



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS SOBRAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO (PPGEEC)

HUMBERTO PONTES VAN OOL DE SOUSA

**PROPOSTA DE UM MODELO ELÉTRICO SIMPLIFICADO E UM MODELO
ELÉTRICO DINÂMICO DE ELETROLISADORES PARA ELETRÔNICA DE
POTÊNCIA APLICADA EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE H₂V**

SOBRAL
2025

HUMBERTO PONTES VAN OOL DE SOUSA

PROPOSTA DE UM MODELO ELÉTRICO SIMPLIFICADO E UM MODELO ELÉTRICO
DINÂMICO DE ELETROLISADORES PARA ELETRÔNICA DE POTÊNCIA APLICADA
EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE H₂V

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Edilson Mineiro Sá Júnior.

SOBRAL

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

S696p Sousa, Humberto Pontes Van Ool de.

109 f. : il. color.

Orientação: Prof. Dr. Edilson Mineiro Sá Júnior.

CDD 621.3

HUMBERTO PONTES VAN OOL DE SOUSA

PROPOSTA DE UM MODELO ELÉTRICO SIMPLIFICADO E UM MODELO ELÉTRICO
DINÂMICO DE ELETROLISADORES PARA ELETRÔNICA DE POTÊNCIA APLICADA
EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE H₂V

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Aprovada em: 07/04/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Edilson Mineiro Sá Júnior (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – *Campus* Sobral
Universidade Federal do Ceará (UFC) – PPGEEC

Prof. Dr. Kleber Cesar Alves de Souza
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – *Campus* Sobral
Universidade Federal do Ceará (UFC) – PPGEEC

Prof. Dr. Pedro de Lima Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC) – *Campus* do Pici

A Deus.

À minha noiva, família e amigos.

Aos meus professores.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida.

À minha noiva Joyce Clemente, por estar sempre ao meu lado, nos momentos mais prazerosos e nos momentos mais difíceis, seu carinho e compreensão são essenciais.

À minha mãe Francismini Van Ool, ao meu padrasto Antônio Coelho e às minhas irmãs Natasja Van Ool e Hanney Van Ool, por serem a minha base familiar e por terem me permitido trilhar o caminho que sempre sonhei.

À memória dos meus avós Petrus Van Ool e Zuneide Van Ool, por sempre terem sido a minha principal fonte de inspiração.

Ao meu orientador Prof. Dr. Edilson Mineiro, pela confiança, paciência, ensinamentos, conselhos e repreensões que tornaram a pesquisa e o desenvolvimento deste trabalho possíveis.

Aos membros da banca examinadora, por avaliarem e contribuírem com este trabalho.

Aos demais professores do PPGEEC da UFC *campus* Sobral, em especial ao Prof. Dr. Kléber César Alves, por ensinamentos que vão além da vida acadêmica.

Aos meus queridos amigos de Sobral-CE, Rhuan Nunes, Iago Magalhães, Sarah Frota e Isaak Sousa que foram essenciais para tornar os dias de mestrado mais leves. Em especial, ao meu amigo Wilson Frota por contribuir ativamente com este e outros trabalhos e por ter me auxiliado durante os experimentos em laboratório.

Aos colegas do grupo de pesquisa de acionamentos de eletrolisadores da rede de pesquisas RedeVerdes, em destaque: Prof. Me. Leonardo Tabosa, Prof. Me. Aglailson Olivindo Prof. Me. Ronaldo Portela e Alane Rodrigues.

Aos demais colegas da UFC e do IFCE que contribuíram direta ou indiretamente com este trabalho.

Aos colegas do setor de desenvolvimento de *hardware* de potência da WEG *Drives & Controls*, por terem me recebido de braços abertos em Jaraguá do Sul-SC durante a reta final do desenvolvimento deste trabalho.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

À UFC *Campus* Sobral e ao IFCE *Campus* Sobral pela disponibilidade do espaço das salas de aula e dos laboratórios durante as disciplinas, pesquisas e experimentos.

“Os sonhos dos homens nunca têm fim!”
(Marshall D. Teach).

RESUMO

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo elétrico dinâmico capaz de representar as características elétricas de células eletrolíticas em uma ampla faixa de operação, com aplicabilidade na análise de intermitência de fontes de energia renováveis, no dimensionamento de novas topologias de conversores eletrônicos de potência e em sistemas de controle. Inicialmente, uma revisão bibliográfica sobre os fundamentos da eletrólise da água e sobre as principais tecnologias de eletrólise da água foi realizada. A integração de sistemas de eletrólise com fontes de energia renovável foi discutida, com ênfase no papel da eletrônica de potência para reduzir o impacto da intermitência inerente de algumas das fontes renováveis. Após a fundamentação teórica, um modelo elétrico simplificado de um eletrolisador alcalino bipolar foi desenvolvido. O modelo elétrico simplificado foi validado experimentalmente e um conversor buck foi dimensionado utilizando o modelo elétrico simplificado como carga, demonstrando baixa ondulação de tensão e corrente na carga. Posteriormente, o modelo elétrico dinâmico para células eletrolíticas, capaz de representar o comportamento temporal em uma ampla faixa de operação, foi proposto a partir da análise de modelos elétricos presentes na literatura. O modelo elétrico dinâmico foi proposto para uma célula alcalina e foi validado experimentalmente, demonstrando maior precisão em regime e em variações de potência em comparação com os demais modelos elétricos analisados. Os resultados obtidos demonstraram que o modelo elétrico dinâmico proposto é uma ferramenta capaz de analisar a intermitência de fontes de energia renovável e otimizar o dimensionamento de conversores e sistemas de controle em sistemas de produção de hidrogênio verde.

Palavras-chave: hidrogênio verde; eletrólise da água; modelo elétrico de eletrolisadores.

ABSTRACT

This work proposes the development of a dynamic electrical model capable of representing the electrical characteristics of electrolytic cells over a wide operating range, with applicability in the analysis of intermittency of renewable energy sources, in the sizing of new power electronic converter topologies, and in control systems. Initially, a literature review on the fundamentals of water electrolysis and the main water electrolysis technologies was conducted. The integration of electrolysis systems with renewable energy sources was discussed, emphasizing the role of power electronics in reducing the impact of the inherent intermittency of some renewable sources. After the theoretical foundation, a simplified electrical model of a bipolar alkaline electrolyzer was developed. The simplified electrical model was experimentally validated, and a buck converter was sized using the simplified electrical model as the load, demonstrating low voltage and current ripple on the load. Subsequently, a dynamic electrical model for electrolytic cells, capable of representing the temporal behavior over a wide operating range, was proposed based on the analysis of electrical models found in the literature. The dynamic electrical model was proposed for an alkaline cell and experimentally validated, demonstrating greater accuracy in steady-state and power variation conditions compared to the other electrical models analyzed. The results obtained demonstrated that the proposed dynamic electrical model is a tool capable of analyzing the intermittency of renewable energy sources and optimizing the sizing of converters and control systems in green hydrogen production systems.

Keywords: green hydrogen; electrolysis of water; electrical model of electrolyzers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	– Potência instalada acumulada das principais fontes de eletricidade renovável e não renovável entre os anos de 2015 e 2023 globalmente.....	15
Figura 1.2	– Potência instalada em 2022 e em 2023 por fonte no Brasil.....	16
Figura 1.3	– Demanda de hidrogênio por setores da indústria em 2023.....	17
Figura 1.4	– Comparação entre os métodos de oferta de hidrogênio em 2023.....	18
Figura 1.5	– Linha do tempo do desenvolvimento e dos avanços na eletrólise da água.....	20
Figura 2.1	– Célula eletrolítica genérica.....	24
Figura 2.2	– Curva I-V de uma célula eletrolítica genérica para temperatura e pressão constantes.....	25
Figura 2.3	– Valores termodinâmicos da reação de eletrólise da água para diferentes temperaturas.....	27
Figura 2.4	– Tensão reversível e tensão termoneutra em função da temperatura.....	29
Figura 2.5	– Representação do efeito de dupla camada em um eletrodo carregado negativamente.....	30
Figura 2.6	– Modelo elétrico equivalente dos efeitos de ativação e de dupla camada em uma célula eletrolítica.....	34
Figura 2.7	– Condutividade do eletrólito em função da sua concentração e da temperatura.....	36
Figura 2.8	– Modelo elétrico equivalente do sobrepotencial ôhmico.....	37
Figura 3.1	– Esquemático de uma célula alcalina clássica.....	40
Figura 3.2	– Esquemático de uma célula eletrolítica PEM.....	41
Figura 3.3	– Esquemático de uma célula eletrolítica AEM.....	43
Figura 3.4	– Esquemático de uma célula eletrolítica de óxido sólido.....	44
Figura 3.5	– Conexão entre células de forma monopolar.....	47
Figura 3.6	– Conexão entre células de forma bipolar.....	47
Figura 3.7	– Sistema para produção de hidrogênio via energias renováveis.....	50
Figura 4.1	– Resposta de tensão de uma célula eletrolítica à interrupção de corrente.....	55
Figura 4.2	– Linearização do sobrepotencial de ativação.....	55
Figura 4.3	– Modelo elétrico simplificado de células eletrolíticas.....	56
Figura 4.4	– (a) Eletrolisador utilizado nos experimentos (b) Esquemático do eletrolisador utilizado.....	57

Figura 4.5	– (a) Sistema utilizado nos experimentos; (b) Diagrama do sistema utilizado nos experimentos.....	58
Figura 4.6	– Curva I-V experimental do eletrolisador alcalino utilizado.....	59
Figura 4.7	– Respostas de tensão das células do eletrolisador analisado ao experimento com interrupção de corrente.....	60
Figura 4.8	– (a) Curva I-V experimental do eletrolisador alcalino utilizado, sem o bombeamento do eletrólito; (b) Modelo elétrico simplificado das células do eletrolisador alcalino analisado, sem o bombeamento do eletrólito.....	61
Figura 4.9	– Conversor buck com o modelo elétrico simplificado do eletrolisador como carga.....	62
Figura 4.10	– Circuito resultante da análise da componente c.a. do conversor.....	65
Figura 4.11	– Forma de onda teórica da corrente no capacitor.....	66
Figura 4.12	– Forma de onda da tensão na saída do conversor buck com o modelo elétrico simplificado do eletrolisador como carga.....	67
Figura 4.13	– Forma de onda da corrente na saída do conversor buck com o modelo elétrico simplificado do eletrolisador como carga.....	67
Figura 4.14	– Ondulação de corrente no modelo elétrico simplificado proposto.....	67
Figura 5.1	– Modelo elétrico com fonte de tensão não linear controlada por corrente....	71
Figura 5.2	– Modelo elétrico dinâmico com representação da capacitância de dupla camada.....	72
Figura 5.3	– Método EIS aplicado para estimativa da capacitância de dupla camada....	72
Figura 5.4	– Resposta natural de tensão do eletrolisador à interrupção de corrente.....	73
Figura 5.5	– (a) Modelo elétrico considerando os efeitos de ativação dos eletrodos separadamente; (b) Modelo elétrico considerando a impedância de Warburg.....	74
Figura 5.6	– Modelo elétrico estático-dinâmico.....	74
Figura 5.7	– Modelo elétrico proposto por Cheng <i>et al.</i> (2024).....	75
Figura 5.8	– Modelo elétrico proposto por He <i>et al.</i> (2024).....	76
Figura 5.9	– Modelo elétrico dinâmico proposto.....	77
Figura 5.10	– Célula eletrolítica utilizada nos experimentos.....	78
Figura 5.11	– Sistema utilizado durante os experimentos.....	79
Figura 5.12	– Esquemático do experimento com degrau de corrente.....	80
Figura 5.13	– Esquemático do experimento com interrupção de corrente.....	81

Figura 5.14 – Esquemático do experimento de extração da curva I-V.....	82
Figura 5.15 – Esquemático do experimento de medição da resistência de canal.....	82
Figura 5.16 – Resposta natural de tensão da célula eletrolítica ao experimento com degrau de corrente.....	83
Figura 5.17 – Equivalência do processo de carga da célula eletrolítica no modelo elétrico proposto.....	85
Figura 5.18 – Resposta natural de tensão da célula eletrolítica ao experimento com interrupção de corrente.....	86
Figura 5.19 – Equivalência do processo de carga da célula eletrolítica no modelo elétrico proposto.....	87
Figura 5.20 – Curva I-V experimental da célula eletrolítica analisada.....	88
Figura 5.21 – Resultados do experimento de medição da resistência de canal.....	89
Figura 5.22 – Resultados de simulação dos modelos analisados em comparação aos resultados do experimento com degrau de corrente.....	91
Figura 5.23 – Resultados de simulação dos modelos analisados em comparação aos resultados do experimento com interrupção de corrente.....	92
Figura 5.24 – Resultados de simulação dos modelos analisados em comparação aos resultados da extração da curva I-V.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	– Comparação entre os valores termodinâmicos das reações de eletrólise da água líquida e gasosa.....	28
Tabela 3.1	– Comparação entre eletrolisadores de baixa temperatura.....	46
Tabela 4.1	– Parâmetros construtivos do eletrolisador.....	57
Tabela 4.2	– Parâmetros do modelo elétrico simplificado das células do eletrolisador analisado.....	61
Tabela 4.3	– Parâmetros do conversor buck proposto.....	63
Tabela 4.4	– Valores utilizados na simulação do conversor buck com o modelo elétrico simplificado do eletrolisador como carga.....	66
Tabela 5.1	– Parâmetros construtivos da célula eletrolítica utilizada.....	78
Tabela 5.2	– Parâmetros utilizados para simulação do modelo proposto.....	89
Tabela 5.3	– Métricas dos modelos avaliados no experimento com degrau de corrente..	91
Tabela 5.4	– Métricas dos modelos avaliados no experimento com interrupção de corrente.....	93
Tabela 5.5	– Métricas dos modelos avaliados no experimento da curva I-V.....	94
Tabela 5.6	– Comparação entre os modelos elétricos analisados.....	94

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Panorama energético global.....	14
1.2	Oferta e demanda de hidrogênio.....	17
1.3	Eletrólise da água e hidrogênio verde.....	18
1.4	Objetivos.....	21
1.5	Estrutura do trabalho.....	22
2	FUNDAMENTOS DA ELETRÓLISE DA ÁGUA	24
2.1	Comportamento elétrico da célula eletrolítica	25
2.1.1	<i>Tensão reversível</i>	26
2.1.2	<i>Sobrepotencial de ativação</i>	29
2.1.3	<i>Sobrepotencial ôhmico.....</i>	35
2.2	Conclusões do capítulo	37
3	TECNOLOGIAS PARA ELETRÓLISE DA ÁGUA.....	39
3.1	Tipos de eletrólise da água	39
3.1.1	<i>Eletrólise alcalina clássica</i>	39
3.1.2	<i>Eletrólise PEM.....</i>	41
3.1.3	<i>Eletrólise AEM.....</i>	42
3.1.4	<i>Eletrólise de óxido sólido</i>	44
3.1.5	<i>Comparação entre os tipos de eletrólise.....</i>	45
3.2	Conexões entre células eletrolíticas	46
3.3	Sistemas para eletrólise da água via energias renováveis	49
3.4	Eficiência do processo de eletrólise	50
3.5	Conclusões do capítulo	52
4	MODELO ELÉTRICO SIMPLIFICADO DE ELETROLISADORES.....	54
4.1	Modelo elétrico simplificado de um eletrolisador alcalino bipolar extraído experimentalmente	54
4.1.1	<i>Metodologia.....</i>	56
4.1.2	<i>Resultados Experimentais</i>	58
4.2	Aplicação do modelo simplificado no dimensionamento de um conversor buck..	62
4.3	Conclusões do capítulo	68
5	MODELO ELÉTRICO DINÂMICO DE CÉLULAS ELETROLÍTICAS	70
5.1	Modelos elétricos estáticos e dinâmicos	70

5.1.1	<i>Modelo elétrico 1</i>	70
5.1.2	<i>Modelo elétrico 2</i>	71
5.1.3	<i>Modelo elétrico 3</i>	74
5.1.4	<i>Modelo elétrico 4</i>	75
5.2	Modelo elétrico dinâmico proposto	76
5.3	Metodologia	78
5.3.1	<i>Degrau de corrente (ao ligar)</i>	80
5.3.2	<i>Interrupção de corrente (ao desligar)</i>	81
5.3.3	<i>Extração da curva I-V</i>	81
5.3.4	<i>Medição a quatro fios da resistência de canal</i>	82
5.4	Resultados experimentais	83
5.5	Conclusões do capítulo	95
6	CONCLUSÃO	97
	REFERÊNCIAS	99

1 INTRODUÇÃO

1.1 Panorama energético global

A demanda energética global está em constante expansão devido ao crescimento populacional, aos avanços econômicos e ao progresso tecnológico. A partir da segunda fase da revolução industrial, o uso de combustíveis fósseis foi altamente adotado para suprir a demanda energética. Atualmente, os combustíveis fósseis compõem mais de 80% da matriz energética global (IEA, 2024f). O uso excessivo de combustíveis fósseis e de outras fontes não renováveis é o principal responsável pelo aumento das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), principalmente dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) e metano (CH_4), e consequentemente, do aquecimento global (IEA, 2024a).

Buscando o controle do aquecimento global e a diminuição das emissões dos GEE, tratados como o Acordo de Paris de 2015 e o Pacto Climático de Glasgow de 2021 foram estabelecidos. Os objetivos do Acordo de Paris visam limitar o aumento da temperatura global a 1,5 °C em relação aos níveis pré-industriais (Salawitch *et al.*, 2017). Já o Pacto Climático de Glasgow reforça a meta do Acordo de Paris e objetiva um cenário com emissões líquidas nulas (NZE – *Net Zero Emissions*) de GEE até 2050 (Pandey, Kumar e Kumari, 2024). Para isso, será necessário reduzir as emissões globais de GEE em 45% até 2030, em comparação com os níveis registrados em 2010 (Sugsaisakon e Kittipongvises, 2024).

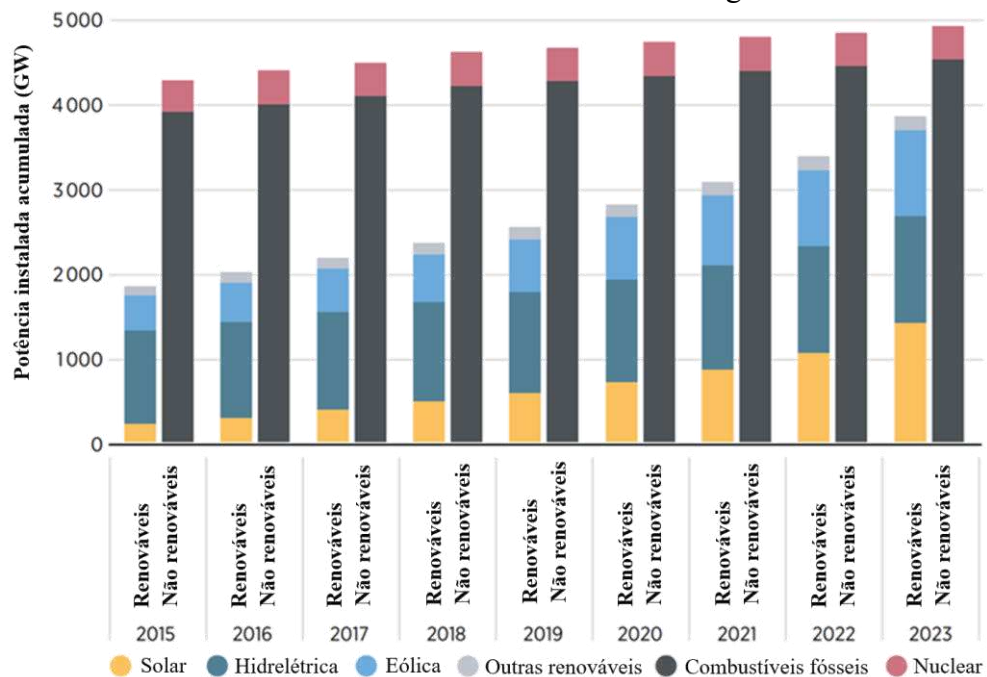
Para alcançar a meta do Acordo de Paris, a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA – *International Renewable Energy Agency*) propõe a eletrificação dos setores industrial, transporte e construção (IRENA, 2024d). Entretanto, para alcançar o cenário NZE até 2050, uma transição energética para Fontes de Energia Renovável (FER) é essencial (IRENA, 2024a). Atualmente, 57% da matriz elétrica global ainda é abastecida por fontes não renováveis de energia, entretanto, as FER mais que dobraram sua potência instalada acumulada nos últimos oito anos (IRENA, 2024d). Dentre as principais FER, são destacadas a energia solar fotovoltaica, a energia eólica e as hidrelétricas (IRENA, 2024c).

Os usos das energias solar fotovoltaica e eólica foram impulsionados por políticas industriais favoráveis, marcos regulatórios, avanços tecnológicos e o aumento da relação custo-benefício (IEA, 2024e). Ao final de 2023, a energia solar fotovoltaica atingiu 1.411 GW de potência instalada acumulada em todo o mundo, sendo esperado um crescimento significativo tanto em sistemas distribuídos quanto em sistemas de grande escala (IRENA, 2024b; IRENA, 2024c). Já a potência instalada acumulada de energia eólica alcançou 1.017 GW

mundialmente, sendo previsto um crescimento significativo tanto em instalações em terra (*onshore*) quanto no mar (*offshore*) (IRENA, 2024b; IRENA, 2024c). Entretanto, esses sistemas enfrentam desafios relacionados à intermitência e imprevisibilidade, resultando em desconformidade entre oferta e demanda energética (Kourougianni *et al.*, 2024).

Com relação às hidrelétricas, mundialmente, a potência instalada acumulada (excluindo as hidrelétricas reversíveis) alcançou 1.265 GW em 2023, representando 33% da capacidade total de energia renovável (IRENA, 2024d). No entanto, a construção de hidrelétricas enfrenta restrições devido aos consideráveis impactos ambientais que acarreta, incluindo a inundação de grandes áreas e a perda de biodiversidade (Catolico *et al.*, 2021). As demais FER como biomassa, geotérmica e oceânica, alcançaram potência instalada acumulada combinada de 171 GW (IRENA, 2024d). O comparativo entre as potências instaladas acumuladas das principais fontes de eletricidade renovável e não renovável, entre os anos de 2015 e 2023, são mostradas na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Potência instalada acumulada das principais fontes de eletricidade renovável e não renovável entre os anos de 2015 e 2023 globalmente.

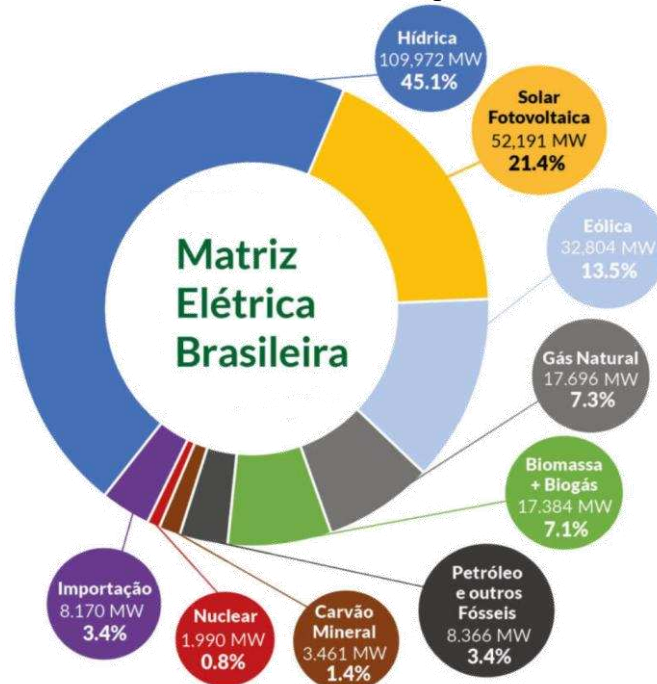


Fonte: Adaptado de IRENA (2024d).

No Brasil, o panorama energético tem se destacado pela crescente participação de FER na matriz energética. De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2024 (ano base 2023), a oferta interna de energia renovável atingiu 49,1%, o que representa um aumento de aproximadamente 9,4% em 10 anos (BEN, 2024). Esse crescimento foi ocasionado principalmente pelo aumento da oferta de fontes como eólica, solar e biomassa. Atualmente, a

matriz elétrica brasileira possui potência total de aproximadamente 244 MW, com 87,1% provenientes de fontes renováveis, onde: 45,1% provêm das hidrelétricas, 21,4% provêm da energia solar (incluindo micro e minigeração distribuídas), 13,5% provêm da energia eólica e 7,1% provêm da biomassa e biogás (ABSOLAR, 2025). A composição da matriz elétrica brasileira em 2025 é mostrada na Figura 1.2.

Figura 1.2 – Matriz elétrica brasileira por fonte em 2025.



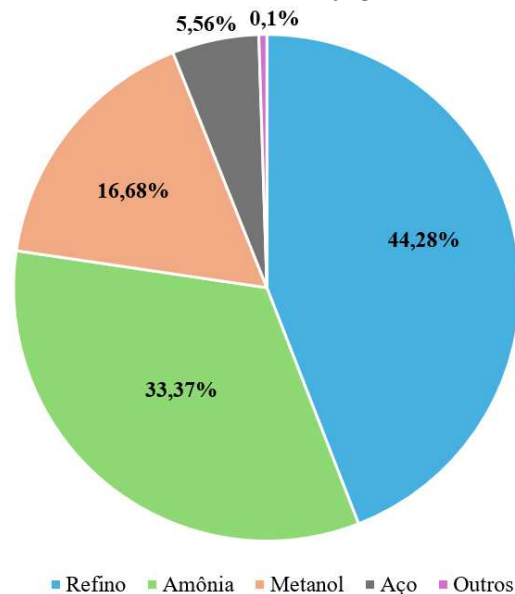
Fonte: Adaptado de ABSOLAR (2025).

O panorama energético global aponta para uma transição energética com foco nas FERs. Nesse contexto, o Hidrogênio Verde (H2V) surge como uma alternativa promissora aos combustíveis fósseis. A União Europeia define o H2V ou hidrogênio renovável, como aquele produzido por eletrólise da água alimentada por FERs certificadas. O H2V tem o potencial para reduzir significativamente as emissões de GEE e atuar como um importante vetor energético, sendo globalmente reconhecido como vital para alcançar a descarbonização de diversos setores da indústria e o cenário NZE até 2050 (Kaplan *et al.*, 2023). Isso ocorre pois o hidrogênio possui alta densidade energética, queima limpa e pode ser utilizado em diversas aplicações, entretanto, a produção de hidrogênio pode resultar em emissões significativas de GEE quando não associada às FERs. Para avaliar a importância do H2V no caminho para uma transição energética global é necessário analisar a demanda global de hidrogênio e os meios de oferta atuais.

1.2 Oferta e demanda de hidrogênio

A análise global de hidrogênio de 2024 (*global hydrogen review 2024*) (ano base 2023), publicado pela Agência Internacional de Energia (IEA –*International Energy Agency*), apresenta os principais setores consumidores de hidrogênio e os métodos predominantes de sua produção. Atualmente, a indústria de refino é o maior consumidor global, responsável por aproximadamente 44,28% da demanda total, utilizando o hidrogênio para a produção de combustíveis (IEA, 2024b). Em seguida, a indústria química é o segundo maior consumidor, representando cerca de 33,37% da demanda global, nesse setor, o hidrogênio pode ser utilizado para produzir amônia para fertilizantes, metanol e aço (IEA, 2024b). Embora a indústria de refino e a indústria química dominem o consumo atual, outros setores como transporte, construção e geração de calor representam 0,1% do quadro de consumidores (IEA, 2024b). Pesquisas atuais ainda apontam que até 2050 o hidrogênio também será amplamente requisitado como transportador energético, devido a possibilidade de armazenamento e conversão em eletricidade (Hassan, Q. *et al.*, 2024). A demanda percentual de hidrogênio por setores da indústria em 2023 é mostrada na Figura 1.3.

Figura 1.3 – Demanda de hidrogênio por setores da indústria em 2023.

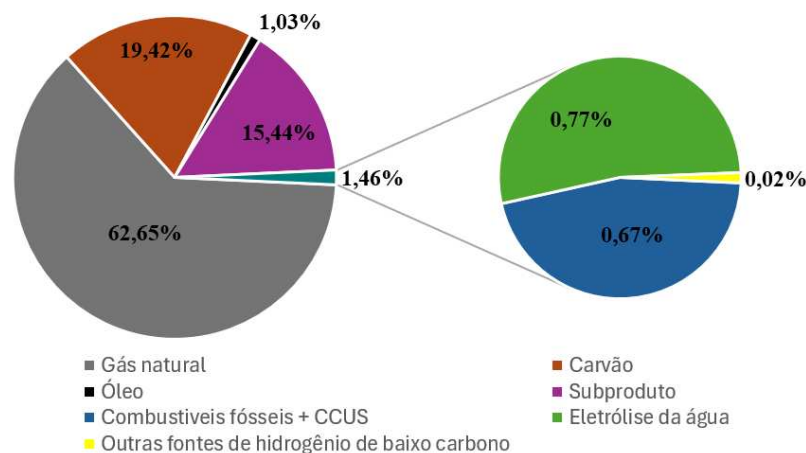


Fonte: Adaptado de IEA (2024c).

Atualmente, a produção de hidrogênio é predominantemente baseada em combustíveis fósseis. O método mais comum é a reforma a vapor de gás natural, responsável por cerca de 62,65% da produção global de hidrogênio (IEA, 2024b). Esse processo utiliza metano para produzir hidrogênio e, conseqüentemente, emite CO_2 . Por emitir grandes

quantidades de carbono, esse processo pode ser associado à captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS – *Carbon Capture, Utilization and Storage*) (Leonzio e Shah, 2024). O hidrogênio produzido por esse método é chamado de hidrogênio azul ou hidrogênio de baixo carbono na União Europeia. O uso do CCUS tem o objetivo de aumentar a oferta de hidrogênio de baixo carbono, com potencial para reduzir o impacto ambiental ao capturar GEE de processos baseados em combustíveis fósseis (Leonzio e Shah, 2024). Outras fontes não renováveis para produção de hidrogênio como o carvão e o óleo ainda são amplamente utilizadas, representando cerca de 20,45% da produção de hidrogênio global (IEA, 2024b). A eletrólise da água, a CCUS e outras fontes de hidrogênio de baixo carbono ainda representam apenas 1,46% do hidrogênio ofertado globalmente. Além disso, cerca de 15,46% do hidrogênio global é produzido como subproduto em processos industriais (IEA, 2024b). A comparação percentual entre os métodos de oferta de hidrogênio em 2023 é mostrada na Figura 1.4.

Figura 1.4 – Comparação entre os métodos de oferta de hidrogênio em 2023.



Fonte: Adaptado de IEA (2024d).

O panorama atual de oferta e demanda de hidrogênio revela uma forte dependência de métodos tradicionais baseados em combustíveis fósseis, mas destaca uma transição em curso para alternativas mais sustentáveis, como a eletrólise da água e a CCUS. A produção de H2V está em um momento crucial de desenvolvimento, mas ainda enfrenta desafios como o alto custo em relação ao hidrogênio obtido de combustíveis fósseis.

