b}) podem sofrer aquecimento expressivo, o qual induz deriva nos parâmetros elétricos e introduz erros de medição e controle (TEXAS INSTRUMENTS, 2013). Em condições mais severas, a dissipação excessiva pode comprometer a integridade dos dispositivos (BATISTA *et al.*, 2023). Soma-se a isso o fato de que amplificadores operacionais de potência, necessários para correntes mais elevadas, apresentam especificações menos precisas em termos de offset e correntes de polarização, quando comparados aos amplificadores de sinal, o que dependendo do grau de precisão necessário para aplicação, limita ainda mais o desempenho da topologia.

4.2.2 Protótipo da Circuito

Para a implementação prática do circuito, visando otimizar as condições operacionais, foram realizadas modificações estruturais em relação à topologia teórica para garantir estabilidade e permitir a calibração de parâmetros. O esquema elétrico final é apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Diagrama elétrico do circuito HCS utilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, o resistor R_6 de aproximadamente $50\ \Omega$ foi inserido na entrada do circuito. Esta modificação objetiva realizar o casamento de impedância com a saída do gerador de funções (tipicamente $50\ \Omega$), maximizando a integridade da forma de onda de entrada.

Foram incorporados capacitores de desacoplamento ($C1$ a $C11$) nos terminais de alimentação ($+V_{c.c.}$ e $-V_{EE}$) do amplificador operacional. Esta prática em projetos com amplificadores de potência serve para prover um *bypass* de baixa impedância para o terra em altas frequências. Isso filtra ruídos provenientes da fonte de alimentação e suprime oscilações.

Os resistores principais da topologia ($R_{2,a}$, $R_{2,a}$, R_3 e R_4) foram implementados através da associação em série de componentes, incluindo potenciômetros de precisão.

1. **Ajuste de Ganho (Transcondutância):** Um potenciômetro ($R_{3,1}$) de $200\ \Omega$ foi associado em série ao resistor $R_{3,2}$. O resistor $R_3 = R_{3,1} + R_{3,2}$ é um componente determinante no ganho de transcondutância da fonte de corrente, conforme (4.14). Este arranjo permite um ajuste fino do ganho, possibilitando a calibração precisa da relação corrente de saída/tensão de entrada (i_L/v_i).
2. **Ajuste de Balanceamento:** A alta impedância de saída da HCS é um resultado direto da

condição de balanceamento da ponte de resistores (4.13). Um potenciômetro $R_{2a.2}$ de 200 Ω foi inserido em série com $R_{2a.1}$ para compensar as tolerâncias dos componentes por meio de um ajuste fino.

Por fim, o componente ativo central selecionado para esta implementação, é o amplificador operacional de potência LM675. A escolha deste dispositivo foi fundamentada em suas especificações elétricas.

1. **Capacidade de Corrente:** O dispositivo é capaz de fornecer correntes de saída contínuas de até 3 A, valor que atende ao requisito de 2 A do projeto com uma margem de segurança operacional de 50% (TEXAS INSTRUMENTS, 2013) .
2. **Características Dinâmicas:** Apresenta uma taxa de variação de tensão de 8 V/ μ s, permitindo a geração de flancos de pulso íngremes. A larga banda de potência de 70 kHz indica a capacidade do dispositivo de fornecer potência significativa à carga em frequências além do regime DC (TEXAS INSTRUMENTS, 2013).
3. **Circuitos de Proteção Integrados:** inclui um circuito de desligamento térmico (*thermal shutdown*) que desativa o componente quando a temperatura da junção atinge níveis críticos (170°C) , protegendo-o contra sobreaquecimento destrutivo. O dispositivo possui limitação de corrente interna. O componente integra diodos de proteção internos entre a saída e os trilhos de alimentação. Estes diodos são servem para suprimir sobretensões transientes geradas por cargas reativas durante as rápidas transições de tensão/corrente do pulso (TEXAS INSTRUMENTS, 2013).

O dimensionamento dos componentes passivos para a Fonte de Corrente Howland (HCS) é um processo que visa satisfazer simultaneamente a condição de balanço do circuito e a função de transcondutância desejada, ao mesmo tempo em que gerencia as limitações térmicas e de precisão do amplificador operacional de potência (AmpOp) empregado.

Um circuito *snubber*, composto por um resistor e um capacitor em série, conectado entre a saída do amplificador (v_o) e o terra, atua no amortecimento da resposta do amplificador para altas frequências, assegurando estabilidade operacional do circuito. Amplificadores de potência, como o LM675, são suscetíveis à instabilidade (manifestada como oscilação) quando acionam cargas reativas. Cargas como eletrolisadores, especialmente em operação dinâmica, podem apresentar um comportamento capacitivo (devido à dupla camada elétrica).

A etapa inicial do dimensionamento consiste na especificação dos parâmetros de saída desejados. A Corrente máxima de saída ($I_{L,max}$) a ser fornecida à carga e faixa de tensão de

entrada ($v_{i,range}$) definem a faixa de tensão do sinal de controle.

O componente R_{2b} é o elemento mais crítico em um projeto de HCS de alta potência, pois é responsável pela detecção da corrente e é o principal ponto de dissipação de potência. Valores ôhmicos reduzidos minimizam a potência dissipada, mas amplificam os erros provenientes do amplificador operacional. Valores mais elevados atenuam tais erros, mas limitam a tensão máxima na carga e aumentam a dissipação. Para aplicações de alta corrente, valores na faixa de 1 a 2.5 ohms são sugeridos (BATISTA *et al.*, 2023).

Seguindo a abordagem utilizada nas notas de aplicação (TEXAS INSTRUMENTS, 2013; LAM, 2023) para operação em correntes maiores, foi utilizado o mesmo valor de R_{2b} (4 Ω). O resistor R_{2b} foi implementado na prática através de um arranjo em série de quatro resistores de 1 Ω /5W. Esta abordagem oferece duas vantagens principais sobre o uso de um único resistor de 4 Ω . A associação em série distribui a dissipação de potência total por quatro componentes, aumentando a área de superfície total para a convecção de calor e resistores de 1 Ω /5W são componentes comuns e de menor custo.

Os resistores R_1 e R_3 determinam a impedância de entrada do circuito. Uma abordagem de projeto padrão para minimizar os erros causados pelas correntes de polarização do amplificador operacional consiste em igualar as impedâncias vistas pelas entradas inversora e não-inversora. Seguindo o circuito de aplicação para alta corrente (*High Current Source/Sink*) em (TEXAS INSTRUMENTS, 2013), foi adotado valores idênticos para os resistores de entrada. $R_1 = R_3 = 1\text{k}\Omega$.

Com R_1 , R_3 e R_{2b} definidos, os valores de R_4 e R_{2a} são determinados simultaneamente para satisfazer a equação de balanço e definir o ganho de transcondutância.

O resistor R_4 define o ganho da malha de realimentação negativa (R_4/R_3) e, consequentemente, o ganho de transcondutância. A topologia HCS básica ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4$) sofre de baixa capacidade de tensão de saída. Se o nó de saída (V_x) sobe, a saída do AmpOp (v_o) precisa subir aproximadamente o dobro, saturando rapidamente. Ao definir $R_4/R_3 > 1$, a tensão de saída V_x pode excursionar mais próximo dos *rails* de alimentação. O LM675 é internamente compensado e estável para ganhos de malha fechada de 10 ou mais (TEXAS INSTRUMENTS, 2013). Portanto, um ganho $R_4/R_3 \approx 10$ é escolhido para garantir estabilidade. Com $R_3 = 1\text{k}\Omega$, R_4 é definido como 10 k Ω . Devido as tolerâncias serem de $\pm 1\%$ em resistores de precisão, o resistor $R_4 = R_{4.1} + R_{4.2}$ prático foi implementado como 10 k Ω em série com 100 Ω , isso garante a possibilidade de ajuste no balanceamento garantindo que o valor de R_4 sempre seja superior

10 k Ω .

Com R_1 , R_3 , R_4 e R_{2b} definidos, R_{2a} não é uma escolha, mas sim um valor calculado para satisfazer a condição de balanço.

$$(10,1 \text{ k}\Omega) \cdot (1 \text{ k}\Omega) = (1 \text{ k}\Omega) \cdot (R_{2a} + 4\Omega) \quad (4.15)$$

$$10,1 \text{ k}\Omega = R_{2a} + 4\Omega \quad R_{2a(\text{ideal})} = 10096\Omega \quad (4.16)$$

É impraticável obter um resistor comercial de 10096 Ω . Mais importante, qualquer tolerância nos outros quatro resistores quebrará a condição de balanço. Para permitir um ajuste fino e compensar as tolerâncias dos componentes, $R_{2a} = R_{2a.1} + R_{2a.2}$ é implementado usando um resistor fixo ($R_{2a.1}$) de 10 k Ω em série com um potenciômetro de precisão ($R_{2a.2}$)(trimpot) de 200 Ω . Este trimpot permite o ajuste exato do valor para 10096 Ω durante a calibração do circuito, garantindo que a condição de balanço seja atingida e a impedância de saída seja maximizada.

Por fim, é possível observar que dado o elevado valor relativo dos resistores, na ordem de K Ω , a contribuição de $R_{2b} = 4\Omega$ é quase desprezível para o balanço global, uma vez que sua participação corresponde a menos de 0,04% do valor efetivo da rede resistiva. Assim, o ajuste fino necessário para compensar sua influência torna-se praticamente nulo, de modo que o processo de calibração concentra-se quase integralmente em R_{2a} , facilitando o processo de balanceamento.

Após a conclusão dos cálculos, procedeu-se com simulações para validar os valores obtidos para os componentes. Em seguida, realizou-se a seleção dos componentes com base nos resultados dos cálculos. A Placa de Circuito Impresso (PCI) do protótipo foi desenvolvida por meio do software KiCad®, conforme ilustrado no apêndice C.

A Tabela 2 fornece as referências correspondentes a cada componente destacado na Figura ???. Esta tabela é essencial para uma compreensão precisa da disposição e identificação dos elementos no contexto do projeto, facilitando a replicação do protótipo.

O apêndice B exibe a placa montada, na qual foram incorporados componentes adicionais para assegurar certos aspectos cruciais ao circuito.

Tabela 2 – Lista de componentes utilizados no circuito

Componente	Valor
Capacitor eletrolítico C_1	470uf 25V
Capacitor eletrolítico C_2	470uf 25V
Capacitor eletrolítico C_3	470uf 25V
Capacitor eletrolítico C_4	470uf 25V
Capacitor eletrolítico C_5	470uf 25V
Capacitor eletrolítico C_6	470uf 25V
Capacitor eletrolítico C_7	470uf 25V
Capacitor eletrolítico C_8	470uf 25V
Capacitor cerâmico C_9	220nF 25V
Capacitor cerâmico C_{10}	100nF 50V
Capacitor cerâmico C_{11}	100nF 50V
Capacitor cerâmico C_{12}	100nF 50V
Resistor de precisão R_1	1k Ω 1%
Resistor de precisão $R_{2a.1}$	10k Ω 1%
Potenciômetro de precisão $R_{2a.2}$	200 Ω
Resistor $R_{2b.1}$	1 Ω /4W 5%
Resistor $R_{2b.2}$	1 Ω /4W 5%
Resistor $R_{2b.3}$	1 Ω /4W 5%
Resistor $R_{2b.4}$	1 Ω /4W 5%
Potenciômetro de precisão $R_{3.1}$	200 Ω
Resistor $R_{3.2}$	1k Ω 1%
Resistor de precisão $R_{4.1}$	100 Ω 1%
Resistor de precisão $R_{4.2}$	10k Ω 1%
Resistor R_5	1 Ω 5%
Resistor R_6	47 Ω 5%
Resistor R_7	100 Ω 5%
Conector BNC	-
Amplificador operacional de potência	LM675T

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2.1 Interface de Controle e Programação dos Pulsos

A arquitetura de controle da fonte HCS foi comandada por um sistema externo. A tensão de controle v_i é fornecida por um gerador de funções RIGOL® Dg832, permitindo a geração de diversas formas de onda com precisão e com a programação de frequência, amplitude e razão cíclica.

4.3 Conclusão do capítulo

Neste capítulo foi realizada uma revisão de topologias com características de fonte de corrente. Baseada nos conceitos de comportamento do circuito, a topologia HCS foi selecionada

devido à sua capacidade de fornecer corrente controlada de forma linear e independente da variação de impedância da carga.

A modelagem da HCS permitiu a derivação da equação geral de transcondutância, evidenciando a relação direta entre a tensão de controle e a corrente fornecida à célula eletrolítica. A dedução teórica demonstrou que a independência da carga é garantida quando a condição de balanço resistivo é satisfeita, conforme expresso em (4.13).

A implementação prática do circuito exigiu o tratamento do descasamento de resistores devido às suas faixas de tolerâncias. As estratégias adotadas para mitigar essas limitações, incluindo o uso de resistores de precisão, potenciômetros de ajuste fino a inserção de capacitores de desacoplamento e circuitos de amortecimento para garantir estabilidade, foram detalhadas. Tais medidas asseguraram a operação do circuito.

Este capítulo estabeleceu a base instrumental necessária para a condução dos experimentos apresentados nos capítulos subsequentes. Nos capítulos seguintes, a fonte de alimentação desenvolvida é empregada na caracterização do eletrolisador alcalino e na aplicação de pulsos.

5 METODOLOGIA

5.1 Planejamento Experimental

A metodologia deste trabalho foi estruturada na definição das variáveis de processo e de resposta, o delineamento do plano de ensaios e a especificação do sistema e dos procedimentos experimentais.

5.1.1 Definição dos Parâmetros do Processo

Para a avaliação do desempenho do eletrolisador, foram definidas as variáveis independentes (parâmetros de processo) e as variáveis dependentes (parâmetros de resposta).

5.1.1.1 Variáveis de Processo

Estes são os parâmetros ajustados durante os experimentos para avaliar seu impacto no processo:

- Modo de Operação: Define a natureza da corrente aplicada.
 - Níveis: Corrente Contínua (DC), Eletrólise Pulsada (EP).
- Amplitude de Corrente de Pico Positiva (I_{pico}): A magnitude máxima da corrente durante o pulso positivo.
 - Níveis: 2A.
- Frequência (f): A taxa com que os ciclos de pulso se repetem.
 - Níveis: 1, 10, 100, 1000, 10000, 20000, 30000, 40000, 50000 Hz.
- Razão Cíclica Positiva (D_+): A porcentagem de tempo em que a corrente positiva é aplicada durante um período.
 - Níveis: Entre 10% e 90%.

5.1.1.2 Variáveis de Resposta

Estas são as métricas medidas para quantificar o desempenho do eletrolisador em cada condição experimental:

- Taxa de Produção de Hidrogênio (V_{H_2}): Volume de hidrogênio gerado por unidade de tempo, expresso em mL/min.
- Tensão da célula: Tensão da célula expresso em Volts para observar possíveis reduções

nos sobrepotenciais da célula.

5.1.2 Delineamento dos Ensaios

A seleção dos regimes de corrente para este estudo foi estabelecida para avaliar o desempenho do sistema de eletrólise pulsada em condições operacionais condizentes com as densidades de correntes utilizadas na literatura. A escolha de um pulso com amplitude de pico de 2A foi projetada para submeter o eletrolisador a uma densidade de corrente de 0,5 A/cm².

Esta condição visa simular um cenário de alta produtividade, representativo da operação industrial, onde a maximização da taxa de produção de hidrogênio por unidade de área do eletrodo é o objetivo. Operar sob estas condições permite investigar os limites da célula, especialmente no que tange aos sobrepotenciais, que se tornam os principais gargalos para a eficiência. Adicionalmente, o uso de uma densidade de corrente normalizada como 0,5 A/cm² posiciona os resultados deste trabalho dentro do contexto da literatura científica.

Os ensaios realizados com corrente DC servem como o grupo de controle deste estudo. Os resultados obtidos nestas condições representam o desempenho da eletrólise convencional. Todas as métricas de desempenho dos ensaios pulsados serão comparadas com estes valores de referência para quantificar o impacto de cada parâmetro.

5.2 Sistema Experimental de Eletrólise

5.2.1 Célula Eletrolítica

A configuração experimental empregou uma célula eletrolítica de reator cúbico, confeccionada em acrílico, com dimensões de 9 cm x 9 cm x 11,5 cm, conforme ilustrado na Figura 14. O volume útil do reator foi de 250 mL, comportando o eletrólito e o conjunto de eletrodos. A distância intereletrodos foi mantida em aproximadamente 2 cm, estabelecendo a interface para as reações eletroquímicas.

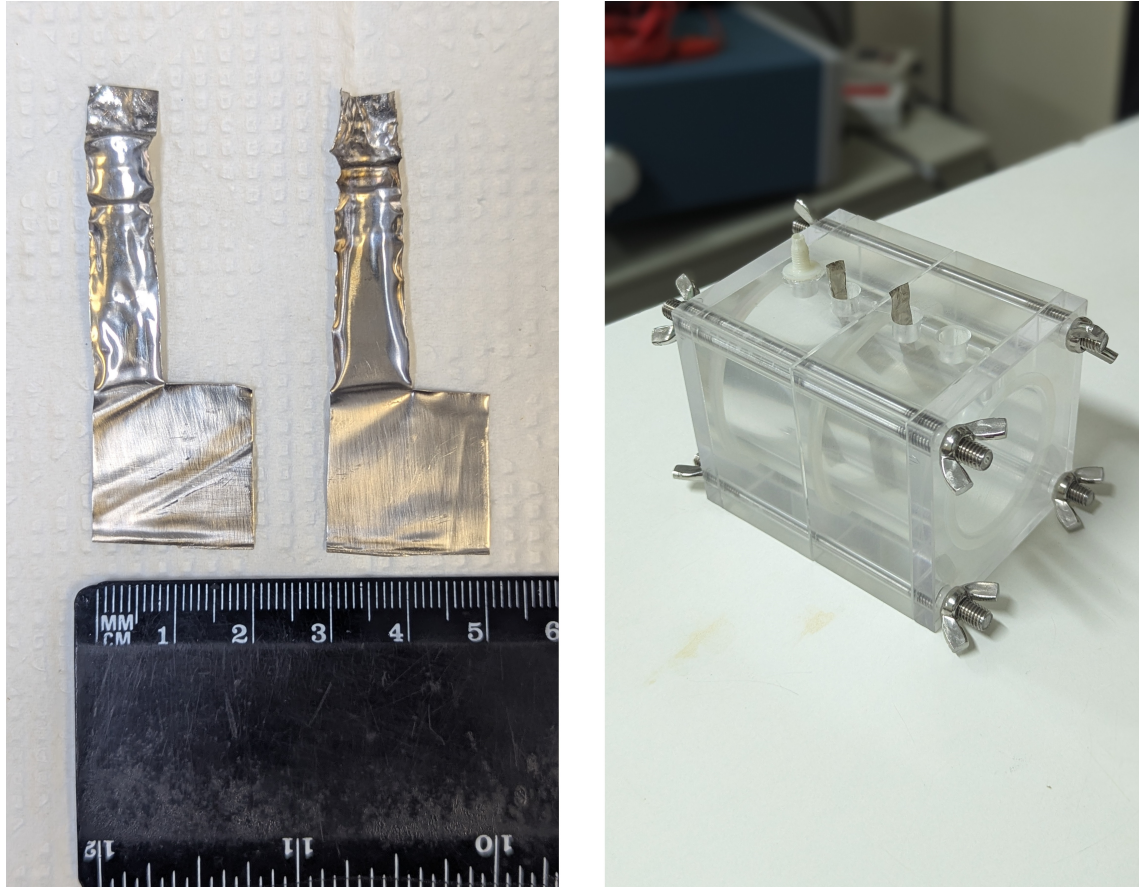
Os eletrodos utilizados são a base de níquel. A escolha deste material é corroborada por sua atividade eletrocatalítica tanto para a reação de evolução de hidrogênio quanto para a Reação de evolução de oxigênio, aliada a uma elevada condutividade elétrica e estabilidade térmica (HAN *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2018; VIJ *et al.*, 2017).

Em conformidade com a área dos eletrodos observados na literatura, os eletrodos foram configurados em formato retangular, com uma área geométrica superficial de ≈ 4 cm² (2

cm x 2 cm). Esta área corresponde à interface ativa onde ocorrem as reações de interesse.

O eletrólito utilizado nos ensaios consistiu em uma solução aquosa de hidróxido de potássio (KOH) a 30% (m/v).

Figura 14 – Célula eletrolítica utilizada



Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.1.1 Caracterização elétrica de eletrolisadores

A análise do comportamento elétrico de eletrolisadores é fundamental para compreender a dinâmica da célula e para definir condições adequadas de operação. Diferentemente da eletrólise em corrente contínua, na qual a resposta tende ao estado permanente, a operação pulsada exhibe fenômenos transitórios governados pela dupla camada elétrica, pelos sobrepotenciais e pela interação entre elementos resistivos e capacitivos da célula.

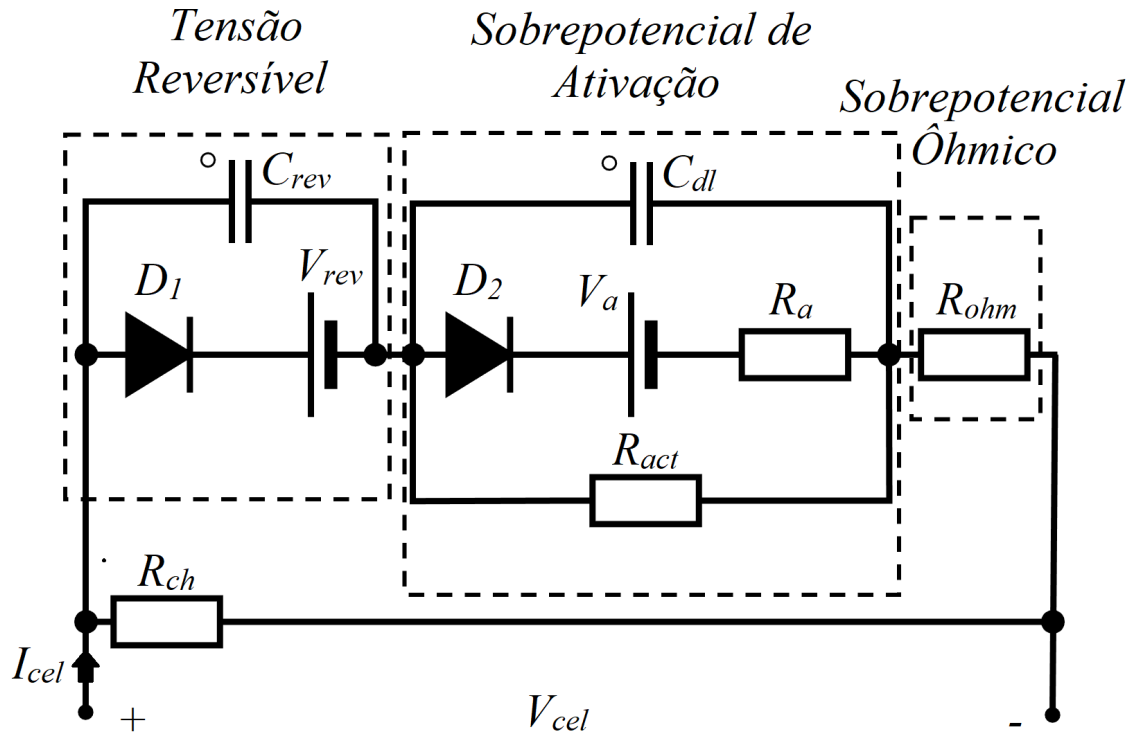
Diversos trabalhos propõem modelos dinâmicos elétricos equivalentes para eletrolisadores. Nesse contexto, uma avaliação das características e limitações dos modelos presentes na literatura, é necessária.

Sousa (2025) realizou uma revisão sobre os principais modelos elétricos dinâmicos

apresentados na literatura, definindo as propostas de aplicação e limitação de cada uma delas. Por fim, Sousa (2025) propôs um modelo elétrico dinâmico e uma metodologia experimental para extrair os parâmetros elétricos para o modelo. A metodologia apresentada, estabelece a base experimental necessária para caracterizar o comportamento da célula sob comportamentos transitórios.

O modelo proposto por Sousa (2025), apresentado na Figura 15, decompõe as tensões da célula em três arranjos distintos, sendo capaz de reproduzir a resposta transitória da célula frente a variações de corrente. O modelo consiste em uma representação da resposta elétrica da célula, na qual os elementos do circuito não correspondem a componentes físicos reais, mas sim a elementos equivalentes empregados para reproduzir os efeitos eletroquímicos.

Figura 15 – Modelo elétrico dinâmico proposto por Sousa (2025).



Fonte: (SOUSA, 2025).

O modelo adotado baseia-se em três premissas operacionais: temperatura constante, pressão constante e circulação forçada do eletrólito. Diante dessas condições, a tensão reversível da célula foi representada por uma fonte de tensão fixa (V_{rev}). Para operação abaixo da tensão reversível, o capacitor (C_{rev}) foi adicionado para simular o comportamento transitório associado à aproximação da tensão reversível. A fim de impedir a inversão de corrente em V_{rev} , um diodo ideal (D_1) foi inserido em série com a fonte V_{rev} . Desse modo, D_1 passa a conduzir apenas quando a tensão no capacitor atinge o valor de V_{rev} (SOUSA, 2025).

Para modelar o comportamento dinâmico associado ao sobrepotencial de ativação e os efeitos da dupla camada elétrica, foi adicionado o capacitor (C_{dl}). A resistência (R_{act}), adicionada em paralelo com C_{dl} , foi implementada para permitir a descarga desse capacitor e representar a dissipação natural dos efeitos capacitivos durante o intervalo sem aplicação de corrente. Para simplificar o modelo, o sobrepotencial de ativação foi linearizado, resultando na inserção da fonte V_a em série com a resistência R_a . De forma semelhante ao arranjo da tensão reversível, um segundo diodo ideal (D_2) foi adicionado em série com V_a , para evitar inversão de corrente na fonte V_a , em série. D_2 conduz apenas quando a tensão no capacitor C_{dl} é igual a V_a (SOUSA, 2025).

O sobrepotencial ôhmico foi representado pela queda de tensão em uma resistência fixa (R_{ohm}), permitindo reproduzir a variação instantânea da tensão da célula durante o desligamento do sistema. Por fim, uma resistência de canal (R_{ch}) foi conectada em paralelo com todos os elementos do circuito, para garantir a simulação da descarga completa da célula eletrolítica durante o repouso (SOUSA, 2025).

Além do modelo, Sousa (2025) também propôs uma metodologia experimental voltada à caracterização elétrica de eletrolisadores, destinada à obtenção de parâmetros que descrevem o comportamento estático e dinâmico das células. Para realizar o dimensionamento dos componentes do modelo proposto, Sousa (2025) aplicou 4 testes experimentais.

A curva I–V ou curva de polarização, é obtida mediante a aplicação de uma rampa de corrente crescente até o limite operacional da célula. Esse ensaio permite identificar a faixa de operação e os parâmetros elétricos associados aos efeitos de ativação e à resistência ôhmica (SOUSA, 2025). A partir desse teste, Sousa (2025) propõe uma linearização da curva de polarização, resultando em um modelo equivalente representado por (5.1). A linearização é realizada a partir do joelho da curva, ponto em que o comportamento passa a se aproximar de uma relação linear. A partir da manipulação da expressão linearizada, os componentes V_a e R_a podem ser obtidos em (5.3) e (5.4).

$$v_{cel} = V_{eq} + R_{eq} \cdot i_{cel} \quad (5.1)$$

$$v_{cell} = v_{rev} + V_a + (R_a + R_{ohm}) \cdot i_{cell} \quad (5.2)$$

$$V_a = V_{eq} - v_{rev} \quad (5.3)$$

$$R_a = R_{eq} - R_{ohm} \quad (5.4)$$

O ensaio de degrau de corrente, destinado à identificação da resposta transitória da célula durante o processo de carga (KHALID RATIB *et al.*, 2024), permite extrair os componentes de tempo de carga das capacitâncias representativas da dupla camada elétrica e os efeitos de ativação. A partir desse teste, Sousa (2025) propõe o dimensionamento dos capacitores C_{rev} e C_{dl} a partir de (5.5) e (5.6) (SOUSA, 2025).

$$C_{rev} = i_{C_{rev}}(t) \cdot \frac{dt}{dv_{C_{rev}}(t)} = I_c \cdot \frac{\Delta t_{rev}}{V_{rev}} \quad (5.5)$$

$$C_{dl} = i_{C_{dl}}(t) \cdot \frac{dt}{dv_{C_{dl}}(t)} = I_c \cdot \frac{\Delta t_{act}}{V_{act}} \quad (5.6)$$

Onde Δt_{rev} e Δt_{act} correspondem, respectivamente, ao tempo necessário para a tensão na célula chegar ao valor de V_{rev} e o tempo necessário para a tensão de ativação ($V_{act} \approx V_{cel} - V_{rev}$) (SOUSA, 2025). Na metodologia empregada por (SOUSA, 2025), as capacitâncias determinadas, C_{rev} e C_{dl} , são resultantes da linearização das curvas de carga nos pontos selecionados, de modo a aproximar o comportamento dinâmico da célula a um modelo equivalente.

O ensaio de interrupção de corrente, avalia a resposta natural de tensão após a interrupção abrupta da corrente (HOSSAIN *et al.*, 2023; KOUNDI *et al.*, 2023; SOUSA, 2025). O procedimento consiste em injetar um sinal contínuo e interrompê-lo bruscamente. A resposta de tensão obtida nesse teste evidencia dois fenômenos distintos. A queda instantânea, associada à eliminação do sobrepotencial ôhmico, e um decaimento subsequente, que representa a descarga do sobrepotencial de ativação. Esses fenômenos modelados por R_{ohm} , R_{act} e τ_{dl} , são obtidos, respectivamente, em (5.7) e (5.8).

$$R_{ohm} = \frac{V_{cel} - V_1}{I} \quad (5.7)$$

$$R_{act} = \frac{\tau_{dl}}{C_{dl}} \quad (5.8)$$

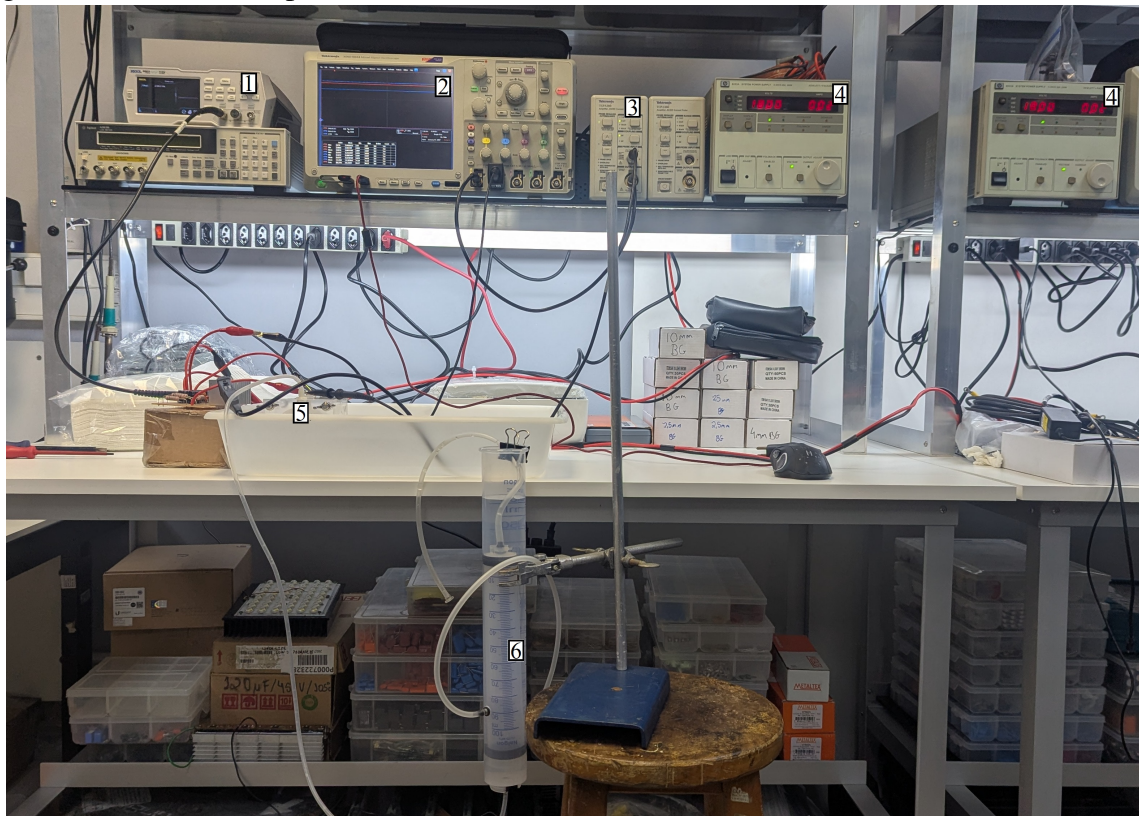
Onde V_1 , é a tensão resultante após a queda instantânea depois da interrupção de corrente. I , a corrente aplicada antes da interrupção. τ_{dl} representa o tempo de descarga até o valor de 37% da carga acumulada no capacitor C_{dl} , e é utilizado para calcular o valor de R_{act} .

Medição a quatro fios consistiu em aplicar densidades de corrente na ordem de μA^2 e medir a resposta de tensão na célula até alcançar o valor calculado para V_{rev} .

5.2.2 Sistema de Medição e Aquisição de Dados

O bancada experimental é apresentada na Figura 16 e foi organizada conforme o diagrama na Figura 17.

Figura 16 – Bancada experimental utilizada.