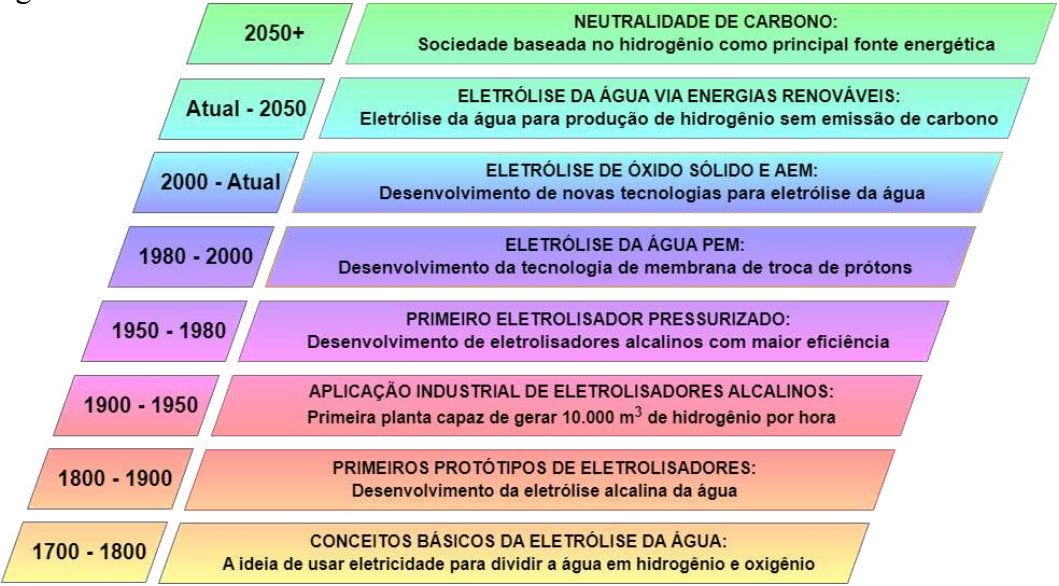
1.3 Eletrólise da água e hidrogênio verde

Embora a eletrólise da água esteja ocupando um papel central nos cenários de transição energética sustentável, devido a possibilidade de produção de H2V, os primeiros

conceitos de eletrólise da água são datados do século XVIII (Smolinka *et al.*, 2022). Os primeiros protótipos de eletrolisadores foram desenvolvidos durante o século XIX, com a eletrólise alcalina que foi a base para o desenvolvimento de eletrolisadores industriais de baixa temperatura (Smolinka *et al.*, 2022). Na primeira metade do século XX, a eletrólise alcalina já era uma tecnologia robusta e utilizada na indústria química e metalúrgica, com capacidades de gerar até 10.000 m³ de hidrogênio por hora. Pesquisas modernas sobre a eletrólise alcalina continuam a priorizar a melhoria da eficiência e a redução de custos (Tüysüz, 2024). Durante a segunda metade do século XX, a eletrólise da água com membrana de troca de prótons (PEM – *Proton Exchange Membrane*) foi desenvolvida, possibilitando a produção de hidrogênio de alta pureza, devido à alta seletividade aos íons hidrogênio das PEMs (Wang, Cao e Jiao, 2022). Entretanto, o meio em que a reação ocorre se torna ácido, por isso, essa tecnologia utiliza metais nobres em sua composição, o que torna o seu custo elevado.

Atualmente, os eletrolisadores alcalinos e PEM são os mais utilizados na indústria. Entretanto, a tecnologia da membrana de troca aniônica (AEM – *Anion Exchange Membrane*) foi desenvolvida e integrada à eletrólise alcalina, visando combinar a robustez da eletrólise alcalina à produção de hidrogênio com a alta pureza da eletrólise PEM, sem o uso de metais nobres (Liu *et al.*, 2024). A tecnologia AEM tem potencial para ser a tecnologia de eletrólise da água mais utilizada até 2050 e está em estado avançado de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), com perspectivas de redução de custos e aumento de eficiência (Liu *et al.*, 2024). Há também a eletrólise de óxido sólido também está em estado de P&D e possibilita a eletrólise da água em altas temperaturas, visando principalmente a eficiência do processo (Lahrichi et al., 2024). Atualmente, a eletrólise da água alimentada por FER é considerada o principal método para produzir hidrogênio livre de carbono e essencial para uma transição energética sustentável (IRENA, 2024a). Perspectivas para 2050 e em diante, apontam que o H2V poderá desempenhar um papel crucial para alcançar a neutralidade de carbono (IRENA, 2024a). Uma simplificação da linha do tempo do desenvolvimento e dos avanços na eletrólise da água é mostrada na Figura 1.5

Figura 1.5 – Linha do tempo do desenvolvimento e dos avanços na eletrólise da água.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Atualmente, o custo de produção do H2V pode ser até seis vezes maior que custo com métodos baseados em combustíveis fósseis, tornando a competitividade econômica um objetivo prioritário para o setor (IEA, 2024b). Devido a sua matriz elétrica altamente renovável, o Brasil se destaca como um potencial líder na produção global de H2V até 2050 (Botelho, Moraes, e de Oliveira, 2024). A Lei 14.948/24, conhecida como “Lei do H2V”, introduziu incentivos importantes para reduzir barreiras financeiras e fomentar a cadeia produtiva (Brasil, 2024). O Estado do Ceará se destaca como um dos principais polos para a exportação de H2V, devido às suas condições climáticas e geográficas favoráveis (ABRAZPE, 2024), além de iniciativas de certificação conduzidas pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) (CCEE, 2022).

Visando a exportação de H2V do Brasil para a Europa, há a necessidade de atender às exigências europeias para certificação do H2V, estabelecidos pela Resolução EU 2023/1184 (RED III) (European Union, 2023). Essa resolução, estabelece os critérios de temporalidade e adicionalidade como aspectos fundamentais para a certificação do H2V. O critério de temporalidade exige que, a partir de 2030, a energia consumida pelo sistema de eletrólise seja certificada com base em uma integração horária, ou seja, a energia renovável utilizada deve ser gerada na mesma hora em que o hidrogênio é produzido (Tenhumberg, 2024). Esse critério visa garantir que o hidrogênio não seja gerado por fontes não renováveis em momentos de intermitência, exigindo soluções como o uso de acumuladores de energia, como banco de baterias (Rana *et al.*, 2023). Já o critério de adicionalidade determina que a energia renovável utilizada deve ser proveniente de novos empreendimentos de geração, evitando a competição

com a demanda energética já existente e promovendo o aumento da capacidade instalada de FER (Tenhumberg, 2024). Esses critérios adicionam complexidade ao desenvolvimento da cadeia de H2V, mas também impulsionam a transição para um sistema energético mais sustentável.

Características como a intermitência das FER, principalmente a solar e a eólica, demandam tecnológicas robustas para garantir o suprimento contínuo de eletricidade e elevar a eficiência do sistema de eletrólise (Blaabjerg *et al.*, 2023). Conversores eletrônicos de potência são cruciais para a integração das FER, realizando a adaptação da energia intermitente às características elétricas específicas do eletrolisador, com potencial para reduzir os custos com acumuladores (Wei *et al.*, 2023). Entretanto, a eletrônica de potência ainda representa cerca de 30% do custo total dos sistemas de H2V (IRENA, 2020). As pesquisas atuais em eletrônica de potência aplicada a sistemas de geração de H2V buscam o desenvolvimento de novas topologias de conversores eletrônicos de potência e a otimização dos sistemas de controle (Hassan, A. *et al.*, 2024). As principais metas a serem alcançadas são: melhoria da eficiência, reduzir os custos associados, gerenciar as altas densidades de corrente, e assegurar a confiabilidade e a durabilidade dos eletrolisadores (Hassan, A. *et al.*, 2024).

Para a evolução da eletrônica de potência aplicada à geração de H2V, propostas de modelos elétricos estáticos e dinâmicos dos eletrolisadores são essenciais. Os modelos elétricos estáticos são focados em descrever o comportamento elétrico dos eletrolisadores em uma faixa de operação (Koundi *et al.*, 2023). Já os modelos elétricos dinâmicos visam representar a dinâmica temporal dos eletrolisadores em variações de potência (Koundi *et al.*, 2023). Por tanto, para desenvolver um modelo elétrico é necessário avaliar: os princípios da eletrólise da água; as características elétricas das células eletrolíticas e eletrolisadores; as particularidades das tecnologias para eletrólise da água; a faixa de operação do eletrolisador; a dinâmica temporal dos eletrolisadores em variações de potência; e a aplicabilidade no dimensionamento de conversores eletrônicos de potência.

1.4 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo elétrico dinâmico que represente as características elétricas de células eletrolíticas em uma ampla faixa de operação. O modelo elétrico dinâmico deve ser aplicável na análise de intermitência das FER, no dimensionamento de novas topologias de conversores eletrônicos de potência e em sistemas de

controle. O modelo elétrico dinâmico deve ser proposto com base na literatura e validado através de experimentos com um eletrolisador.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido da seguinte maneira:

O capítulo 2 consiste em uma revisão bibliográfica dos principais fundamentos da eletrólise da água, levando em consideração o comportamento elétrico das células eletrolíticas. Nesse capítulo, conceitos iniciais como a tensão reversível, o sobrepotencial de ativação e o sobrepotencial ôhmico são abordados.

O capítulo 3 consiste em uma revisão bibliográfica das principais tecnologias para eletrólise da água. Nesse capítulo, os diferentes tipos de eletrólise da água são analisados, abordando suas principais particularidades, vantagens e desvantagens. Além disso, as possibilidades de conexão entre células eletrolíticas para compor um eletrolisador e as particularidades dos sistemas para eletrólise da água via energias renováveis, com foco na eletrônica de potência, são avaliadas. Outro ponto abordado nesse capítulo são as diferentes formas de mensurar a eficiência do processo de eletrólise.

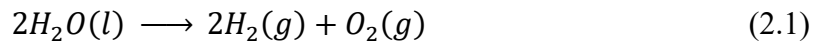
O capítulo 4 detalha a metodologia e os experimentos utilizados para desenvolver o modelo elétrico simplificado de um eletrolisador alcalino bipolar. Além disso, o modelo elétrico simplificado do eletrolisador alcalino foi extraído considerando a operação com e sem a circulação forçada do eletrólito, visando avaliar se há redução dos sobrepotenciais com a circulação forçada do eletrólito. Nesse capítulo, um conversor buck foi dimensionado considerando o modelo elétrico simplificado do eletrolisador como carga, para validar sua aplicabilidade em eletrônica de potência.

O capítulo 5 detalha o processo de desenvolvimento do modelo elétrico dinâmico para células eletrolíticas. Esse capítulo inicia com uma revisão bibliográfica dos principais modelos elétricos, estáticos e dinâmicos, de eletrolisadores presentes na literatura. Em seguida, a metodologia e os experimentos utilizados para desenvolver o modelo elétrico proposto são detalhadas. A partir dos resultados experimentais de uma célula alcalina, os elementos que compõem o modelo elétrico proposto foram dimensionados. Para validação, os resultados de simulação do modelo proposto foram comparados com os resultados de simulação dos modelos elétricos da literatura e com os resultados experimentais.

Por fim, o capítulo 6 consiste nas conclusões do trabalho, apoiadas no desenvolvimento. Esse capítulo apresenta uma recapitulação sintética dos resultados obtidos, apresentando também sugestões para pesquisas futuras.

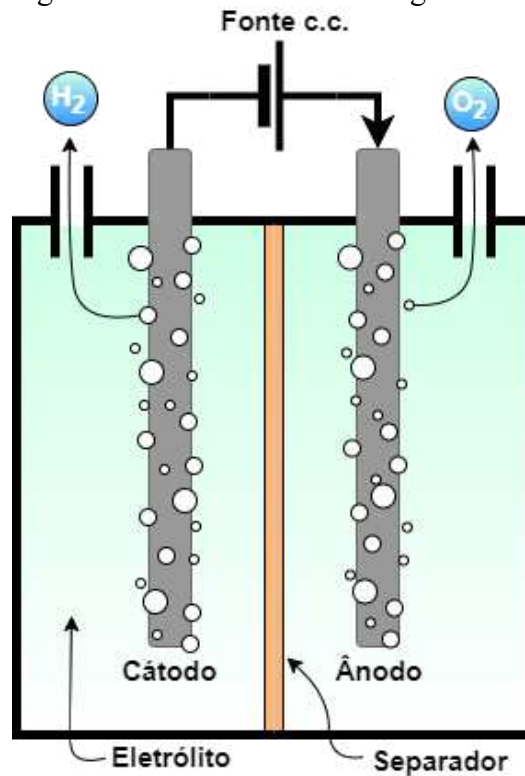
2 FUNDAMENTOS DA ELETRÓLISE DA ÁGUA

A eletrólise da água é um processo eletroquímico que consiste na quebra das moléculas de água, para gerar gás hidrogênio (H_2) e gás oxigênio (O_2), cuja equação química pode ser expressa por (2.1). Esse processo é provocado pela passagem de uma corrente elétrica em uma célula eletrolítica (Miranda, 2019).



Uma célula eletrolítica genérica consiste em dois eletrodos e um condutor iônico, também chamado de eletrólito. O H_2 é liberado da superfície do cátodo e o O_2 é liberado da superfície do ânodo (Cavaliere, 2023). Para que não ocorra a mistura dos gases gerados, um separador de gases (membrana ou diafragma) pode ser utilizado entre os eletrodos. O separador deve possuir porosidade suficiente para possibilitar a livre movimentação de íons, porém não excessiva, para que não ocorra a transferência indesejada de bolhas de gases entre os compartimentos (Smolinka, 2021). Uma célula eletrolítica genérica é mostrada na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Célula eletrolítica genérica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O funcionamento de uma célula eletrolítica tem os seus fundamentos na eletroquímica e na termodinâmica, que conseqüentemente, são responsáveis pelo seu

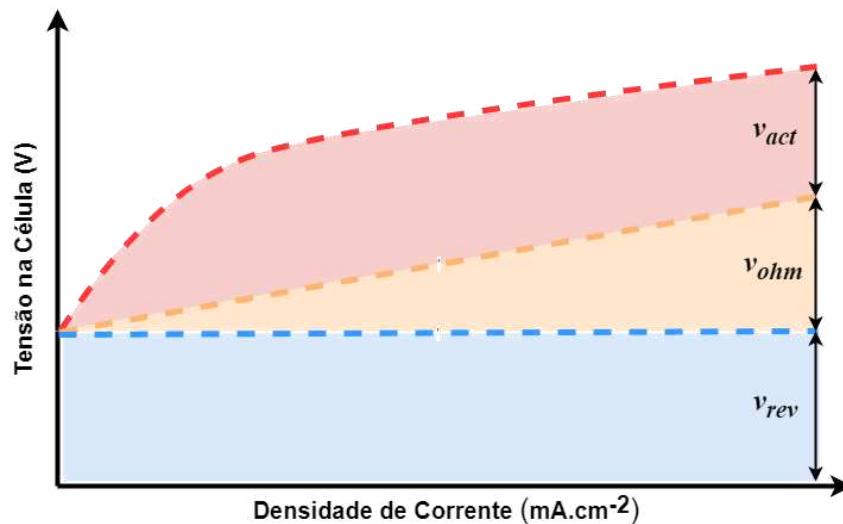
comportamento elétrico estático e dinâmico. Por isso, a análise do comportamento elétrico de células eletrolíticas é necessária para propor modelos elétricos que as representem eletricamente.

2.1 Comportamento elétrico da célula eletrolítica

A partir da curva corrente x tensão (curva I-V), ou curva de polarização, de uma célula eletrolítica genérica é possível compreender suas características elétricas. Para comparação de células de diferentes tamanhos e formas, a densidade de corrente (em $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$) geralmente é utilizada no lugar da corrente (em A). As curvas I-V devem ser extraídas em condições de temperatura (T) e pressão (P) constantes, de uma faixa específica para cada tipo de célula, pois a reação de eletrólise é afetada pela temperatura e pela pressão de operação (Bard e Faulkner, 2001). O aumento da temperatura impulsiona a reação eletroquímica e um aumento na pressão pode aumentar a solubilidade dos gases, favorecendo uma reação de eletrólise mais rápida e maior volume de gases gerados. Entretanto, temperaturas elevadas aumentam a velocidade de degradação dos eletrodos, já pressões elevadas, quando não controladas, podem danificar a membrana ou o diafragma (Cavaliere, 2023).

A dinâmica eletroquímica de uma célula eletrolítica se reflete no surgimento de diferentes componentes de tensões elétricas, como mostrado na Figura 2.2, que são: a tensão reversível (v_{rev}), que reflete a tensão mínima necessária para que a eletrólise da água ocorra; o sobrepotencial de ativação (v_{act}), referente à energia necessária para vencer a barreira que bloqueia a reação eletroquímica nos eletrodos; e o sobrepotencial ôhmico (v_{ohm}), que reflete a resistência elétrica que a corrente elétrica enfrenta ao passar pela célula.

Figura 2.2 – Curva I-V de uma célula eletrolítica genérica para temperatura e pressão constantes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, a tensão sobre uma célula eletrolítica (v_{cel}) pode ser definida por (2.2).

$$v_{cel} = v_{rev} + v_{act} + v_{ohm} \quad (2.2)$$

Dessa forma, para compreender o comportamento elétrico das células eletrolíticas é necessário a análise dos princípios eletroquímicos que envolvem a reação, bem como, as perdas envolvidas no processo que irão afetar o comportamento dinâmico da célula.

2.1.1 Tensão reversível

A tensão reversível representa a diferença de potencial elétrico mínima necessária para que a reação de eletrólise da água ocorra de forma ideal, sem considerar perdas. Esse parâmetro está diretamente relacionado à energia livre de Gibbs (ΔG^o), que é uma função termodinâmica essencial para compreender a viabilidade e a espontaneidade das reações químicas. Em sistemas de eletrólise, assim como em processos de oxirredução em geral, quando o sistema não está em equilíbrio, a reação eletroquímica tende a evoluir para atingir esse estado. A energia requerida para essa transição pode ser quantificada pela variação da energia livre de Gibbs em (2.3), que expressa a condição termodinâmica do sistema (Zoski, 2006).

$$\Delta G^o = n \cdot F \cdot E \quad (2.3)$$

Onde:

- F – Constante de Faraday ($F = 96490 \text{ C}$);
- n – Número de elétrons envolvidos na reação, em geral, na eletrólise da água $n = 2$.
- E – Diferença de potencial entre os eletrodos, resultante da variação da energia livre de Gibbs, em V.

Na eletrólise da água, a variação da energia livre de Gibbs representa a energia que deve ser aplicada para que ocorra a quebra da água. Dessa forma, a diferença de potencial E passa a representar a tensão reversível v_{rev} , definida em (2.4).

$$E = v_{rev} = \frac{\Delta G^o}{n \cdot F} \quad (2.4)$$

A variação da energia livre de Gibbs também pode ser determinada em condições não padrão, com base nos parâmetros energéticos associados à eletrólise da água, utilizando a equação de Gibbs-Helmholtz em (2.5) (Smolinka, 2021).

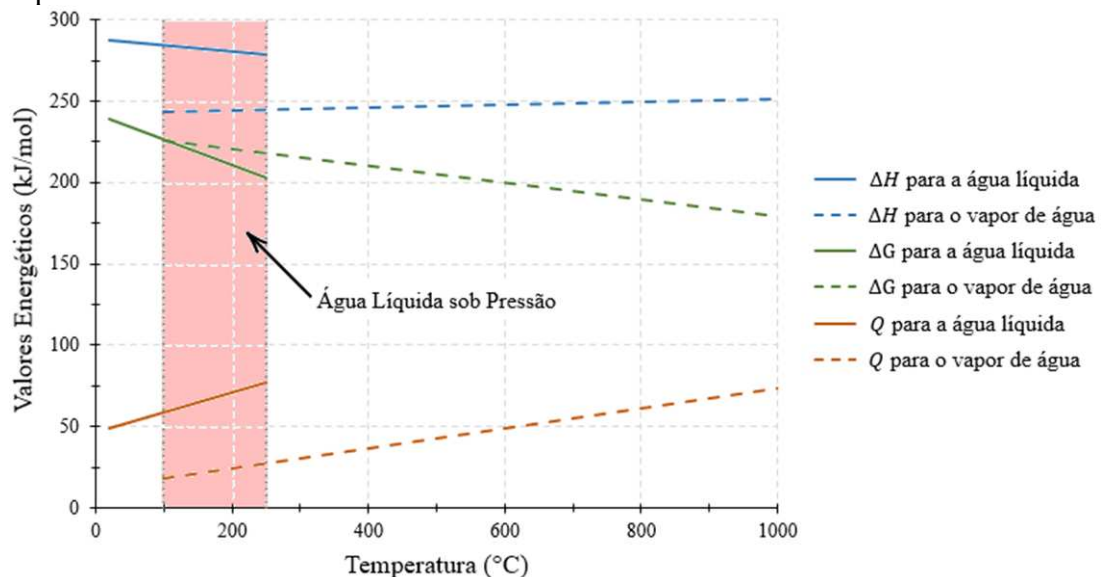
$$\Delta G(T, P) = \Delta H(T, P) - Q(T, P) = \Delta H(T, P) - T \cdot \Delta S(T, P) \quad (2.5)$$

Onde:

- ΔH – Variação de entalpia da reação ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), é a energia total da reação de eletrólise;
- ΔG – Variação da energia livre de Gibbs ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), é a energia elétrica necessária para a quebra da molécula da água. Essa é a energia que deve ser fornecida aos eletrodos através de uma fonte externa;
- Q – Quantidade de calor da reação de eletrólise ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), representada pelo produto entre a temperatura do processo e a variação de entropia (ΔS em $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

Os valores energéticos da reação de eletrólise da água, em função da temperatura são mostrados na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Valores termodinâmicos da reação de eletrólise da água para diferentes temperaturas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O comparativo entre os valores de ΔH , ΔG e Q das reações de eletrólise para a água líquida ($T = 25\text{ °C} = 298,15\text{ K}$) e gasosa ($T = 100\text{ °C} = 373,15\text{ K}$) pode ser observado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Comparação entre os valores termodinâmicos das reações de eletrólise da água líquida e gasosa.

Estado da água	Temperatura	$\Delta H(T, 1 \text{ bar})$	$\Delta G(T, 1 \text{ bar})$	$Q(T, 1 \text{ bar})$
Líquido	298,15 K	$286 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	$237 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	$49 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
Gasoso	373,15 K	$242 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	$229 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	$70 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

Fonte: Adaptado de (Miranda, 2019).

Aplicando (2.5) em (2.4), a tensão reversível pode ser obtida em função da temperatura e da pressão na célula, conforme (2.6).

$$v_{rev}(T, P) = \frac{\Delta H(T, P) - T \cdot \Delta S(T, P)}{n \cdot F} \quad (2.6)$$

Em condição de referência, para temperatura e pressão ambiente $v_{rev}(298,15 \text{ K}, 1 \text{ bar}) = 1,23 \text{ V}$. Dessa forma, ao considerar a operação da célula em regime, a tensão reversível pode ser modelada eletricamente como uma fonte de tensão dependente da temperatura e da pressão de operação da célula. Demonstrando que uma célula eletrolítica em operação possui característica inerente de fonte de tensão.

Embora a tensão reversível dê início à reação de eletrólise, em uma operação endotérmica¹, é necessário aplicar uma tensão maior para compensar as perdas do processo (Godula-Jopek e Stolten, 2015). Em uma célula eletrolítica ideal, o calor gerado durante o processo de eletrólise seria o suficiente para atender à demanda de calor da reação de eletrólise, dessa forma, a célula poderia operar em equilíbrio térmico (Cavaliere, 2023). O nível de tensão em que isso ocorreria é chamado de tensão termoneutra (v_{tn}) e pode ser expressa por (2.7).

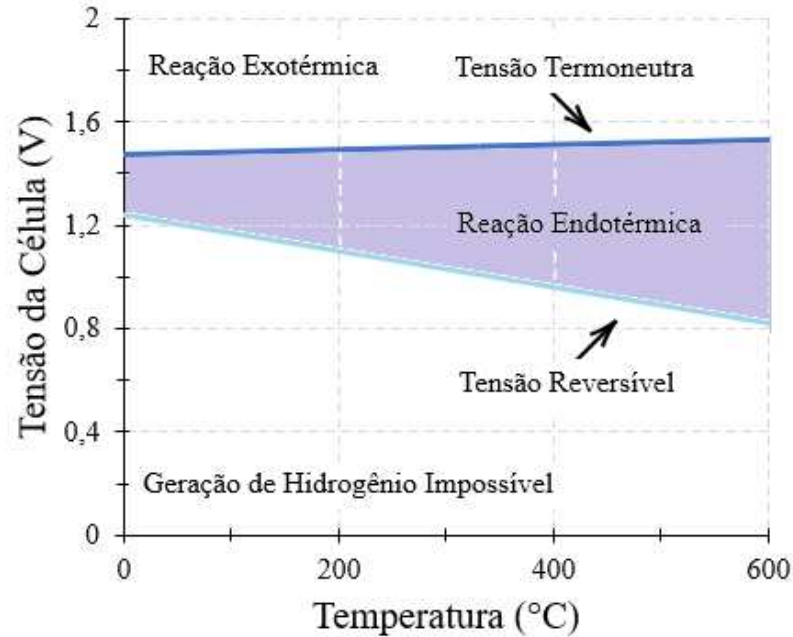
$$v_{tn}(T, P) = \frac{\Delta H(T, P)}{n \cdot F} \quad (2.7)$$

A baixa variação da tensão termoneutra permite que ela seja considerada constante ($V_{tn} = 1,48 \text{ V}$) (Ulleberg, 2003). Entretanto, como a eletrólise é um processo sujeito a perdas térmicas e irreversibilidades, a tensão real a ser aplicada sobre a célula é maior que a tensão termoneutra (Godula-Jopek e Stolten, 2015). Acima da tensão termoneutra a célula eletrolítica passa a operar como uma reação exotérmica², como mostrado na Figura 2.4.

¹ Reações endotérmicas absorvem energia do ambiente, geralmente na forma de calor. Nesse tipo de reação, a entalpia dos produtos é maior do que a dos reagentes, resultando em uma variação de entalpia positiva ($\Delta H > 0$).

² Reações exotérmicas liberam energia para o ambiente, também na forma de calor. Nesse tipo de reação, a entalpia dos produtos é menor do que a dos reagentes, resultando em uma variação de entalpia negativa ($\Delta H < 0$).

Figura 2.4 – Tensão reversível e tensão termoneutra em função da temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A tensão que deve ser adicionada sobre as células para compensar as perdas é chamada de sobrepotencial, que pode ser separado em duas categorias: de ativação e ôhmico.

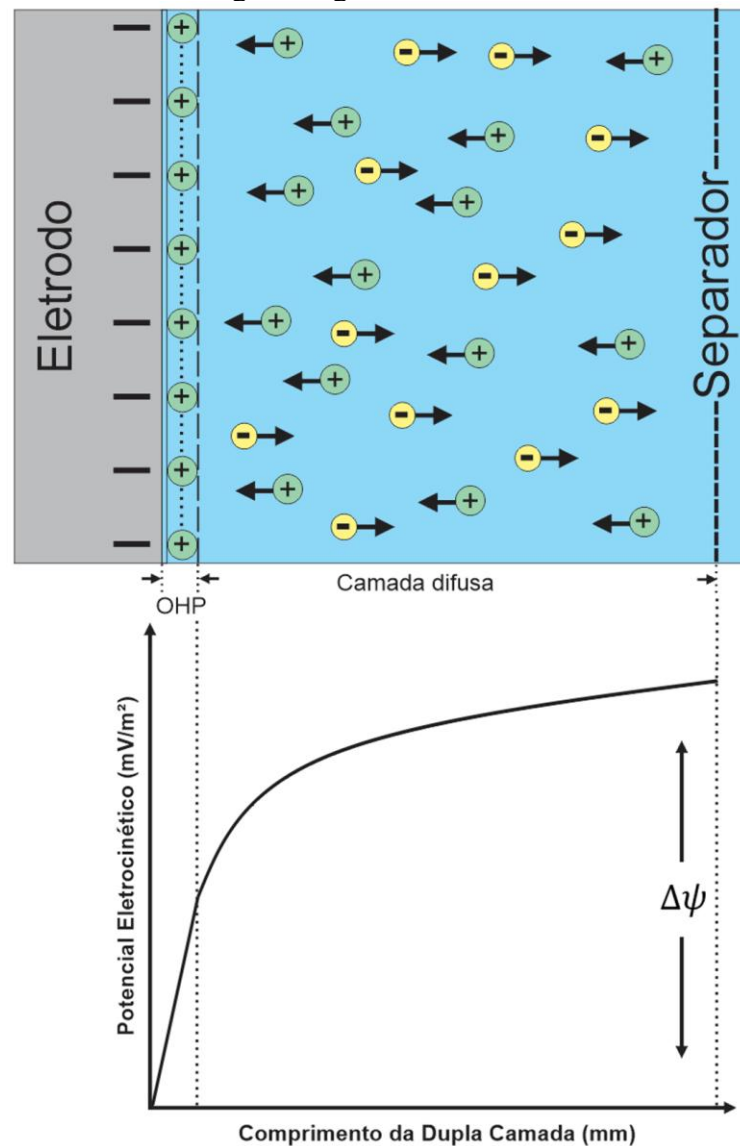
2.1.2 Sobrepotencial de ativação

O sobrepotencial de ativação representa a tensão adicional necessária para que as reações de evolução de hidrogênio (HER - *Hydrogen Evolution Reaction*) e de oxigênio (OER - *Oxygen Evolution Reaction*) ocorram eficientemente nos eletrodos durante a eletrólise da água. Para que não seja necessário a aplicação de um sobrepotencial elevado, catalisadores como a platina e o níquel são comumente adotados nos eletrodos para acelerar o processo de ativação (Cavaliere, 2023). Esse sobrepotencial é necessário pois a área de contato entre o eletrodo e o eletrólito atua como uma barreira energética, devido ao acúmulo de carga na superfície do eletrodo, o qual é compensado pelo acúmulo de íons no eletrólito (Cavaliere, 2023).

Esse efeito foi apresentado inicialmente por Hermann von Helmholtz (1853) e foi chamado de dupla camada elétrica. A análise de Helmholtz postula que íons atraídos se aproximam da superfície do eletrodo, formando uma camada que neutraliza sua carga. Essa aproximação é limitada ao raio do íon e a uma única camada de moléculas solventes ao redor de cada íon. Como resultado ocorre uma queda de potencial restrita a essa região específica, conhecida como camada compacta ou plano de Helmholtz externo (OHP – *outer Helmholtz plane*) (Srinivasan, 2006).