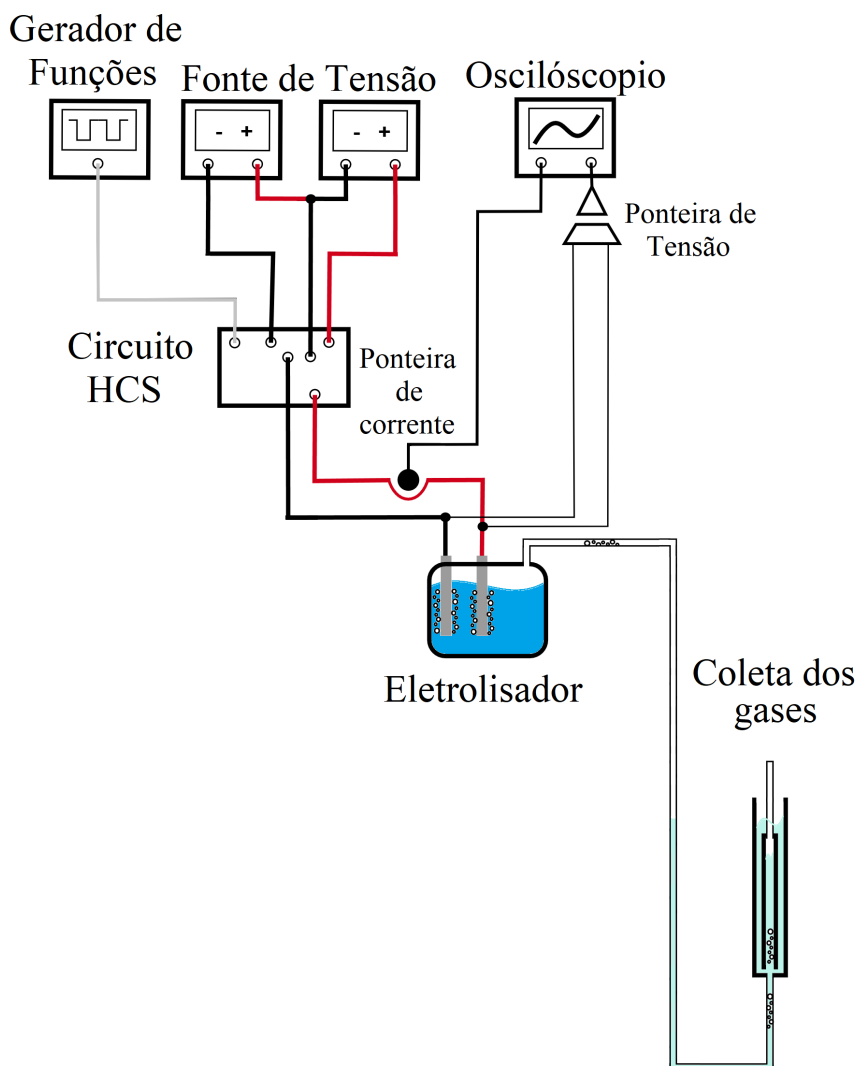
Fonte: Elaborado pelo autor

O sistema utilizado nos experimentos consistiu em:

1. Um gerador de funções RIGOL® Rigol Dg832 para gerar o controle da modulação do circuito *Howland pump current*;

2. Um osciloscópio digital Tektronix® MSO5034, com largura de banda de 350 MHz, resolução vertical de 12 bits e ponteiros de tensão de 1:10 e 500 MHz para realizar a aquisição dos valores de corrente e observar os formatos de onda;
3. Um amplificador para sonda de corrente Tektronix® TCPA300, com sonda de corrente TCP303 para até 150 A capaz de detectar variações de até 1 mA e frequência de 50 MHz;
4. Duas fontes de bancada HP® 6033A, capaz de fornecer uma corrente elétrica de até 30A para tensões de até 20 V para alimentar o circuito *Howland pump current*;
5. Duas fontes de bancada HP® 6033A, capaz de fornecer uma corrente elétrica de até 30A para tensões de até 20 V para alimentar o circuito *Howland pump current*;
6. Célula eletrolítica;
7. O sistema de medição de geração dos gases por meio do deslocamento volumétrico da água.

Figura 17 – Esquemático da bancada experimental



Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.3 Protocolo de Execução Experimental

O primeiro passo é a preparação da célula utilizada. Inicialmente, os eletrodos foram submetidos a um procedimento de limpeza para remover quaisquer contaminantes orgânicos ou particulados, como gordura, impressões digitais e sujeiras, que pudessem interferir na atividade catalítica. Cada eletrodo foi suavemente esfregado com uma solução de sabão neutro, utilizando a face macia de uma esponja para evitar dano mecânico ou alteração na morfologia da superfície. Os eletrodos foram abundantemente enxaguados, primeiramente em água corrente e, em seguida, em água destilada para eliminar completamente os resíduos de sabão e evitar a deposição de sais minerais. Por fim, os eletrodos foram limpos com algodão embebido em álcool isopropílico e deixados para secar ao ar. Este passo final garante a remoção de qualquer filme orgânico residual e de moléculas de água. Após esta etapa, os eletrodos foram manuseados cuidadosamente para

prevenir contaminação.

Adicionalmente, o reator cúbico de acrílico também foi submetido a um processo análogo de limpeza para remover quaisquer impurezas. O procedimento envolveu uma lavagem com sabão neutro, seguida de um enxágue completo em água corrente e um enxágue final com água destilada.

A montagem final consistiu no posicionamento dos eletrodos limpos dentro da célula cúbica de acrílico, assegurando a distância intereletrodos de aproximadamente 2cm. O reator foi então preenchido com 250 ml da solução de KOH 30% previamente preparada, finalizando a montagem do sistema e deixando-o pronto para a condução dos ensaios.

Para assegurar a precisão dos resultados, um protocolo de calibração e estabilização foi executado antes de cada bateria de ensaios. O procedimento iniciava-se com a climatização do ambiente laboratorial até o equilíbrio térmico em 25°C. Subsequentemente, todos os equipamentos eram energizados e mantidos em operação por um período mínimo de 15minuto para atingir a estabilização térmica e minimizar a deriva (*thermal drift*) de seus componentes internos. O osciloscópio, como sistema primário de aquisição de dados, era então submetido ao seu procedimento de autocalibração interna.

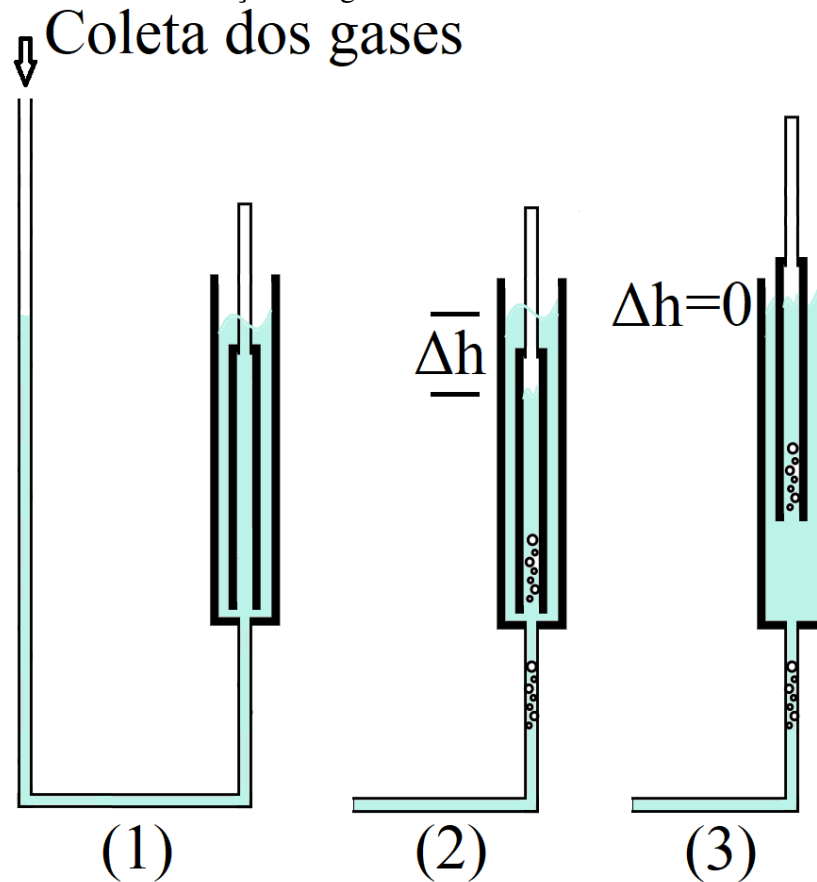
Para cada ponto experimental, a condução do ensaio seguiu um protocolo padronizado, visando garantir a consistência e a comparabilidade dos dados. A definição da janela de testes em 3minuto (180segundos) foi ditada pelas limitações físicas e de precisão do sistema de coleta de gás por deslocamento volumétrico (limitado a 100 ml). Este intervalo representa o tempo máximo de ensaio que garante que o volume de gás gerado, nas condições de maior produtividade (regime de 2A DC), permaneça dentro da faixa de medição da proveta graduada. A duração é suficientemente extensa para transcender transientes iniciais do processo, permitindo que o sistema atinja um regime. Isso garante que o volume de gás acumulado seja o bastante para minimizar o erro da medição visual. A duração também, é contida para assegurar a integridade dos dados. Limitar o ensaio a três minutos garante que a concentração do eletrólito não sofra alterações significativas e otimiza a gestão do tempo experimental, permitindo a execução de um maior número de ensaios comparativos sob condições controladas e reproduzíveis.

O procedimento para cada ensaio iniciava-se com a configuração dos parâmetros de pulso na fonte de alimentação (frequência, razão cíclica e amplitude de corrente). Antes de iniciar a aquisição de dados, o sistema operava em um período de estabilização, aguardando a produção de aproximadamente 10mL de gases. Esta etapa visa garantir que o sistema atinja um

regime pseudoestacionário, buscando mitigar condições inerentes ao repouso da célula.

O processo de medição do volume de gases é apresentado em etapas na Figura 18. Na etapa (1), observa-se o sistema em condição inicial, sem geração de gases. Na etapa (2), a produção de gás provoca o deslocamento da coluna de água no interior da proveta. Por fim, na etapa (3), realiza-se a equalização entre os níveis das colunas de água interna e externa.

Figura 18 – Processo de medição dos gases



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a estabilização do sistema (produção de 10 mL), a aferição do volume de gás inicial era realizada. Para garantir a acurácia da medição, o método de deslocamento volumétrico com equalização da pressão hidrostática era aplicado. A justificativa baseia-se na fórmula da pressão hidrostática (5.9). Quando o nível de água no interior da proveta está desalinhado com o nível externo, uma coluna de líquido diferencial de altura h exerce uma pressão (P_{hidro}) que falseia a medição.

$$P_{hidro} = \rho \cdot g \cdot h \quad (5.9)$$

Onde ρ é a densidade do fluido, g é a aceleração da gravidade e h é a altura da coluna de líquido. A pressão real do gás coletado (P_{gs}) é, portanto, a pressão atmosférica (P_{atm}) subtraída dessa componente hidrostática:

$$P_{gs} = P_{atm} - P_{hidro} = P_{atm} - (\rho \cdot g \cdot h) \quad (5.10)$$

O procedimento de igualar os níveis de água consiste em mover a proveta verticalmente até que a altura diferencial h seja nula ($h = 0$). Ao fazer isso, a pressão hidrostática é eliminada ($P_{hidro} = 0$), e a equação de equilíbrio é simplificada para $P_{gs} = P_{atm}$. Isso garante que o volume de gás medido esteja submetido à pressão atmosférica local, permitindo uma aquisição volumétrica mais precisa.

Após igualar os níveis de água e o registro do volume inicial, Figura 18 etapa (3), a proveta era reposicionada, Figura 18 etapa (2), e iniciava-se sincronicamente a aquisição dos dados elétricos e a cronometragem do ensaio. Ao término da janela de 3 minutos, a alimentação elétrica da célula era cessada. O procedimento de equalização, Figura 18 etapa (3), hidrostática era então repetido para a aferição do volume final.

A aquisição dos dados elétricos (formas de onda de tensão e corrente) foi realizada pelo osciloscópio digital. Ao final de cada ensaio, as formas de onda completas eram salvas em formato de valores separados por vírgula (.csv), para o pós-processamento e análise de dados. Capturas de tela (*prints*) das formas de onda também foram salvas para referência visual.

Paralelamente, os dados físicos eram registrados manualmente. O volume inicial na coluna de água do sistema de medição de gás era anotado no início da janela de aquisição de 3minuto, e o volume final era registrado ao seu término. Os parâmetros de controle do ensaio (frequência, razão cíclica, etc.) e os dados volumétricos eram registrados em um diário de laboratório digital (bloco de notas). Subsequentemente, em uma etapa de pós-processamento, todos os dados foram e organizados em um único conjunto para o tratamento e a análise final.

Todo sistema de medição experimental está sujeito a incertezas intrínsecas, que podem ser categorizadas em erros sistemáticos (afetando a exatidão) e aleatórios (afetando a precisão). No presente trabalho, o delineamento experimental fundamenta-se na análise comparativa, na qual os resultados de diferentes regimes operacionais, como eletrólise pulsada vs. corrente contínua, são avaliados em relação uns aos outros, utilizando-se invariavelmente o mesmo conjunto de instrumentos e a mesma célula eletrolítica. Neste contexto, os erros sistemáticos, tais como desvios de calibração do osciloscópio, na sonda de corrente ou no sistema

de medição de volume, atuam como um desvio comum a todas as medições. Ao se calcular o ganho percentual de eficiência ou a redução no consumo específico de energia, este viés sistemático é matematicamente cancelado. Portanto, a exatidão absoluta de uma medição isolada é de menor relevância do que a validade da diferença relativa observada entre os ensaios.

A seguir é listado um resumo do passo a passo do protocolo de execução.

5.3 Obtenção da eficiência

A eficiência de um processo é definida como a razão entre a energia útil obtida e a energia total fornecida ao sistema. Para a eletrólise, a energia útil é a energia química contida no hidrogênio produzido, avaliada pelo seu Poder Calorífico Superior (HHV), e a energia de entrada é a energia elétrica consumida.

$$\eta_{\text{eletrolisador}} = \frac{E_{\text{saída}}}{E_{\text{entrada}}} \quad (5.11)$$

Onde $\eta_{\text{eletrolisador}}$ é a eficiência do eletrolisador, $E_{\text{saída}}$ é a energia química do hidrogênio produzido (J) e E_{entrada} é a energia elétrica consumida pelo eletrolisador (J).

5.3.1 Cálculo da Energia de Saída ($E_{\text{saída}}$)

A energia de saída do processo ($E_{\text{saída}}$) é quantificada pela entalpia de combustão do hidrogênio (H_2) gerado. Para determinar $E_{\text{saída}}$ a partir de um volume (V) de H_2 , é necessário calcular a quantidade de matéria correspondente (n_{mols} , em mols). Este cálculo é realizado aplicando-se a Lei dos Gases Ideais, considerando a pressão (P) e a temperatura (T) do gás no momento da medição do volume.

$$n_{\text{mols}} = \frac{P \cdot V_{H_2}}{R \cdot T} \quad (5.12)$$

Onde n_{mols} é a quantidade de hidrogênio em mols. P é a pressão absoluta (em Pa) do gás no momento de medição do volume. V_{H_2} o volume de hidrogênio em metros cúbicos.

A energia contida no hidrogênio é calculada com base no seu HHV. O HHV, considera a energia liberada na combustão do H_2 mais a energia recuperada da condensação da água formada. É o valor mais utilizado para o cálculo de eficiência de eletrolisadores. O HHV molar do H_2 : $\approx 286.000 \text{ J/mol}$.

A energia de saída é, então, calculada pelo do volume de hidrogênio produzido e seu HHV:

$$E_{\text{saída}} = E_{H_2} = n \cdot HVV_{\text{molar}} \quad (5.13)$$

Este valor é determinado pelo volume de hidrogênio gerado e pelo seu Poder Calorífico Superior (HHV_{H₂}).

Conforme especificado em (2.5), o volume de hidrogênio (V_{H_2}) é considerado como sendo 2/3 do volume total de gás ($V_{\text{total_gás}}$) produzido pelo eletrolisador alcalino (assumindo que o 1/3 restante é oxigênio).

$$V_{H_2} = \frac{2}{3} \cdot V_{\text{total_gás}} \quad (5.14)$$

5.3.2 Cálculo da Energia de Entrada

A energia de entrada é a energia elétrica total fornecida ao eletrolisador durante o período em que o hidrogênio foi produzido. Para o caso de uma alimentação com energia pulsada, o cálculo é realizado a partir da aquisição da corrente e tensão utilizando um osciloscópio.

A potência instantânea ($p_i(t)$), em watts (W), em um instante t é definida como o produto da tensão instantânea $v(t)$ pela corrente instantânea $i(t)$, conforme (5.15).

$$p_i(t) = v_i(t) \cdot i_i(t) \quad (5.15)$$

A energia (E), em joules (J), representa a potência calculada ao longo de um intervalo de tempo $[t_1, t_2]$. Matematicamente, E é definida pela integral da função de potência no referido intervalo, como demonstrado em (5.16).

$$E = \int_{t_1}^{t_2} p_i(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} v(t) \cdot i(t) dt \quad (5.16)$$

Em um contexto experimental, as funções $v(t)$ e $i(t)$ não são contínuas. Em vez disso, são adquiridas como um conjunto de dados discretos. A aquisição resulta em um conjunto de pontos amostrais, onde cada ponto i é composto pela tupla (t_i, i_i, v_i) , representando o tempo, a corrente e a tensão, respectivamente.

Para solucionar a integral definida em (5.16) a partir de dados discretos, emprega-se um método de integração numérica. O método utilizado foi a Regra do Trapézio, que aproxima a área sob a curva $p_i(t)$ pela soma de áreas trapezoidais.

O procedimento é dividido nas seguintes etapas:

5.3.3 Etapa 1: Cálculo da Potência Instantânea Amostral

A primeira etapa do processamento de dados consiste no cálculo da potência instantânea P_i para cada ponto amostral i no conjunto de dados (onde i varia de 0 a n). O conjunto de dados é, assim, expandido para (t_i, I_i, V_i, P_i) .