Embora fornecesse uma base para compreender o comportamento dessa região, o modelo de Helmholtz não considerava fatores como a difusão dos íons na solução. Em um trabalho subsequente, Otto Stern (1924) considerou a movimentação dos íons no eletrólito para propor uma região adjacente à camada compacta, chamada de camada difusa, onde a queda de potencial ocorre predominantemente. Os íons oxidados e reduzidos podem se mover na camada difusa sob a influência de uma tensão tangencial denominada de potencial eletrocinético ($\Delta\psi$) (expresso em $\text{mV} \cdot \text{m}^{-2}$) (Srinivasan, 2006). A representação do efeito de dupla camada, considerando a camada compacta e a camada difusa e a relação entre o potencial eletrocinético e o comprimento da dupla camada é mostrado na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Representação do efeito de dupla camada em um eletrodo carregado negativamente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da análise do potencial eletrocinético, é possível identificar que o efeito de dupla camada confere característica capacitiva à interface eletrodo-eletrólito. Isso representa uma barreira de potencial elétrico que deve ser superada para que a reação de transferência de carga seja desencadeada (Miranda, 2019). Considerando um sistema com um eletrodo e uma única reação de oxirredução reversível, a densidade de corrente necessária para a reação de redução (\vec{j}) pode ser definida por (2.8) e a densidade de corrente necessária para a reação de oxidação (\tilde{j}) pode ser definida por (2.9) (Bard e Faulkner, 2001).

$$\vec{j}(T, \Delta\psi) = F \cdot C_{ox} \cdot k \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot n \cdot F \cdot \Delta\psi}{R \cdot T}\right) \quad (2.8)$$

$$\tilde{j}(T, \Delta\psi) = F \cdot C_r \cdot k \cdot \exp\left[\frac{(\alpha - 1) \cdot n \cdot F \cdot \Delta\psi}{R \cdot T}\right] \quad (2.9)$$

Onde:

- C_{ox} – Concentração de íons oxidados;
- C_r – Concentração de íons reduzidos;
- k – Coeficiente de temperatura do eletrodo;
- α – Coeficiente de transferência do eletrodo, representa a razão entre o comprimento da OHP e a espessura de toda a dupla camada;
- R – Constante universal dos gases ($R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Quando nenhum potencial externo é aplicado, $\Delta\psi$ passa a representar a diferença de potencial da reação em equilíbrio ($\Delta\psi_{eq}$). Nessa condição, a densidade de corrente de redução se iguala à densidade de corrente de oxidação (2.10). Isso resulta na densidade de corrente de troca (j_0), conforme (2.11). A densidade de corrente de troca pode ser determinada de acordo com o material do eletrodo (Wolyne, 2003).

$$j_0 = \vec{j} = \tilde{j} \quad (2.10)$$

$$j_0 = F \cdot C_{ox} \cdot k \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot n \cdot F \cdot \Delta\psi_{eq}}{R \cdot T}\right) = F \cdot C_r \cdot k \cdot \exp\left[\frac{(\alpha - 1) \cdot n \cdot F \cdot \Delta\psi_{eq}}{R \cdot T}\right] \quad (2.11)$$

O sobrepotencial de ativação é a tensão que deve ser fornecida à célula para superar a barreira de potencial elétrico, podendo ser definida pela diferença entre $\Delta\psi$ e $\Delta\psi_{eq}$, conforme (2.12) (Cardoso e Panossian, 2012).

$$v_{act} = \Delta\psi - \Delta\psi_{eq} \quad (2.12)$$

Quando v_{act} é positiva ($\Delta\psi > \Delta\psi_{eq}$), ocorre um fluxo de elétrons em direção ao ânodo e quando v_{act} é negativa ($\Delta\psi < \Delta\psi_{eq}$), ocorre um fluxo de elétrons em direção ao cátodo (Bockris, Reddy e Gamboa-Aldeco, 2002). Dessa forma, as densidades de correntes no ânodo (j_a) e no cátodo (j_c) podem ser definidas em (2.14) e (2.16), respectivamente.

$$j_a = \vec{j} - \tilde{j} > 0 \quad (2.13)$$

$$j_a(T, \Delta\psi_a) = F \cdot C_{ox} \cdot k_a \cdot \exp\left(\frac{\alpha_a \cdot n \cdot F \cdot \Delta\psi_a}{R \cdot T}\right) - F \cdot C_r \cdot k_a \cdot \exp\left[\frac{(\alpha_a - 1) \cdot n \cdot F \cdot \Delta\psi_a}{R \cdot T}\right] \quad (2.14)$$

$$j_c = -(\tilde{j} - \vec{j}) < 0 \quad (2.15)$$

$$j_c(T, \Delta\psi_c) = -\left\{F \cdot C_{ox} \cdot k_c \cdot \exp\left[\frac{(\alpha_c - 1) \cdot n \cdot F \cdot \Delta\psi_c}{R \cdot T}\right] - F \cdot C_r \cdot k_c \cdot \exp\left(\frac{\alpha_c \cdot n \cdot F \cdot \Delta\psi_c}{R \cdot T}\right)\right\} \quad (2.16)$$

Através da razão entre j_a e j_0 , a densidade de corrente no ânodo pode ser expressa por (2.19).

$$\frac{j_a(T, \Delta\psi_a)}{j_{0,a}} = \frac{F \cdot C_{ox} \cdot k_a \cdot \exp\left(\frac{\alpha_a \cdot n \cdot F \cdot \Delta\psi_a}{R \cdot T}\right)}{F \cdot C_{ox} \cdot k_a \cdot \exp\left(\frac{\alpha_a \cdot n \cdot F \cdot \Delta\psi_{eq}}{R \cdot T}\right)} - \frac{F \cdot C_r \cdot k_a \cdot \exp\left[\frac{(\alpha_a - 1) \cdot n \cdot F \cdot \Delta\psi_a}{R \cdot T}\right]}{F \cdot C_r \cdot k_a \cdot \exp\left[\frac{(\alpha_a - 1) \cdot n \cdot F \cdot \Delta\psi_{eq}}{R \cdot T}\right]} \quad (2.17)$$

$$j_a(T, \Delta\psi_a) = j_{0,a} \left\{ \exp\left[\frac{\alpha_a \cdot n \cdot F (\Delta\psi_a - \Delta\psi_{eq})}{R \cdot T}\right] - \exp\left[\frac{n \cdot F (\alpha_a - 1) (\Delta\psi_a - \Delta\psi_{eq})}{R \cdot T}\right] \right\} \quad (2.18)$$

$$j_a(T, v_{act,a}) = j_{0,a} \left\{ \exp\left(\frac{\alpha_a \cdot n \cdot F \cdot v_{act,a}}{R \cdot T}\right) - \exp\left[\frac{(\alpha_a - 1) \cdot n \cdot F \cdot v_{act,a}}{R \cdot T}\right] \right\} \quad (2.19)$$

Analogamente, para o cátodo:

$$\frac{j_c(T, \Delta\psi_c)}{j_{0,c}} = \frac{F \cdot C_{ox} \cdot k_c \cdot \exp\left(\frac{\alpha_c \cdot n \cdot F \cdot \Delta\psi_c}{R \cdot T}\right)}{F \cdot C_{ox} \cdot k_c \cdot \exp\left(\frac{\alpha_c \cdot n \cdot F \cdot \Delta\psi_{eq}}{R \cdot T}\right)} - \frac{F \cdot C_r \cdot k_c \cdot \exp\left[\frac{(\alpha_c - 1) \cdot n \cdot F \cdot \Delta\psi_c}{R \cdot T}\right]}{F \cdot C_r \cdot k_c \cdot \exp\left[\frac{(\alpha_c - 1) \cdot n \cdot F \cdot \Delta\psi_{eq}}{R \cdot T}\right]} \quad (2.20)$$

$$j_c(T, \Delta\psi_c) = j_{0,c} \left\{ \exp\left[\frac{\alpha_c \cdot n \cdot F (\Delta\psi_c - \Delta\psi_{eq})}{R \cdot T}\right] - \exp\left[\frac{n \cdot F (\alpha_c - 1) (\Delta\psi_c - \Delta\psi_{eq})}{R \cdot T}\right] \right\} \quad (2.21)$$

$$j_c(T, v_{act,c}) = j_{0,c} \left\{ \exp\left(\frac{\alpha_c \cdot n \cdot F \cdot v_{act,c}}{R \cdot T}\right) - \exp\left[\frac{(\alpha_c - 1) \cdot n \cdot F \cdot v_{act,c}}{R \cdot T}\right] \right\} \quad (2.22)$$

Dessa forma, a densidade de corrente necessária para vencer a barreira potencial da dupla camada, independentemente do tipo de polarização, pode ser calculada por (2.23).

$$j(T, v_{act,a,c}) = j_{0,a,c} \left\{ \exp\left(\frac{n \cdot F \cdot \alpha_{a,c} \cdot v_{act,a,c}}{R \cdot T}\right) - \exp\left[\frac{(\alpha_{a,c} - 1) \cdot n \cdot F \cdot v_{act,a,c}}{R \cdot T}\right] \right\} \quad (2.23)$$

Convencionalmente, a temperatura pode ser considerada constante, $v_{act,a,c}$ tem valor positivo e $\alpha_{a,c}$ é um valor entre 0 e 1, dessa forma, $\left(\frac{n \cdot F \cdot \alpha_{a,c} \cdot v_{act,a,c}}{R \cdot T}\right)$ sempre será um termo positivo e $\left[\frac{(\alpha_{a,c} - 1) \cdot n \cdot F \cdot v_{act,a,c}}{R \cdot T}\right]$ sempre será um termo negativo. Como um termo exponencial com um argumento positivo tende a crescer rapidamente enquanto um termo exponencial com um argumento negativo tende a diminuir, é possível considerar que:

$$\exp\left(\frac{n \cdot F \cdot \alpha_{a,c} \cdot v_{act,a,c}}{R \cdot T}\right) \gg \exp\left[\frac{(\alpha_{a,c} - 1) \cdot n \cdot F \cdot v_{act,a,c}}{R \cdot T}\right] \quad (2.24)$$

Nessas condições, (2.23) pode ser substituída por (2.25).

$$j(T, v_{act,a,c}) = j_{0,a,c} \exp\left(\frac{n \cdot F \cdot \alpha_{a,c} \cdot v_{act,a,c}}{R \cdot T}\right) \quad (2.25)$$

Desenvolvendo (2.25), $v_{act,a,c}$ pode ser determinada por (2.30).

$$\ln[j(T, v_{act,a,c})] = \ln(j_{0,a,c}) + \frac{n \cdot F \cdot \alpha_{a,c} \cdot v_{act,a,c}}{R \cdot T} \quad (2.26)$$

$$2,3 \cdot \log[j(T, v_{act,a,c})] = 2,3 \cdot \log(j_{0,a,c}) + \frac{n \cdot F \cdot \alpha_{a,c} \cdot v_{act,a,c}}{R \cdot T} \quad (2.27)$$

$$2,3 \cdot \{\log[j(T, v_{act,a,c})] - \log(j_{0,a,c})\} = \frac{n \cdot F \cdot \alpha_{a,c} \cdot v_{act,a,c}}{R \cdot T} \quad (2.28)$$

$$2,3 \cdot \log\left(\frac{j(T, v_{act,a,c})}{j_{0,a,c}}\right) = \frac{n \cdot F \cdot \alpha_{a,c} \cdot v_{act,a,c}}{R \cdot T} \quad (2.29)$$

$$v_{act,a,c}(T,j) = 2,3 \frac{R \cdot T}{n \cdot F \cdot \alpha_{a,c}} \cdot \log\left(\frac{j}{j_{0,a,c}}\right) \quad (2.30)$$

Assim, o sobrepotencial de ativação total de uma célula eletrolítica pode ser determinado por (2.32).

$$v_{act}(T,j) = v_{act,a}(T,j) + v_{act,c}(T,j) \quad (2.31)$$

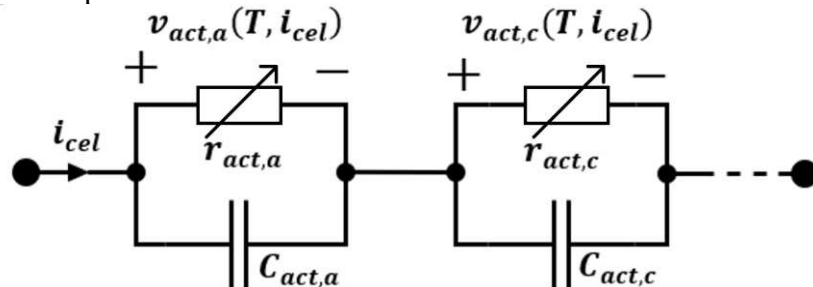
$$v_{act}(T,j) = 2,3 \cdot \frac{R \cdot T}{n \cdot \alpha_a \cdot F} \cdot \log\left(\frac{j}{j_{0,a}}\right) + 2,3 \cdot \frac{R \cdot T}{n \cdot \alpha_c \cdot F} \cdot \log\left(\frac{j}{j_{0,c}}\right) \quad (2.32)$$

Onde a densidade de corrente j pode ser calculada pela razão entre a corrente instantânea na célula (i_{cel}) e a área eficaz da célula (área de contato entre o eletrodo e o eletrólito – A_{ef}), conforme (2.33).

$$j = \frac{i_{cel}}{A_{ef}} \quad (2.33)$$

As equações (2.30), (2.31) e (2.32) expressam como o sobrepotencial de ativação varia com a densidade de corrente e com a temperatura, levando em consideração os parâmetros termodinâmicos e cinéticos. O logaritmo da razão entre a densidade de corrente e a densidade de corrente de troca expressa uma descrição quantitativa da reação eletroquímica, sendo o principal desafio no que diz respeito à modelagem elétrica de células eletrolíticas. O comportamento do efeito de dupla camada e o sobrepotencial de ativação podem ser modelados eletricamente como um circuito RC (Järvinen *et al.*, 2024; Ratib *et al.* (2024)), como mostrado na Figura 2.6. $C_{act,a}$ e $C_{act,c}$ são as capacitâncias que representam a dinâmica temporal da célula. Já as resistências $r_{act,a}$ e $r_{act,c}$ são utilizadas para representar os sobrepotencial de ativação em condições de regime permanente, que variam de acordo com o ponto de operação.

Figura 2.6 – Modelo elétrico equivalente dos efeitos de ativação e de dupla camada em uma célula eletrolítica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.1.3 Sobrepotencial ôhmico

O sobrepotencial ôhmico está relacionado aos elementos que compõem a célula eletrolítica e que possuem resistência elétrica, que contribuem para perdas, exigindo uma tensão adicional para compensação. Para Darband, Aliofkhazraei e Shanmugam (2019), os componentes resistivos de uma célula eletrolítica podem ser divididos em três categorias, que variam de acordo com o tipo de célula, sendo elas: resistências do circuito elétrico, resistências de transporte e resistências da reação eletroquímica.

As resistências do circuito elétrico de uma célula provocam perdas em forma de calor durante o processo de eletrólise. Nessa categoria se encaixam as resistências dos eletrodos e dos elementos auxiliares, como placas bipolares e conectores, que são determinadas pelas dimensões e pela condutividade elétrica desses elementos. Para fins de simplificação, as resistências dos eletrodos e dos outros elementos auxiliares podem ser condensadas em resistência do ânodo (r_{an}) e resistência do cátodo (r_{cat}) e podem ser determinadas por (2.34) e (2.35), respectivamente.

$$r_{an}(T) = \sum \frac{l_{ga}}{A_{ga} \cdot k_{ga}(T)} \quad (2.34)$$

$$r_{cat}(T) = \sum \frac{l_{gc}}{A_{gc} \cdot k_{gc}(T)} \quad (2.35)$$

Onde:

- g – Elemento que compõe o conjunto eletrodo;
- l_{ga} e l_{gc} – Espessura dos elementos do conjunto eletrodo (m);
- A_{an} e A_{cat} – Área dos elementos do conjunto eletrodo (m²);
- k_{ga} e k_{gc} – Condutividade elétrica do conjunto eletrodo ($\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$).

As resistências de transporte estão relacionadas aos meios em que os íons são transportados dentro da célula, isso está relacionado ao transporte iônico no eletrólito e no separador de gases (diafragma ou membrana). Semelhante aos eletrodos, a resistência do separador (r_{sep}) pode ser determinada pela resistividade do material que o compõe e suas dimensões, conforme (2.36).

$$r_{sep}(T) = \frac{l_{sep}}{A_{sep} \cdot k_{sep}(T)} \quad (2.36)$$

Onde:

- l_{sep} – Espessura do separador (m);
- A_{sep} – Área do separador (m²);
- k_{sep} – Condutividade elétrica do separador ($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$).

Na eletrólise alcalina, a transferência de íons depende da concentração do eletrólito, da distância entre os eletrodos e da área eficaz da célula (Grdeń *et al.*, 2008). A resistência do eletrólito pode ser determinada por (2.37).

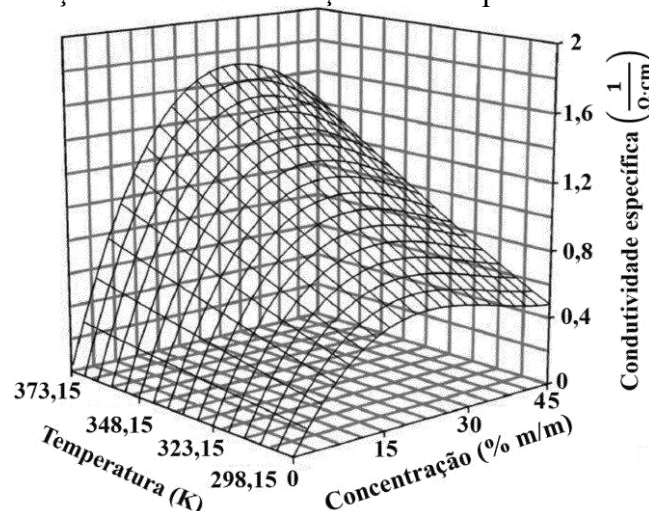
$$r_{ele}(T) = \frac{d}{A_{ef} \cdot \Lambda_{ele}(T) \cdot C_{ele}} \quad (2.37)$$

Onde:

- d – Distância entre os eletrodos (m);
- Λ_{ele} – Condutividade molar do eletrólito ($m^2 \cdot \Omega^{-1} \cdot mol^{-1}$);
- C_{ele} – Concentração do eletrólito ($mol \cdot m^{-3}$).

Já as resistências da reação eletroquímica estão relacionadas às variações que ocorrem na célula conforme a reação de eletrólise ocorre. Um exemplo que ocorre em células alcalinas é o aumento da concentração do eletrólito conforme a água é consumida. A relação entre a concentração em porcentagem de massa e a condutividade de um eletrólito a base de hidróxido de potássio para diferentes temperaturas é mostrada na Figura 2.7, demonstrando uma condutividade máxima para uma concentração de massa de 30%. Como a variação da concentração afeta a resistência elétrica do eletrólito, esse efeito pode ser representado por uma resistência que varia com a concentração (r_{con}) (Carmo *et al.*, 2022).

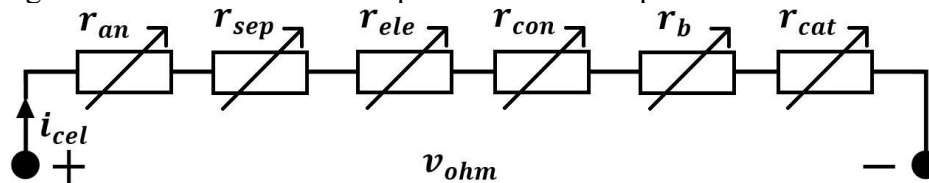
Figura 2.7 – Condutividade do eletrólito em função da sua concentração e da temperatura.



Fonte: Adaptado de Carmo *et al.* (2022).

Além disso, a formação de bolhas de gás O_2 e gás H_2 nas superfícies dos eletrodos cria resistências à transferência iônica e, conseqüentemente, à reação eletroquímica (Huang *et al.*, 2022; Cao *et al.*, 2024). O efeito das bolhas também pode ser representado como uma resistência variável (r_b) que aumenta conforme o volume de gases gerados. Assim, o sobrepotencial ôhmico pode ser representado como a queda de tensão sobre um conjunto de resistências variáveis em série, como mostrado na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Modelo elétrico equivalente do sobrepotencial ôhmico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2 Conclusões do capítulo

Este capítulo abordou os princípios do processo de eletrólise, bem como os fundamentos eletroquímicos que regem o funcionamento de células eletrolíticas. A partir da análise do comportamento elétrico de uma célula genérica foi possível observar três componentes elétricos básicos: tensão reversível, sobrepotencial de ativação e sobrepotencial ôhmico.

A partir da análise eletroquímica, foi constatado que a célula eletrolítica requer um valor mínimo de tensão para iniciar o processo de eletrólise, chamada de tensão reversível, que concede à célula característica inerente de fonte de tensão. Essa tensão varia com a temperatura em que a reação ocorre, porém, como os eletrolisadores comerciais possuem controle da temperatura, a tensão reversível pode ser considerada constante. Além da tensão reversível, a célula eletrolítica apresenta outros dois componentes elétricos que representam perdas. O sobrepotencial ôhmico está relacionado à resistência elétrica que os elementos que compõem a célula possuem. Já o sobrepotencial de ativação está relacionado com a cinética eletroquímica das semirreações dos eletrodos. Durante o processo, os pontos de contato entre o eletrodo e o eletrólito formam uma dupla camada elétrica, que se comporta como um dielétrico. Por ser o principal responsável pelo comportamento elétrico dinâmico da célula, o capítulo apresentou uma pesquisa aprofundada sobre o efeito de dupla camada e como quantificar o sobrepotencial de ativação.

Para compreender as demais particularidades que envolvem o processo de eletrólise da água é necessário avaliar as características das tecnologias para eletrólise da água. Além dos

tipos de células eletrolíticas existentes, é necessário considerar também as possibilidades de conexão entre células de um mesmo tipo. As características de um sistema para eletrólise da água e as diferentes formas de mensurar sua eficiência também devem ser consideradas, visando principalmente a implementação de FER para produção de H₂V.

3 TECNOLOGIAS PARA ELETRÓLISE DA ÁGUA

As tecnologias para eletrólise da água têm sido continuamente desenvolvidas e utilizadas em aplicações industriais. Ao longo dos séculos, a eletrólise da água saiu do campo teórico para o prático, tendo suas tecnologias constantemente aprimoradas e com perspectivas de auxiliar na descarbonização global com uso combinado às FER (Lv; Tian e Yuan, 2023). Ao longo do tempo, diferentes tecnologias para eletrólise da água foram propostas e aplicadas na produção de hidrogênio, essas variações apresentam vantagens e desvantagens entre si. Mesmo que algumas dessas tecnologias já possam ser aplicadas industrialmente em sistemas para produção de hidrogênio, cada tipo de célula continua em constante processo de P&D.

3.1 Tipos de eletrólise da água

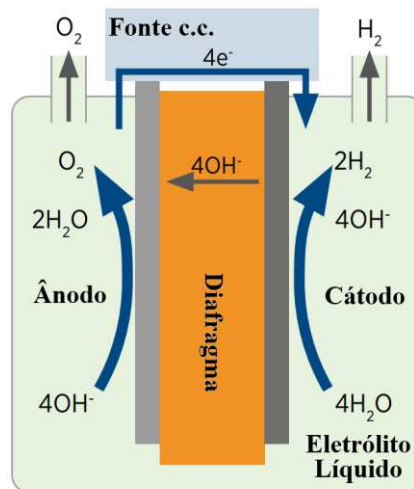
De acordo com Bessarabov e Millet (2018), os processos de eletrólise podem ser diferenciados com base na temperatura de operação e no pH do meio em que a reação ocorre. A eletrólise de baixa temperatura (LTE – *Low Temperature Electrolysis*) pode ocorrer em meio alcalino ou ácido. No meio alcalino, existem dois tipos principais: a eletrólise alcalina clássica e a eletrólise alcalina com AEM. Já no meio ácido, a eletrólise ocorre com a utilização de uma PEM. Por outro lado, a eletrólise de alta temperatura (HTE – *High Temperature Electrolysis*) é representada apenas pela eletrólise de óxido sólido. Atualmente, as principais tecnologias de eletrólise utilizadas na produção de hidrogênio são a eletrólise alcalina clássica e a eletrólise PEM. A eletrólise AEM e a eletrólise de óxido sólido foram desenvolvidas recentemente e estão em estado avançado de P&D.

3.1.1 Eletrólise alcalina clássica

A eletrólise alcalina clássica é uma tecnologia bem estabelecida e madura para aplicações industriais na produção de hidrogênio, com sistemas na faixa de centenas de megawatts (Iyer, Kelly e Elgowainy, 2022). Uma célula clássica para eletrólise alcalina utiliza um eletrólito com alta condutividade iônica e que não seja corrosivo aos eletrodos, geralmente feitos de aço inoxidável revestidos com níquel (Kumar *et al.*, 2018). Tipicamente, uma solução alcalina de hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH), com concentração entre 20% e 40%, é utilizada como eletrólito (Kumar e Lim, 2022). O diafragma, utilizado para separar os gases gerados, deve ser feito de um material permeável ao eletrólito para permitir o transporte iônico, o mais adotado é de óxido de zircônio (ZrO₂) com PPS (*polyphenylene*

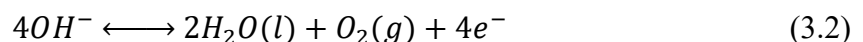
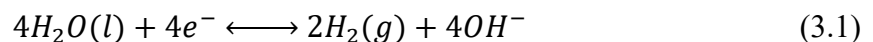
sulphide), também chamado de *Zirfon*[®] (Lavorante; Reynoso e Franco, 2015). Além desses elementos, esse tipo de célula também pode utilizar: camadas de difusão de gás, geralmente, malhas ou espumas de níquel; placas bipolares, geralmente, placas de aço inoxidável revestidas com níquel; e placas terminais (Kumar e Lim, 2022). O esquemático de uma célula eletrolítica alcalina clássica é mostrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Esquemático de uma célula alcalina clássica.



Fonte: Adaptado de IRENA (2020).

No processo de eletrólise da célula alcalina clássica, a solução alcalina é reduzida no cátodo, produzindo moléculas de água que são divididas em H_2 e íons hidroxila (OH^-), conforme (3.1). O gás H_2 é liberado da superfície do cátodo e os íons hidroxila são conduzidos através do diafragma para o ânodo. No ânodo, esses íons são recombinados formando gás O_2 e água, conforme (3.2) (Kumar e Lim, 2022).



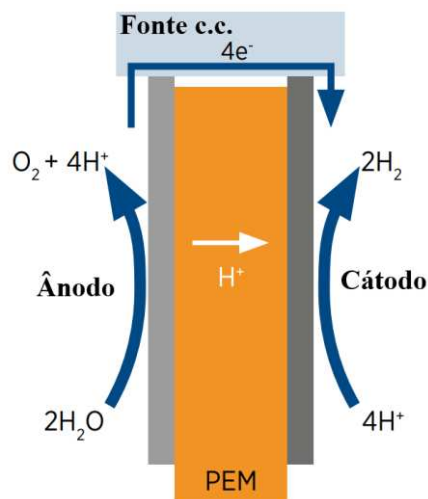
De forma geral, esse tipo de célula eletrolítica opera em baixa temperatura, entre 25 e 90 °C, suportando pressões de até 30 bar. A operação ocorre em níveis de tensão entre 1,8 e 3 V, para densidades de corrente de 200 a 500 mA·cm⁻², atingindo eficiência elétrica de 40 a 70% (IRENA, 2020; El-Shafie, 2023). Eletrolisadores alcalinos comerciais operam de forma eficaz a partir de 20% da potência nominal, tendo como ponto ótimo de operação entre 60% e 80% da potência nominal (Franco e Giovannini, 2023). Além disso, o diafragma não bloqueia totalmente a passagem dos gases, fazendo com que o H_2 produzido possua pureza de 99,3 a

99,9% (Barros *et al.*, 2024). A nível de sistema, o consumo específico de energia do é de 4,5 a 7,5 $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{Nm}^{-3}$, com taxas de produção de hidrogênio de menos de $760 \text{ Nm}^3\cdot\text{h}^{-1}$ e uma vida útil de cerca de 10.000 horas (El-Shafie, 2023).

3.1.2 Eletrólise PEM

A eletrólise PEM também já possui aplicações a nível industrial, com potências operacionais na escala de megawatts e perspectivas para alcançar operações em gigawatts (Grigoriev *et al.*, 2020). Uma célula para eletrólise PEM utiliza uma membrana que atua tanto como eletrólito quanto separador de gases, permitindo a condução seletiva de prótons e isolando os gases produzidos, o material mais utilizado nas membranas é o Nafion[®], devido à sua alta condutividade e resistência (Bessarabov *et al.*, 2016). Esse processo de eletrólise é realizado com água destilada, entretanto, a troca de prótons torna o meio em que a reação ocorre ácido. Por isso, os eletrodos utilizam catalisadores a base de metais nobres, como irídio (Ir) e platina (Pt), o que elevam o custo dessa tecnologia (Holst *et al.*, 2021). Esse tipo de célula também pode utilizar camadas de difusão de gás, placas bipolares e placas terminais, entretanto, devido ao meio ácido, esses elementos apresentam metais como titânio, platina e irídio (Kumar e Lim, 2022). O esquemático de uma célula eletrolítica PEM é mostrado na Figura 3.2.

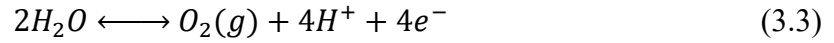
Figura 3.2 – Esquemático de uma célula eletrolítica PEM.



Fonte: Adaptado de IRENA (2020).

Durante o processo de eletrólise da água na célula PEM, as moléculas de água são divididas no ânodo em gás O_2 e em íons hidrogênio (H^+), conforme (3.3). O gás O_2 gerado é liberado do ânodo e os prótons são transportados através da PEM para o cátodo. Os elétrons

são transferidos para o cátodo, onde se recombina com os íons H^+ para produzir o gás H_2 , o que torna o meio em que a reação ocorre ácido, conforme (3.4) (Kumar e Lim, 2022).



As células para eletrólise PEM têm a capacidade de operar em temperaturas de 25 a 90 °C e pressões de até 80 bar (IRENA, 2020). Essa tecnologia suporta densidades de corrente mais altas, em comparação à célula alcalina clássica, podendo atingir valores de até 2500 mA·cm⁻² para tensões de 1,8 a 2,5 V, apresentando eficiência elétrica entre 50 e 70% (Iyer, Kelly e Elgowainy, 2022). Devido à alta seletividade das membranas, esse tipo de célula também produz gases H_2 e O_2 com pureza de cerca de 99,999% (Kumar e Himabindu, 2019). Eletrolisadores PEM comerciais operam com maior eficiência a partir de 40% da potência nominal, tendo como ponto ótimo de operação entre 70% e 90% da potência nominal (Franco e Giovannini, 2023). A nível de sistema, seu consumo específico de energia é de 5,8 a 7,5 kWh·Nm⁻³ e as taxas de produção de hidrogênio variam de 0,265 a 30 Nm³·h⁻¹, apresentando uma vida útil do eletrolisador de até 20.000 horas (El-Shafie, 2023).

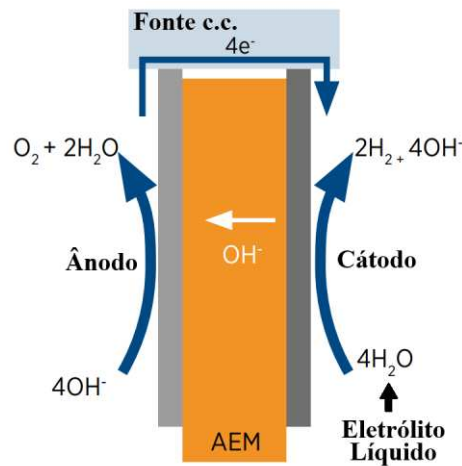
3.1.3 Eletrólise AEM

A eletrólise AEM é uma tecnologia emergente e com grande potencial para produção de H₂V em larga escala no futuro. Essa tecnologia vem ganhando destaque devido à produção de hidrogênio com maior pureza, em comparação à eletrólise alcalina clássica, e às perspectivas de redução de custo, em comparação à eletrólise PEM (Palmas *et al.*, 2023). Embora a célula AEM compartilhe semelhanças com a célula alcalina clássica, ela difere principalmente na substituição dos diafragmas convencionais por membranas de troca aniônica, como as membranas de troca de íons de amônio quaternário (Miller, 2022). Em comparação aos diafragmas, as membranas utilizadas na eletrólise AEM oferecem vantagens como maior condutividade iônica, elevada seletividade e, conseqüentemente, a produção de hidrogênio com alta pureza.

Essa tecnologia oferece vantagens, como o uso de eletrodos de aço inoxidável com catalisadores de metais de transição, como o níquel, em vez de metais nobres. Além disso, a eletrólise AEM tem a capacidade de operar com soluções alcalinas de baixa concentração, KOH ou NaOH de 10% a 20% e a possibilidade de diminuição da interface eletrodo eletrólito,

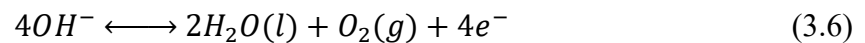
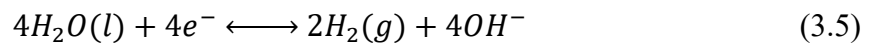
chamada de estrutura *zero-gap*, visando a redução do efeito das bolhas dos gases gerados (Henkensmeier *et al.*, 2021). Atualmente, os esforços em P&D são para melhorar a estabilidade da membrana, bem como, da estrutura membrana-eletródo e a eficiência das células, especialmente para aplicações em grande escala (Hou e Yang, 2024; Liu *et al.*, 2024). O esquemático de uma célula eletrolítica AEM é mostrado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Esquemático de uma célula eletrolítica AEM.



Fonte: Adaptado de IRENA (2020).

O princípio de funcionamento da eletrólise alcalina com AEM é semelhante ao da eletrólise alcalina clássica. A solução alcalina é reduzida no cátodo, produzindo moléculas de água que são divididas em H_2 e OH^- , conforme (3.5). O gás H_2 é liberado da superfície do cátodo e o OH^- é conduzido através da membrana para o ânodo que são recombinados formando gás O_2 e água, conforme (3.6) (Kumar e Lim, 2022).



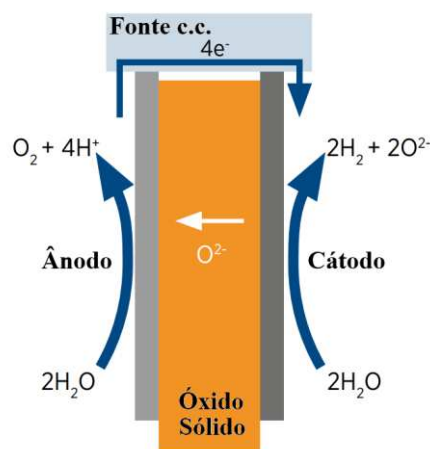
Atualmente, as células para eletrólise alcalina com AEM têm a capacidade de operar em temperaturas de até 70 °C e pressões de até 30 bar. Essa tecnologia suporta densidades de corrente de 200 a 500 mA·cm⁻² para tensões de 1,8 a 2,5 V, apresentando eficiência elétrica em torno de 40%, porém, com os avanços em pesquisa esse valor tende a ultrapassar o valor de 80% em poucos anos (Iyer; Kelly e Elgowainy, 2022; Liu *et al.*, 2024). Devido à alta seletividade da membrana, o hidrogênio produzido apresenta pureza de 99,99%. Eletrolisadores AEM comerciais operam de forma eficaz a partir de 20% da potência nominal, tendo como ponto ótimo de operação entre 50% e 70% da potência nominal (Franco e Giovannini, 2023). A nível

de sistema, seu consumo específico de energia é de 4,8 a 5,2 kWh·Nm⁻³ e as taxas de produção de hidrogênio variam de 0,25 a 1 Nm³·h⁻¹ (El-Shafie, 2023). Um dos desafios atuais é vida útil da membrana, que geralmente varia de 1.000 a 2.000 horas (Hou e Yang, 2024).

3.1.4 Eletrólise de óxido sólido

A eletrólise da água de óxido sólido começou a ser idealizada na década de 1970 e ainda está em estado de P&D. Diferente das demais, a célula de óxido sólido opera em temperaturas elevadas e com a água em estado gasoso, o que reduz significativamente o consumo de energia elétrica (Lahrichi *et al.*, 2024). A operação em alta temperatura melhora a termodinâmica e a cinética das reações, resultando em eficiências do sistema mais elevadas, além de permitir a integração com processos de síntese química, como a produção de metanol e amônia (Shen, Wang e Tucker, 2020). Uma célula possui dois eletrodos porosos e um eletrólito cerâmico denso capaz de conduzir íons óxido (O^{2-}) e atuar como separador de gases. O material mais utilizado como eletrólito é o YSZ (*Yttria Stabilized Zirconia*), conhecido por sua alta condutividade iônica e boa estabilidade química e térmica em altas temperaturas. O cátodo geralmente contém uma combinação de zircônia e níquel (Ni-YSZ), enquanto o ânodo é composto por materiais perovskitas à base de lantânio (Nechache e Hody, 2021). Para alcançar a viabilidade comercial, as pesquisas estão focadas em aumentar a estabilidade da célula a longo prazo e reduzir os custos de produção de hidrogênio (Iyer, Kelly e Elgowainy, 2022). O esquemático de uma célula de óxido sólido é mostrado na Figura 3.4.

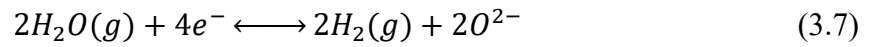
Figura 3.4 – Esquemático de uma célula eletrolítica de óxido sólido.



Fonte: Adaptado de IRENA (2020)..

Na eletrólise de óxido sólido, a água é fornecida ao cátodo na forma de vapor, onde é dividida em H_2 e íons O^{2-} pela adição de dois elétrons (3.7). Os íons O^{2-} são transportados

através do eletrólito de óxido sólido até o ânodo, onde perdem os elétrons excedentes, gerando gás O_2 (3.8) (Kumar e Lim, 2022).



Atualmente, as células eletrolíticas de óxido sólido têm a capacidade de operar em temperaturas de até 1000 °C, com pressões abaixo de 30 bar (Lahrichi *et al.*, 2024). Essa tecnologia suporta densidades de corrente de 300 a 1000 mA·cm⁻² para tensões de 0,95 a 1,3 V, apresentando eficiência elétrica em torno de 80 a 85%. Esse tipo de célula também produz o gás hidrogênio com alta pureza, cerca de 99,9% (El-Shafie, 2023). Eletrolisadores de óxido sólido operam de forma eficaz a partir de 300% da potência nominal, não tendo ponto ótimo de operação especificado (Franco e Giovannini, 2023). A nível de sistema, seu consumo específico de energia é de 2,5 a 3,5 kWh·Nm⁻³ e a vida útil do eletrolisador está em torno de 40.000 horas com perspectiva de aumento para 80.000 horas até 2050 (Iyer, Kelly e Elgowainy, 2022).

3.1.5 Comparação entre os tipos de eletrólise

Em resumo, dentre os tipos de eletrolisadores de baixa temperatura analisados, os eletrolisadores alcalinos clássicos são a tecnologia mais madura e robusta, com custo inicial menor. Em variações de potência tendem a ter sua eficiência reduzida e em baixa potência podem sofrer com a formação de bolhas que aumentam a resistência interna, enquanto altas potências podem levar à degradação dos eletrodos. Os eletrolisadores PEM possuem eficiências mais elevadas e oferecem alta pureza do hidrogênio. Podem suportar picos superiores à capacidade nominal por curtos períodos. Entretanto, eles são mais sensíveis a variações bruscas de potência, podendo danificar a membrana ou degradar os eletrodos. Já os eletrolisadores AEM ainda estão em estágio de desenvolvimento, mas combinam características dos sistemas alcalinos e PEM, permitindo uma operação flexível e eficiente sob variações moderadas de potência. Embora os eletrolisadores de óxido sólido não sejam o foco deste trabalho devido às suas condições de operação, é importante ressaltar que os eletrolisadores de óxido sólido alcançam as maiores eficiências devido à operação em alta temperatura. No entanto, eles requerem uma fonte externa de calor para gerar vapor e enfrentam desafios relacionados à durabilidade, com uma vida útil tipicamente baixa. Uma comparação entre as características dos eletrolisadores de baixa temperatura são mostradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Comparação entre eletrolisadores de baixa temperatura.

Características	Eletrolisador alcalino clássico	Eletrolisador PEM	Eletrolisador AEM
Temperatura de operação	25 a 90 °C	25 a 90 °C	Até 70 °C
Pressão	Até 30 bar	Até 80 bar	Até 30 bar
Densidade de corrente	200 a 500 mA·cm ⁻²	Até 2500 mA·cm ⁻²	200 a 500 mA·cm ⁻²
Eficiência elétrica	40 a 70%	50 a 70%	De 40% a 80%
Custo relativo	Baixo	Elevado	Com perspectivas de redução
Pureza do hidrogênio	99,3 a 99,9%	Cerca de 99,999%	Cerca de 99,99%
Consumo específico de energia	Até 7,5 kWh·Nm ⁻³	Até 7,5 kWh·Nm ⁻³	Até 5,2 kWh·Nm ⁻³
Taxa de produção de hidrogênio	Até 760 Nm ³ ·h ⁻¹	Até 30 Nm ³ ·h ⁻¹	Até 1 Nm ³ ·h ⁻¹
Vida útil	Cerca de 10.000 horas	Até 20.000 horas	Geralmente de 1000 a 2000 horas
Ponto ótimo de operação	60% a 80% da potência nominal	70% a 90% da potência nominal	50% a 70% da potência nominal
Comportamento em variações de potência	A eficiência pode cair em baixa potência e ocorrer degradação em alta potência.	Sensível a variações e picos prolongados podem acelerar sua degradação.	Menos sensível que PEM, mas ainda requer cuidados para evitar degradação.

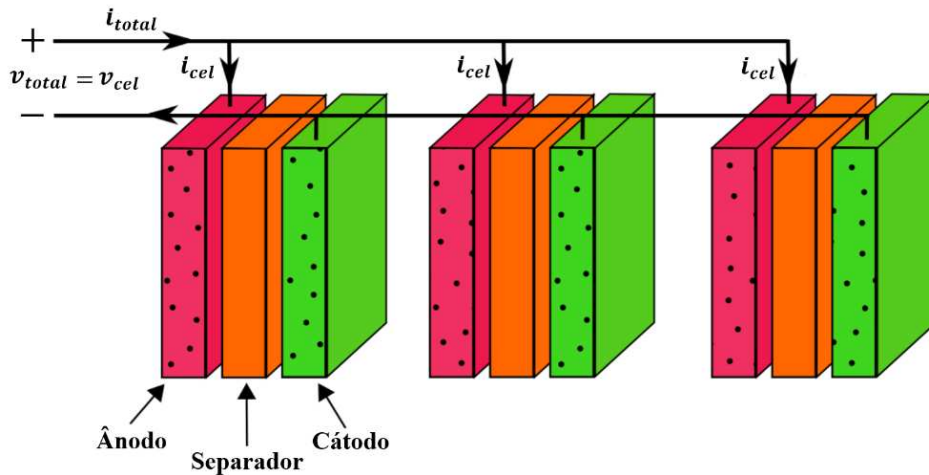
Fonte: Elaborado pelo autor.

Além dos tipos de eletrólise, outro aspecto construtivo que impacta na eficiência, produção, complexidade e durabilidade dos eletrolisadores são as possibilidades de conexão entre as células eletrolíticas para formar uma pilha.

3.2 Conexões entre células eletrolíticas

Sistemas para eletrólise da água podem utilizar duas configurações de células distintas para compor o eletrolisador, sendo elas a configuração monopolar e a configuração bipolar. A conexão monopolar, mostrada na Figura 3.5, é aquela em que as células são conectadas em paralelo. Eletrolisadores comerciais monopolares tendem a operar com baixa tensão e necessitar de fontes com alta capacidade de corrente.

Figura 3.5 – Conexão entre células de forma monopolar.



Fonte: Adaptado de Koponen (2015).

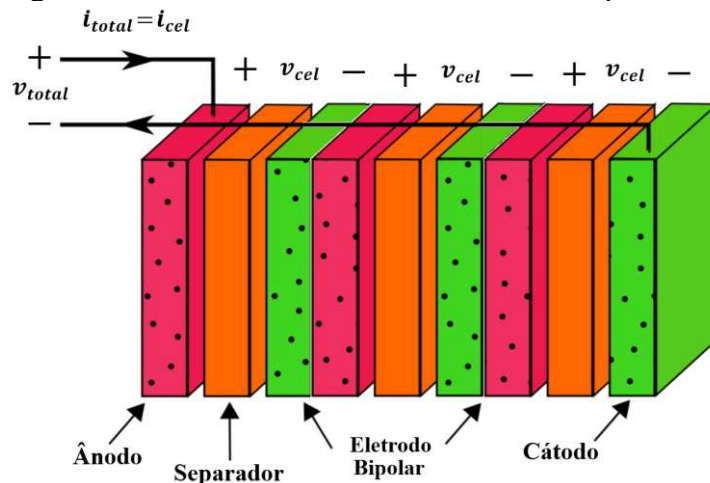
Assumindo que todas as células são iguais, a tensão total sobre o eletrolisador monopolar (v_{total}) é igual à tensão individual de cada célula (v_{cel}) e a corrente total do eletrolisador (i_{total}) é igual ao produto da corrente em uma célula (i_{cel}) pelo número de células em paralelo (N_p), conforme (3.9) e (3.10), respectivamente.

$$v_{total} = v_{cel} \quad (3.9)$$

$$i_{total} = i_{cel} \cdot N_p \quad (3.10)$$

Na configuração bipolar ou em pilha, mostrada na Figura 3.6, apenas os dois eletrodos finais são conectados à fonte de alimentação. Em comparação com o eletrolisador monopolar, uma pilha que é composta por muitas células bipolares de baixa tensão pode operar com tensões mais altas e com maiores densidades de corrente por célula.

Figura 3.6 – Conexão entre células de forma bipolar.



Fonte: Adaptado de Koponen (2015).

Assumindo que todas as células são iguais, a tensão total sobre uma pilha é igual ao produto da tensão de uma célula pelo número de células em série (N_s) e a corrente total da pilha é igual à corrente individual de cada célula, conforme (3.11) e (3.12), respectivamente.

$$v_{total} = v_{cel} \cdot N_s \quad (3.11)$$

$$i_{total} = i_{cel} \quad (3.12)$$

Cada tipo de conexão em eletrolisadores apresenta vantagens e desvantagens específicas. Os eletrolisadores monopolares são de simples implementação e manutenção, permitindo o reparo de uma célula enquanto as demais continuam operando. Entretanto, esse tipo de eletrolisador normalmente requer um sistema para monitorar a pressão, temperatura e nível de eletrólito ou água destilada em cada célula, o que pode resultar em um equipamento de grandes dimensões. Além disso, eletrolisadores monopolares podem apresentar distribuição de corrente não uniforme devido a variações nas resistências internas de cada célula, o que pode afetar negativamente a produção de hidrogênio (Ursúa; Gandia; Sanchis, 2012).

Os eletrolisadores bipolares possuem uma configuração mais complexa devido à junção e vedação das células em série, o que dificulta o processo de manutenção. Em contrapartida, seu *design* compacto economiza espaço e permite alcançar maiores densidades de corrente por célula, aumentando a produção de hidrogênio por célula. Esse tipo de conexão também permite que o fluxo do eletrólito ou da água destilada seja distribuído em todas as células da pilha, minimizando perdas (Ursúa; Gandia; Sanchis, 2012).

Os eletrolisadores também podem ter uma conexão mista, com células em série formando ramificações que, por sua vez, são conectadas em paralelo. No entanto, muitos fabricantes adotam a estrutura em pilha nos seus eletrolisadores, devido às suas vantagens em comparação ao eletrolisador monopolar. Em seguida, essas pilhas ainda podem ser conectadas entre si para atingir a taxa de produção desejada e, futuramente, facilitar a manutenção de um conjunto reduzido de células, sem a necessidade de interromper o funcionamento do eletrolisador (ITM, 2024; NEL, 2024; Siemens Energy, 2024).

Os eletrolisadores são dispositivos confiáveis que não requerem manutenção contínua, pois dificilmente incluem elementos móveis. Além disso, por possuírem alto grau de modularidade, são adequados para aplicações comerciais e industriais. Atualmente, os eletrolisadores associados às energias renováveis são considerados um dos principais meios

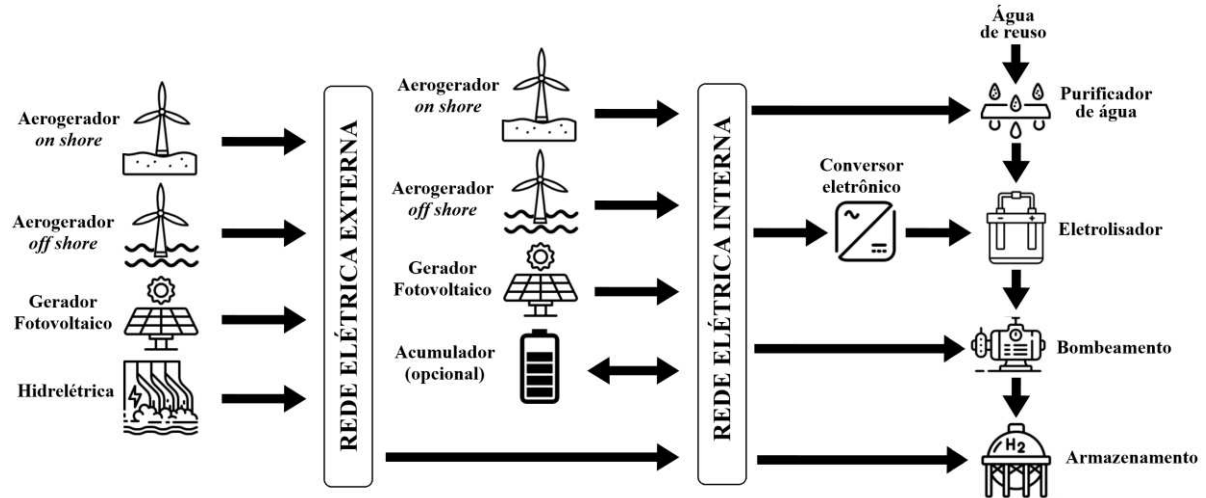
para produção de hidrogênio sem emissão de carbono. Nesse sentido, é necessário avaliar as interações entre as FER e o sistema para eletrólise da água.

3.3 Sistemas para eletrólise da água via energias renováveis

Sistemas para a produção de hidrogênio via eletrólise da água utilizam uma série de equipamentos adicionais além dos eletrolisadores. Em alguns sistemas, o hidrogênio e oxigênio gerados são resfriados, purificados, comprimidos e armazenados; em outros casos, o oxigênio é simplesmente ventilado para a atmosfera. Existem também sistemas que produzem hidrogênio em alta pressão, o que reduz os custos com compressores. Essas variações nos sistemas estão principalmente relacionadas ao tipo de célula que compõe o eletrolisador (IRENA, 2020). Para a geração de H₂V, é essencial que todo o sistema de eletrólise da água seja alimentado por FER, sendo as principais opções atualmente a energia eólica (tanto *onshore* quanto *offshore*) e a solar fotovoltaica. Devido à intermitência característica das FER, algumas pesquisas sugerem o uso de energias renováveis com maior constância, como as hidrelétricas (Kojima *et al.*, 2023). Contudo, a implementação de hidrelétricas é limitada pelos significativos impactos ambientais associados, como a inundação de vastas áreas e a perda de biodiversidade (Catolico *et al.*, 2021). Assim, para manter a produção do sistema em condições de intermitência, é necessário o uso de acumuladores, como baterias, o que aumenta significativamente os custos (Rana *et al.*, 2023).

A integração das FER aos sistemas de eletrólise da água para a produção de H₂V apresenta desafios, especialmente em relação à eletrônica de potência. Como as FER podem gerar eletricidade tanto em corrente contínua (c.c.) quanto em corrente alternada (c.a.), conversores eletrônicos de potência, do tipo c.a.-c.c. ou c.c.-c.c., são necessários para que os eletrolisadores recebam a corrente e a tensão adequadas para a sua operação de maneira eficiente (Hassan, A. *et al.*, 2024). A eficiência desses conversores é crucial, pois altas perdas durante a conversão podem impactar negativamente a eficiência geral do sistema (EE Times, 2023). Em relação à intermitência inerente de algumas FER, os conversores devem ser capazes de se ajustar rapidamente às mudanças na entrada sem comprometer a estabilidade do sistema, visando reduzir o custo com acumuladores. Um esquemático típico representando um sistema para produção de H₂V alimentado por diferentes FER é mostrado na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Sistema para produção de hidrogênio via energias renováveis.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o correto acionamento dos eletrolisadores, os conversores eletrônicos devem atender aos requisitos de corrente e tensão dos eletrolisadores industriais, que precisam de tensões c.c. estáveis que, atualmente, variam entre 640 V e mais de 1 kV e correntes entre 1 kA e 10 kA (AWE International, 2024). Além disso, as perdas por condução e por comutação nos componentes eletrônicos de alta potência representam um desafio para a engenharia, impactando diretamente na eficiência do processo de eletrólise (European Commission, 2018). Para melhor compreensão dos impactos da eletrônica de potência na eficiência do processo de eletrólise da água, é necessário avaliar as diferentes formas de medir esse parâmetro, seja a nível de célula, pilha ou sistema.

3.4 Eficiência do processo de eletrólise

A eficiência é um conceito fundamental em qualquer sistema, pois determina o quão bem os recursos são convertidos em resultados úteis. No caso da eletrólise para produção de hidrogênio, diferentes tipos de eficiência podem ser analisados para avaliar o desempenho do processo e otimizar o uso de energia. Nesse sentido, os diversos métodos para medir a eficiência, desde a nível de célula a nível de sistema, serão avaliados. A eficiência (ε) é um parâmetro técnico que varia entre 0 e 100%. A definição básica de eficiência de um sistema pode ser obtida pela razão entre a energia útil (E_u) e a energia gasta (E_g) do sistema expressa por (3.13).

$$\varepsilon = \frac{E_u}{E_g} \quad (3.13)$$

A eficiência de Faraday (ε_F) é a razão entre a massa de hidrogênio tecnicamente utilizável ($m_{re\ H_2}$) e a massa de hidrogênio teoricamente produzida ($m_{id\ H_2}$), conforme (3.14). Ela considera as perdas de difusão pelo separador, perdas de corrente e perdas de hidrogênio devido a contaminantes no sistema de purificação (Nuttall, Fickett e Titterington, 1975).

$$\varepsilon_F = \frac{m_{re\ H_2}}{m_{id\ H_2}} \quad (3.14)$$

A eficiência de tensão (ε_V) é definida como a razão entre a tensão termoneutra V_{th} e a tensão medida da célula V_{cel} , conforme (3.15). Onde a tensão da célula inclui todas as perdas catalíticas e elétricas dentro da célula eletrolítica (Siemens Energy, 2021).

$$\varepsilon_V = \frac{V_{th}}{V_{cel}} \quad (3.15)$$

A eficiência de corrente contínua (ε_{cc}) pode ser definida por (3.16). Onde: \dot{V}_{H_2} é o volume de hidrogênio tecnicamente utilizável produzido na saída do eletrolisador; H_O é o valor calorífico superior do hidrogênio; e P_{ele} é a potência elétrica fornecida ao eletrolisador que é consumida pelo durante a eletrólise para gerar o hidrogênio (Zhang, Lin e Chen, 2010).

$$\varepsilon_{cc} = \frac{\dot{V}_{H_2} \cdot H_O}{P_{ele}} \quad (3.16)$$

Essa eficiência também pode ser expressa como o produto da eficiência de tensão com a eficiência de Faraday, conforme (3.17) (Siemens Energy, 2021).

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_V \cdot \varepsilon_F \quad (3.17)$$

A eficiência do sistema (ε_{sis}) ou da planta pode incluir várias perdas adicionais, como a conversão de corrente c.a. para c.c., sistemas de refrigeração, ou até compressão e purificação do hidrogênio. A eficiência ε_{sis} pode ser definida por (3.18), onde: $\dot{V}_{H_2\ sis}$ é o volume de hidrogênio tecnicamente utilizável produzido pelo sistema e P_{sis} é a potência elétrica fornecida ao sistema (Zhang, Lin e Chen, 2010).

$$\varepsilon_{sis} = \frac{\dot{V}_{H_2\ sis} \cdot H_O}{P_{sis}} \quad (3.18)$$

O gasto de energia em um processo como a eletrólise é a quantidade de eletricidade necessária para gerar uma determinada quantidade de hidrogênio. Caso o hidrogênio seja usado para gerar energia novamente (como energia mecânica, elétrica ou térmica), o valor calorífico inferior (H_u) deve ser utilizado para calcular a eficiência de todo o processo de conversão (ε_{LHV}), conforme (3.19) (Tsotridis *et al.*, 2018).

$$\varepsilon_{LHV} = \frac{\dot{V}_{H_2} \cdot H_u}{P_{ele}} \quad (3.19)$$

A eficiência dos eletrolisadores depende de vários fatores, como temperatura, pressão e densidade de corrente. Um aumento na densidade de corrente resulta em maior produção de hidrogênio, mas também eleva a tensão da célula, reduzindo a eficiência. A inclinação da curva I-V é um indicador direto da eficiência do sistema (Anantharaj *et al.*, 2018). Catalisadores mais eficientes e a redução das resistências internas da célula podem diminuir essa inclinação, melhorando a eficiência global. No entanto, é necessário balancear os ganhos de eficiência com a longevidade do equipamento, uma vez que temperaturas elevadas aceleram o desgaste dos componentes (Siemens Energy, 2021).

3.5 Conclusões do capítulo

Esse capítulo apresentou os elementos que envolvem as tecnologias para eletrólise da água, seja a nível de célula, eletrolisador ou sistema. A eletrólise alcalina clássica é uma tecnologia madura e amplamente utilizada para a produção industrial de hidrogênio. Utiliza uma solução alcalina como eletrólito e opera em baixas temperaturas e pressões moderadas. É conhecida por sua eficiência, mas a pureza do hidrogênio produzido é ligeiramente inferior à de outras tecnologias. A eletrólise PEM também já é usada em aplicações industriais, onde uma membrana permite a condução seletiva de prótons, resultando em hidrogênio de alta pureza. Opera em condições de baixa a média temperatura e pressão, mas é mais cara devido ao uso de metais nobres em seus eletrodos e catalisadores. A eletrólise AEM é uma tecnologia emergente com potencial para produção de H₂V em larga escala. Oferece uma alternativa à eletrólise alcalina clássica e à PEM, combinando alta pureza do hidrogênio com perspectivas de redução de custos, mas ainda enfrenta desafios como a vida útil limitada da membrana. Diferente das demais, a eletrólise de óxido sólido opera em altas temperaturas, o que aumenta a eficiência do sistema, mas ainda está em fase de P&D para melhorar sua estabilidade e reduzir custos.

Além do tipo de eletrólise os eletrolisadores podem ser diferenciados quanto às conexões entre as células que o compõem, conexão monopolar ou bipolar. A configuração monopolar é simples e de fácil manutenção, mas pode levar a uma distribuição de corrente não uniforme. A configuração bipolar é mais compacta e eficiente em termos de produção de hidrogênio, mas é mais complexa e de difícil manutenção individual de célula. Uma combinação das duas configurações pode ser usada para otimizar a produção e a manutenção dos eletrolisadores.

A eficiência dos eletrolisadores depende de uma série de fatores técnicos e operacionais, como densidade de corrente, temperatura e pressão. Melhorias na eficiência, podem ser alcançadas por meio de catalisadores mais eficazes e pela redução de perdas relacionadas a aspectos construtivos. No entanto, essas melhorias precisam ser cuidadosamente balanceadas com a durabilidade do sistema. A avaliação de diferentes tipos de eficiência, desde a nível de célula a nível de sistema, fornece uma visão abrangente sobre o desempenho do processo de eletrólise e os desafios envolvidos na maximização da produção de hidrogênio com o menor consumo de energia.

A integração de sistemas de eletrólise da água com FER é fundamental para a produção sustentável de H₂V. Entretanto, desafios como a intermitência de algumas fontes renováveis, exigem estratégias como o uso de acumuladores e sistemas híbridos, que combinam diferentes FER. Nesse contexto, os conversores eletrônicos de potência não apenas desempenham um papel crucial na adaptação da eletricidade fornecida ao eletrolisador, mas também podem auxiliar em situações de intermitência, elevando a eficiência do sistema e potencialmente reduzindo a dependência de acumuladores.

A eficiência, confiabilidade e custo desses conversores estão diretamente relacionadas à topologia utilizada. Para dimensionar adequadamente novas topologias de conversores eletrônicos de potência, é necessário um modelo elétrico que considere as características elétricas específicas das células e dos eletrolisadores. Para o dimensionamento de conversores estáticos de potência um modelo elétrico simplificado, para uma determinada faixa de operação pode ser utilizado. Para obtenção de tal modelo, experimentos com um eletrolisador alcalino bipolar foram realizados.

4 MODELO ELÉTRICO SIMPLIFICADO DE ELETROLISADORES

O desenvolvimento de novas topologias de conversores eletrônicos, adequados para o acionamento de eletrolisadores, requer um modelo elétrico que contemple as características elétricas das células eletrolíticas que o compõem. Como demonstrado no Capítulo 2, os eletrolisadores em geral apresentam: característica elétrica de fonte de tensão, atribuída à tensão reversível; característica resistiva, atribuída ao sobrepotencial ôhmico; e característica capacitiva, atribuída ao sobrepotencial de ativação e ao efeito de dupla camada. Apesar dessas particularidades, é comum que alguns estudos simplifiquem o modelo elétrico do eletrolisador para uma carga puramente resistiva, desconsiderando sua característica inerente de fonte de tensão ou seus aspectos dinâmicos associados (Gautam e Bhat, 2013; Guilbert, Collura e Scipioni, 2017; Guo *et al.*, 2022). Essa simplificação, embora facilite o projeto, pode levar a distorções na avaliação de desempenho e na resposta do sistema a variações de carga.

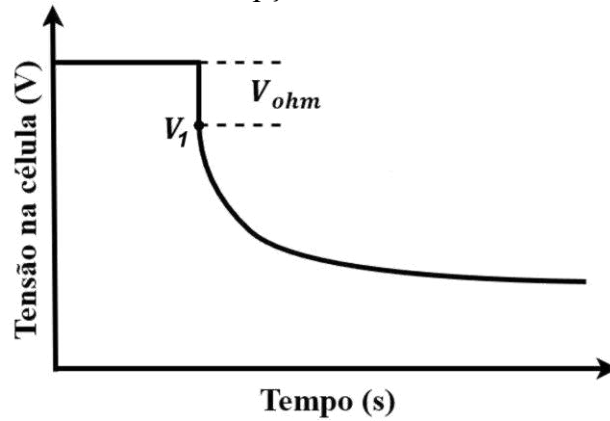
Visando o desenvolvimento de um modelo elétrico que contemple as características elétricas dos eletrolisadores em regime permanente, sem elevar a complexidade de aplicação no dimensionamento de conversores eletrônicos e sistemas de controle, um modelo elétrico simplificado foi proposto. Tal modelo foi proposto com base na análise dos fundamentos da eletrólise da água e validado através de resultados experimentais com um eletrolisador alcalino.

4.1 Modelo elétrico simplificado de um eletrolisador alcalino bipolar extraído experimentalmente

O modelo elétrico simplificado foi idealizado para uma célula ou eletrolisador com operação em regime permanente, nessa condição, é possível considerar que parâmetros como temperatura e pressão são constantes, dessa forma, a tensão reversível pode ser considerada constante (V_{rev}) e pode ser determinada por (2.6) (Ulleberg 2003). Ainda nessas condições, as resistências do circuito elétrico e de transporte podem ser consideradas constantes, além disso, a circulação forçada do eletrólito deve manter o volume de bolhas constante e auxiliar na manutenção da concentração do eletrólito (Zhou, Y. *et al.*, 2024a). Dessa forma, o sobrepotencial ôhmico pode ser representado como a queda de tensão sobre uma resistência fixa (R_{ohm}). Para estimar essa resistência, a técnica da interrupção de corrente pode ser utilizada (Lopes e Watanabe, 2009; Koundi *et al.*, 2023). Essa técnica consiste em observar a resposta

de tensão nas células ao interromper instantaneamente a corrente que flui por uma célula eletrolítica, em um ponto de operação dentro da faixa desejada, como mostrado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Resposta de tensão de uma célula eletrolítica à interrupção de corrente.



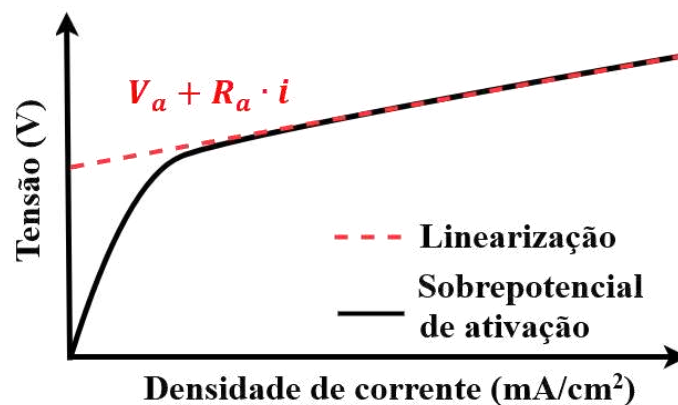
Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, a resistência R_{ohm} pode ser determinada pela corrente inicial I_d e pela queda de tensão imediata, representada por $V_{cel} - V_1$, conforme (4.1).

$$R_{ohm} = \frac{V_{cel} - V_1}{I_d} \quad (4.1)$$

Com a temperatura constante, o sobrepotencial de ativação passa a ter apenas uma variação logarítmica com a densidade de corrente aplicada, conforme (2.30). Possibilitando que, a partir de uma determinada densidade de corrente, o sobrepotencial de ativação possa ser linearizado em uma faixa de operação, representado pelos elementos V_a e R_a , como mostrado na Figura 4.2.

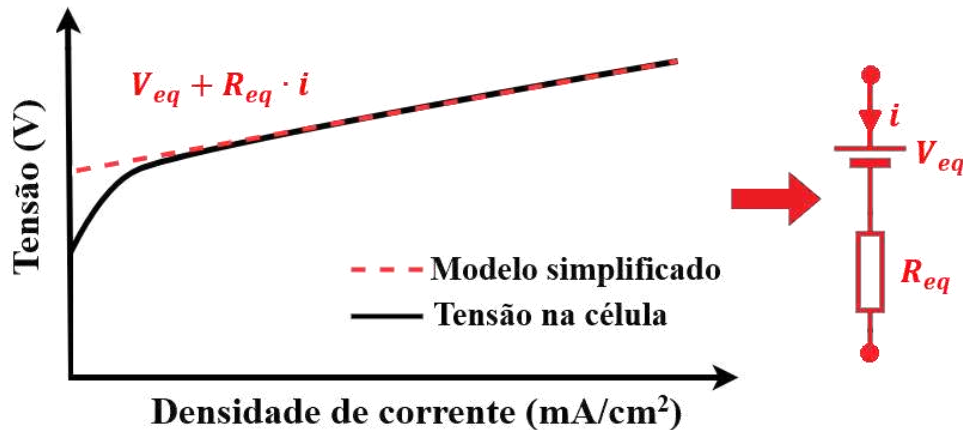
Figura 4.2 – linearização do sobrepotencial de ativação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, é possível dimensionar o modelo elétrico simplificado de uma célula eletrolítica como uma fonte de tensão (V_{eq}), conforme (4.2), em série com uma resistência (R_{eq}), conforme (4.3), como mostrado na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Modelo elétrico simplificado de células eletrolíticas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$V_{eq} = V_{rev} + V_a \quad (4.2)$$

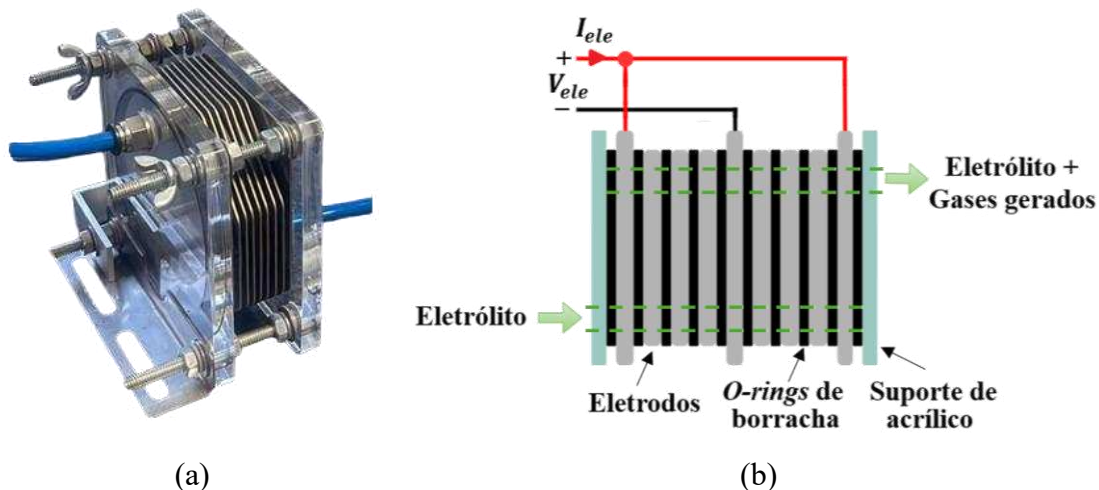
$$R_{eq} = R_{ohm} + R_a \quad (4.3)$$

4.1.1 Metodologia

Para a validação do modelo, experimentos foram conduzidos em laboratório. Devido à simplicidade de implementação, um eletrolisador alcalino foi construído e utilizado nos experimentos, entretanto, o modelo simplificado pode ser adaptado e aplicado para os outros tipos de eletrolisadores. O eletrolisador utilizado, mostrado na Figura 4.4(a) possui uma estrutura mista, sendo duas pilhas em paralelo com quatro células em cada pilha. Devido à sua atividade catalítica, o aço AISI 316L³ foi utilizado para compor os eletrodos do eletrolisador (Borisov *et al.*, 2020). Visando a condutividade máxima do eletrólito, uma solução com percentual de massa a 30% de KOH foi utilizada. Como o eletrolisador foi utilizado como carga durante os experimentos, não foram utilizados membrana ou diafragma, os quais poderiam ser danificados devido às variações de potência. Dessa forma, ao serem gerados, os gases eram misturados e liberados em ambiente externo. *O-rings* de borracha foram utilizados para vedação e separação entre os eletrodos. O esquemático do eletrolisador utilizado é mostrado na Figura 4.4(b).