5.3.4 Etapa 2: Aplicação da Regra do Trapézio para Intervalos Discretos

Como os dados são discretos, a energia não é obtida pela integral contínua, mas sim por sua aproximação numérica. A integral em (5.16), é aproximada pela soma das áreas de trapézios formados entre pares de pontos consecutivos (i e $i + 1$). A energia ΔE_i para cada intervalo $[t_i, t_{i+1}]$ é calculada pela média da potência nesse intervalo, multiplicada pela respectiva variação no tempo, Δt_i , conforme (5.17).

$$\Delta E_i = \left(\frac{P_i + P_{i+1}}{2} \right) \cdot (t_{i+1} - t_i) \quad (5.17)$$

O termo $(t_{i+1} - t_i)$ representa o passo de tempo entre dois pontos amostrais, Δt_i . Caso a aquisição de dados ocorra com uma taxa de amostragem uniforme, este termo torna-se uma constante Δt , o que simplifica o cálculo subsequente.

5.3.5 Etapa 3: Cálculo da Energia Total por Somatório

A energia total (E_{total}) consumida durante o tempo de amostra é determinada pelo somatório das energias ΔE_i de todos os n intervalos, desde $i = 0$ até $i = n - 1$.

$$E_{total} = \sum_{i=0}^{n-1} \Delta E_i \quad (5.18)$$

Combinando (5.17) e (5.18), obtém-se a fórmula de integração numérica completa para a energia total.

$$E_{total} = \sum_{i=0}^{n-1} \left(\frac{p_i + p_{i+1}}{2} \right) \cdot (t_{i+1} - t_i) \quad (5.19)$$

Para o caso de amostragem uniforme ($\Delta t_i = \Delta t$ constante), (5.19) pode ser reescrita como.

$$E_{total} = \Delta t \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \left(\frac{p_i + p_{i+1}}{2} \right) \quad (5.20)$$

A Equação (5.19) ou (5.20) representa a implementação numérica discreta da integral $E = \int v(t) \cdot i(t) dt$, permitindo a quantificação da energia consumida a partir dos pontos experimentais.

É importante ressaltar que o valor E_{total} obtido através da Equação (5.19) representa a energia elétrica total consumida exclusivamente durante o intervalo de tempo de amostra, $T_{amostra} = t_n - t_0$. Este intervalo corresponde à duração da aquisição de dados do ensaio experimental.

Para estimar o consumo energético em um período operacional completo (T_{op}), que excede significativamente o tempo de amostragem, a energia calculada para o período amostral é extrapolada. Este procedimento pressupõe que o comportamento do sistema durante $T_{amostra}$ é representativo do regime permanente de operação.

A energia operacional total (E_{op}) é então calculada pela relação proporcional direta entre o tempo total de operação e o tempo de amostragem, conforme (5.21).

$$E_{op} = E_{amostra} \cdot \left(\frac{T_{op}}{T_{amostra}} \right) \quad (5.21)$$

5.3.6 Determinação Experimental da Energia Utilizando o Osciloscópio

Para determinar a energia elétrica consumida pelo eletrolisador operando em regime de eletrólise pulsada, foi realizada a medição direta da potência instantânea aplicada ao sistema por meio do osciloscópio digital. A partir dos canais de aquisição de tensão e corrente, utilizou-se a função matemática (*Math*) do osciloscópio para multiplicar os sinais de tensão e corrente, obtendo o sinal de potência instantânea definido por:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t).$$

Em seguida, por meio das ferramentas internas de medição (*Measurements*), determinou-se o valor médio dessa potência ao longo de uma janela temporal contendo vários ciclos completos dos pulsos aplicados. A partir disso, observou-se que a potência média permaneceu constante ao longo do tempo, possibilitando o uso da potência média como métrica para o cálculo da energia. Assim, para estimar o consumo energético ao longo de três minutos de operação, utilizou-se diretamente o valor de $\bar{P}$ fornecido pelo osciloscópio, multiplicado pela duração do ensaio em segundos.

Considerando que a energia elétrica total consumida corresponde à integral da potência no tempo, e verificando-se experimentalmente que o sistema operava em regime estacionário, a energia pôde ser estimada diretamente pela relação:

$$E = \bar{P} \cdot \Delta t,$$

onde $\bar{P}$ é a potência média medida e Δt representa o intervalo de operação analisado.

Essa metodologia registra fielmente a dinâmica real dos pulsos, considera simultaneamente tensão e corrente aplicadas à célula e evita simplificações decorrentes da suposição de formas de onda ideais. Entretanto, sua precisão depende da calibração das sondas, a compensação do desalinhamento temporal entre os canais (*deskew*), a escolha adequada da taxa de amostragem e a seleção de uma janela que contenha um número inteiro de períodos. Satisfeitas essas condições, o método fornece uma estimativa confiável da potência média no eletrolisador sob operação pulsada. Possibilitando o cálculo da energia consumida.

5.4 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foi detalhado o planejamento e a execução dos experimentos conduzidos neste trabalho. A metodologia proposta foi concebida de forma a garantir reprodutibilidade e comparabilidade entre os diferentes regimes de operação investigados, especialmente entre a eletrólise convencional em corrente contínua e a eletrólise pulsada.

A escolha dos parâmetros foi guiada por critérios teóricos e práticos, permitindo explorar condições que simulam regimes industriais.

O delineamento experimental adotado, é baseado na comparação entre modos de operação.

A utilização de um procedimento de equalização hidrostática na medição do volume de gás, visa garantir a obtenção de dados volumétricos precisos sob pressão atmosférica real. O tempo de ensaio de três minutos foi definido de forma para assegurar a operação em regime estacionário, mantendo a validade das medições.

O processamento de dados, baseado em integração numérica, possibilitou a determinação da energia elétrica consumida, através dos pontos obtidos experimentalmente, fornecendo subsídios diretos para o cálculo da eficiência energética segundo o HHV do hidrogênio produzido.

De forma geral, este capítulo consolidou a metodologia empregada na pesquisa, estabelecendo as bases operacionais da análise experimental. No Capítulo 6, os resultados obtidos são apresentados e discutidos, sendo validados por meio da comparação de parâmetros elétricos e energéticos com referências consolidadas da literatura.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

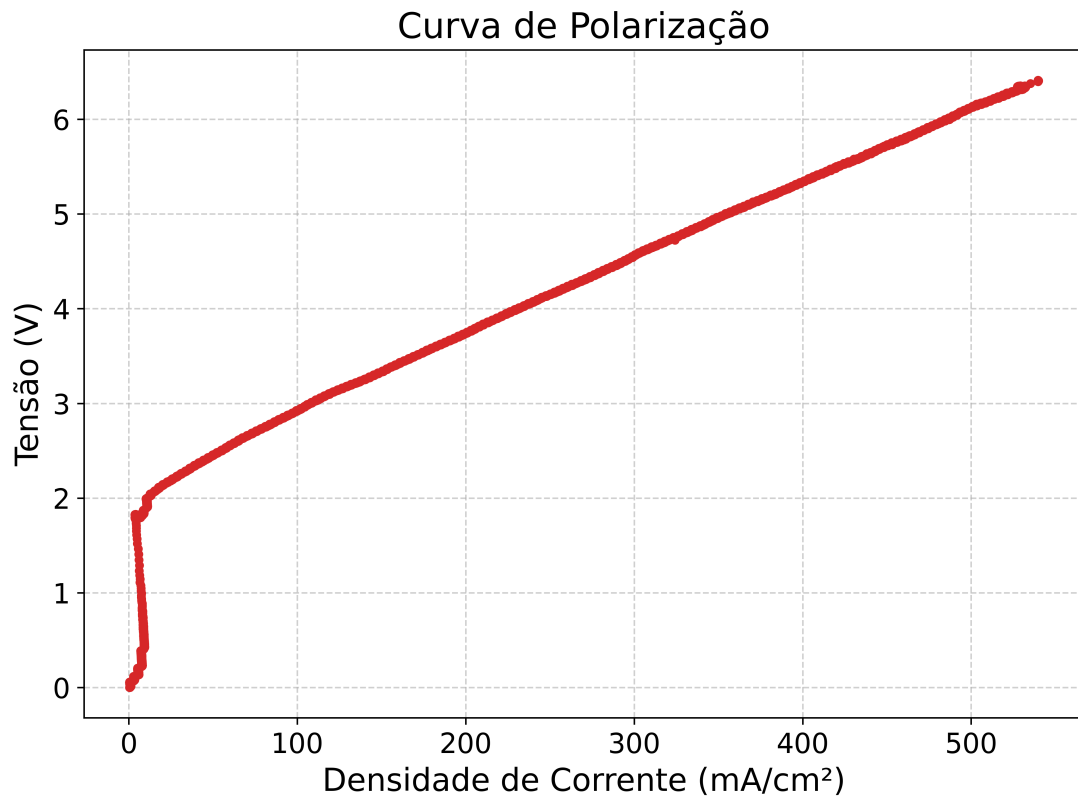
Este capítulo apresenta e analisa os resultados experimentais obtidos a partir dos ensaios de eletrólise da água em um eletrolisador alcalino. A investigação foca nos efeitos da aplicação de corrente pulsada comparada à eletrólise por corrente contínua. A análise visa avaliar os efeitos dos pulsos aplicados e determinar as condições operacionais que otimizam a produção de hidrogênio e a eficiência energética do processo.

6.1 Caracterização Inicial

Essa seção aborda a caracterização proposta por Sousa (2025) e detalhada na Seção 5.2.1.1. Com base nesse referencial, seguiu-se o protocolo experimental para a caracterização inicial da célula. Entretanto, diferentemente da bancada experimental originalmente utilizada, o presente trabalho empregou a bancada apresentada na Figura 16, Em virtude das características de modulação do circuito HCS. Essa configuração possibilitou a execução dos três ensaios necessários à obtenção dos parâmetros da célula.

A curva I–V foi obtida mediante a aplicação de uma rampa de corrente crescente até o limite operacional da célula ($0,5 \text{ mA/cm}^2$). O gerador de funções foi configurado no modo rampa com taxa de variação de 10 mV/s (equivalente a 20 mA/s), até atingir 1 V (2 A). A curva resultante é apresentada na Figura 19.

Figura 19 – Curva de polarização da célula eletrolítica.

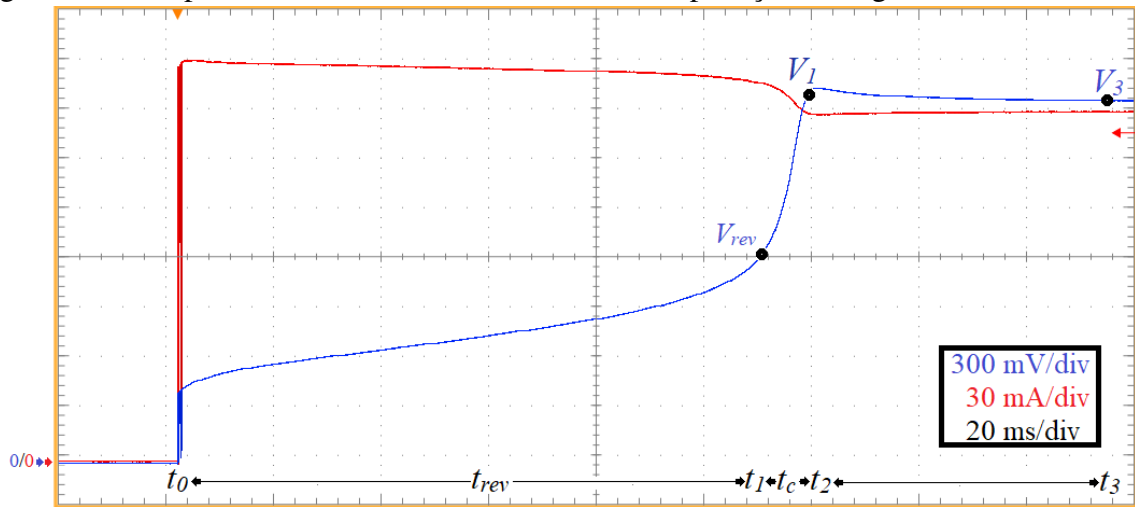


Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da curva de polarização, foi ajustado um modelo linear que representa a tensão da célula, descrito pela expressão (5.1) que corresponde à tensão na célula. A tensão equivalente ($V_{eq} = 2,25V$) e a resistência equivalente ($R_{eq} = 1,92\Omega$) foram obtidas.

Para o teste degrau de corrente, o gerador de funções foi configurado para aplicar um degrau de 100 mV (200 mA = 50 mA/cm²) após 3 segundos. Sousa (2025) indica baixas densidades de correntes para que o efeito do sobrepotencial ôhmico seja menos significativo, capturando com maior precisão a carga da dupla camada. O osciloscópio foi ajustado para detecção da borda de subida, e a resposta obtida é apresentada na Figura 20.

Figura 20 – Resposta de tensão da célula eletrolítica à aplicação de degrau de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor

De t_0 a t_1 , obteve-se o tempo de carga associado à tensão reversível ($t_{rev} \approx 108,7ms$), utilizado no cálculo do capacitor C_{rev} . No intervalo entre t_1 e t_2 , foi determinado o tempo de carga característico da dupla camada elétrica ($t_c \approx 8,56ms$) até a tensão de célula $V_1 \approx 2,20V$, a partir do qual se calculou a capacitância C_{dl} , conforme (6.1) e (6.2).

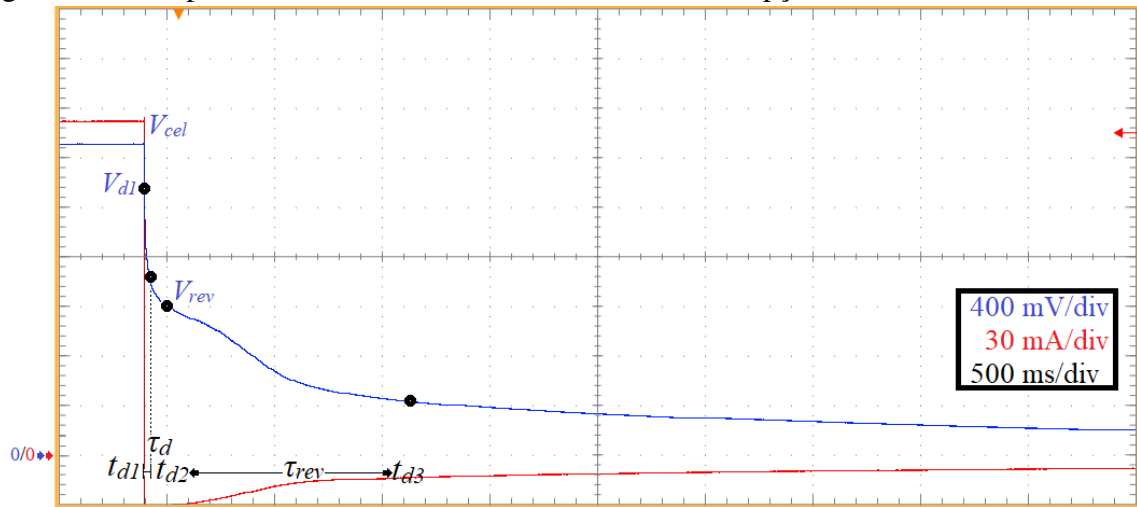
$$C_{dl} = 0,2A \cdot \frac{0,00856s}{2,20V - 1,23V} \approx 1,76mF \quad (6.1)$$

$$C_{rev} = 0,2A \cdot \frac{0,1087s}{1,23V} \approx 17,67mF \quad (6.2)$$

O comportamento observado no teste de degrau, evidenciou um comportamento diferente do esperado em células eletrolíticas.

O ensaio de interrupção de corrente, por sua vez, avalia a resposta natural de tensão após a interrupção abrupta da corrente (HOSSAIN *et al.*, 2023; KOUNDI *et al.*, 2023; SOUSA, 2025). O procedimento para esse teste, consistiu em injetar um sinal contínuo de 100 mV (200 mA = 50 mA/cm²), após cerca de um minuto de estabilização, interrompê-lo bruscamente. O osciloscópio é configurado para detectar a borda de descida, e o resultado do experimento é apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Resposta de tensão da célula eletrolítica à interrupção de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A resposta de tensão obtida nesse teste evidencia os fenômenos da queda instantânea, associada ao sobrepotencial ôhmico, e o decaimento exponencial que representa a descarga do sobrepotencial de ativação.

A constante de tempo de descarga ($\tau_d = 8,05ms$), é utilizada para o cálculo da capacitância da dupla camada elétrica C_{dl} , conforme (5.6). Mantendo a coerência com os valores anteriormente determinados, a resistência de ativação R_{act} é estimada por (6.3). A resistência ôhmica R_{ohm} é obtida diretamente a partir da queda instantânea de tensão, conforme (6.4). Para que o tempo de descarga do capacitor C_{rev} simulasse o tempo de descarga da célula, o valor de R_{ch} foi adotado como 80Ω .

$$R_{act} = \frac{0,00805s}{0,00176F} \approx 4,57\Omega \quad (6.3)$$

$$R_{ohm} = \frac{2,52V - 2,27V}{0,2A} \approx 1,25\Omega \quad (6.4)$$

Por fim, V_a e R_a , são calculados.

$$V_a = 2,25V - 1,23V = 1,02V \quad (6.5)$$

$$R_a = 1,92\Omega - 1,25\Omega = 0,67\Omega \quad (6.6)$$

A Tabela 3 reúne os valores obtidos nos ensaios experimentais e os componentes calculados a partir das equações apresentadas.