³ Composição do Aço AISI 316L: 65,4% ferro, 17% cromo, 12% níquel, 5,57% outros metais não nobres e 0,03% carbono.

Figura 4.4 – (a) Eletrolisador utilizado nos experimentos (b) Esquemático do eletrolisador utilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os demais parâmetros construtivos do eletrolisador utilizado são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros construtivos do eletrolisador.

Parâmetro	Especificação
Material dos eletrodos	Aço AISI 316L
Eletrólito	Solução de KOH a 30%
Área da célula	70,88 cm ²
Área eficaz da célula	63,82 cm ²
Espessura dos eletrodos	1,1 mm
Distância entre os eletrodos	2,5 mm
Número de células em série (N_s)	4
Número de pilhas em paralelo (N_p)	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

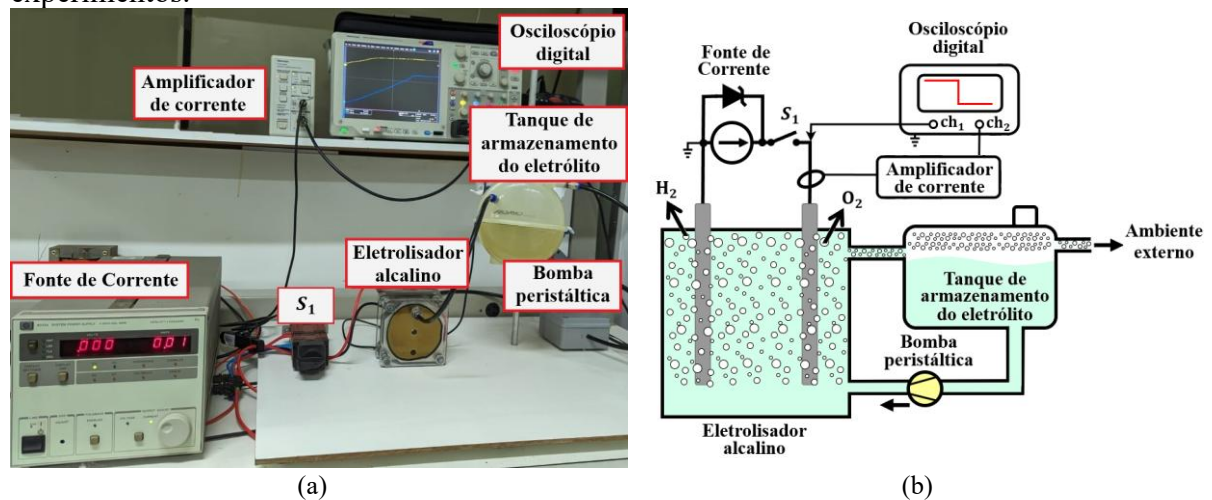
Além do eletrolisador, o sistema utilizado nos experimentos consistiu em:

01. Um tanque para armazenamento do eletrólito;
02. Uma bomba peristáltica de 12V, com capacidade de fluxo de 100 mL·min⁻¹, para a recirculação do eletrólito;
03. Um tanque borbulhador para visualização da geração de gases;
04. Uma fonte de bancada HP® Agilent, capaz de fornecer uma corrente elétrica de até 30 A para tensões de até 20 V;
05. Um osciloscópio digital Tektronix® MSO5034, com largura de banda de 350 MHz, sistema operacional de 64 bits, resolução vertical de 12 bits e ponteiros de tensão de 500 MHz para obter formas de onda com alta resolução;

06. Um amplificador de corrente Tektronix® TCPA300, com sonda de corrente de 50 MHz para valores de corrente de até 150 A (c.c.) capaz de detectar variações de até 1 mA, para medir a corrente no eletrolisador em conjunto com o osciloscópio digital;
07. Um termopar tipo K foi utilizado em conjunto com um multímetro para monitorar a temperatura;
08. Uma chave seccionadora (S_1) para alta corrente, capaz de realizar a interrupção de corrente sem permitir a formação de arco elétrico.

O sistema utilizado para realização dos experimentos é mostrado na Figura 4.5(a) e o diagrama das conexões elétricas do sistema é mostrado na Figura 4.5(b).

Figura 4.5 – (a) Sistema utilizado nos experimentos; (b) Diagrama do sistema utilizado nos experimentos.

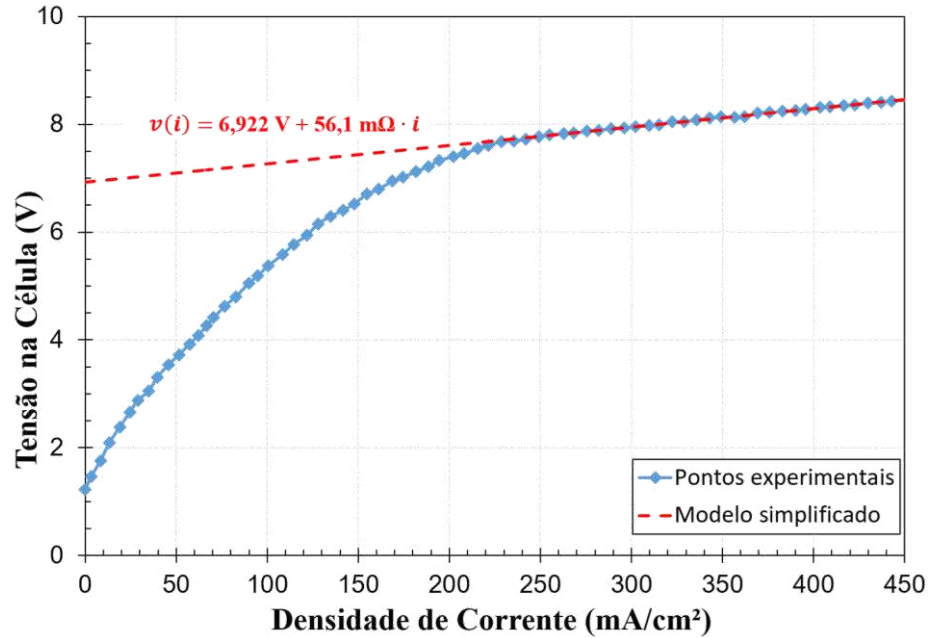


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Resultados Experimentais

Inicialmente, a curva I-V do eletrolisador alcalino foi obtida experimentalmente. O valor máximo da corrente elétrica aplicada em cada pilha do eletrolisador foi de 15 A, resultando em uma densidade de corrente máxima de aproximadamente $200 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$. A forma de onda foi extraída a partir de pontos experimentais com incremento de $100 \text{ mA} \cdot \text{s}^{-1}$. A temperatura no eletrolisador durante a extração da curva foi de aproximadamente 40°C . A curva I-V experimental do eletrolisador alcalino utilizado é mostrada na Figura 4.6(a). A função linear que descreve o modelo elétrico simplificado do eletrolisador foi obtida em *software* a partir dos pontos de operação desejado. O modelo elétrico simplificado equivalente ao eletrolisador pode ser representado pela fonte de tensão $V_{ele} = 6,922 \text{ V}$ e pela resistência $R_{ele} = 56,1 \text{ m}\Omega$.

Figura 4.6 –Curva I-V experimental do eletrolisador alcalino utilizado.

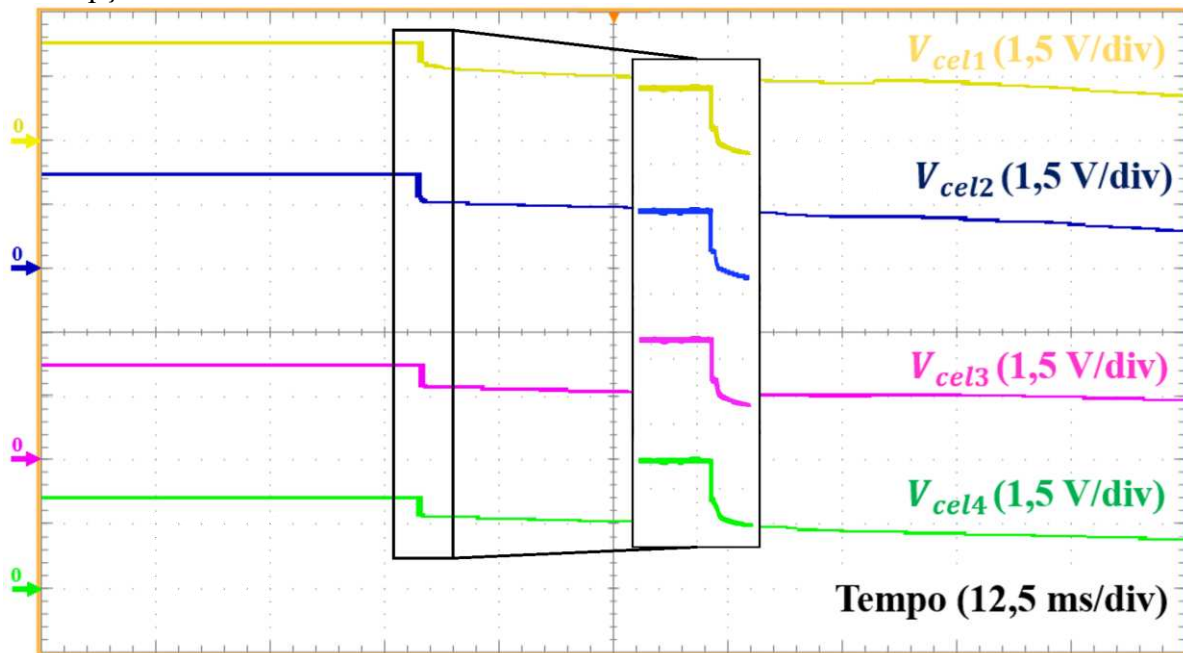


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para obter os parâmetros do modelo elétrico simplificado de cada célula do eletrolisador, o valor da tensão reversível para cada célula foi calculado para a temperatura durante o experimento, para $T = 313,15 \text{ K}$ (40 °C) $V_{rev} = 1,217 \text{ V}$. Teoricamente, a reação de eletrólise na pilha deveria começar apenas quando a tensão total sobre a pilha fosse igual a $N_s \cdot V_{rev}$, entretanto, devido aos aspectos construtivos do eletrolisador, a curva I-V mostrou que a reação de eletrólise iniciou como se a pilha fosse uma única célula. Só após uma determinada densidade de corrente as demais células passaram a produzir hidrogênio, isso foi possível graças à condutividade do eletrólito.

Para empregar a técnica de interrupção de corrente, uma corrente de 25 A foi aplicada no eletrolisador (12,5 A em cada pilha) e após ele entrar em regime a corrente foi cessada instantaneamente. A partir desse experimento, a queda de tensão instantânea em cada célula foi observada e as resistências internas foram calculadas. As respostas de tensão das células do eletrolisador à interrupção de corrente são mostradas na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Respostas de tensão das células do eletrolisador analisado ao experimento com interrupção de corrente.



Fonte: (De Sousa *et al.*, 2023).

Em média, a queda de tensão instantânea em cada célula foi de 344,75 mV, aplicando em (4.1), a resistência R_{ohm} de cada célula foi obtida em (4.4).

$$R_{ohm} = \frac{344,75 \text{ mV}}{12,5 \text{ A}} = 27,58 \text{ m}\Omega \quad (4.4)$$

Para a configuração de conexão entre as células do eletrolisador operando em regime permanente e considerando que todas as células possuem parâmetros com valores semelhantes, a fonte de tensão equivalente V_{eq} de uma célula do eletrolisador analisado pode ser determinada por (4.5) e a resistência equivalente R_{eq} de uma célula do eletrolisador analisado pode ser determinada por (4.6).

$$V_{eq} = \frac{V_{ele}}{N_s} \quad (4.5)$$

$$R_{eq} = \frac{N_p \cdot R_{ele}}{N_s} \quad (4.6)$$

Aplicando (4.5) em (4.2) e (4.6) em (4.3), os parâmetros V_a e R_a das células do eletrolisador analisado podem ser determinados por (4.7) e (4.8) respectivamente.

$$V_a = \frac{V_{ele}}{N_s} - V_{rev} = \frac{6,922 \text{ V}}{4} - 1,217 \text{ V} = 513,5 \text{ mV} \quad (4.7)$$

$$R_a = \frac{N_p \cdot R_{ele}}{N_s} - R_{ohm} = \frac{2 \cdot 56,1 \text{ m}\Omega}{4} - 27,58 \text{ m}\Omega = 470 \text{ }\mu\Omega \quad (4.8)$$

Dessa forma, o modelo elétrico simplificado das células do eletrolisador analisado, para a temperatura de 40 °C, foi obtido, como mostrado na Tabela 4.2.

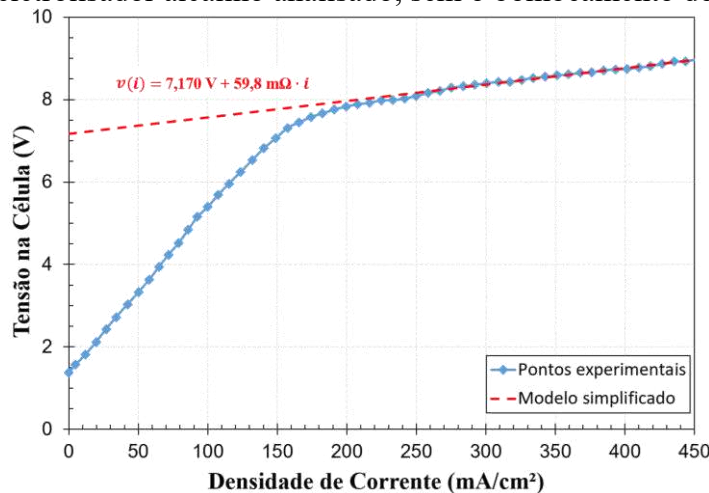
Tabela 4.2 – Parâmetros do modelo elétrico simplificado das células do eletrolisador analisado.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
V_{rev}	1,217 V	V_a	513,5 mV
R_{ohm}	27,58 mΩ	R_a	470 μΩ

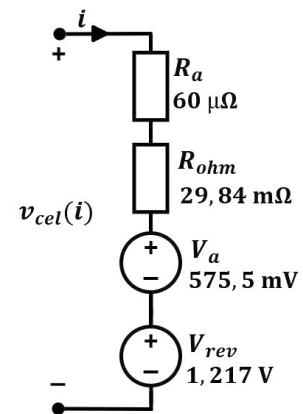
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para avaliar o impacto da circulação forçada do eletrólito sobre o modelo elétrico do eletrolisador, a extração do modelo elétrico simplificado do eletrolisador analisado foi realizada sem o bombeamento do eletrólito (De Sousa *et al.*, 2023). A curva I-V do eletrolisador sem a circulação forçada do eletrólito, bem como o modelo simplificado das suas células, são mostrados na Figura 4.8(a) e na Figura 4.8(b), respectivamente. A partir desse experimento foi constatado uma diminuição de 7,574% na resistência ôhmica e uma redução de 4,255% na tensão total sobre as células para densidades de corrente acima de 200 mA. Isto se dá, pois, a circulação forçada do eletrólito auxilia na manutenção da concentração do eletrólito e na constância do fluxo de bolhas, impactando diretamente no modelo elétrico do eletrolisador.

Figura 4.8 – (a) Curva I-V experimental do eletrolisador alcalino utilizado, sem o bombeamento do eletrólito (b) Modelo elétrico simplificado das células do eletrolisador alcalino analisado, sem o bombeamento do eletrólito.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

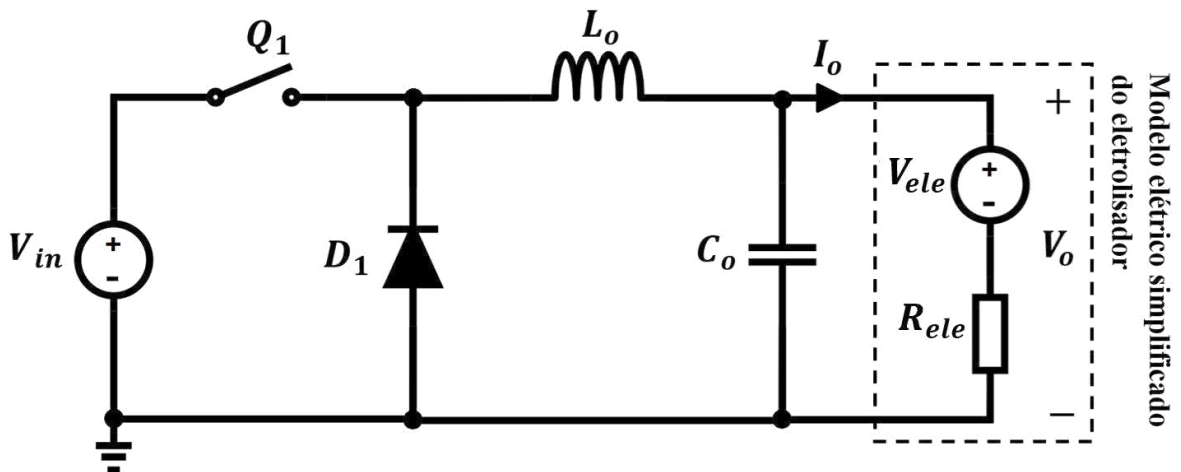
Para demonstrar a aplicabilidade do modelo elétrico simplificado proposto, um conversor buck foi dimensionado para o eletrolisador alcalino analisado.

4.2 Aplicação do modelo simplificado no dimensionamento de um conversor buck

Em sistemas para produção de H₂V como o descrito na Seção 3.3, conversores c.c.-c.c., como o conversor buck clássico, são comumente utilizados para interligar a saída de conversores c.a.-c.c. (Sánchez *et al.*, 2024). Isso ocorre pois é comum que os conversores c.a.-c.c. utilizados, geralmente a tiristores (Chen *et al.*, 2022), apresentem uma tensão no barramento c.c. superior à necessária para acionar os eletrolisadores (Guilbert, Collura e Scipioni, 2017). Além disso, Hassan, A. *et al.* (2024) destacam a utilização de conversores buck para alimentar eletrolisadores, pois devido à característica de fonte de corrente na saída do conversor, é possível proporcionar estabilidade de corrente no eletrolisador, um fator crucial para garantir uma produção de hidrogênio constante. Adicionalmente, os conversores buck são capazes de gerenciar eficientemente o fluxo de potência entre FER, eletrolisadores e sistemas de armazenamento. Em síntese, a adoção de conversores buck para o acionamento de eletrolisadores está alinhada aos objetivos de aprimorar a eficiência, confiabilidade e desempenho de sistemas para produção de H₂V.

O conversor buck proposto consiste em: uma fonte de tensão c.c. na entrada (V_{in}); um elemento de comutação ativa (Q_1); um elemento de comutação passiva (D_1); um indutor (L_o) e um capacitor (C_o) na saída do conversor. Como carga, o modelo elétrico simplificado do eletrolisador utilizado nos experimentos foi adotado (V_{ele} e R_{ele}), como mostrado na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Conversor buck com o modelo elétrico simplificado do eletrolisador como carga.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise do conversor buck levou em consideração os seguintes pontos:

- O funcionamento do conversor é em regime permanente;
- A corrente em L_o é periódica, mas o indutor opera no Modo de Condução Contínuo (MCC)⁴;
- A tensão média em L_o é zero e a corrente média C_o é zero;
- O período de comutação é T_s . O elemento de comutação é fechado pelo tempo $D \cdot T_s$ e aberto pelo tempo $(1 - D) \cdot T_s$, onde D é a razão cíclica;
- Os componentes são ideais.

O dimensionamento do conversor foi proposto considerando um ponto de operação do eletrolisador equivalente a 70% da potência nominal, visando contemplar o ponto ótimo de operação de eletrolisadores alcalinos (Franco e Giovannini, 2023). Os parâmetros utilizados para o dimensionamento do conversor buck proposto são mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Parâmetros do conversor buck proposto.

Parâmetro	Nomenclatura	Valor
Fonte de tensão do modelo elétrico simplificado	V_{ele}	6,922 V
Resistência do modelo elétrico simplificado	R_{ele}	56,1 mΩ
Densidade de corrente na saída para 70% da potência nominal do eletrolisador	$j_{70\%}$	315 mA·cm ⁻²
Tensão de entrada	V_{in}	24 V
Frequência de chaveamento	f_s	50 kHz

Fonte: Elaborado pelo autor.

A corrente média na saída do conversor I_o foi obtida através de (2.32) em função da densidade de corrente para 70% da potência nominal do eletrolisador em (4.9).

$$I_o = \frac{j_{70\%} \cdot A_{cel}}{1000} = \frac{315 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot 63,82 \text{ cm}^2}{1000} = 20,103 \text{ A} \quad (4.9)$$

A tensão média na saída do conversor V_o foi então obtida através da equação que descreve o modelo elétrico simplificado em (4.10).

$$V_o = V_{ele} + I_o \cdot R_{ele} = 6,922 \text{ V} + 20,103 \text{ A} \cdot 56,1 \cdot 10^{-3} \Omega = 8,05 \text{ V} \quad (4.10)$$

⁴ O modo de condução contínua é uma condição operacional em indutores onde a corrente nunca atinge zero durante um ciclo de chaveamento.

Como o equacionamento do conversor buck considera todos os componentes ideais e a alteração na carga do conversor não altera as etapas de operação do conversor, a razão cíclica foi calculada em função da tensão média na saída do conversor e da tensão de entrada em (4.11), como no dimensionamento do conversor buck convencional (Hart, 2016).

$$D = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{8,05 \text{ V}}{24 \text{ V}} = 0,335 \quad (4.11)$$

Para o dimensionamento do indutor, a ondulação de corrente percentual no indutor ($\Delta i_{L\%}$) foi especificada em 30%, esse valor permite um projeto compacto, com um indutor menor e mais econômico, ao mesmo tempo que mantém uma operação eficiente e estável (Alvarado-Maldonado, Ponce-Silva, Olivar-Castellanos, 2023). Além disso, essa ondulação não será percebida pelo eletrolisador, uma vez que o capacitor C_o tem a função de filtrar a componente alternada da corrente de saída. A variação de corrente no indutor (Δi_L) também não é afetada pela mudança da carga. Quando Q_1 está em estado fechado, a corrente aumenta linearmente, podendo ser expressa por (4.12). Quando Q_1 está em estado aberto, a corrente diminui linearmente, podendo ser expressa por (4.13). Onde T_s é o período de chaveamento ($T_s = 1/f_s$).

$$(\Delta i_L)_{fechado} = \frac{(V_{in} - V_o)}{L_o} \cdot D \cdot T_s = \frac{(V_{in} - V_o) \cdot D}{L_o \cdot f_s} \quad (4.12)$$

$$(\Delta i_L)_{aberto} = -\frac{V_o}{L_o} \cdot (1 - D) \cdot T_s = -\frac{(1 - D) \cdot V_o}{L_o \cdot f_s} \quad (4.13)$$

Como a ondulação de corrente percentual no indutor foi definida, Δi_L pode ser definida em (4.14) através da corrente média na saída.

$$\Delta i_L = I_o \cdot \Delta i_{L\%} = 20,103 \text{ A} \cdot 0,3 = 6,031 \text{ A} \quad (4.14)$$

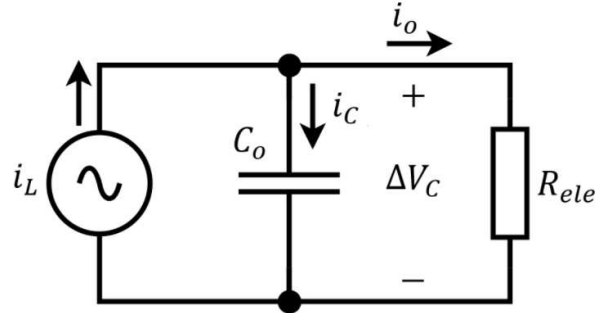
O valor de indutância L_o foi então ser calculado da forma convencional em (4.15).

$$L_o = \frac{V_o \cdot (1 - D)}{\Delta i_L \cdot f_s} = \frac{8,05 \text{ V} \cdot (1 - 0,335)}{6,031 \text{ A} \cdot 50 \cdot 10^3 \text{ Hz}} = 17,741 \mu\text{H} \quad (4.15)$$

O principal impacto que o modelo elétrico causa no dimensionamento do conversor buck é no cálculo da capacitância C_o , isto se dá, pois, a ondulação de tensão na saída afeta

apenas o elemento resistivo do modelo. Analisando apenas a componente c.a. da saída do conversor, o circuito resultante mostrado na Figura 4.10 foi obtido. Onde: i_{L_o} é a componente alternada da corrente em L_o , i_C é a componente alternada de C_o , ΔV_C é a variação de tensão sobre C_o e i_o é a componente alterna na saída do conversor.

Figura 4.10 – Circuito resultante da análise da componente c.a. do conversor.



Fonte:

Dessa forma, a variação de tensão sobre o capacitor será igual à variação de tensão sobre a resistência R_{ele} , que pode ser definida pelo produto de R_{ele} e a variação de corrente na saída do conversor, conforme (4.16).

$$\Delta V_C = R_{ele} \cdot \Delta I_o \quad (4.16)$$

O capacitor C_o foi dimensionado para que a ondulação percentual de corrente na saída ($\Delta I_{o\%}$) fosse de 1%. Esse valor foi adotado pois as ondulações de corrente no eletrolisador tendem a acelerar a degradação dos eletrodos (Dobó e Palotás, 2017; Parache. *et al.*, 2022). A variação de corrente na saída do conversor pode então ser calculada em (4.17).

$$\Delta I_o = I_o \cdot \Delta I_{o\%} = 20,103 \text{ A} \cdot 0,01 = 201,03 \text{ mA} \quad (4.17)$$

Já a variação percentual de tensão no capacitor pode ser calculada por (2.18).

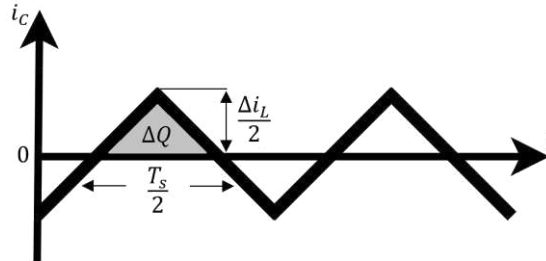
$$V_{C\%} = \frac{\Delta V_C}{V_o} = \frac{R_{ele} \cdot \Delta I_o}{V_o} = \frac{56,1 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot 201,03 \text{ mA}}{8,05 \text{ V}} = 0,14\% \quad (4.18)$$

Por definição, a capacitância pode ser calculada pela razão entre a variação de carga (ΔQ) e a variação de tensão no capacitor, conforme (4.19).

$$C_o = \frac{\Delta Q}{\Delta V_C} \quad (4.19)$$

A forma de onda teórica da corrente no capacitor é mostrada na Figura 4.11, onde a ΔQ é representada pela área do triângulo formado pelo ciclo positivo da corrente no capacitor.

Figura 4.11 – Forma de onda teórica da corrente no capacitor.



Fonte: Adaptado de Hart (2016).

A variação de carga em C_o pode então ser definida por (4.20).

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \cdot \frac{T_s}{2} \cdot \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{T_s \cdot \Delta i_L}{8} \quad (4.20)$$

Aplicando (4.13), (4.16) e (4.20) em (4.19), (4.21) foi obtido.

$$C_o = \frac{\Delta Q}{\Delta V_C} = \frac{T_s \cdot \Delta i_L}{8 \cdot R_{ele} \cdot \Delta I_o} = \frac{V_o \cdot (1 - D)}{8 \cdot L_o \cdot f_s^2 \cdot R_{ele} \cdot \Delta I_o} \quad (4.21)$$

Dessa forma, a capacitância de C_o foi calculada, conforme (4.22).

$$C_o = \frac{8,05 \text{ V} \cdot (1 - 0,335)}{8 \cdot 17,741 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot (50 \cdot 10^3 \text{ Hz})^2 \cdot 201,03 \cdot 10^{-3} \text{ A}} = 1,337 \text{ mF} \quad (4.22)$$

Para validação do equacionamento, o conversor buck com o modelo elétrico simplificado do eletrolisador como carga foi simulado em software. Os valores utilizados na simulação são mostrados na Tabela 4.4.

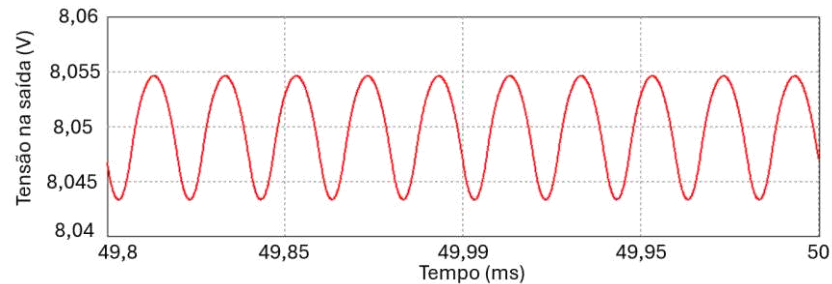
Tabela 4.4 – Valores utilizados na simulação do conversor buck com o modelo elétrico simplificado do eletrolisador como carga.

Parâmetro	Nomenclatura	Valor
Fonte de tensão do modelo elétrico simplificado	V_{ele}	6,922 V
Resistência do modelo elétrico simplificado	R_{ele}	56,1 mΩ
Tensão de entrada	V_{in}	24 V
Frequência de chaveamento	f_s	50 kHz
Razão cíclica	D	0,335
Indutor	L_o	17,741 μH
Capacitor	C_o	1,337 mF

Fonte: Elaborado pelo autor.

A forma de onda da tensão na saída do conversor buck com o modelo elétrico simplificado do eletrolisador como carga é mostrada na Figura 4.12. Conforme o dimensionado, a ondulação de tensão na saída do conversor foi igual 0,14%.

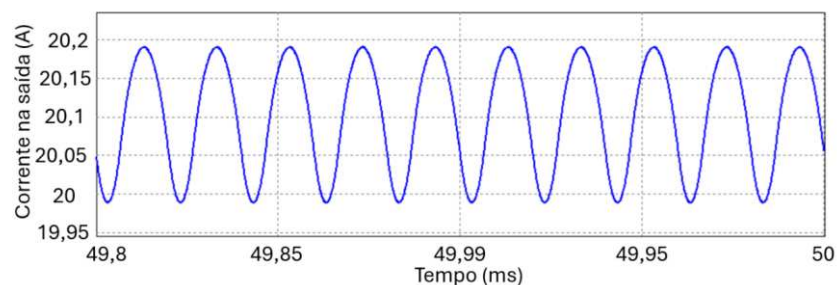
Figura 4.12 – Forma de onda da tensão na saída do conversor buck com o modelo elétrico simplificado do eletrolisador como carga.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A forma de onda da corrente na saída do conversor buck com o modelo elétrico simplificado do eletrolisador como carga é mostrada na Figura 4.13. Conforme o dimensionado, a ondulação de corrente na saída do conversor foi de aproximadamente 1%.

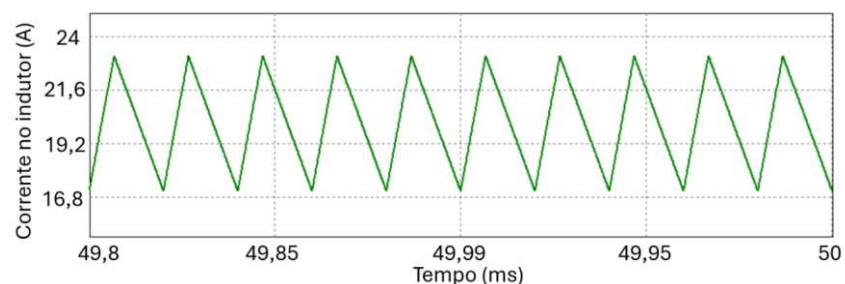
Figura 4.13 – Forma de onda da corrente na saída do conversor buck com o modelo elétrico simplificado do eletrolisador como carga.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A forma de onda da corrente no indutor do conversor buck com o modelo elétrico simplificado do eletrolisador como carga é mostrada na Figura 4.13. Conforme o dimensionado, a ondulação de corrente no indutor do conversor foi de aproximadamente 30%.

Figura 4.14 – Forma de onda da corrente no indutor do conversor buck com o modelo elétrico simplificado do eletrolisador como carga.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Conclusões do capítulo

Neste capítulo, o modelo elétrico simplificado de um eletrolisador alcalino bipolar foi desenvolvido experimentalmente e demonstrou que, ao considerar parâmetros como temperatura e pressão constantes, a tensão reversível, as resistências do circuito elétrico e as de transporte podem ser tratadas como constantes. A técnica de interrupção de corrente foi utilizada para determinar a resistência ôhmica e o sobrepotencial de ativação, permitindo a linearização do modelo em uma faixa específica de operação.

Nos experimentos realizados com um eletrolisador alcalino construído em laboratório, parâmetros construtivos, como o material dos eletrodos, a área da célula, a espessura dos eletrodos e a distância entre eles, foram detalhados. O modelo simplificado foi validado, sendo destacada a importância da circulação forçada do eletrólito para manutenção de sua concentração e reduzir as resistências ôhmicas decorrente às bolhas, melhorando a eficiência do sistema e destacando seu efeito sobre o modelo elétrico simplificado.

Os experimentos demonstraram que o processo de eletrólise iniciou em um nível de tensão inferior ao esperado para a pilha devido à condução elétrica proporcionada pelo eletrólito entre as células. Esse fenômeno fez com que a reação começasse como se apenas uma célula estivesse em operação. Conforme o nível de corrente foi aumentado, o processo de eletrólise foi iniciado progressivamente em todas as células. Dessa forma, se pode concluir que para modelar corretamente o comportamento elétrico de eletrolisadores alcalinos bipolares, é essencial considerar as interações entre as células e o eletrólito. Essas interações desempenham um papel crucial e podem influenciar diretamente o dimensionamento dos conversores associados.

Um conversor buck foi dimensionado para o modelo elétrico simplificado do eletrolisador analisado. O dimensionamento do capacitor de saída foi proposto considerando a ondulação de tensão apenas sobre a resistência do modelo. As simulações do conversor buck proposto validaram o dimensionamento do conversor buck com o modelo elétrico simplificado do eletrolisador como carga. O dimensionamento possibilitou baixa ondulação de tensão e de corrente no modelo elétrico simplificado eletrolisador conforme o especificado.

Há uma necessidade contínua de desenvolver modelos que capturem plenamente a dinâmica temporal das células eletrolíticas em uma ampla faixa de operação, sem aumentar excessivamente a complexidade de implementação. Em suma, os modelos elétricos de eletrolisadores são ferramentas essenciais para a otimização e o dimensionamento de sistemas de produção de hidrogênio, especialmente em contextos de integração com energias renováveis.

O avanço das pesquisas nessa área é fundamental para melhorar a eficiência e viabilidade econômica da produção de H₂V, contribuindo para a redução dos impactos ambientais e a transição para uma economia mais sustentável. Dessa forma, um modelo elétrico dinâmico de eletrolisadores deve ser proposto, considerando: a aplicabilidade em células alcalinas e em outras tecnologias; o dimensionamento de conversores e sistemas de controle; e a análise da intermitência de FER.

5 MODELO ELÉTRICO DINÂMICO DE CÉLULAS ELETROLÍTICAS

Assim como o modelo elétrico simplificado, grande parte dos modelos elétricos de células eletrolíticas e de eletrolisadores utilizados na literatura são modelos estáticos que descrevem as características elétricas das células em uma faixa de operação, correspondente à curva I-V (Koundi *et al.*, 2023). Geralmente, esses modelos são dimensionados a partir de uma análise teórica, levando em consideração os aspectos construtivos da célula (Marefatjouikilevae, Auger e Olivier, 2023). Devido à possibilidade de implementação dos eletrolisadores em conjunto com energias renováveis, alguns autores também exploram o comportamento elétrico de eletrolisadores relacionados à dinâmica temporal de suas células (Koundi *et al.*, 2023). A maioria desses modelos são dimensionados a partir de resultados experimentais com células eletrolíticas, considerando pequenas variações de potência (Marefatjouikilevae, Auger e Olivier, 2023).

Dessa forma, para propor um modelo elétrico dinâmico para células eletrolíticas e que descreve o comportamento da célula em uma ampla faixa de operação, uma análise dos principais modelos elétricos utilizados na literatura foi realizada. Os modelos elétricos de eletrolisadores, estáticos e dinâmicos, presentes na literatura foram separados em quatro grupos para serem avaliados quanto a: operação em ampla faixa de potência; resposta a variações de potência; complexidade de aplicação no dimensionamento de conversores eletrônicos e sistemas de controle; e aplicação em *softwares* convencionais para simulação de eletrônica de potência, como PSIM e OrCAD/PSpice.

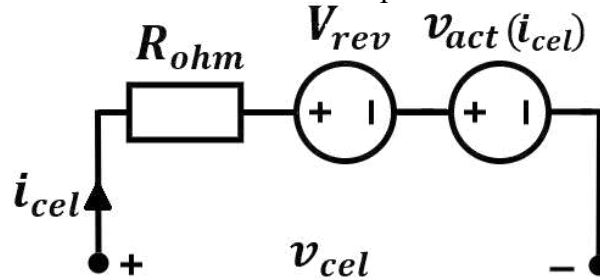
5.1 Modelos elétricos estáticos e dinâmicos

5.1.1 Modelo elétrico 1

O primeiro modelo analisado possui uma abordagem modular e é baseado nos fundamentos físico-químicos da eletrólise da água, abordados no Capítulo 2. Esse modelo foi desenvolvido para *softwares* como o MATLAB/Simulink, sendo utilizado em trabalhos como o de Abdin, Webb e Gray (2015). Cada módulo do modelo representa uma das componentes elétricas do eletrolisador, calculadas a partir dos seus parâmetros construtivos e controlados por variáveis como pressão, temperatura e corrente. Essa abordagem permite que o modelo siga a curva I-V de eletrolisadores com precisão, tendo aplicações tanto em baixa temperatura, quanto em alta temperatura (Ni, Leung e Leung, 2007; Abdin, Webb e Gray, 2017).

Esse modelo pode ser abordado de forma mais simplificada, Ulleberg (2003) desenvolveu um modelo estático para um eletrolisador alcalino, considerando a operação do eletrolisador em condições de temperatura e pressão constantes. Como mostrado na Figura 5.1, o modelo pode ser abordado como uma fonte de tensão constante, em série com uma resistência fixa e uma fonte de tensão não linear controlada por corrente, expressa por (2.31), que representa o efeito de ativação dos eletrodos.

Figura 5.1 – Modelo elétrico com fonte de tensão não linear controlada por corrente.



Fonte: Adaptado de Ulleberg (2003).

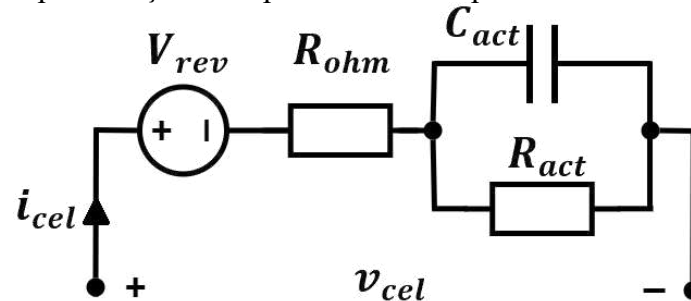
Além de se adequar com precisão à curva I-V de eletrolisadores, esse tipo de modelo tem a capacidade de prever a taxa de produção de hidrogênio do eletrolisador. Por isso, modelos semelhantes a esse são utilizados em trabalhos sobre dimensionamento de plantas para produção de hidrogênio, como: Cheng, Xia, e Wei (2024), Zeng *et al.* (2024) e Zhou, Z. *et al.* (2024). Entretanto, esse modelo não leva em consideração a dinâmica temporal das células eletrolíticas. Além disso, devido ao uso de *softwares* como o MATLAB/Simulink e ao uso de elementos ativos, esse modelo elétrico é de complexa implementação no dimensionamento de conversores e de sistemas de controle.

5.1.2 Modelo elétrico 2

Quando um eletrolisador é acoplado a FER intermitentes, as condições operacionais mudam ao longo do tempo. Nessas condições, uma modelagem dinâmica dos eletrolisadores possibilita descrever o seu comportamento real de forma mais precisa e confiável (Koundi *et al.*, 2023). Em geral, esses modelos são dimensionados para um único ponto de operação da curva I-V e estão relacionados à dinâmica temporal do sobrepotencial de ativação. Semelhante ao modelo anterior, a temperatura e a pressão na célula podem ser consideradas constantes, mantendo V_{rev} e R_{ohm} constantes. Nessa abordagem, o ramo que representa o sobrepotencial de ativação é composto por um capacitor referente à dupla camada elétrica (C_{dl})

em paralelo com uma resistência para descarga desse capacitor (R_{act}), como mostrado na Figura 5.2.

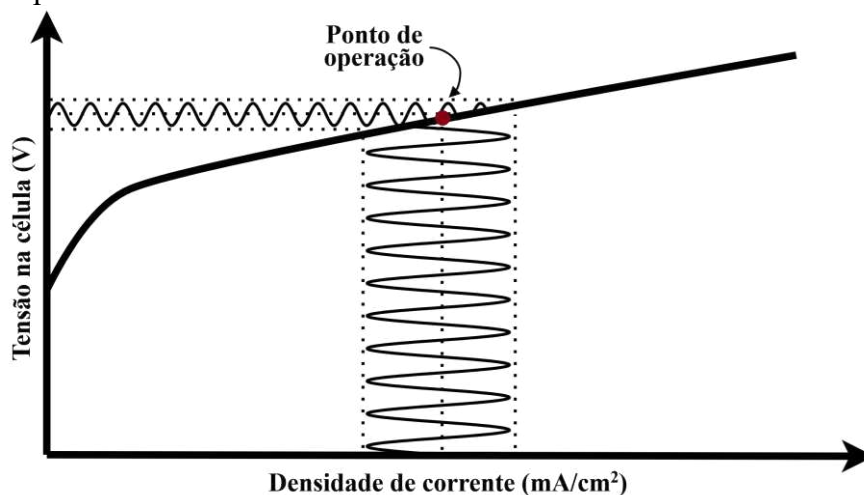
Figura 5.2 – Modelo elétrico dinâmico com representação da capacitância de dupla camada.



Fonte: Adaptado de Koundi *et al.* (2023).

Na literatura, um dos métodos utilizados para estimativa da capacitância de dupla camada e dos demais componentes desse modelo é a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS – *Electrochemical Impedance Spectroscopy*), como nos trabalhos desenvolvidos por: Merwe *et al.* (2014) e Amireh *et al.* (2023). Esse método consiste na aplicação de uma corrente senoidal sobreposta a uma corrente contínua em uma faixa de frequência acima de 1 kHz, permitindo a linearização do comportamento do eletrolisador em torno de um ponto de operação específico, como mostrado na Figura 5.3. Os dados obtidos são usados para modelar a impedância do eletrolisador através de circuitos elétricos equivalentes, considerando: o sobrepotencial ôhmico, a capacitância de dupla camada e as perdas de ativação e de concentração (Siracusano *et al.*, 2018).

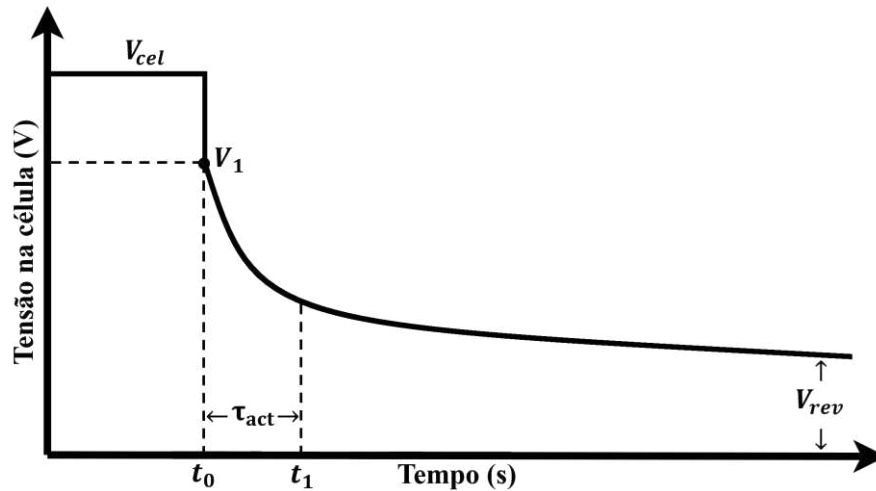
Figura 5.3 – Método EIS aplicado para estimativa da capacitância de dupla camada.



Fonte: Adaptado de Amireh *et al.* (2023).

Em contrapartida, a técnica de interrupção de corrente também pode ser utilizada para estimar os parâmetros desse tipo de modelo (Martinson *et al.*, 2013). Esse método consiste em analisar a resposta natural de tensão do eletrolisador à interrupção de corrente após a queda de tensão instantânea, como mostrado na Figura 5.4. Nesse método, a capacitância C_{dl} e a resistência R_{act} podem ser dimensionadas a partir da curva de descarga do sobrepotencial de ativação, representado como o intervalo entre V_1 e V_{rev} .

Figura 5.4 – Resposta natural de tensão do eletrolisador à interrupção de corrente.



Fonte: Adaptado de Martinson *et al.* (2013).

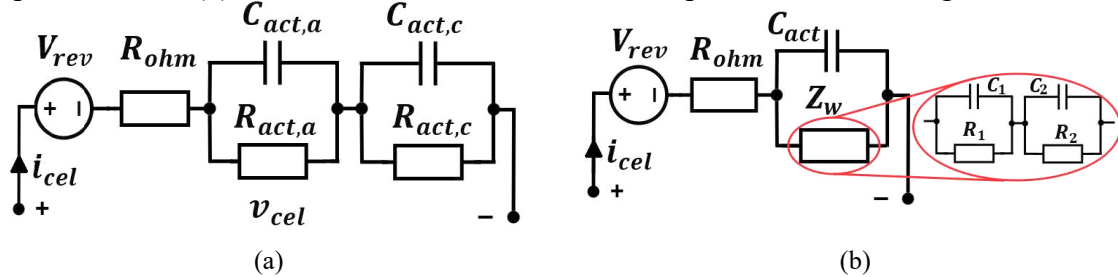
Geralmente, a resistência R_{act} é calculada em função de V_1 , V_{rev} e da corrente inicial I_0 , conforme (5.1). Já a capacitância C_{dl} pode ser estimada a partir do tempo de descarga de 37% do sobrepotencial de ativação (τ_{act}) e da resistência R_{act} , conforme (5.2).

$$R_{act} = \frac{V_1 - V_{rev}}{I_0} \quad (5.1)$$

$$C_{dl} = \frac{\tau_{act}}{R_{act}} \quad (5.2)$$

Amireh *et al.* (2023) e Järvinen *et al.* (2024) utilizaram uma variação desse modelo que consiste na separação dos efeitos de ativação entre cátodo e ânodo, como mostrado na Figura 5.5(a). Outra variação foi utilizada por Martinson *et al.* (2013) e consiste na substituição de R_{act} , por uma impedância chamada de impedância de Warburg (Z_w), com o objetivo de representar as perdas de concentração na célula alcalina e de difusão na célula PEM, como mostrado na Figura 5.5(b).

Figura 5.5 – (a) Modelo elétrico considerando os efeitos de ativação dos eletrodos separadamente; (b) Modelo elétrico considerando a impedância de Warburg.



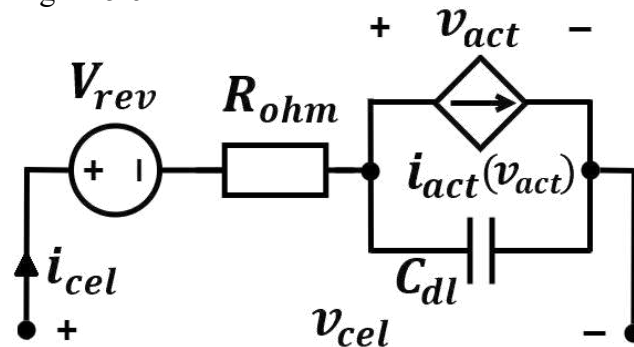
Fonte: Adaptado de Järvinen *et al.* (2024) e Martinson *et al.* (2013).

Ainda que esse modelo represente o comportamento dinâmico do sobrepotencial de ativação, é aplicável apenas em pequenas variações de potência e não representa a dinâmica temporal da célula eletrolítica completamente. Além disso, deve ser dimensionado para um único ponto de operação. Järvinen *et al.* (2024) utilizaram capacitores C_{dl} e resistências R_{act} não variáveis com a densidade de corrente de forma não linear para ampliar a faixa de aplicação do modelo. Entretanto, o uso de elementos não lineares eleva a complexidade de aplicação do modelo na eletrônica de potência e sistemas de controle.

5.1.3 Modelo elétrico 3

Visando representar o comportamento dinâmico do sobrepotencial de ativação e a operação em ampla faixa de potência, Ursúa e Sanchis (2012) propuseram um modelo estático-dinâmico para um eletrolisador alcalino comercial, considerando os fenômenos termodinâmicos, ôhmicos, de ativação e dupla camada elétrica. O modelo adotou no ramo de ativação uma fonte de corrente não linear controlada por tensão em paralelo com o capacitor de dupla camada, dimensionado pelo método EIS, como mostrado na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Modelo elétrico estático-dinâmico.



Fonte: Adaptado de Ursúa e Sanchis (2012).

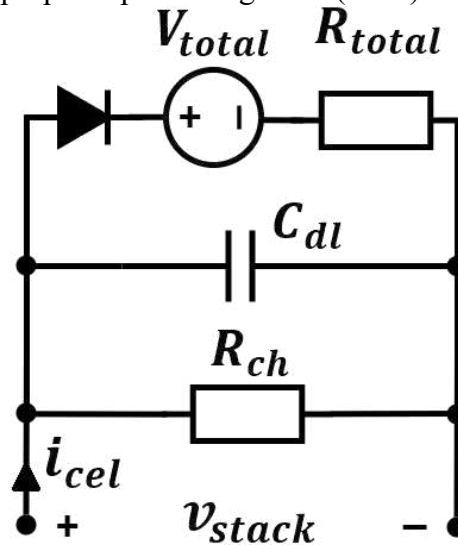
Esse modelo possui robustez e capacidade de adaptação aos diferentes tipos de tecnologias e escalas de potência de eletrólise, sendo aplicável em simulações de sistemas de

produção de hidrogênio conectados a energias renováveis (Gambou *et al.*, 2022; Jakobsen *et al.*, 2023). Entretanto, além de não representar completamente a dinâmica temporal das células eletrolíticas é de complexa implementação no dimensionamento de conversores e de sistemas de controle, como relatado por Iribarren *et al* (2022).

5.1.4 Modelo elétrico 4

Buscando a aplicação de modelos elétricos dinâmicos de eletrolisadores em uma maior faixa de operação, Cheng *et al.* (2024) e He *et al.* (2024) propuseram dois modelos elétricos que consideram os efeitos de ativação e de dupla camada elétrica, mas sem o uso de elementos ativos como fontes de corrente e fontes de tensão controladas. O modelo elétrico proposto por Cheng *et al.* (2024), mostrado na Figura 5.7, foi desenvolvido para representar os processos de carga e descarga de um eletrolisador alcalino, visando a aplicação de pulsos de corrente ou tensão. Para representar a passagem de corrente decorrente da condutividade do eletrólito, o modelo utiliza uma resistência em paralelo com o modelo equivalente da célula, chamada de resistência de canal (R_{ch}). Durante a etapa de carga, a corrente flui pelo resistor R_{ch} e uma parcela da corrente faz com que o capacitor C_{dl} seja carregado. Quando a tensão sobre o capacitor atinge a tensão de operação, representada pela fonte de tensão V_{total} , o diodo ideal passa conduzir liberando passagem de corrente por R_{total} . Durante a etapa de descarga, C_{dl} passa a descarregar sobre R_{ch} e o diodo ideal para de conduzir.

Figura 5.7 – Modelo elétrico proposto por Cheng *et al.* (2024).

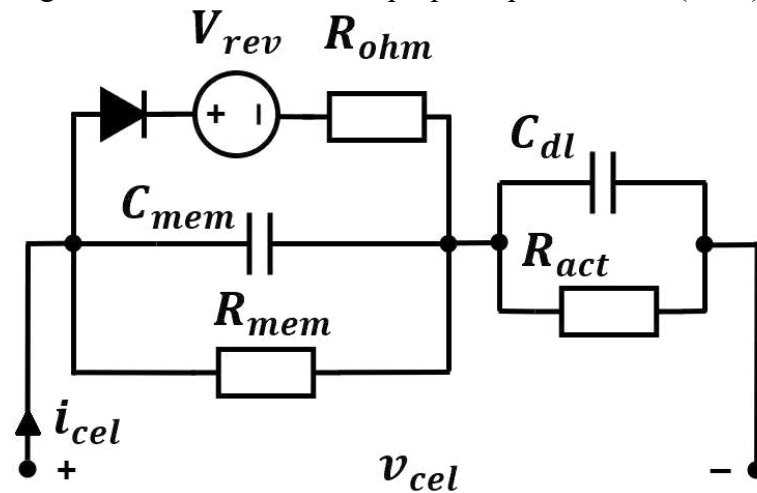


Fonte: Adaptado de Cheng *et al.* (2024).

A aplicabilidade do modelo é direcionada para simulação da eletrólise pulsada, visando o aumento da eficiência em eletrolisadores alcalinos. Mas, sua ideia geral pode ser aplicada em modelos elétricos que buscam simular a dinâmica temporal do eletrolisador em uma ampla faixa de operação, sem o uso de elementos ativos ou não lineares. Entretanto, a abordagem para proposta e dimensionamento desse modelo elétrico, que foi baseada apenas no comportamento do eletrolisador analisado, não captura todos os fenômenos eletroquímicos envolvidos no processo de eletrólise.

Outro modelo elétrico semelhante foi proposto por He *et al.* (2024) para uma célula PEM, mostrado na Figura 5.8. O modelo elétrico proposto foi capaz de simular as características elétricas da célula analisada em diferentes modos de operação e escalas de tempo. A obtenção desse modelo levou em consideração, além do efeito de ativação dos eletrodos, o efeito capacitivo resultante da forma com que os eletrodos e a membrana são estruturados nas células PEM, representados pela resistência R_{mem} e pela capacitância C_{mem} . Devido ao seu circuito simplificado, esse modelo pode ser aplicado na eletrônica de potência e sistemas de controle. Contudo, a dependência dos aspectos construtivos do eletrolisador PEM para estimar os parâmetros desse modelo elétrico dificulta a sua aplicação aos outros tipos de eletrolisadores.

Figura 5.8 – Modelo elétrico proposto por He *et al.* (2024).



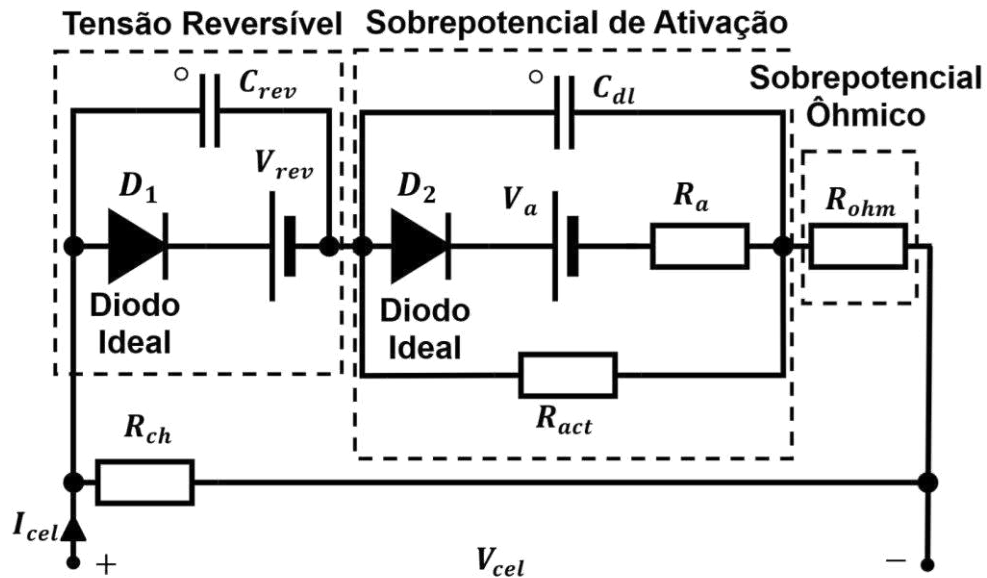
Fonte: Adaptado de He *et al.* (2024).

5.2 Modelo elétrico dinâmico proposto

A partir da análise dos principais modelos elétricos presentes na literatura, o modelo elétrico dinâmico de uma célula eletrolítica foi proposto. O modelo elétrico foi planejado para uma célula alcalina, mas pode ser facilmente replicado para os outros tipos de células eletrolíticas com as devidas considerações. Semelhante aos modelos elétricos analisados, o

modelo elétrico proposto foi idealizado considerando constantes os parâmetros como: temperatura, pressão, concentração do eletrólito e fluxo das bolhas. O modelo elétrico proposto representa as três componentes de tensão da célula através de três ramos principais, como mostrado na Figura 5.9.

Figura 5.9 – Modelo elétrico dinâmico proposto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as condições estabelecidas, a tensão reversível foi representada por uma fonte de tensão constante V_{rev} . Para simular a dinâmica da célula eletrolítica abaixo da tensão reversível, o capacitor C_{rev} foi utilizado. Para evitar inversão de corrente em V_{rev} , um diodo ideal D_1 foi adicionado em série com essa fonte. Dessa forma, o diodo ideal D_1 passa a conduzir quando a tensão sobre o capacitor C_{rev} for igual a V_{rev} .

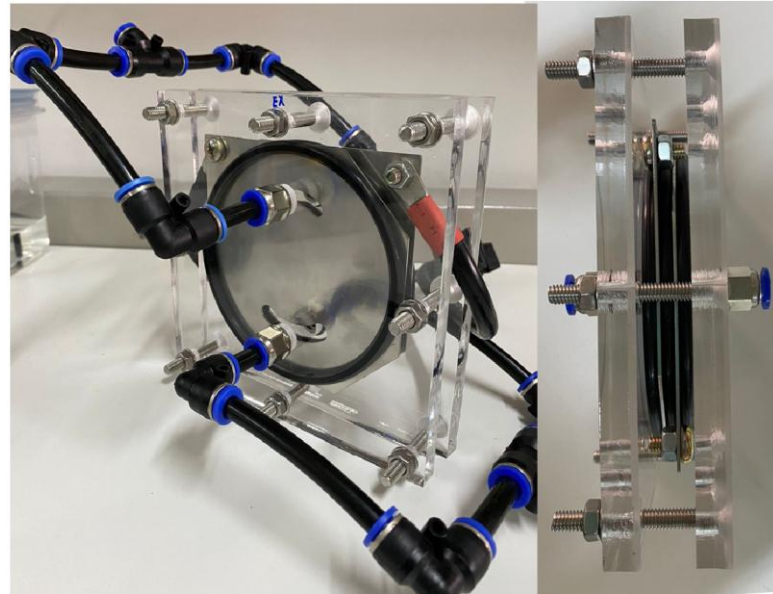
O capacitor C_{dl} foi inserido para simular o comportamento dinâmico do sobrepotencial de ativação e do efeito de dupla camada elétrica proposto por Helmholtz (1853). Em paralelo, a resistência R_{act} foi adicionada para atuar principalmente na descarga no capacitor C_{dl} . Para simplificar o modelo elétrico proposto, o sobrepotencial de ativação foi linearizado com a adição da fonte V_a em série com a resistência R_a . Para evitar inversão de corrente em V_a , um diodo ideal D_2 também foi adicionado em série com a fonte V_a . Dessa forma, o diodo ideal passa a conduzir quando a tensão sobre o capacitor C_{dl} for igual a V_a .

O sobrepotencial ôhmico foi representado como a tensão sobre uma resistência fixa R_{ohm} , sendo possível representar a queda de tensão instantânea que ocorre ao desligar a célula eletrolítica. Para simular o efeito de descarga completa da célula eletrolítica, uma resistência de canal R_{ch} foi adicionada em paralelo com todos os elementos do circuito.

5.3 Metodologia

Para validação do modelo proposto, quatro experimentos foram realizados em laboratório. Para visualizar o comportamento elétrico de uma célula, desconsiderando a interação entre as células de uma pilha, uma célula alcalina foi construída e utilizada nos experimentos. Como a célula eletrolítica foi utilizada como carga durante os experimentos, não foram utilizados membrana ou diafragma em sua construção, os quais poderiam ser danificados devido às variações de potência. Dessa forma, ao serem gerados, os gases eram misturados e liberados em ambiente externo ao laboratório. Para vedação e separação entre os eletrodos, *O-rings* de borracha foram utilizados. Visando a condutividade máxima do eletrólito, uma solução com percentual de massa a 30% de KOH foi utilizada. A célula eletrolítica utilizada é mostrada na Figura 5.10.

Figura 5.10 – Célula eletrolítica utilizada nos experimentos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros construtivos da célula eletrolítica são mostrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Parâmetros construtivos da célula eletrolítica utilizada.

Parâmetro	Especificação
Material dos eletrodos	Aço AISI 316L
Eletrólito	Solução de KOH a 30%
Área da célula	78,54 cm ²
Área eficaz da célula	70,72 cm ²
Espessura dos eletrodos	1,1 mm
Distância entre os eletrodos	5 mm

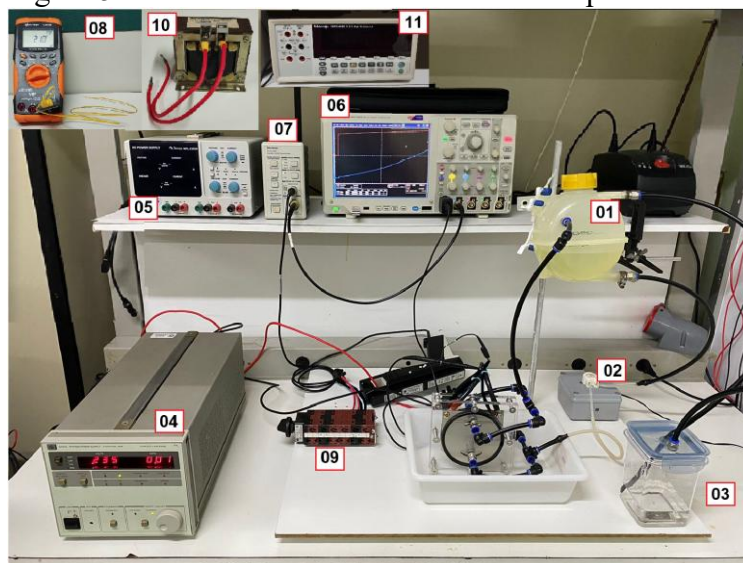
Fonte: Elaborado pelo autor.