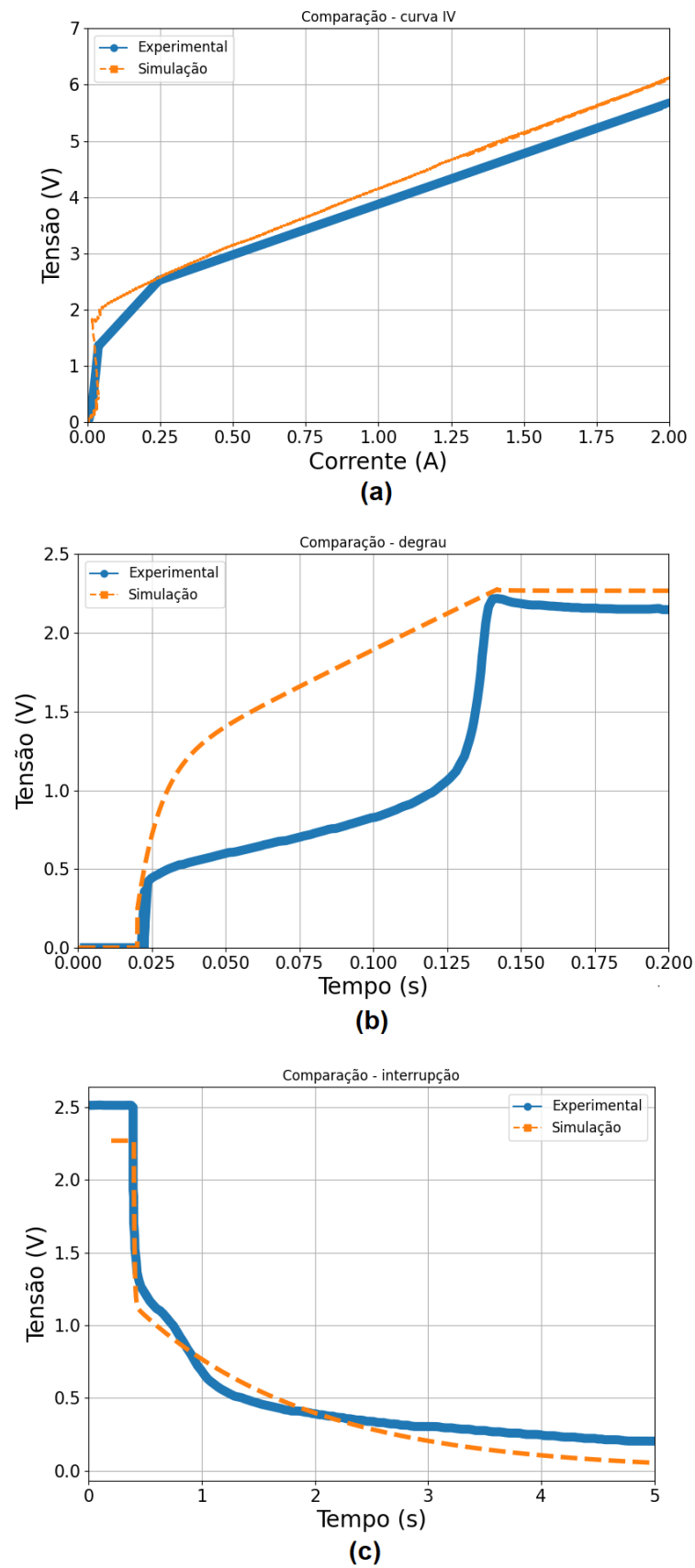
Tabela 3 – Parâmetros obtidos para o modelo proposto

Parâmetro	Símbolo	Valor
Tempo de carga até atingir V_{rev}	t_{rev}	108,7 ms
Tempo de carga de V_{rev} até V_1	$t_{C_{dl}}$	8,56 ms
Constante de descarga da dupla camada	$\tau_{C_{dl}}$	8,05 ms
Constante de descarga de tensão reversível	$\tau_{C_{rev}}$	1,023 s
Tensão equivalente da curva I–V	V_{eq}	2,252 V
Resistência equivalente da curva I–V	R_{eq}	1,92 Ω
Tensão reversível	V_{rev}	1,23 V
Resistência ôhmica	R_{ohm}	1,25 Ω
Capacitância reversível	C_{rev}	17,67 mF
Capacitância de dupla camada	C_{dl}	1,764 mF
Resistência de descarga do sobrepotencial de ativação	R_{act}	4,57 Ω
Resistência de canal	R_{ch}	80 Ω
Fonte de sobrepotencial de ativação	V_a	1,022 V
Resistência associada ao sobrepotencial	R_a	0,67 Ω

Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante dos resultados obtidos, foi realizada uma comparação entre o modelo simulado e os dados experimentais, com o objetivo de avaliar a fidelidade da caracterização. A Figura 22 apresenta os gráficos comparativos entre as curvas simuladas e as observadas em laboratório.

Figura 22 – Comparação entre simulação e experimento



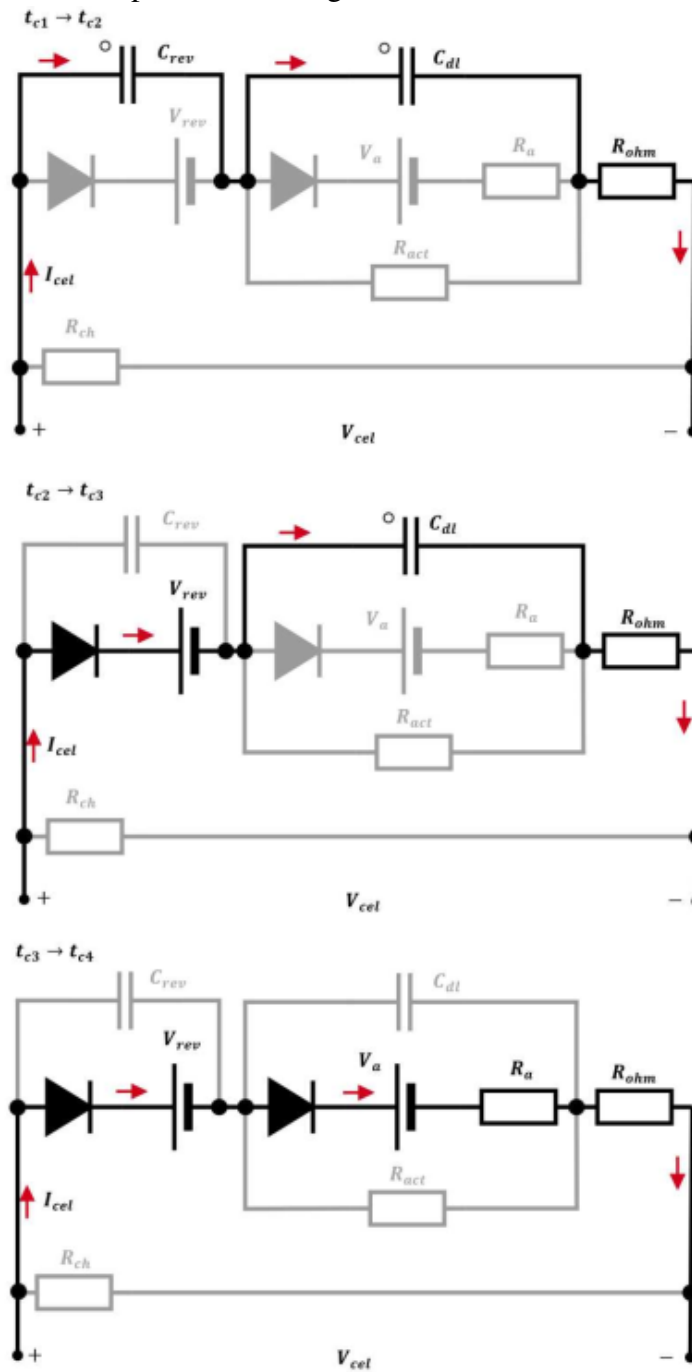
Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos resultados, nota-se um desvio mais pronunciado na Figura 22(b), onde o formato da curva de carga experimental apresenta um comportamento que extrapola a capacidade de representação do modelo adotado. Tal discrepância indica que a resposta elétrica dinâmica do eletrolisador envolve fenômenos adicionais que não são capturados pelo modelo elétrico equivalente adotado. Esse comportamento pode estar associado às características construtivas da célula eletrolítica utilizada, uma vez que parâmetros como geometria dos eletrodos e espaçamento intereletrodos, influenciam diretamente os sobrepotenciais da célula, conforme discutido no Capítulo 2.

Nesse contexto, o comportamento característico de carga da célula experimental impacta a resposta do arranjo associado ao sobrepotencial de ativação, fazendo com que este não reproduza integralmente a dinâmica observada. Ressalta-se que a célula empregada neste estudo apresenta uma configuração construtiva distinta daquela de eletrolisadores industriais, o que contribui para diferenças nos fenômenos interfaciais e, conseqüentemente, para as discrepâncias observadas entre o modelo e os resultados experimentais. Entretanto, essas limitações não invalidam o modelo, mas delimitam o seu campo de aplicabilidade.

A Figura 23 ilustra o processo de carga da célula e evidencia os aspectos dinâmicos que motivam a necessidade de extensões futuras do modelo.

Figura 23 – Equivalência do processo de carga da célula eletrolítica no modelo elétrico.

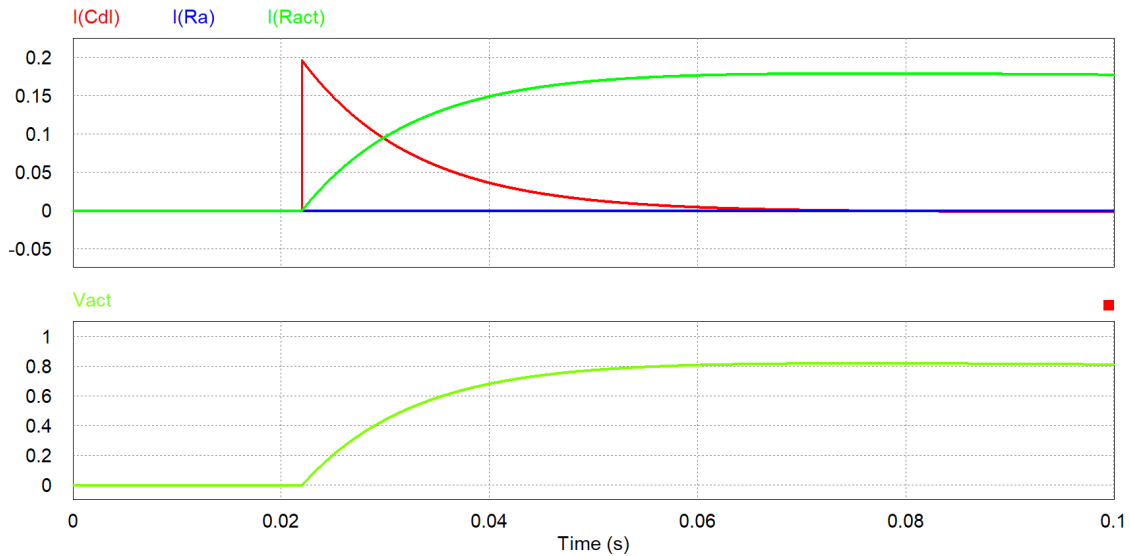


Fonte: (SOUSA, 2025).

No modelo o diodo D_2 , foi projetado para conduzir somente após o capacitor da dupla camada elétrica C_{dl} atingir a tensão de polarização V_a . Isso permitiria representar a dinâmica da carga. No entanto, foi observado que essa condição não é alcançada durante a simulação. A razão para isso está diretamente associada ao valor reduzido do resistor R_{act} . Para esta célula, o valor de R_{act} apresenta uma resistência muito pequena, a elevação da tensão no ramo faz com que uma fração crescente da corrente passe a fluir por esse caminho resistivo, em

vez de carregar C_{dl} . Dessa forma, a tensão no ramo deixa de ser determinada pela corrente de carga e passa a ser limitada pela queda resistiva em R_{act} . Dessa forma C_{dl} não acumula carga suficiente para elevar sua tensão ao patamar exigido para a condução de D_2 . Como consequência, a tensão do ramo nunca alcança o valor de V_a . Isso impede a ativação do diodo D_2 , mantendo o circuito permanentemente na condição em que a dinâmica do sobrepotencial de ativação é regulada apenas pelo caminho resistivo. A Figura 24 apresenta as correntes nos componentes simulados.

Figura 24 – Simulação das correntes nos componentes do ramo do sobrepotencial de ativação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2 Análise da Forma de Onda Medida

Para quantificar a precisão da forma de onda de corrente aplicada pela HCS, foi realizada uma comparação entre a onda experimental e a forma de onda ideal esperada para cada conjunto de parâmetros de operação.

A partir das informações extraídas de cada arquivo, frequência (f), razão cíclica (D) e corrente nominal ($I_{nominal}$) construiu-se a forma de onda ideal.

Para evitar distorções nos índices de erro decorrentes de atrasos introduzidos pelo sistema físico ou pela instrumentação, foi realizado um alinhamento entre a forma de onda medida $i_{medida}(t)$ e o pulso ideal. Esse alinhamento foi feito a partir da detecção do primeiro flanco de subida da corrente experimental.

Uma vez alinhadas, as duas formas de onda são comparadas por amostra, resultando no vetor de erro.

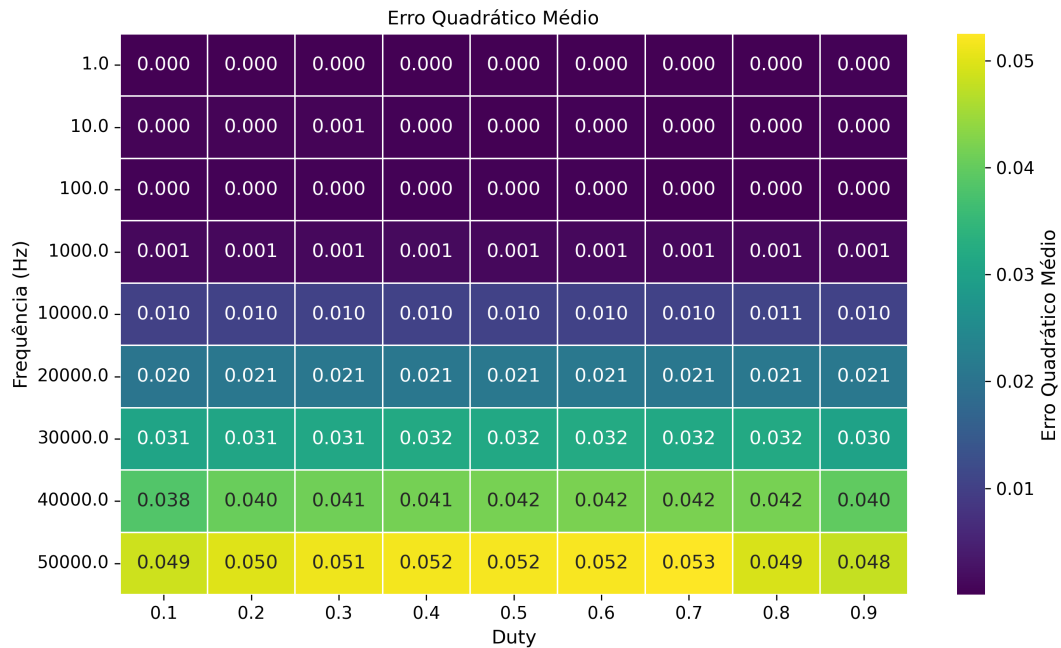
$$e[n] = i_{medido}[n] - i_{ideal}[n]. \quad (6.7)$$

Esse vetor expressa a diferença instantânea entre o pulso real e o pulso ideal. O Erro Quadrático Médio (EQM) é calculado.

$$EQM = \frac{1}{N_a} \sum_{n=1}^N e[n]^2 \quad (6.8)$$

A Figura 25 apresenta o mapa de calor, que expressa o erro quadrático médio entre a forma de onda medida e a forma de onda ideal para diferentes combinações de frequência e razão cíclica.

Figura 25 – Erro quadrático médio do pulso aplicado em relação a um formato de onda ideal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O sinal de corrente gerado apresentou um EQM de $\approx 0,000$ - $0,001$ para frequências entre 1 Hz e 1 kHz, independentemente do duty cycle. Nessa região, o sistema dispõe de tempo suficientemente longo em cada ciclo para que a corrente atinja o valor nominal e para que as transições de subida e descida ocorram. Assim, o sinal medido praticamente coincide com o sinal teórico. À medida que a frequência aumenta para a faixa intermediária, em torno de 10 kHz a 20 kHz, o EQM aumenta gradualmente para valores entre $\approx 0,01$ - $0,021$. Esse aumento se deve ao fato de que o sistema passa a operar em um regime dinâmico mais restritivo. Para frequências

ainda maiores, na faixa de 30 kHz a 50 kHz, o EQM atinge seus maiores valores, situando-se entre $\approx 0,03$ - $0,053$. Esse comportamento é esperado, uma vez que o tempo disponível por ciclo torna-se insuficiente para que a corrente acompanhe adequadamente a comutação, predominando os efeitos de limitação dinâmica impostos pelas limitações do LM675.

6.3 Análise Paramétrica da Eletrólise Pulsada

Esta seção dedica-se à análise dos resultados experimentais, comparando a eletrólise de água pulsada à eletrólise convencional por corrente contínua. A eficácia da EP reside na manipulação transiente da interface eletrodo-eletrólito. Nesta seção, a influência da frequência e da razão cíclica do pulso de corrente sobre as variáveis de resposta do sistema como a tensão do eletrolisador, a vazão de hidrogênio produzido e a eficiência energética do processo, são analisadas. A análise é conduzida para o cenário experimental aplicando a EP com picos de corrente de 2A.