Além da célula eletrolítica, o sistema utilizado nos experimentos consistiu em:

01. Um tanque para armazenamento do eletrólito;
02. Uma bomba peristáltica de 12V, com capacidade de fluxo de $100 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, para fazer a recirculação do eletrólito;
03. Um tanque borbulhador para visualização da geração de gases;
04. Uma fonte de bancada HP® Agilent, capaz de fornecer uma corrente elétrica de até 30 A para tensões de até 20 V;
05. Uma fonte de bancada Minipa®, capaz de fornecer uma corrente elétrica de até 5 A para tensões de até 30 V;
06. 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 obter formas de onda com alta resolução;
07. 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;
08. Um termopar tipo K Agilent® U1186A foi utilizado em conjunto com um multímetro digital Keysight® para monitorar a temperatura;
09. Uma chave seccionadora para alta corrente, capaz de realizar a interrupção de corrente sem permitir a formação de arco elétrico;
10. Um indutor de 7,5 mH, capaz de suportar uma corrente elétrica até 30 A;
11. Um multímetro digital de bancada Tektronix® DMM4020, com precisão de 6 dígitos.

O sistema utilizado para realização dos experimentos com a célula eletrolítica é mostrado na Figura 5.11.

Figura 5.11 – Sistema utilizado durante os experimentos.



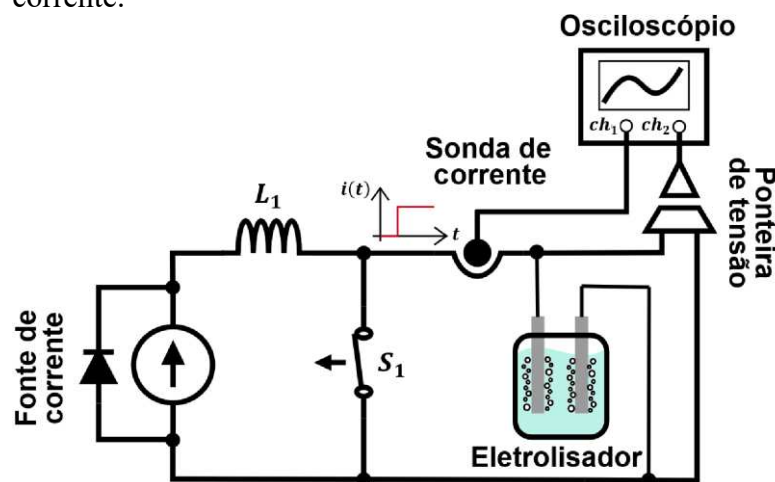
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os experimentos realizados foram: degrau de corrente, para mensurar a curva de carga da célula eletrolítica; interrupção de corrente, para mensurar a curva de descarga da célula eletrolítica; extração da curva I-V, para mensurar a faixa de operação da célula eletrolítica; e medição a quatro fios da resistência de canal, para mensurar a resistência da célula em densidades de corrente baixas.

5.3.1 Degrau de corrente (ao ligar)

O experimento com degrau de corrente foi abordado em trabalhos como o de He *et al.* (2024) e Ratib *et al.* (2024), tendo como objetivo analisar a resposta natural de tensão de uma célula eletrolítica ao ligar. Esse experimento pode ser utilizado para dimensionar as capacitâncias presentes no modelo elétrico proposto. Para a realização do experimento com degrau de corrente, o sistema foi configurado conforme o esquemático mostrado na Figura 5.12. Além da célula eletrolítica, os elementos utilizados para compor o circuito elétrico foram: a fonte de bancada Minipa®, o indutor de 7,5 mH (L_1) para garantir o acionamento da célula por fonte de corrente e a chave seccionadora (S_1). Para medir a tensão e a corrente sobre a célula, o osciloscópio digital foi utilizado em conjunto com uma ponteira de tensão e uma sonda de corrente. Inicialmente, as capacitâncias internas da célula estavam completamente descarregadas. A chave S_1 estava fechada e uma corrente $I_c = 1$ A circulava apenas por L_1 . Em um determinado instante de tempo, S_1 foi aberta e uma corrente $I_c = I_{cel} = 1$ A foi aplicada na célula eletrolítica.

Figura 5.12 – Esquemático do experimento com degrau de corrente.

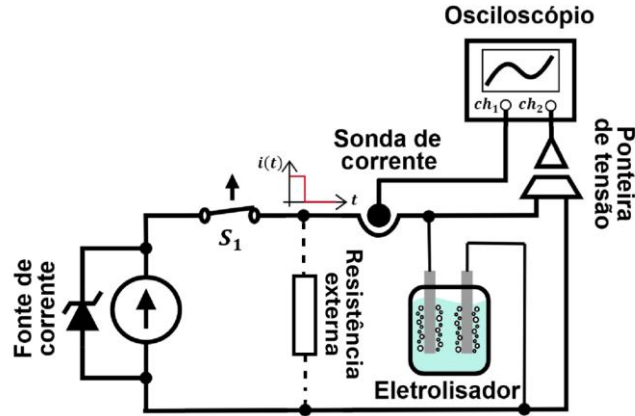


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.2 Interrupção de corrente (ao desligar)

O experimento de interrupção de corrente foi abordado em trabalhos como o de Hossain *et al.* (2023) e Koundi *et al.* (2023), tendo como objetivo analisar a resposta natural de tensão de uma célula eletrolítica ao desligar. Para a realização do experimento de interrupção de corrente, o sistema foi configurado conforme o esquemático mostrado na Figura 5.13. Além da célula eletrolítica, os elementos utilizados para compor o circuito elétrico foram: a fonte de bancada HP® e a chave seccionadora (S_1). Nesse experimento, uma resistência externa pode ser utilizada para observar a inversão no sentido de corrente durante o processo de descarga do eletrolisador. Para medir a tensão e a corrente sobre a célula, o osciloscópio digital foi utilizado em conjunto com uma ponteira de tensão e uma sonda de corrente. Inicialmente, a chave S_1 estava fechada e a célula operava em regime permanente, com uma corrente $I_d = I_{cel} = 5\text{ A}$ circulando por ela. Em um determinado instante de tempo, S_1 foi aberta e o fornecimento de corrente para a célula foi cessado $I_{cel} = 0\text{ A}$.

Figura 5.13 – Esquemático do experimento com interrupção de corrente.



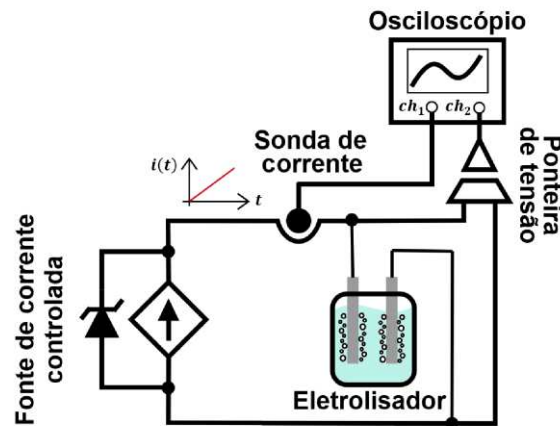
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.3 Extração da curva I-V

A extração da curva I-V de eletrolisadores é comumente abordada na literatura como nos trabalhos de Cheng *et al.* (2024) e Koundi *et al.* (2023), tendo como objetivo analisar a curva característica das células e, consequentemente, a sua faixa de operação para determinadas temperaturas. Esse experimento consiste em medir a resposta de tensão à aplicação de uma rampa de corrente na célula eletrolítica. Para a extração da curva I-V, o sistema foi configurado conforme o esquemático mostrado na Figura 5.14. Além da célula eletrolítica,

a fonte de bancada HP[®] foi utilizada, configurada para uma rampa de corrente de 0 a 25 A, com incremento de $100 \text{ mA} \cdot \text{s}^{-1}$. Para medir a tensão e a corrente sobre a célula, o osciloscópio digital foi utilizado em conjunto com uma ponteira de tensão e uma sonda de corrente.

Figura 5.14 – Esquemático do experimento de extração da curva I-V.

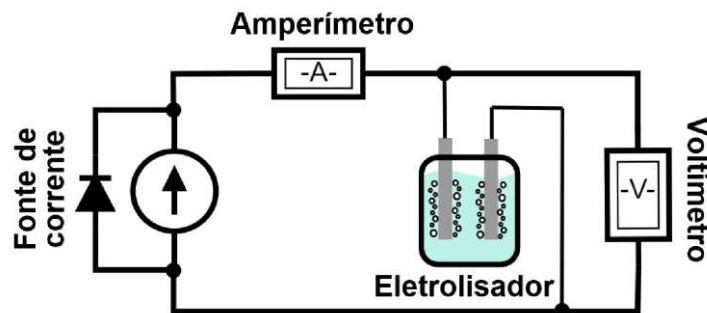


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.4 Medição a quatro fios da resistência de canal

A medição da resistência de eletrolisadores foi proposta para medir a resistência dos elementos que compõem uma célula PEM por Ouimet *et al.* (2022), analogamente, este trabalho propõe a análise da resistência de canal de uma célula eletrolítica alcalina, utilizada no modelo elétrico proposto por Cheng *et al.* (2024). Esse experimento consistiu em aplicar densidades de corrente na ordem de $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ e medir a resposta de tensão na célula até alcançar o valor calculado para V_{rev} . Para a medição a quatro fios da resistência de canal, o sistema foi configurado conforme o esquemático mostrado na Figura 5.15. Além da célula eletrolítica, a fonte de bancada HP[®] e dois multímetros Tektronix[®] foram utilizados.

Figura 5.15 – Esquemático do experimento de medição da resistência de canal.



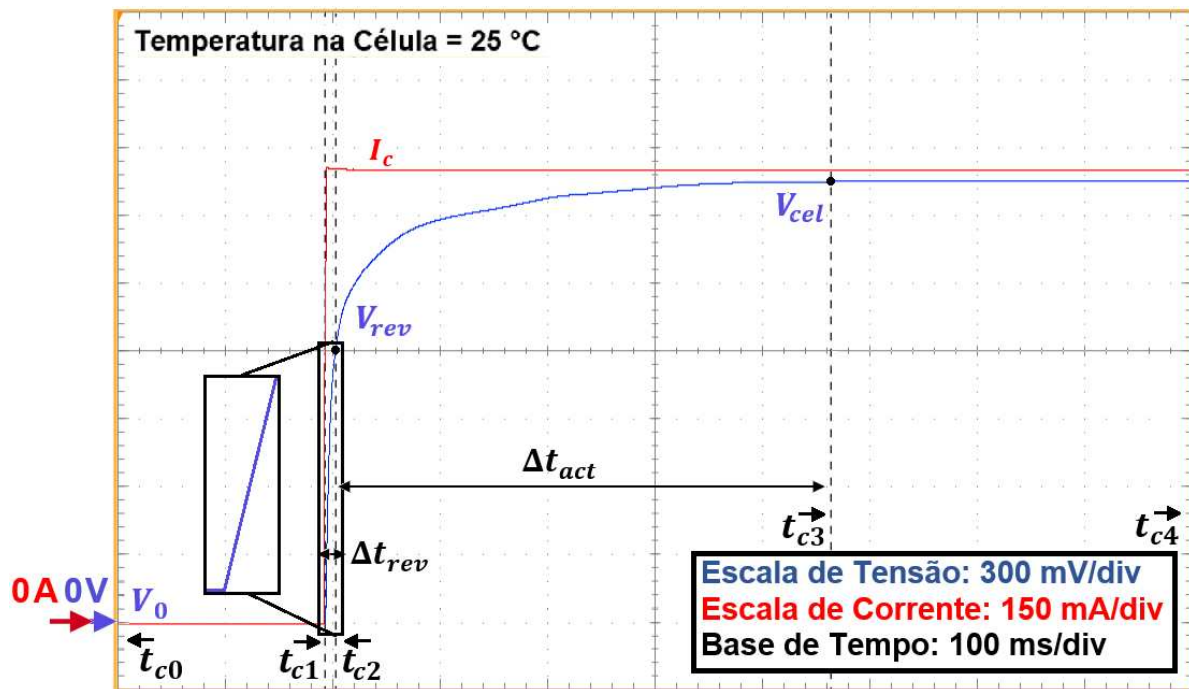
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 Resultados experimentais

Os parâmetros do modelo elétrico proposto foram extraídos a partir dos resultados dos experimentos descritos na Seção 5.3. Para que o modelo elétrico proposto fosse extraído em condições referência de temperatura e pressão, os experimentos realizados tiveram a temperatura monitorada com o uso do termopar tipo K e do multímetro digital. Todos os experimentos ocorreram a 25 °C ($T = 298,15 \text{ K}$) e a configuração do sistema de bombeamento permitiu que a célula operasse com pressão de 1 bar, além de auxiliar na manutenção da concentração do eletrólito e na constância do fluxo de bolhas.

A resposta de tensão da célula ao experimento com degrau de corrente é mostrada na Figura 5.16, na qual é possível observar o rápido processo de carga da tensão reversível, em comparação ao sobrepotencial de ativação. Do instante inicial t_{c0} ao instante t_{c1} , a célula eletrolítica estava completamente descarregada. No instante $t_{c1} = 0,3 \text{ s}$, um degrau de corrente I_c de 0 a 1 A ($j_c \approx 15 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$) foi aplicado à célula eletrolítica utilizada. O instante $t_{c2} = 0,309 \text{ s}$ marca o momento em que $V_{rev} = 1,229 \text{ V}$ foi alcançada, conforme (2.6). Já o instante $t_{c3} = 0,546 \text{ s}$ marca o momento em que a célula eletrolítica entrou em regime permanente, com a resposta de tensão $V_{cel} = 1,957 \text{ V}$, até o fim da captura no instante $t_{c4} = 1 \text{ s}$. O tempo de carga das capacitâncias C_{rev} e C_{dl} são representados por Δt_{rev} e Δt_{act} , respectivamente.

Figura 5.16 – Resposta natural de tensão da célula eletrolítica ao experimento com degrau de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como a proposta do modelo é uma linearização do processo de carga da célula eletrolítica, as capacitâncias C_{rev} e C_{dl} podem ser determinadas por (5.3) e (5.4), respectivamente.

$$C_{rev} = i_{C_{rev}}(t) \cdot \frac{dt}{dv_{C_{rev}}(t)} = I_c \cdot \frac{\Delta t_{rev}}{V_{rev}} \quad (5.3)$$

$$C_{dl} = i_{C_{dl}}(t) \cdot \frac{dt}{dv_{C_{dl}}(t)} = I_c \cdot \frac{\Delta t_{act}}{V_{act}} \quad (5.4)$$

Aplicando os valores obtidos experimentalmente em (5.3) e (5.4), os valores das capacitâncias C_{rev} e C_{dl} foram obtidas em (5.5) e (5.6), respectivamente.

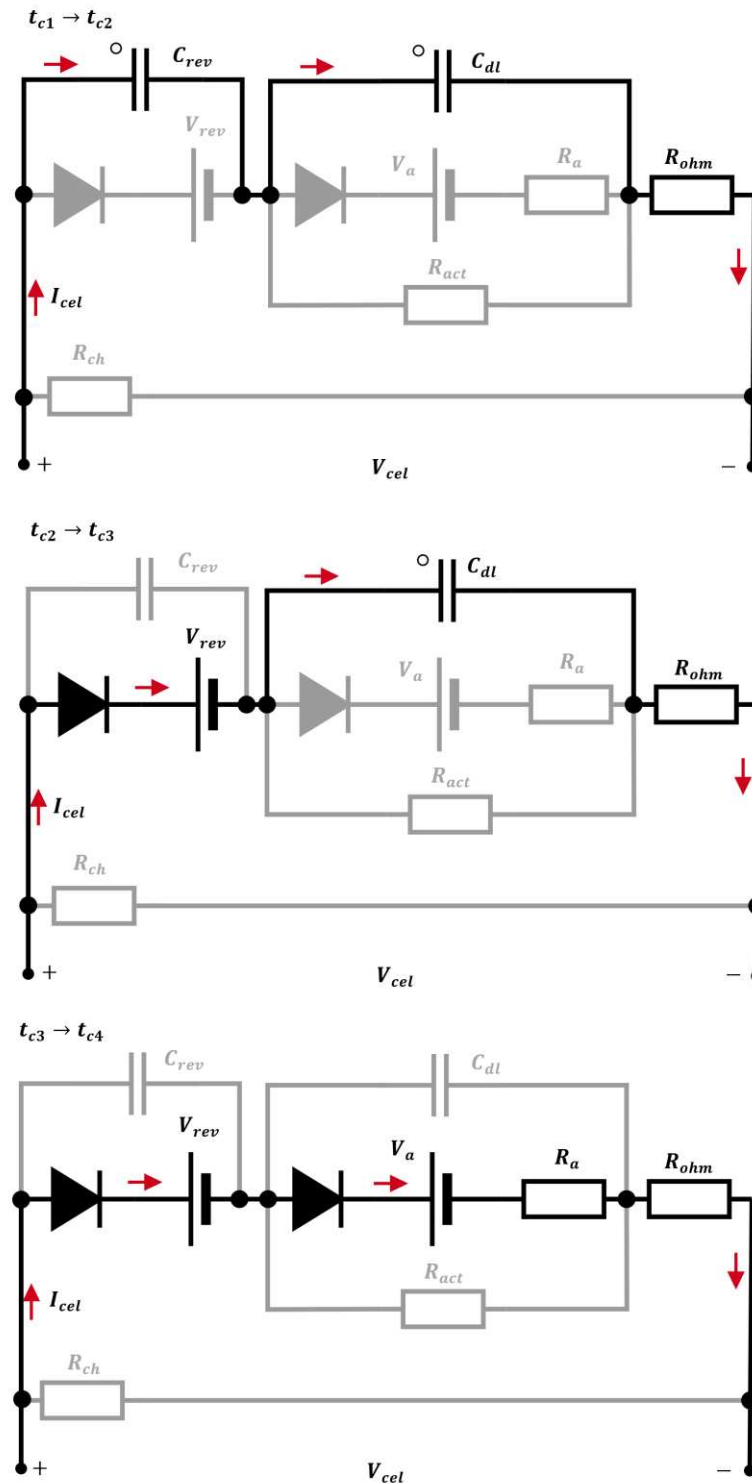
$$C_{rev} = 1 \text{ A} \cdot \frac{0,309 \text{ s} - 0,3 \text{ s}}{1,229 \text{ V}} = 7,3 \text{ mF} \quad (5.5)$$

Considerando a corrente $I_c = 1 \text{ A}$, V_{ohm} é muito menor que V_{act} , dessa forma, $V_{act} \approx V_{cel} - V_{rev}$.

$$C_{dl} = 1 \text{ A} \cdot \frac{0,546 \text{ s} - 0,309 \text{ s}}{1,957 \text{ V} - 1,229 \text{ V}} = 325,613 \text{ mF} \quad (5.6)$$

A equivalência do processo de carga da célula eletrolítica no modelo proposto é mostrada na Figura 5.17. Do instante inicial t_{c0} ao instante t_{c1} , os elementos do circuito estão desenergizados. No instante t_{c1} , os capacitores C_{rev} e C_{dl} começam o processo de carga. No instante t_{c2} , a tensão sobre C_{rev} se equipara à V_{rev} , isso faz com que o primeiro diodo ideal conduza, fazendo a fonte V_{rev} participar do circuito. No instante t_{c3} , a tensão sobre o capacitor C_{dl} se equipara à V_a , isso faz com que o segundo diodo ideal conduza, fazendo com que a fonte V_a e a resistência R_a participem do circuito. A partir do instante t_{c3} , a célula eletrolítica entra em regime permanente, logo, o modelo elétrico dinâmico proposto se iguala ao modelo elétrico simplificado.

Figura 5.17 – Equivalência do processo de carga da célula eletrolítica no modelo elétrico proposto.

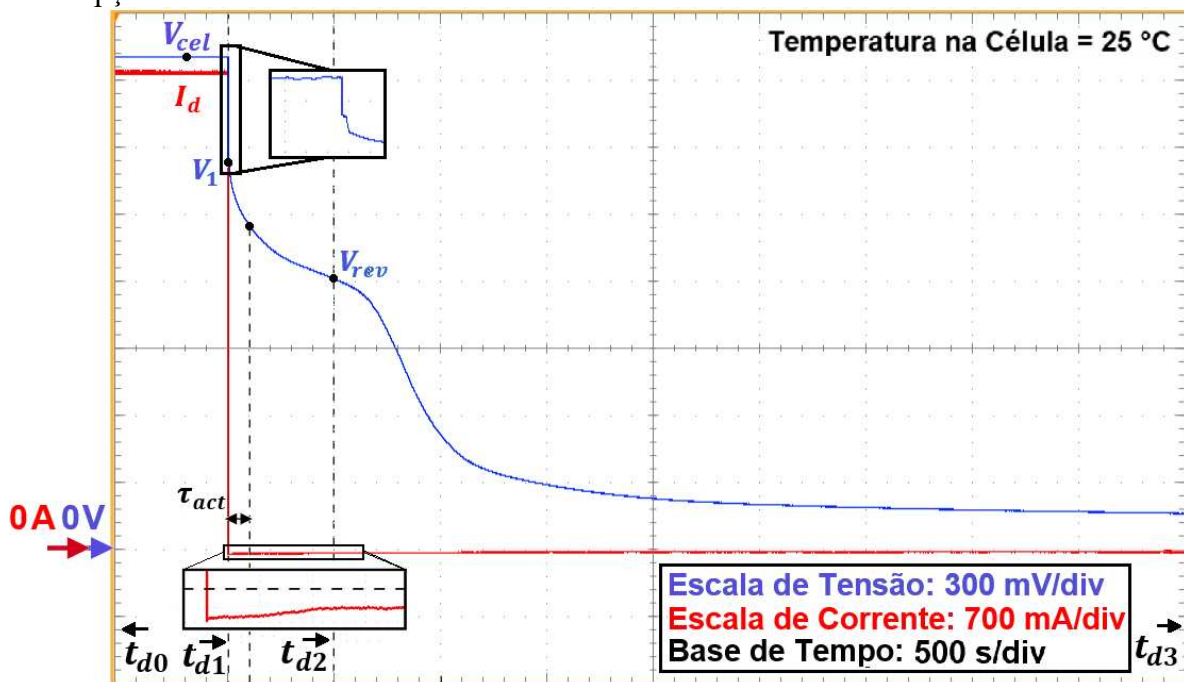


Fonte: Elaborado pelo autor.

A resposta de tensão da célula eletrolítica ao experimento com interrupção de corrente é mostrada na Figura 5.18, na qual é possível observar a inversão do sentido da corrente na célula, demonstrando que, a célula eletrolítica se comporta de forma semelhante à uma célula

combustível nessa situação. Do instante inicial t_{d0} ao instante t_{d1} , a célula eletrolítica estava operando em regime permanente, com uma tensão $V_{cel} = 2,2$ V para uma corrente $I_d = 5$ A ($j_d \cong 70 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$) circulando por ela. No instante $t_{d1} \cong 500$ s, a corrente foi interrompida. O ponto V_1 marca a queda de tensão instantânea ao desligar a célula. No instante $t_{d2} \cong 1000$ s, a tensão sobre a célula retornou ao valor aproximado da tensão reversível. A partir do instante t_{d2} até o final da captura no instante $t_{d3} = 5000$ s, parte do processo de descarga de V_{rev} foi observado.

Figura 5.18 – Resposta natural de tensão da célula eletrolítica ao experimento com interrupção de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Aplicando os valores obtidos experimentalmente em (4.1), R_{ohm} foi determinado em (5.7).

$$R_{ohm} = \frac{2,2 \text{ V} - 2,108 \text{ V}}{5 \text{ A}} = 18,32 \text{ m}\Omega \quad (5.7)$$

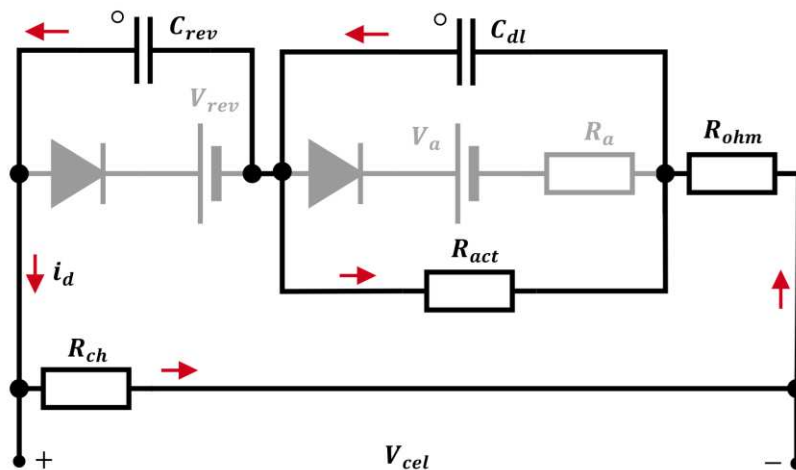
Para manter o valor da capacitância C_{dl} especificado em (5.6), a resistência R_{act} foi dimensionada a partir (5.2), conforme (5.8).

$$R_{act} = \frac{136,92 \text{ s}}{325,613 \text{ mF}} = 420,5 \Omega \quad (5.8)$$

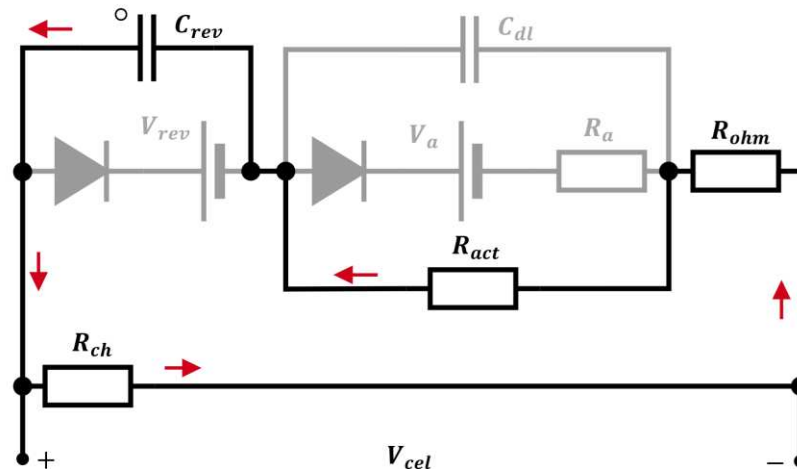
A equivalência do processo de descarga da célula eletrolítica no modelo proposto é mostrada na Figura 5.19. Do instante inicial t_{d0} ao instante t_{d1} , os elementos do circuito estão energizados e o modelo elétrico proposto se iguala ao modelo elétrico simplificado. No instante t_{d1} , os capacitores C_{rev} e C_{dl} começam o processo de descarga e os diodos ideais param de conduzir. No instante t_{d2} , o capacitor C_{dl} descarrega completamente devido ao resistor R_{act} e o capacitor C_{rev} continua o processo de descarga sobre R_{ch} . No intervalo de tempo entre t_{d1} e t_{d3} , um valor de corrente (i_d) circula no sentido inverso no modelo, entretanto, i_d é muito menor que a corrente inicial na célula. Dessa forma, as quedas de tensão sobre R_{act} e R_{ohm} são praticamente iguais a zero.

Figura 5.19 – Equivalência do processo de carga da célula eletrolítica no modelo elétrico proposto.

$t_{d1} \rightarrow t_{d2}$



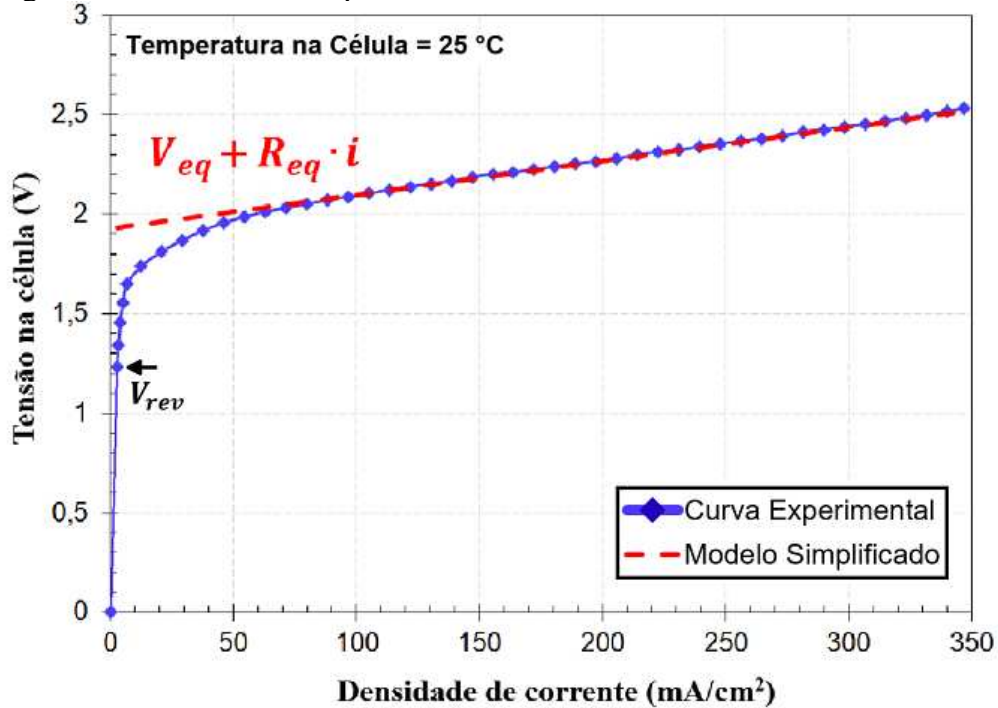
$t_{d2} \rightarrow t_{d3}$



Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado deste experimento é mostrado na Figura 5.20. A partir da curva I-V da célula eletrolítica, o modelo elétrico simplificado foi obtido, onde: $V_{eq} = 1,931 \text{ V}$ e $R_{eq} = 24 \text{ m}\Omega$.

Figura 5.20 – Curva I-V experimental da célula eletrolítica analisada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

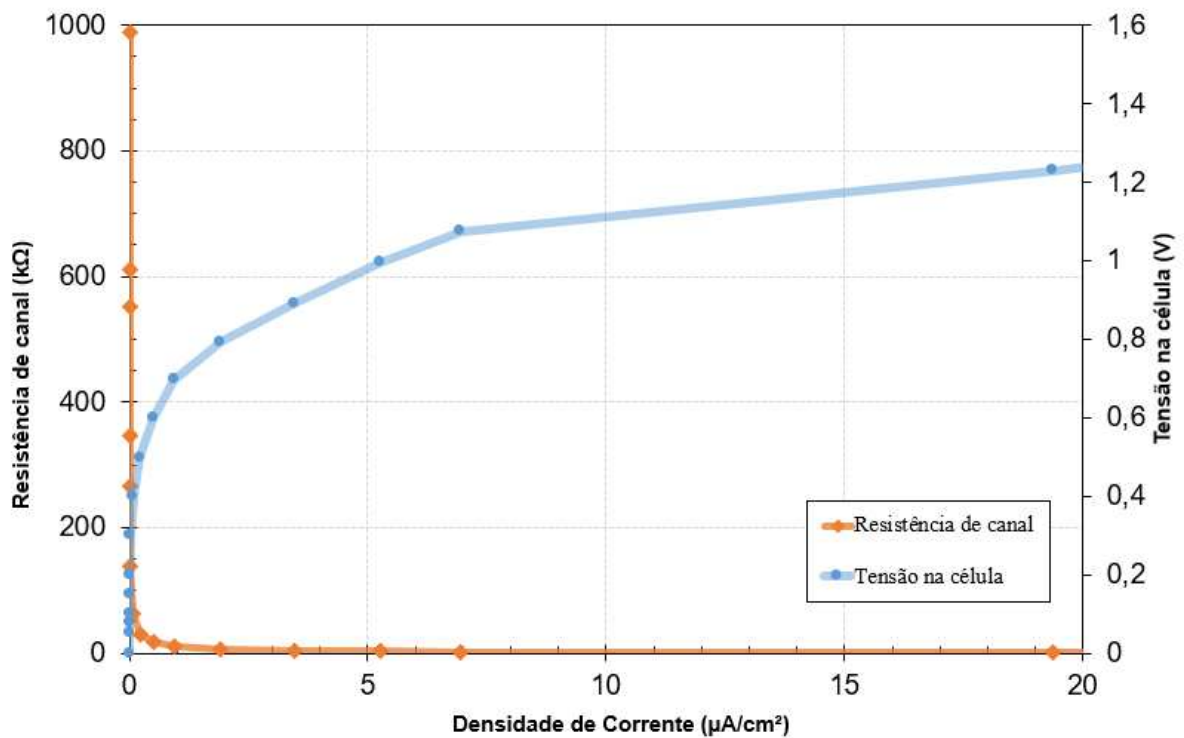
Aplicando os valores obtidos experimentalmente em (4.2) e (4.3), os valores correspondentes à linearização do sobrepotencial de ativação V_a e R_a foram obtidos em (5.9) e (5.10).

$$V_a = V_{eq} - V_{rev} = 1,931 \text{ V} - 1,229 \text{ V} = 702 \text{ mV} \quad (5.9)$$

$$R_a = R_{eq} - R_{ohm} = 24 \text{ m}\Omega - 18,32 \text{ m}\Omega = 5,68 \text{ m}\Omega \quad (5.10)$$

Para dimensionar corretamente a resistência de canal a medição a quatro fios da resistência da célula foi feita. Como no modelo proposto, a resistência de canal atua principalmente na descarga de C_{rev} , a corrente sobre a célula foi sendo elevada até que a tensão sobre a célula fosse igual a V_{rev} , correspondendo a uma densidade de corrente de aproximadamente $19,3 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$. A partir dos dados de corrente e tensão medidos, a resistência de canal foi medida, sendo observado um comportamento não linear, como mostrado na Figura 5.21.