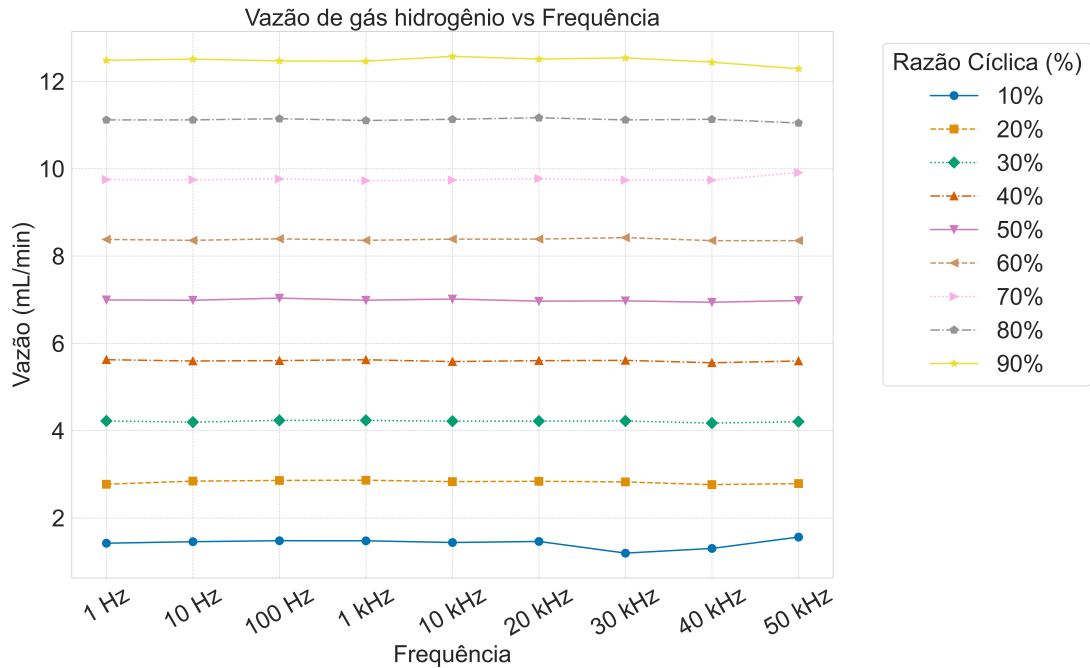
Inicialmente, uma avaliação da eficiência do sistema de coleta de gases, baseada na comparação entre o volume experimental de H_2 coletado e o volume teórico estimado a partir da corrente média registrada durante os ensaios, foi realizada. Os valores de eficiência faradaica, obtidos pela razão entre os volumes medidos e teóricos, concentraram-se na faixa entre 110 e 120%, excedendo o limite de 100%. Esse comportamento indica a presença de um erro sistemático positivo no sistema de medição de vazão de gás. Diante disso, a comparação entre as diferentes condições de modulação foi conduzida utilizando os volumes teóricos calculados com base na corrente média, conforme os princípios estabelecidos pela Lei de Faraday.

A influência de parâmetros como frequência e razão cíclica, foi analisada. Subsequentemente, uma avaliação quantitativa do desempenho comparado a eficiência entre os parâmetros de pulsos aplicados conjuntamente e, finalmente, com a eletrólise c.c..

6.3.1 Influência da Frequência do Pulso

O gráfico apresentado na Figura 26 mostra o comportamento da produção teórica de H_2 em função da variação da frequência para diferentes razões cíclicas.

Figura 26 – Influência da frequência na produção teórica de H_2 .



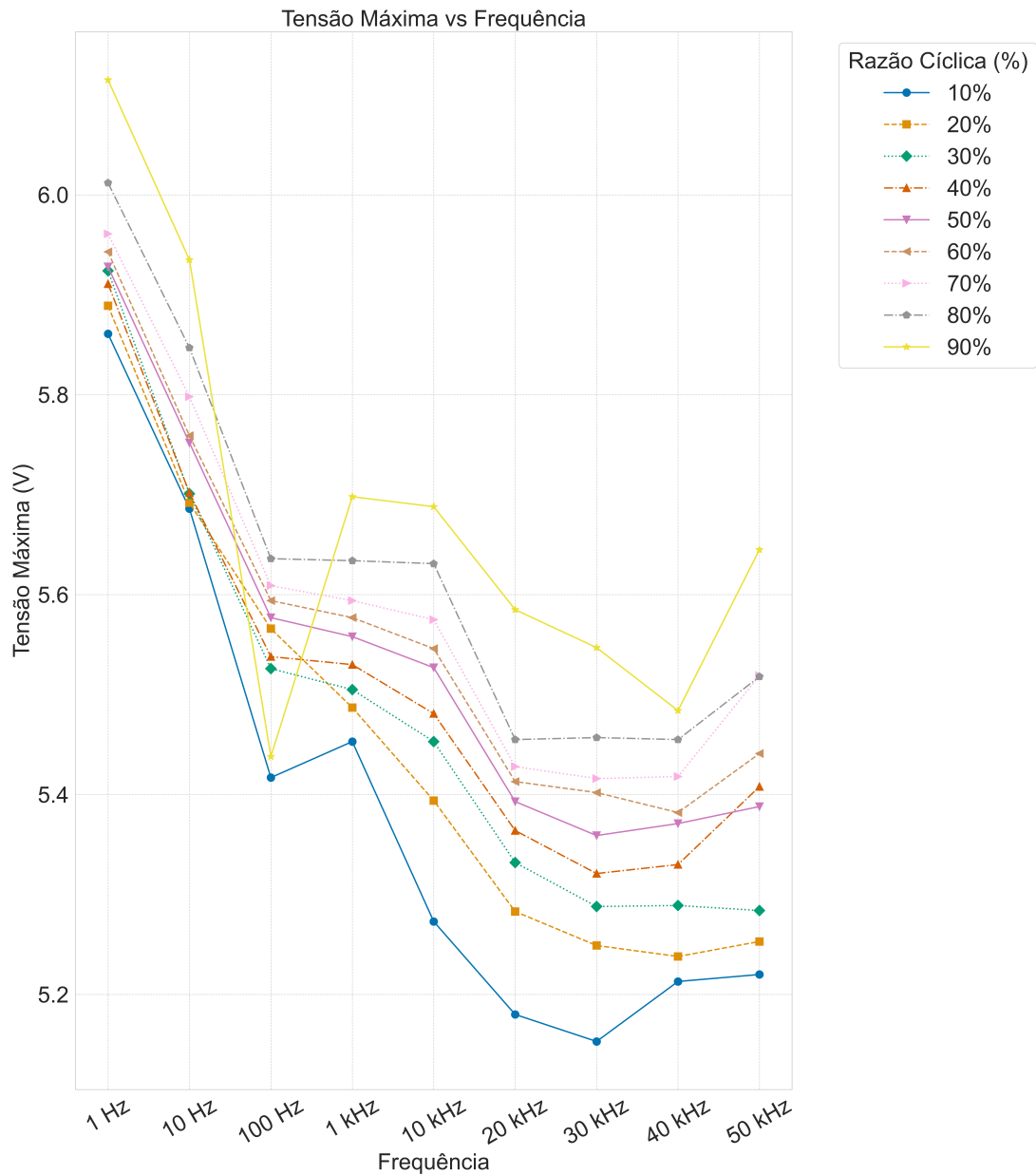
Fonte: Elaborado pelo autor

A partir do gráfico, observa-se que a produção teórica de H_2 permaneceu praticamente constante em todas as faixas de frequência para ciclos de trabalho intermediários (de 20 para 60%), com exceção de pequenas variações nas faixas superiores e sobretudo para razões cíclicas de 10, 70 e 90%.

Como o cálculo do volume teórico é relacionado a corrente média, essas oscilações são associadas ao comportamento da alimentação de corrente fornecida pela HCS. Quando a operação se aproxima do limite superior de 60 kHz (TEXAS INSTRUMENTS, 2013), especialmente em ciclos ativos ou inativos de tempos muito curtos (10% e 90%), a forma de onda quadrada tende a sofrer deformação. Essa deformação, é associada ao tempo de resposta e ao erro de *offset* intrínseco do amplificador LM675, que modifica a corrente média e resulta em pequenas variações na produção teórica de H_2 .

O gráfico da Figura 27 apresenta a variação da tensão máxima na célula em função da frequência para diferentes razões cíclicas.

Figura 27 – Influência da frequência na tensão máxima da célula.



Fonte: Elaborado pelo autor

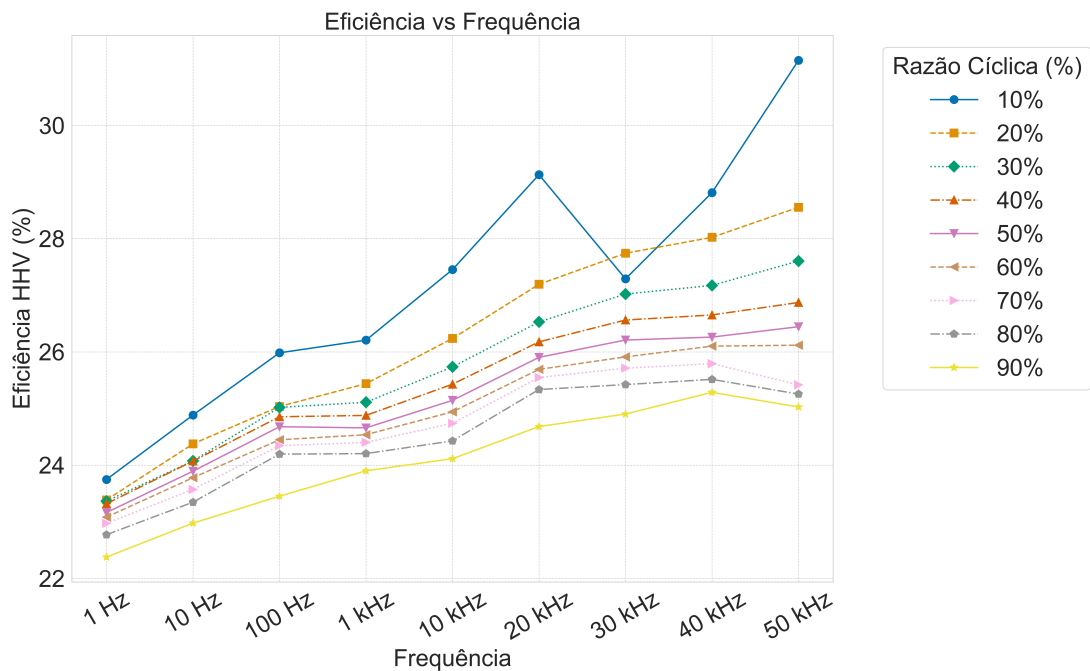
A tensão máxima da célula tende a diminuir à medida que a frequência aumenta, com exceção dos ciclos de 10, 80 e 90%. Para a frequência de 1 kHz, os ciclos de 10, 80 e 90% apresentaram, respectivamente, um aumento, uma estabilidade e um leve aumento de tensão. Acima dessa faixa, todas as condições exibem redução gradual até a faixa de aproximadamente 30–40 kHz. O aumento observado na faixa de 50 kHz, pode ser atribuída ao erro intrínseco de *offset* do LM675, que se intensifica em 50 kHz.

Comparando as tensões máximas entre as frequências de 1 Hz e 50 kHz, observa-se que, mesmo no cenário menos favorável (razão cíclica de 90%), ocorreu uma redução

de aproximadamente 160 mV. Entretanto, a aplicação do pulso com o razão cíclica de 20% apresentou a maior redução, cerca de 704 mV. A média de redução da tensão máxima entre todas as condições, de 10 à 90%, entre 1 e 50 kHz, foi próxima de 539 mV. A redução do sobrepotencial global pode ser atribuído à redução da resistência equivalente da célula, o efeito foi observado por Vincent *et al.* (2018), onde a resistência reduzia conforme a frequência de operação subia, e por Demir *et al.* (2018) com o aumento das densidades de correntes durante regime pulsado. Zhang *et al.* (2025) observou que durante o regime pulsado, o diâmetro das bolhas são menores em comparação com o regime c.c., otimizando a área ativa do eletrolito e reduzindo os sobrepotenciais na faixa de 180 e 220 mV. Essa redução da tensão sugere uma mitigação do sobrepotencial global do sistema, o que se reflete diretamente em ganhos de eficiência quando a eletrólise é conduzida sob regime pulsado.

O gráfico da Figura 28 ilustra a variação da eficiência em função da frequência para diferentes ciclos de trabalho.

Figura 28 – Influência da frequência na eficiência.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados indicam que as curvas de eficiência se mantêm com comportamento semelhante até cerca de 40 kHz, com exceção ao ciclo de 10%, cujo desvio experimental inviabilizou análise comparativa precisa.

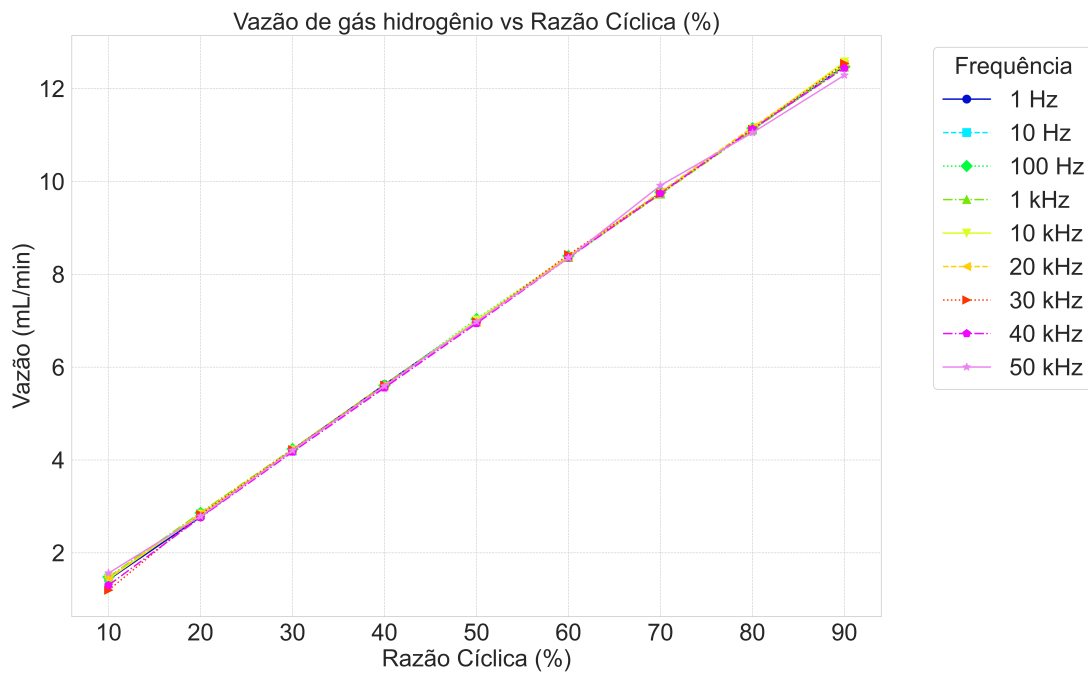
Para o razão cíclica de 20%, verificou-se um ganho relativo de aproximadamente

22,1% entre 1 Hz e 50 kHz (aumento de 23,386% para 28,556%), enquanto o ciclo de 90% apresentou ganho relativo de 11,9% (de 22,376% para 25,027%). Esses resultados reforçam a contribuição positiva da modulação em frequência na redução do sobrepotencial e na melhoria da eficiência global do processo. Assim como observado em (VINCENT *et al.*, 2018; DEMIR *et al.*, 2018; ROCHA; PROOST, 2021), os maiores pontos de eficiência da eletrólise pulsada, encontram-se em frequências superiores.

6.3.2 Influência do razão cíclica

A Figura 29 apresenta a produção teórica de H_2 em função da variação do razão cíclica.

Figura 29 – Influência do razão cíclica na produção teórica de H_2 .

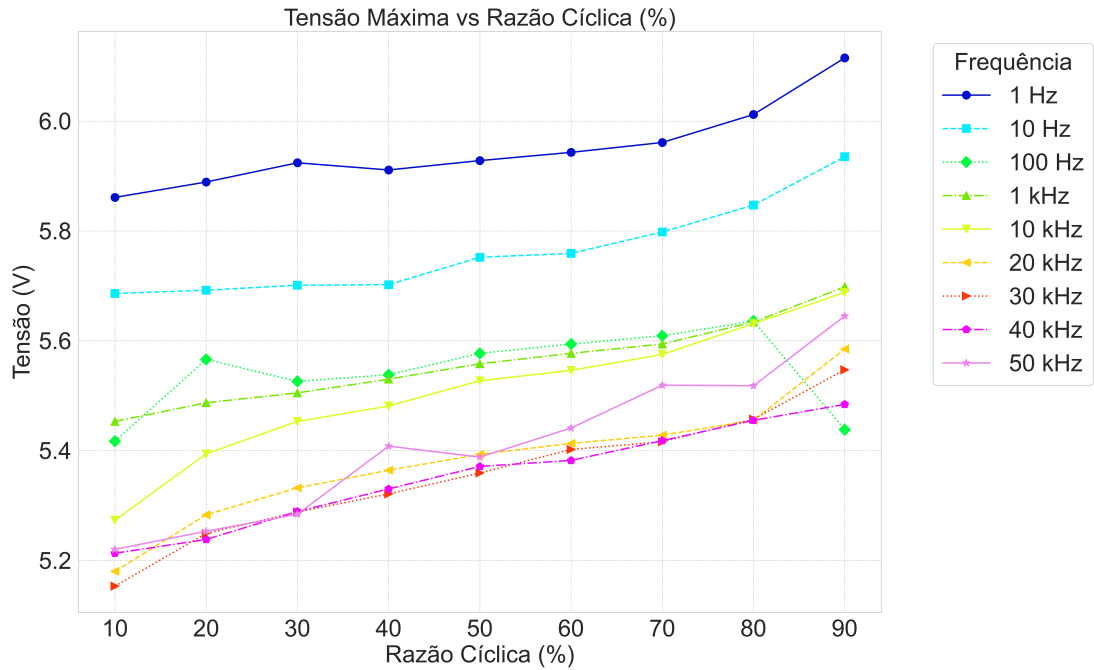


Fonte: Elaborado pelo autor

De modo geral, observa-se uma relação aproximadamente linear entre a produção de gás e o aumento da largura de pulso. Comportamento esperado, uma vez que o acréscimo de tempo ativo eleva a corrente média e, consequentemente, a taxa de geração de hidrogênio.

A Figura 30 mostra a variação da tensão máxima na célula em função do razão cíclica.

Figura 30 – Influência do razão cíclica na tensão máxima da célula.

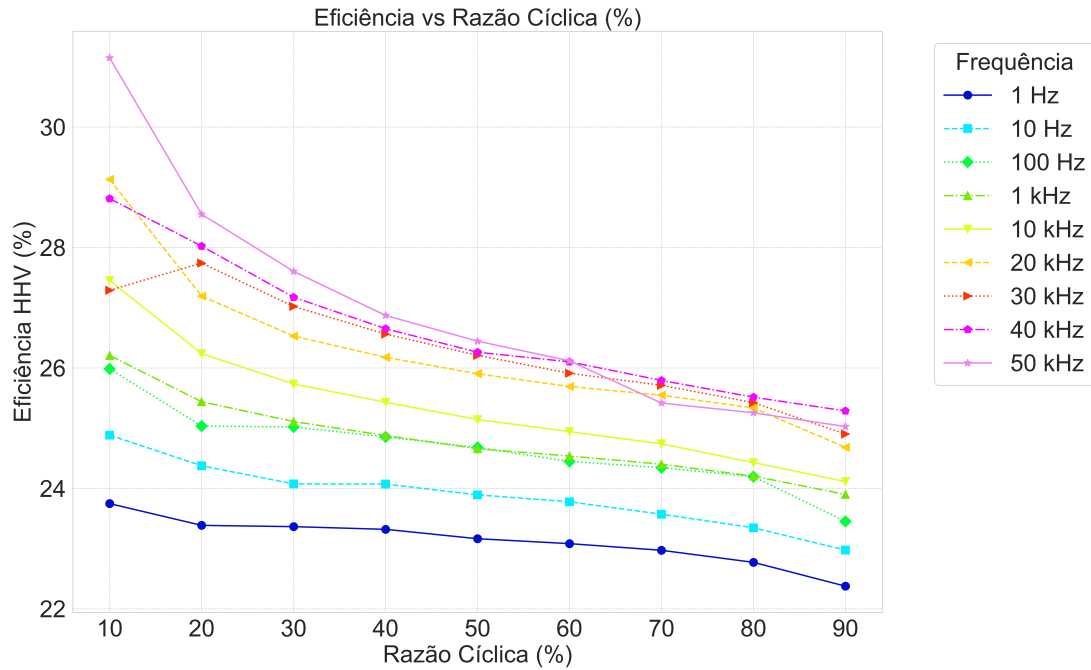


Fonte: Elaborado pelo autor

Com o aumento do razão cíclica, verifica-se também a elevação da tensão máxima da célula, fenômeno que pode ser atribuído ao processo de carga da EDL. À medida que o tempo ativo aumenta, há maior contribuição das perdas associadas aos sobrepotenciais, resultando em um aumento da tensão máxima.

A Figura 31 apresenta a variação da eficiência energética em função do razão cíclica.

Figura 31 – Influência do razão cíclica na eficiência energética.



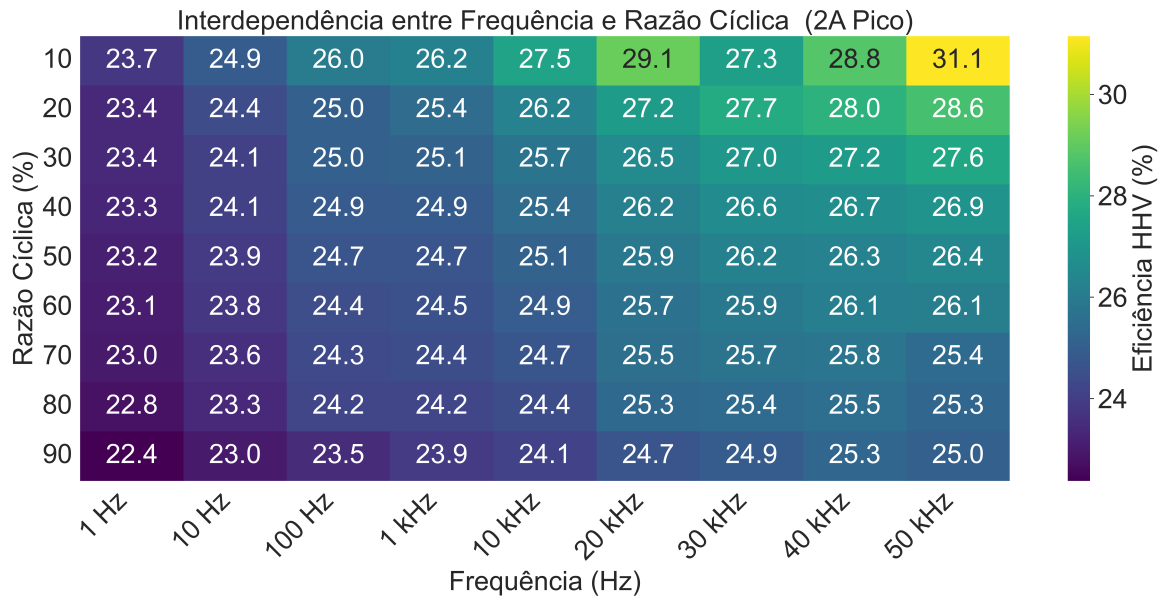
Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados obtidos indicam que os maiores valores de eficiência são alcançados para razões cíclicas inferiores a 50%. Esse resultado reforça as observações sobre o comportamento da eletrólise pulsada apresentado em (CHENG *et al.*, 2024; ZHANG *et al.*, 2025) e principalmente por Rocha e Proost (2021), onde foi observado que razões cíclicas inferiores apresentam melhorias nas para todas as frequências analisadas, principalmente em frequências maiores. Essa tendência reforça a importância do equilíbrio entre a razão cíclica e a frequência aplicada, para maximizar a eficiência do processo.

6.3.3 Análise da Interdependência dos Parâmetros

O mapa de calor, Figura 32, foi elaborado para mapear a interdependência entre frequência e o razão cíclica e identificar as regiões de maior eficiência. Essa representação permite visualizar a influência sinérgica entre os dois parâmetros sobre a eficiência energética do sistema.

Figura 32 – Interdependência entre frequência e razão cíclica na eficiência energética.



Fonte: Elaborado pelo autor

A análise conjunta dos parâmetros revela que as combinações de frequência elevadas e razões cíclica <50% resultam nos maiores valores de eficiência. Observando os pontos ótimos de operação com razões cíclicas de 20 e 30% para frequências de 40 e 50 kHz, é observado que o *toff* que maximiza os efeitos avaliados é por volta de 20 us e 14 us.

A literatura indica que o parâmetro ótimo de operação da eletrólise pulsada encontra-se, em geral, na mesma ordem de grandeza do tempo característico de descarga da dupla camada elétrica. Entretanto, os valores de *toff* obtidos experimentalmente diferem daqueles estimados a partir da caracterização elétrica direta da célula.

6.4 Análise Comparativa de Desempenho: EP vs. c.c.

Esta seção realiza uma comparação direta entre os modos de operação, utilizando os pontos ótimos da EP identificados anteriormente contra seus respectivos em c.c.. A comparação realizada foi baseada na corrente média para cada parâmetro de operação. As correntes aplicadas durante o pulso eram de 2A, foram selecionados pulsos onde a corrente média era equivalente a operação em modo c.c..

6.4.1 Análise Comparativa de Desempenho

A Tabela 4 sumariza os principais indicadores de desempenho para os cenários escolhidos.

Tabela 4 – Resumo comparativo da eficiência

Método	Eficiência HHV (%)	Método	Eficiência HHV (%)	Ganho Relativo (%)
c.c. (1,8 A)	23,04	EP 40 kHz 90% (1,786 A)	25,28	9,72
c.c. (1,6 A)	24,76	EP 40 kHz 80% (1,598 A)	25,51	3,02
c.c. (1,4 A)	26,77	EP 40 kHz 70% (1,398 A)	25,79	-3,66
c.c. (1,2 A)	29,12	EP 50 kHz 60% (1,199 A)	26,11	-10,33
c.c. (1A)	31,85	EP 50 kHz 50% (1A)	26,44	-16,98

Fonte: Elaborado pelo autor

6.4.2 Discussão dos Resultados e Análise Comparativa entre Corrente Contínua e Corrente Pulsada

Os resultados apresentados neste capítulo representam uma investigação inicial acerca da aplicação da eletrólise pulsada (EP) em comparação à eletrólise convencional por corrente contínua (c.c.).

Os dados apresentados na Tabela 4 indicam que, sob regime de corrente contínua, a eficiência energética, baseada no poder calorífico superior, aumenta progressivamente à medida que a corrente é reduzida. Esse comportamento é típico de sistemas de eletrólise alcalina, onde correntes mais elevadas intensificam as perdas por sobrepotenciais, resultando em menor aproveitamento energético (ZHANG *et al.*, 2025). Entretanto, em sistemas alcalinos comerciais (AWE), a faixa típica de densidade de corrente situa-se entre 0,2 e 0,5 A/cm² (CHENG *et al.*, 2024). Neste trabalho, a densidade de corrente máxima alcançada foi de aproximadamente 0,5 A/cm², correspondente à aplicação de 2 A. No entanto, devido à alta resistência interna do eletrolisador utilizado, obtidas durante a caracterização, as tensões de operação foram significativamente superiores, o que acentuou as perdas em dentro da faixa de operação. Assim, a eficiência observada em baixas correntes reflete mais o caráter resistivo do dispositivo do que as reações em si.

Essa diferença evidencia que o dispositivo empregado opera em regime distante das condições industriais, o que restringe uma análise comparativa, mas ainda assim permite identificar tendências relevantes e efeitos qualitativos da modulação pulsada.

A comparação direta entre as condições equivalentes de corrente média ocorreu entre

a faixa de densidade de corrente de operação de 0,2 e 0,5 A/cm² e evidenciou que, a eficiência da eletrólise pulsada foi inferior à obtida em corrente contínua para densidade de correntes abaixo de 0,400 A/cm² (1,6 A). Por exemplo, para uma corrente média próxima de 1 A, a eficiência da EP (50 kHz, 50% de razão cíclica) foi de aproximadamente 26,44%, enquanto a operação em c.c. atingiu 31,85%, uma redução relativa de aproximadamente 17%.

Apesar disso, os resultados obtidos para densidade de correntes mais elevadas mostraram comportamento promissor e semelhante aos observados na literatura. A partir de 0,4 A/cm², a produção de hidrogênio intensifica-se, e o regime pulsado demonstrou capacidade de reduzir a tensão máxima da célula, indicando mitigação parcial dos sobrepotenciais e demonstrou um aumento na eficiência um ganho relativo de 9,72%. Mesmo com a limitação imposta pela célula, os resultados sugerem que, a eletrólise pulsada pode trazer ganhos em eficiência energética e estabilidade operacional.

6.5 Discussão dos Mecanismos de Melhoria

A melhoria de desempenho da EP pode ser atribuída a uma combinação de mecanismos físico-químicos:

6.5.1 Redução de Sobrepotenciais

A redução da tensão da célula do sistema para uma mesma ou similar produção de gás, como no caso do EP, é a evidência mais direta da mitigação dos sobrepotenciais. A tensão da célula (V_{cell}) é a soma do tensão reversível (E_{rev}) e dos sobrepotenciais (ativação η_{act} e ôhmico η_{Ω}). Como E_{rev} é constante para pressões e temperaturas fixas e controladas, a diminuição de V_{cell} pode ser implicada diretamente na redução da soma dos sobrepotenciais $\eta_{\text{act}} + \eta_{\Omega}$.

A partir dos resultados, é observado que o incremento da frequência de pulso resulta em uma redução da tensão média da célula, atingindo uma diminuição máxima de até 700 mV nas condições testadas.

6.6 Conclusões do Capítulo

O presente capítulo teve como objetivo central apresentar e discutir detalhadamente os resultados experimentais obtidos para o eletrolisador alcalino, com ênfase na avaliação comparativa entre os modos de operação em corrente contínua e eletrólise pulsada. Para tal,

a estrutura do capítulo foi organizada em três etapas principais: a caracterização inicial do sistema eletrolítico; a análise paramétrica dos efeitos da modulação pulsada e (iii) a comparação quantitativa do desempenho entre os dois regimes de operação.

Na etapa de caracterização, a curva corrente–tensão (I–V) foi utilizada para definir a faixa operacional do sistema, enquanto os ensaios de degrau e interrupção de corrente permitiram quantificar a dinâmica transiente da célula, revelando os tempos característicos de carga e relaxamento. A partir desses testes, observou-se que o eletrolisador apresenta uma elevada resistência interna e uma capacitância relativamente baixa. Essas características, diretamente relacionadas às dimensões construtivas do equipamento, indicam que a faixa de operação difere daquela geralmente reportada na literatura. Em virtude da alta resistência ôhmica, as perdas mostraram-se significativas, o que impactou diretamente na análise comparativa de eficiência. Ainda assim, a utilização do circuito HCS possibilitou a caracterização segundo a metodologia proposta por Sousa (2025), sem a necessidade de modificações no arranjo experimental.

Uma análise comparando a forma de onda produzida pela HCS durante os testes com uma onda ideal utilizando dos mesmo parâmetros foi utilizada. O mapa de calor apresentado revelou que o sistema apresenta um erro quadrático médio muito baixo nas baixas frequências (<1 kHz), sólido (0,01-0,021) nas frequências intermediárias (10-20 kHz) e mais elevados ($\approx$ 0,03-0,05) nas frequências mais elevadas (>30 kHz).

A análise da EP, conduzida em regime de 2 A de pico, demonstrou a forte influência da frequência e da razão cíclica sobre o desempenho energético do processo. Verificou-se que frequências elevadas (até 50 kHz), associadas a razões cíclicas de até 50%, contribuíram para o aumento da eficiência e para a redução significativa da tensão de operação. A análise de interdependência dos parâmetros, realizada por meio de mapas de calor, confirmou visualmente as regiões de maior eficiência e destacou a existência de pontos ótimos distintos de operação.

Na etapa comparativa, observou-se que a eletrólise pulsada apresenta desempenho inferior ao da eletrólise em corrente contínua em regimes de densidade de corrente inferiores a $0,4$ A/cm². Contudo, em condições de alta corrente, a EP, operando em corrente média de $1,8$ A ($0,5$ A/cm²), alcançou uma eficiência de 25,28%, o que representa um ganho relativo de 7,53% em relação à sua condição de referência em c.c.. A discussão dos mecanismos associados a esse comportamento indicou que os ganhos observados decorrem de uma combinação sinérgica de efeitos físico-químicos, com destaque para a mitigação dos sobrepotenciais.

As conclusões apresentadas neste capítulo reforçam a versatilidade do circuito desen-

volvido, que se mostrou eficaz tanto na aplicação controlada de pulsos de corrente, fundamental para a análise da eletrólise pulsada, quanto na caracterização elétrica precisa da célula eletrolítica.

Os achados experimentais confirmam que os parâmetros de pulso exercem influência sobre o desempenho do sistema, afetando eficiência energética e seu comportamento elétrico dinâmico. Essa constatação valida a abordagem metodológica adotada e demonstra o potencial da eletrólise pulsada como estratégia de otimização.

No próximo capítulo, as principais conclusões do estudo são consolidadas, com ênfase nas contribuições científicas e tecnológicas alcançadas, nas limitações observadas ao longo do trabalho e nas possibilidades de avanço futuro, especialmente no contexto de integração de sistemas de eletrólise com fontes de energia renovável.

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e aplicar um circuito com característica de fonte de corrente para acionar uma célula eletrolítica em regime pulsado, permitindo avaliar de forma experimental como parâmetros como frequência e razão cíclica influenciam o desempenho eletroquímico e a eficiência energética de um eletrolisador alcalino.

Inicialmente, revisaram-se os princípios termodinâmicos e cinéticos que regem a eletrólise da água, destacando-se a tensão reversível, os sobrepotenciais ôhmico e de ativação, bem como a influência de variáveis como pressão, temperatura e densidade de corrente. Em seguida, os principais tipos de eletrolisadores foram analisados, e o sistema alcalino foi escolhido devido à sua maturidade tecnológica e menor custo de operação.

A revisão sobre eletrólise pulsada permitiu identificar os mecanismos que explicam a melhoria de desempenho na eletrólise da água. Verificou-se que, durante o intervalo de repouso do pulso, ocorre um alívio na camada de difusão, favorecendo o reabastecimento de espécies reativas na interface eletrodo–eletrolito. Paralelamente, a modulação pulsada promove um alívio periódico na formação de bolhas, facilitando sua liberação da superfície do eletrodo. Esses fenômenos reduzem os sobrepotenciais da células e diminuem a resistência equivalente do sistema. Observou-se também que pulsos de corrente tendem a apresentar resultados superiores aos pulsos de tensão.

A partir da revisão, foram definidas as características necessárias para a fonte a ser desenvolvida. Entre elas, destacou-se a necessidade de um circuito capaz de operar de forma efetivamente independente da impedância da célula, condição necessária para lidar com as variações da resistência equivalente durante a eletrólise pulsada. Após uma revisão das possíveis topologias, a *Howland Current Source* foi selecionada por atender aos requisitos de operação. Além disso, a topologia oferece baixo custo de implementação e permite a replicação de qualquer forma de onda aplicada à sua entrada, mas com característica de fonte de corrente.

O equacionamento do circuito permitiu derivar a equação geral de transcondutância e estabelecer a condição de balanço resistivo responsável por garantir a independência da corrente em relação à carga.

Os resultados experimentais confirmaram o desempenho satisfatório da fonte baseada na topologia Howland. As formas de onda aplicadas apresentaram um erro quadratico médio máximo de 0,053 em relação à uma onda ideal, e o circuito foi eficaz tanto na geração dos pulsos quanto na caracterização elétrica da célula eletrolítica utilizada. As medições revelaram que a

célula estudada apresenta elevada resistência interna e baixa capacitância, características que influenciaram diretamente a resposta dinâmica e a faixa ideal de operação.

Nos testes com eletrólise pulsada, observou-se que frequências elevadas (50 kHz) associadas a razões cíclicas de aproximadamente 50% resultaram em reduções significativas na tensão média de operação e ganhos relevantes de eficiência, em consonância com resultados reportados na literatura. Em comparação à operação em corrente contínua, verificou-se um ganho relativo de 9,72% em altas densidades de corrente. Além disso, o regime pulsado alcançou eficiências de até 31,1% e apresentou valores consistentes entre 27% e 28,6% para frequências de 40 e 50 kHz com ciclos de trabalho de 20% e 30%.

7.1 Conclusões Gerais

Os resultados demonstram que o protótipo desenvolvido, baseado na topologia Howland Current Source, é eficaz no controle preciso de correntes pulsadas e na caracterização elétrica de células eletrolíticas. A principal contribuição deste trabalho reside no desenvolvimento e validação de uma ferramenta experimental de baixo custo e fácil replicabilidade, capaz de aplicar diferentes perfis de corrente pulsada, com controle independente de frequência, razão cíclica e amplitude, mantendo elevada independência em relação às variações da impedância da carga.

Essa característica possibilita a aplicação do circuito HCS em estudos experimentais da eletrólise pulsada, viabilizando a investigação dos efeitos da modulação elétrica sem a interferência direta das variações dinâmicas da célula eletrolítica.

7.2 Perspectivas Futuras

Como continuidade natural deste estudo, recomenda-se a aplicação da metodologia desenvolvida em células eletrolíticas com características construtivas mais próximas das utilizadas em escala industrial. Essa abordagem permitirá uma avaliação mais representativa do comportamento real do processo, evitando que parâmetros como resistência interna, capacitância e faixa operacional se distanciem das condições típicas reportadas na literatura.

De modo geral, o trabalho contribui para o entendimento da eletrólise pulsada e demonstrou que o protótipo e a topologia HCS oferece uma solução precisa, acessível e versátil para estudos experimentais que demandam controle dinâmico de corrente, configurando-se como

uma ferramenta promissora para investigações futuras nesse campo.

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, A. M.; HOSSAIN, S.; NISFINDY, O. B.; AZAD, A. T.; DAWOOD, M.; AZAD, A. K. Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review. **Energy Conversion and Management**, v. 165, p. 602–627, 2018. ISSN 0196-8904. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418303170>>.
- ALSABA, W.; AL-SOBHI, S.; QYYUM, M. Recent advancements in the hydrogen value chain: Opportunities, challenges, and the way forward—middle east perspectives. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier Ltd, v. 48, n. 68, p. 26408–26435, ago. 2023. ISSN 0360-3199. Publisher Copyright: © 2023 Hydrogen Energy Publications LLC.
- BATISTA, D. S.; GRANZIERA, F.; TOSIN, M. C.; de Melo, L. F. Analysis and practical implementation of a high-power howland current source. **Measurement**, v. 207, p. 112404, 2023. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224122016013>>.
- BESSARABOV, D.; WANG, H.; LI, H.; ZHAO, N. (Ed.). **PEM Electrolysis for Hydrogen Production: Principles and Applications**. 1st. ed. CRC Press, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1201/b19096>>.
- BUTTLE, A.; SPLIETHOFF, H. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2440–2454, 2018. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211731242X>>.
- CAO, X.; ZHAO, N.; ZHANG, S.; ZHOU, L.; HU, Y.; YUN, J. Investigation of the hydrogen bubble effect on the overpotential in an alkaline water electrolyzer. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 49, 07 2023.
- CARDOSO, J. L.; PANOSSIAN, Z. Cinética eletroquímica: comparação de curvas de polarização teóricas com as curvas experimentais. In: **Anais do 32º Congresso Brasileiro de Corrosão, INTERCORR 2012**. Salvador: ABRACO, 2012. p. 13.
- CAVALIERE, P. **Water Electrolysis for Hydrogen Production**. Springer, 2023. ISBN 978-3-031-37780-8. Disponível em: <<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-37780-8>>.
- CHENG, H.; XIA, Y.; HU, Z.; WEI, W. Optimum pulse electrolysis for efficiency enhancement of hydrogen production by alkaline water electrolyzers. **Applied Energy**, v. 358, p. 122510, 2024. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923018743>>.
- DARBAND, G. B.; ALIOFKAZRAEI, M.; SHANMUGAM, S. Recent advances in methods and technologies for enhancing bubble detachment during electrochemical water splitting. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 114, p. 109300, oct 2019.
- de Miranda, P. E. V. Chapter 1 - hydrogen energy: Sustainable and perennial. In: DE MIRANDA, P. E. V. (Ed.). **Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies**. Academic Press, 2019. p. 1–38. ISBN 978-0-12-814251-6. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128142516000010>>.

DEMIR, N.; KAYA, M. F.; ALBAWABIJI, M. S. Effect of pulse potential on alkaline water electrolysis performance. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 36, p. 17013–17020, 2018. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319918322602>>.

DOBÓ, Z.; PALOTÁS Árpád B. Impact of the current fluctuation on the efficiency of alkaline water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 9, p. 5649–5656, 2017. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319916334310>>.

FRANCO, A.; GIOVANNINI, C. Recent and future advances in water electrolysis for green hydrogen generation: Critical analysis and perspectives. **Sustainability**, v. 15, n. 24, 2023. ISSN 2071-1050. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/15/24/16917>>.

GOV.BR. **COP 30**. 2025. <<https://www.gov.br/mdr/cop30>>. Acesso em: 2025.

HAN, L.; DONG, S.; WANG, E. Transition-metal (co, ni, and fe)-based electrocatalysts for the water oxidation reaction. **Advanced Materials**, v. 28, n. 42, p. 9266–9291, 2016. Disponível em: <<https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201602270>>.

HOSSAIN, M. B.; ISLAM, M. R.; MUTTAQI, K. M.; SUTANTO, D.; AGALGAONKAR, A. P. Dynamic electrical circuit modeling of a proton exchange membrane electrolyzer for frequency stability, resiliency, and sensitivity analysis in a power grid. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 59, n. 6, p. 7271–7281, 2023.

HUANG, D.; XIONG, B.; FANG, J.; HU, K.; ZHONG, Z.; YING, Y.; AI, X.; CHEN, Z. A multiphysics model of the compactly-assembled industrial alkaline water electrolysis cell. **Applied Energy**, v. 314, n. C, 2022. Disponível em: <<https://ideas.repec.org/a/eee/appene/v314y2022ics0306261922003968.html>>.

IEA. **Hydrogen in Latin America**. Paris: IEA, 2021. Licence: CC BY 4.0. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/hydrogen-in-latin-america>>.

IEA. **Global Hydrogen Review 2023**. Paris: International Energy Agency, 2023. Licence: CC BY 4.0. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>>.

IEA. **Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity**. Paris: International Energy Agency, 2023. Licence: CC BY 4.0. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/towards-hydrogen-definitions-based-on-their-emissions-intensity>>.

International Energy Agency. **Energy Technology Perspectives 2020**. Paris: [s.n.], 2020. Licence: CC BY 4.0. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>>.

IRENA. **Shaping sustainable international hydrogen value chains**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2024.

KHALID RATIB, M.; M. Muttaqi, K.; ISLAM, M. R.; SUTANTO, D.; AGALGAONKAR, A. P. Electrical circuit modeling of proton exchange membrane electrolyzer: The state-of-the-art, current challenges, and recommendations. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 49, p. 625–645, 2024. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923045172>>.

KOUNDI, M.; FADIL, H. E.; IDRISSE, Z. E.; LASSIOUI, A.; INTIDAM, A.; BOUANOU, T.; NADY, S.; RACHID, A. Investigation of hydrogen production system-based pem el: Pem el modeling, dc/dc power converter, and controller design approaches. **Clean Technologies**, v. 5, n. 2, p. 531–568, 2023. ISSN 2571-8797. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2571-8797/5/2/28>>.

LAM, I. V. **Analysis of Improved Howland Current Pump Configurations**. Dallas, TX, 2023. Revisado em Fevereiro de 2023.

LI, D.; SHI, J.; LI, C. Transition-metal-based electrocatalysts as cocatalysts for photoelectrochemical water splitting: A mini review. **Small**, v. 14, n. 23, p. 1704179, 2018. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sml.201704179>>.

LIU, N.; CHEN, R.; WAN, Q. Recent advances in electric-double-layer transistors for bio-chemical sensing applications. **Sensors**, v. 19, n. 15, 2019. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/19/15/3425>>.

MASAUD, Z.; LIU, G.; ROSENG, L. E.; WANG, K. Progress on pulsed electrocatalysis for sustainable energy and environmental applications. **Chemical Engineering Journal**, v. 475, p. 145882, 2023. ISSN 1385-8947. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894723046132>>.

MAYYAS, A.; WEI, M.; LEVIS, G. Hydrogen as a long-term, large-scale energy storage solution when coupled with renewable energy sources or grids with dynamic electricity pricing schemes. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 33, p. 16311–16325, 2020. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920315664>>.

MEROUANI, S.; HAMDAOUI, O. (Ed.). **Hydrogen Production, Storage and Utilization**. Berlin, Boston: De Gruyter, 2025. ISBN 9783111623863. Disponível em: <<https://doi.org/10.1515/9783111623863>>.

MONK, N.; WATSON, S. Review of pulsed power for efficient hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 19, p. 7782–7791, 2016. ISSN 0360-3199. Special Issue on Progress in Hydrogen Production and Applications (ICH2P-2015), 3-6 May 2015, Oshawa, Ontario, Canada. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915027664>>.

ROCHA, F.; PROOST, J. Discriminating between the effect of pulse width and duty cycle on the hydrogen generation performance of 3-d electrodes during pulsed water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 57, p. 28925–28935, 2021. ISSN 0360-3199. HYDROGEN ENERGY SYSTEMS. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920344839>>.

SHIMIZU, N.; HOTTA, S.; SEKIYA, T.; ODA, O. A novel method of hydrogen generation by water electrolysis using an ultra-short-pulse power supply. **Journal of Applied Electrochemistry**, v. 36, p. 419–423, 04 2006.

SHIVA KUMAR, S.; LIM, H. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. **Energy Reports**, v. 8, p. 13793–13813, 2022. ISSN 2352-4847. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722020625>>.

SMOLINKA, T.; GARCHE, J. (Ed.). **Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications**. Amsterdam: Elsevier, 2022. ISBN 978-0-12-819424-9. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/book/9780128194249/electrochemical-power-sources>>.

SOUSA, H. P. V. O. d. **Proposta de um modelo elétrico simplificado e um modelo elétrico dinâmico de eletrolisadores para eletrônica de potência aplicada em sistemas de produção de H₂**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação)) — Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral, 2025.

TEXAS INSTRUMENTS. **AN-1515 A Comprehensive Study of the Howland Current Pump**. [S.l.], 2013.

TEXAS INSTRUMENTS. **LM675 Power Operational Amplifier**. Dallas, TX, 2013. Datasheet SNOSBP3E. Revisado em Março de 2013.

ULLEBERG, Modeling of advanced alkaline electrolyzers: A system simulation approach. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 28, p. 21–33, 01 2003.

VIJ, V.; SULTAN, S.; HARZANDI, A. M.; MEENA, A.; TIWARI, J. N.; LEE, W.-G.; YOON, T.; KIM, K. S. Nickel-based electrocatalysts for energy-related applications: Oxygen reduction, oxygen evolution, and hydrogen evolution reactions. **ACS Catalysis**, American Chemical Society, v. 7, n. 10, p. 7196–7225, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acscatal.7b01800>>.

VINCENT, I.; CHOI, B.; NAKOJI, M.; ISHIZUKA, M.; TSUTSUMI, K.; TSUTSUMI, A. Pulsed current water splitting electrochemical cycle for hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 22, p. 10240–10248, 2018. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319918312126>>.

ZHANG, X.; ZHOU, W.; HUANG, Y.; DING, Y.; LI, J.; XIE, L.; YU, Y.; CHEN, J.; SUN, M.; MENG, X. Enhanced hydrogen production enabled by pulsed potential coupled sulfite electrooxidation water electrolysis system. **Renewable Energy**, v. 227, p. 120464, 2024. ISSN 0960-1481. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148124005299>>.

ZHANG, X.; ZHOU, W.; HUANG, Y.; XIE, L.; LI, T.; KANG, H.; WANG, L.; YU, Y.; DING, Y.; LI, J.; CHEN, J.; SUN, M.; CHENG, S.; MENG, X.; GAO, J.; ZHAO, G. Pulsed dynamic electrolysis enhanced pemwe hydrogen production: Revealing the effects of pulsed electric fields on protons mass transport and hydrogen bubble escape. **Journal of Energy Chemistry**, v. 100, p. 201–214, 2025. ISSN 2095-4956. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095495624005898>>.

ZHAO, X. Carbon-based materials as supercapacitor electrodes. **Chemical Society reviews**, v. 38, p. 2520–31, 10 2009.

ZOSKI, C. G. (Ed.). **Handbook of Electrochemistry**. Amsterdam: Elsevier, 2007. ISBN 978-0-444-51958-0. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/book/9780444519580/handbook-of-electrochemistry>>.

APÊNDICE A – CÓDIGOS-FONTES UTILIZADOS PARA PLOTAR OS GRÁFICOS

```

1 import pandas as pd
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # =====
5 # CONFIGURA ES INICIAIS
6 # =====
7
8 # Nome do arquivo Excel
9 arquivo = "Caracteriza o.xlsx" # <-- Altere para o
    nome do seu arquivo
10
11 # Tamanho base da fonte (ajuste aqui)
12 TAMANHO_FONTE = 16
13
14 plt.rcParams.update({
15     "font.size": TAMANHO_FONTE,
16     "axes.titlesize": TAMANHO_FONTE + 2,
17     "axes.labelsize": TAMANHO_FONTE,
18     "xtick.labelsize": TAMANHO_FONTE - 2,
19     "ytick.labelsize": TAMANHO_FONTE - 2,
20     "legend.fontsize": TAMANHO_FONTE - 2,
21     "figure.titlesize": TAMANHO_FONTE + 4
22 })
23
24 # =====
25 # LEITURA DOS DADOS
26 # =====
27
28 try:
29     df = pd.read_excel(arquivo)

```

```

30 except FileNotFoundError:
31     print(f"      Arquivo '{arquivo}' n o encontrado.")
32     exit()
33
34 # Renomeia colunas (padroniza nomes)
35 df.columns = ["Tempo_s", "Corrente_A", "Tensao_V"]
36
37 # =====
38 # INSER O DA REA DO ELETRODO
39 # =====
40
41 try:
42     area_cm2 = float(input("Digite a rea do eletrodo em
43                             cm (ex: 4): ") or 1)
44 except ValueError:
45     print("Valor inv lido! Usando rea padr o de 1 cm
46           .")
47     area_cm2 = 1.0
48
49 # =====
50
51 # C LCULO DA DENSIDADE DE CORRENTE
52 # =====
53
54 # j = I / A      convertendo A      mA e cm
55 df["Densidade_mA_cm2"] = (df["Corrente_A"] * 1000) /
56     area_cm2
57
58 # =====
59 # PLOTAGEM: CURVA POLARIZA O (V vs j)
60 # =====
61
62 plt.figure(figsize=(8, 6))

```

```
59
60 plt.plot(
61     df["Densidade_mA_cm2"],
62     df["Tensao_V"],
63     color="tab:red",
64     linewidth=0.5,          #      Linha mais fina
65     marker="o",
66     markersize=3.5         #      Marcadores menores
67 )
68
69 plt.title("Curva de Polariza o")
70 plt.xlabel("Densidade de Corrente (mA/cm )")
71 plt.ylabel("Tens o (V)")
72 plt.grid(True, linestyle="--", alpha=0.6)
73 plt.tight_layout()
74
75 plt.savefig("curva_polarizacao.png", dpi=600)
76 plt.show()
77
78 print("      Gr fico salvo como 'curva_polarizacao.png'")
79
80 }
81 }
```

APÊNDICE B – PLACA MONTADA