Figura 5.21 – Resultados do experimento de medição da resistência de canal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para que o tempo de descarga do capacitor C_{rev} simulasse corretamente o tempo de descarga da célula eletrolítica, o valor da resistência de canal foi adotado como $R_{ch} = 300 \text{ k}\Omega$. Para validação do dimensionamento do modelo proposto, os experimentos foram replicados em *software*, com o objetivo de comparar o modelo elétrico dinâmico proposto com os resultados experimentais e com as simulações dos modelos analisados na Seção 5.1. Os parâmetros utilizados para simulação do modelo elétrico proposto são mostrados na Tabela 5.2

Tabela 5.2 – Parâmetros utilizados para simulação do modelo proposto.

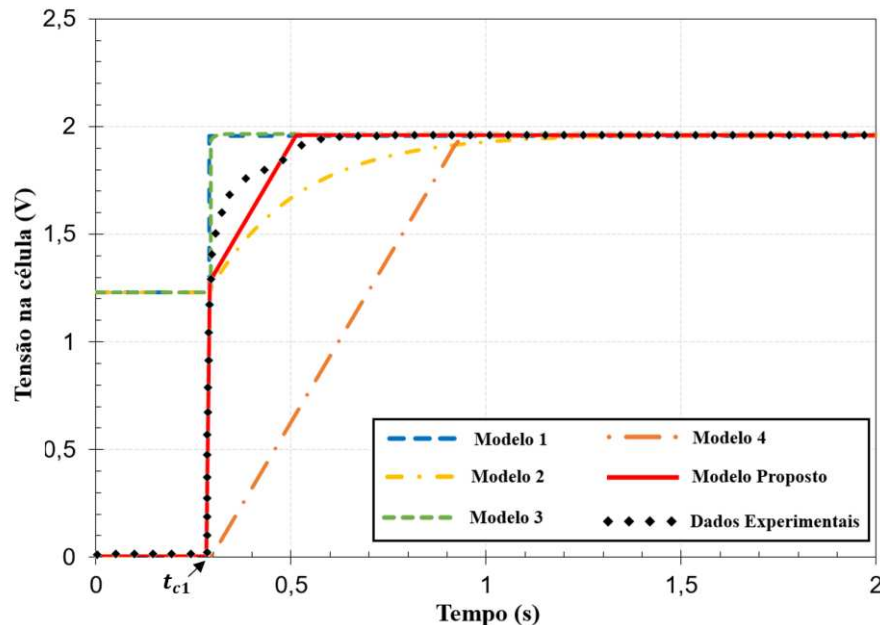
Parâmetro	Nomenclatura	Especificação
Tensão reversível	V_{rev}	1,229 V
Capacitância referente à V_{rev}	C_{rev}	7,3 mF
Capacitância de dupla camada	C_{dl}	325,613 mF
Resistência referente ao sobrepotencial ôhmico	R_{ohm}	18,32 mΩ
Resistência de descarga do sobrepotencial de ativação	R_{act}	420,5 Ω
Fonte de tensão resultante da linearização do sobrepotencial de ativação	V_a	702 mV
Resistência resultante da linearização do sobrepotencial de ativação	R_a	5,68 mΩ
Resistência de canal	R_{ch}	300 kΩ

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a avaliação da precisão do modelo elétrico proposto em comparação aos resultados experimentais, três métricas foram empregadas, sendo elas: o Erro Médio Absoluto (EMA), o Erro Quadrático Médio (EQM) e o coeficiente de determinação (R^2). O EMA calcula a média das diferenças absolutas entre os valores previstos pelo modelo e os valores experimentais (Hodson, 2022). Essa métrica fornece uma medida direta da magnitude do erro, aqui expressa em volts, onde um valor mais baixo indica um desempenho superior do modelo, pois reflete uma menor variação entre a resposta do modelo e os dados experimentais. O EQM é obtido pela média dos quadrados das diferenças entre as previsões e os valores observados (Hodson, 2022). Por elevar os erros ao quadrado, essa métrica penaliza mais severamente os erros maiores, sendo útil para detectar dados que se desviam significativamente dos resultados experimentais. Um EQM mais baixo indica um melhor ajuste do modelo aos dados experimentais. O R^2 mede a proporção da variabilidade dos dados dependentes que é explicada pelo modelo (Zhang, 2022). Seus valores variam entre 0 e 1, em que valores próximos a 1 indicam que o modelo consegue capturar a maior parte da variabilidade dos dados, enquanto valores próximos a 0 sugerem que o modelo não é eficaz em explicar as variações observadas. Essa métrica é útil para avaliar a capacidade explicativa do modelo em relação aos dados experimentais.

Os resultados de simulação dos modelos analisados em comparação aos resultados do experimento com degrau de corrente são mostrados na Figura 5.22. Durante a simulação, os modelos elétricos 1, 2 e 3 já iniciaram com o valor especificado da tensão reversível. Apenas o modelo 4 e o modelo proposto representaram o comportamento de carga da célula desde o início do degrau de corrente, dentre os quais, o modelo proposto apresentou um tempo de carga mais similar ao tempo de carga da célula analisada. A análise dos erros demonstrou que o erro máximo do modelo elétrico proposto foi de 297,6 mV (15,20%) no tempo de 0,2888 s, ainda relativamente baixo considerando a amplitude dos dados, enquanto o erro em regime permanente foi de apenas 0,1 mV (0,01%). Em contraste, os demais modelos analisados apresentaram erros máximos de 1,22 V (62,31%) a 1,525 V (77,88%).

Figura 5.22 – Resultados de simulação dos modelos analisados em comparação aos resultados do experimento com degrau de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O EMA do modelo elétrico proposto foi de 46,9 mV (2,39%), para comparação o EMA dos demais modelos analisados variaram de 321,8 mV (16,43%) a 413,4 mV (21,11%). O EQM, que penaliza erros maiores, foi de 8,2 mV (0,21%) para o modelo proposto, valor consideravelmente inferior ao EQM dos demais modelos analisados, que variaram de 290,5 mV (7,58%) a 452,5 mV (11,80%), reforçando sua capacidade de replicar o comportamento experimental. Além disso, o R^2 do modelo elétrico proposto atingiu 0,9854 indicando que 98,54% da variabilidade dos dados experimentais é representada pelo modelo, enquanto os demais modelos analisados apresentaram R^2 entre 0,1936 (19,36%) e 0,4824 (48,24%). O comparativo entre as métricas analisadas para cada modelo avaliado no experimento com degrau de corrente é mostrada na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Métricas dos modelos avaliados no experimento com degrau de corrente.

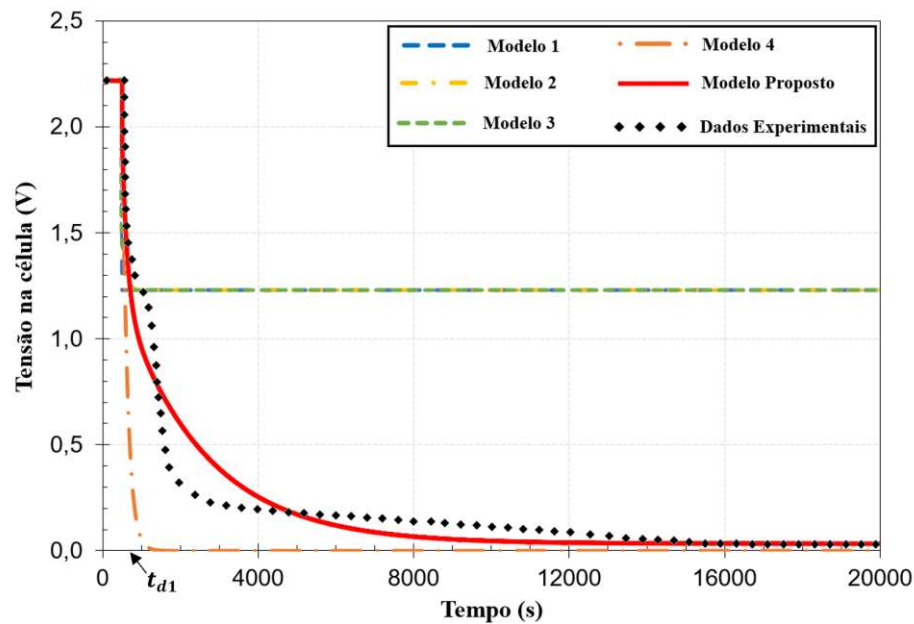
Modelo elétrico	EMA	EQM	R^2
Modelo proposto	46,9 mV (2,39%)	8,2 mV (0,21%)	98,54%
Modelo 1	360,5 mV (18,41%)	345,2 mV (9%)	38,49%
Modelo 2	321,8 mV (16,43%)	290 mV (7,58%)	48,24%
Modelo 3	339,3 mV (17,33%)	313,2 mV (8,17%)	44,18%
Modelo 4	413,4 mV (21,11%)	452,5 mV (11,8%)	19,36%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados de simulação dos modelos analisados em comparação aos resultados do experimento com interrupção de corrente são mostrados na Figura 5.23. Com exceção do modelo elétrico proposto e do modelo elétrico 4, nenhum dos modelos analisados apresentou o

processo de descarga completa da célula. Entretanto, o tempo de descarga do modelo elétrico proposto foi mais próximo ao da célula analisada. A análise dos erros demonstrou que o erro máximo do modelo elétrico proposto foi de 323,1 mV (14,66%) no tempo de 1.659 s, mantendo o erro médio de 0,1 mV (0,01%) em regime permanente. Em contraste, os demais modelos analisados apresentaram erros máximos de 1,2139 V (55,07%) a 1,1468 V (52,02%).

Figura 5.23 – Resultados de simulação dos modelos analisados em comparação aos resultados do experimento com interrupção de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O EMA do modelo elétrico proposto foi de 78,5 mV (3,56%), para comparação o EMA dos demais modelos analisados variaram de 229,5 mV (10,41%) a 893,9 mV (40,55%). O EQM, que penaliza erros maiores, foi de 13,0 mV (0,27%) para o modelo proposto, valor consideravelmente inferior ao EQM dos demais modelos analisados, que variaram de 145,4 mV (2,99%) a 935,9 mV (19,26%), reforçando sua capacidade de replicar o comportamento experimental. Além disso, o R^2 do modelo elétrico proposto atingiu 0,9726 indicando que 97,26% da variabilidade dos dados experimentais é representada pelo modelo, enquanto os demais modelos analisados apresentaram R^2 entre 0,0136 (1,36%) e 0,6937 (69,37%). O comparativo entre as métricas analisadas para cada modelo avaliado no experimento com interrupção de corrente é mostrada na Tabela 5.4.

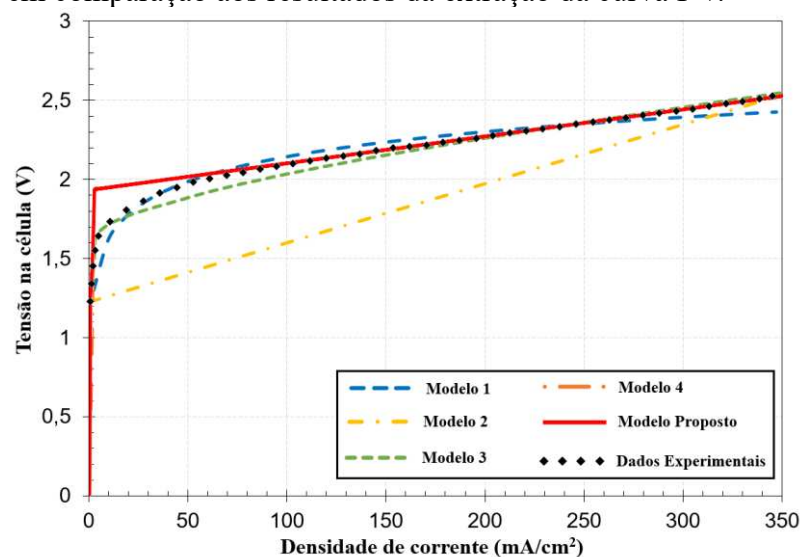
Tabela 5.4 – Métricas dos modelos avaliados no experimento com interrupção de corrente.

Modelo elétrico	EMA	EQM	R ²
Modelo proposto	78,5 mV (3,56%)	13 mV (0,27%)	97,26%
Modelo 1	893,9 mV (40,55%)	935,9 mV (19,26%)	1,36%
Modelo 2	807,3 mV (36,62%)	872,7 mV (17,96%)	1,46%
Modelo 3	861 mV (39,06%)	902,9 mV (18,58%)	1,41%
Modelo 4	229,5 mV (10,41%)	145,4 (2,99%)	69,37%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados de simulação dos modelos analisados em comparação aos resultados da extração da curva I-V são mostrados na Figura 5.24. Por se tratar de um modelo focado na dinâmica temporal da célula, o modelo 2 coincide apenas com um ponto de operação, necessitando ser redimensionado de acordo com a potência desejada. Os modelos 1 e 3 apresentaram um erro semelhante por serem baseados nas equações do sobrepotencial de ativação (2.31) e (2.22), respectivamente. Já o modelo proposto e o modelo 4 apresentaram desvios igualmente baixos para densidades de corrente abaixo de $10 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ e acima de $50 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$. A análise dos erros demonstrou que o erro máximo do modelo elétrico proposto foi de 155,1 mV (6,13%) em $20,9916 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, já na região acima de $50 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ o erro médio foi de apenas 1,265 mV (0,05%). Em contraste, os demais modelos analisados apresentaram erros máximos de 166,5 mV (6,58%) a 595,7 mV (23,55%).

Figura 5.24 – Resultados de simulação dos modelos analisados em comparação aos resultados da extração da curva I-V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O EMA do modelo elétrico proposto foi de 13,1 mV (0,52%), para comparação o EMA dos demais modelos analisados variaram de 45,4 mV (1,79%) a 307,6 mV (12,16%). O EQM, que penaliza erros maiores, foi de 1,1 mV (0,02%) para o modelo proposto, valor consideravelmente inferior ao EQM dos demais modelos analisados, que variaram de 3,2 mV

(0,05%) a 126,3 mV (1,97%), reforçando sua capacidade de replicar o comportamento experimental. Além disso, o R^2 do modelo elétrico proposto atingiu 0,9887 indicando que 98,87% da variabilidade dos dados experimentais é representada pelo modelo, enquanto os demais modelos analisados apresentaram R^2 entre 0,0423 (4,23%) e 0,9663 (96,63%). O comparativo entre as métricas analisadas para cada modelo avaliado no experimento da curva I-V é mostrada na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Métricas dos modelos avaliados no experimento da curva I-V.

Modelo elétrico	EMA	EQM	R^2
Modelo proposto	13,1 mV (0,52%)	1,1 mV (0,02%)	98,87%
Modelo 1	45,4 mV (1,79%)	3,2 mV (0,05%)	96,63%
Modelo 2	307,6 mV (12,16%)	126,3 mV (1,97%)	4,23%
Modelo 3	46,3 mV (1,83%)	5,4 mV (0,08%)	94,38%
Modelo 4	66,7 mV (2,64%)	24,4 mV (0,38%)	74,54%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos demonstram que o modelo elétrico proposto apresenta um desempenho consistente e preciso em comparação aos demais modelos elétricos analisados, com erros máximos e médios significativamente reduzidos em todos os experimentos realizados. No experimento com degrau de corrente e na interrupção de corrente, o modelo proposto exibiu erros menores e um coeficiente de determinação elevado, indicando uma boa capacidade de reproduzir o comportamento experimental. Na extração da curva I-V, o modelo manteve essa precisão, especificamente em faixas de corrente mais elevadas, com erros mínimos e um coeficiente de determinação próximo à unidade. Em contraste, os demais modelos elétricos analisados apresentaram erros mais expressivos e coeficientes de determinação inferiores. Esses resultados indicam que o modelo proposto é uma ferramenta adequada para a simulação e análise do comportamento da célula eletrolítica sob diferentes condições operacionais, oferecendo uma representação mais fiel dos dados experimentais. As vantagens, desvantagens e aplicabilidade de cada modelo elétrico analisado são mostradas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Comparação entre os modelos elétricos analisados.

Modelo	Vantagens	Desvantagens	Aplicabilidade
Modelo elétrico 1	<ul style="list-style-type: none"> - Preciso na descrição da curva I-V; - Aplicável para a eletrólise de baixa e de alta temperatura; - Capaz de prever a taxa de produção de hidrogênio. 	<ul style="list-style-type: none"> - Não considera a dinâmica temporal das células eletrolíticas; - Complexo para implementação em conversores e sistemas de controle; - Uso de elementos ativos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dimensionamento de plantas para produção de hidrogênio.

Modelo	Vantagens	Desvantagens	Aplicabilidade
Modelo elétrico 2	- Descreve o comportamento dinâmico em variações de potência;	- Limitado a pequenas variações de potência; - Deve ser dimensionado para um único ponto de operação; - Uso de elementos não lineares aumenta.	- Análise da intermitência de FER.
Modelo elétrico 3	- Robusto e adaptável a diferentes tecnologias e escalas de potência; - Considera fenômenos termodinâmicos, ôhmicos, de ativação e dupla camada elétrica;	- Não representa completamente a dinâmica temporal das células eletrolíticas; - Complexo para implementação em conversores e sistemas de controle.	- Aplicável aos diferentes tipos de eletrólise.
Modelo elétrico 4	- Simula a dinâmica temporal sem uso de elementos ativos ou não lineares; - Aplicável em simulações de eletrólise pulsada; - Simplificado e aplicável em eletrônica de potência e sistemas de controle.	- Não captura todos os fenômenos eletroquímicos envolvidos; - Dependência dos aspectos construtivos do eletrolisador PEM.	- Simulações de eletrólise pulsada e aplicações em células PEM.
Modelo elétrico proposto	- Representa a dinâmica temporal da célula eletrolítica nos processos de carga e descarga; - Linearização do sobrepotencial de ativação e ôhmico; - Resposta em ampla faixa de potência; - Alta similaridade com os dados experimentais;	- Requer validação experimental para diferentes condições de temperatura e pressão;	- Aplicável para células alcalinas e potencialmente para outras tecnologias; - Dimensionamento de conversores e sistemas de controle; - Análise da intermitência de FER.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5 Conclusões do capítulo

Neste capítulo, quatro das principais formas de modelar eletricamente células eletrolíticas presentes na literatura foram analisadas e avaliadas. O Modelo Elétrico 1, baseado

em fundamentos físico-químicos da eletrólise, é preciso para descrever a curva I-V, mas não considera a dinâmica temporal das células eletrolíticas, sendo complexo para implementação em conversores e sistemas de controle. O Modelo Elétrico 2, dinâmico, descreve o comportamento real dos eletrolisadores em condições de variação de potência, utilizando técnicas como espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) e interrupção de corrente. No entanto, é limitado a pequenas variações de potência e requer dimensionamento para um único ponto de operação. O Modelo Elétrico 3, combina fenômenos termodinâmicos, ôhmicos, de ativação e de dupla camada elétrica, sendo robusto e adaptável a diferentes tecnologias, mas também complexo para implementação no dimensionamento de conversores e sistemas de controle. Já o Modelo Elétrico 4, foca na dinâmica temporal em uma ampla faixa de operação, sem o uso de elementos ativos, sendo simplificado e aplicável em simulações de sistemas de produção de hidrogênio, mas sem capturar todos os fenômenos eletroquímicos envolvidos.

A partir da análise dos modelos elétricos presentes na literatura, um novo modelo elétrico que descreve o comportamento dinâmico de uma célula eletrolítica foi proposto e validado por meio de experimentos em laboratório. Os resultados experimentais e de simulação demonstraram que o modelo proposto possui desempenho superior em comparação aos modelos convencionais. O modelo elétrico proposto se destacou com EMAs abaixo de 4% e EQMs abaixo de 0,5% nos testes com degrau de corrente e interrupção de corrente, indicando precisão tanto em regimes transitórios quanto permanentes. A elevada aderência aos dados experimentais é confirmada por valores de R^2 acima de 97% em todos os cenários testados, contrastando com outros modelos analisados que apresentaram valores de R^2 abaixo de 5% em alguns testes. A capacidade de reproduzir tempos característicos de carga e descarga com erros máximos inferiores a 15%, associada a erros em regime permanente de 0,01%, evidencia a eficácia do modelo em integrar fenômenos eletroquímicos transitórios e de estabilização.

Dessa forma, o modelo elétrico desenvolvido tem a capacidade e o potencial de representar com precisão a dinâmica de eletrolisadores alcalinos, incluindo o AEM e podendo ser estendido para eletrolisadores PEM, com as devidas considerações. Além disso, a não utilização de componentes ativos no modelo desenvolvido é uma vantagem que o torna uma ferramenta que otimizará o dimensionamento de novas topologias de conversores eletrônicos, onde a precisão na previsão do comportamento dinâmico do eletrolisador é essencial para operação em uma ampla faixa de potência. Outra vantagem do modelo desenvolvido é a sua aplicabilidade na modelagem de sistemas de controle para sistemas de eletrólise, considerando as condições de intermitência inerentes das fontes de energia renováveis.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um modelo elétrico dinâmico capaz de representar as características elétricas de células eletrolíticas em uma ampla faixa de operação. O modelo elétrico proposto foi idealizado para ser uma ferramenta robusta e acessível, aplicável na análise de intermitência de fontes renováveis, no dimensionamento de conversores eletrônicos de potência e em sistemas de controle. Com esse objetivo, a pesquisa combinou análises teóricas e experimentais para propor um modelo elétrico de eletrolisadores que não apenas avança o estado da arte, mas que também tem o potencial de contribuir diretamente para a viabilidade técnica e econômica da produção de H₂V.

Inicialmente, os aspectos eletroquímicos e termodinâmicos que regem o funcionamento das células eletrolíticas foram analisados. Pontos cruciais da eletrólise da água foram analisados, dentre eles: a tensão reversível, a tensão termoneutra, o efeito de dupla camada e os sobrepotenciais de ativação e ôhmico. Além disso, os diferentes tipos de eletrólise, como a alcalina clássica, a PEM, a AEM e a de óxido sólido, foram analisados para compreender as particularidades de cada processo. Outros aspectos como a integração da eletrônica de potência à sistemas de produção de H₂V e as diferentes formas de medir a eficiência do processo foram avaliadas. Esse embasamento foi crucial para compreender os elementos fundamentais que precisavam ser representados no modelo elétrico proposto e sua aplicabilidade na eletrônica de potência para o acionamento de eletrolisadores.

Em seguida, o modelo elétrico simplificado de um eletrolisador alcalino desenvolvido experimentalmente. A partir da análise dos fundamentos da eletrólise da água foi identificado que, ao considerar condições operacionais, como temperatura e pressão, constantes, é possível linearizar a curva de polarização de um eletrolisador para descrever o seu comportamento elétrico como uma fonte de tensão em série com uma resistência. Um conversor buck foi dimensionado considerando o modelo elétrico simplificado proposto como carga para validação da sua aplicabilidade em eletrônica de potência. Os resultados de simulação do conversor dimensionado demonstraram a aplicabilidade do modelo elétrico simplificado no dimensionamento de topologias de conversores eletrônicos para o acionamento de eletrolisadores.

Após o desenvolvimento do modelo elétrico simplificado, uma análise dos principais modelos elétricos estáticos e dinâmicos presentes na literatura foi realizada, com foco em avaliar a representação do comportamento da dinâmica temporal dos eletrolisadores. Com base nessa análise, um modelo que integra as vantagens dos modelos analisados, capturando o

comportamento dinâmico das células eletrolíticas em uma ampla faixa de operação, sem comprometer a simplicidade, foi desenvolvido. O modelo elétrico dinâmico proposto foi validado experimentalmente e demonstrou maior precisão em condições de variação de potência quando comparado aos modelos elétricos da literatura. Os resultados obtidos demonstram a relevância do modelo elétrico dinâmico proposto como uma ferramenta capaz de analisar o impacto da intermitência em sistemas de eletrólise integrados a fontes renováveis. Além disso, o modelo possui a robustez necessária para otimizar o dimensionamento de conversores eletrônicos de potência e sistemas de controle.

Esses fatores tornam o modelo elétrico dinâmico desenvolvido neste trabalho uma ferramenta promissora para analisar a intermitência decorrente de FER, reduzindo custos associados aos conversores e acumuladores de energia, que são essenciais para a integração eficiente de FER na produção de H₂V. Em trabalhos futuros, a proposta e desenvolvimento de novas topologias de conversores eletrônicos de potência, considerando os modelos elétricos desenvolvidos neste trabalho como carga, é pretendida.

REFERÊNCIAS

- ABDIN, Z.; WEBB, C. J.; GRAY, E. M. **Modelling and Simulation of a Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolyser Cell**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 40, n. 39, p. 13243–13257, out. 2015.
- ABDIN, Z.; WEBB, C. J.; GRAY, E. M. **Modelling and Simulation of an Alkaline Electrolyser Cell**. *Energy*, v. 138, p. 316–331, nov. 2017.
- ABRAZPE. **Os Impactos da Produção de Hidrogênio e Amônia Verde na Economia Cearense**. Associação Brasileira de Zonas de Processamento de Exportação. 9 de outubro de 2024. Disponível em: <https://www.abrazpe.org.br/index.php/2024/10/09/os-impactos-da-producao-de-hidrogenio-e-amonia-verde-na-economia-cearense/>. Acesso em: 23 dez. 2024.
- ABSOLAR. **Infográfico Energia Solar Fotovoltaica no Brasil**. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. 10 de jan. de 2025. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 16 fev. 2025.
- ALVARADO-MALDONADO, R. C.; PONCE-SILVA, M.; OLIVAR-CASTELLANOS, G. S. **Assessment of the Current and Voltage Ripples of a Buck Converter as a Driver for LEDs Using a Non-Resistive Model**. *Eng.*, v. 4, n. 2, p. 1377 – 1392, 12 maio 2023.
- AMIREH, S. F. *et al.* **Impact of Power Supply Fluctuation and Part Load Operation on the efficiency of alkaline water electrolysis**. *Journal of Power Sources*, v. 560, p. 232629, mar. 2023.
- ANANTHARAJ, S. *et al.* **Precision and Correctness in the Evaluation of Electrocatalytic Water Splitting: Revisiting Activity Parameters with a Critical Assessment**. *Energy & Environmental Science*, v. 11, n. 4, p. 744–771, 2018.
- AWE INTERNATIONAL. **Green Hydrogen to Transform Renewable Energy Landscape**. May. 2024. Disponível em: <https://www.awe.international/article/1874001/green-hydrogen-transform-renewable-energy-landscape>. Acesso em: 4 nov. 2024.
- BARD, A. J.; FAULKNER, L. R. **Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications**. 2nd ed. New York: Wiley, 2001.
- BARROS, R. L. G. *et al.* **Impact of an Electrode-Diaphragm Gap on Diffusive Hydrogen Crossover in Alkaline Water Electrolysis**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 49, p. 886–896, jan. 2024.
- BEN. **Balanço Energético Nacional 2024, Ano Base 2023**. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2024.
- BESSARABOV, D. G. *et al.* (EDS.). **PEM Electrolysis for Hydrogen Production: Principles and Applications**. 1. ed. [s.l.] CRC Press, 2016.
- BESSARABOV, D. G.; MILLET, P. **PEM Water Electrolysis**. London [England]; San Diego, CA: Academic Press, 2018.

BLAABJERG, F. *et al.* **Power Electronics Technology for Large-Scale Renewable Energy Generation**. Proceedings of the IEEE, v. 111, n. 4, p. 335 – 355, abr. 2023.

BOCKRIS, J. O.; REDDY, A. K. N.; GAMBOA-ALDECO, M. **Modern Electrochemistry**. Volume 2A, Fundamentals of electrochemistry. 2nd ed. ed. New York: Kluwer Academic, 2002.

BORISOV, G. *et al.* **Low-Cost AEM Water Electrolysis with Flat Stainless Steel Electrodes**. Bulgarian Chemical Communications, Volume 52, Issue 1, pp. 86-89, 2020.

BOTELHO, D. F.; MORAES, C. A.; DE OLIVEIRA, L. W. **Green Hydrogen Production from Hydro Spilled Energy in Brazilian Hydropower Plants**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 68, p. 575–585, maio 2024.

BRASIL. LEI Nº 14.948. Presidência da República, Casa Civil, Secretaria Especial para Assuntos Jurídicos. 2 de agosto de 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Lei/L14948.htm. Acesso em: 23 dez. 2024.

CAO, X. *et al.* **Investigation of the Hydrogen Bubble Effect on the Overpotential in an Alkaline Water Electrolyzer**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 49, p. 47-57, 2024.

CARDOSO, J. L.; PANOSSIAN, Z. **Cinética Eletroquímica: Comparação de Curvas de Polarização Teóricas com as Curvas Experimentais**. In: Conference Intercorr. 2012.

CARMO, M. *et al.* **Introduction to Liquid Alkaline Electrolysis**. US Department of Energy/Office of Energy Efficiency and Renewable Energy/Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office. 2022.

CATOLICO, A. C. C. *et al.* **Socioeconomic Impacts of Large Hydroelectric Power Plants In Brazil: a Synthetic Control Assessment of Estreito Hydropower Plant**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 151, p. 111508, nov. 2021.

CAVALIERE, P. **Water Electrolysis for Hydrogen Production**. Cham: Springer International Publishing, 2023.

CCEE. **CCEE Lança Primeira Certificação Brasileira de Hidrogênio Renovável**. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. 8 de dezembro de 2022. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/pt/web/guest/-/ccee-lanca-primeira-certificacao-brasileira-de-hidrogenio-renovavel>. Acesso em: 19 jul. 2024.

CHENG, H. *et al.* **Optimum Pulse Electrolysis for Efficiency Enhancement of Hydrogen Production by Alkaline Water Electrolyzers**. Applied Energy, v. 358, p. 122510, mar. 2024.

CHENG, H.; XIA, Y.; WEI, W. **Self-Optimization Control for Alkaline Water Electrolyzers Considering Electrolyzer Temperature Variations**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, p. 1–12, 2024.

CHEN, M. *et al.* **Overview of Power Electronic Converter Topologies Enabling Large-Scale Hydrogen Production via Water Electrolysis**. Applied Sciences, v. 12, n. 4, p. 1906, 11 fev. 2022.

DARBAND, G. B.; ALIOFKHAZRAEI, 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, out. 2019.

De SOUSA, H. P. van O. *et al.* **Simplified Electrical Model of a Bipolar Alkaline Electrolyzer Considering the Bubble Effect**. 2023 IEEE 8th Southern Power Electronics Conference and 17th Brazilian Power Electronics Conference (SPEC/COBEP). Florianopolis, Brazil: IEEE, 26 nov. 2023.

DOBÓ, Z.; PALOTÁS, Á. 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, mar. 2017.

EE TIMES. **Evaluating Hydrogen's Role in Energy Storage Solutions**. Dec. 2023. Disponível em: <https://www.eetimes.eu/evaluating-hydrogens-role-in-energy-storage-solutions/>. Acesso em: 4 nov. 2024.

EL-SHAFIE, M. **Hydrogen Production by Water Electrolysis Technologies: A Review**. *Results in Engineering*, v. 20, p. 101426, dez. 2023.

EUROPEAN COMMISSION. Joint Research Centre. **EU Harmonised Terminology for Low Temperature Water Electrolysis for Energy Storage Applications**. LU: Publications Office, 2018.

EUROPEAN UNION. **Delegated Regulation - 2023/1184 - EN - EUR-Lex**. Official Journal of the European Union. 10 Feb. 2023. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2023/1184/oj/eng. Acesso em: 23 dez. 2024.

FRANCO, A.; GIOVANNINI, C. **Recent and Future Advances in Water Electrolysis for Green Hydrogen Generation: Critical Analysis and Perspectives**. *Sustainability*, v. 15, n. 24, p. 16917, 17 dez. 2023.

GAMBOU, F. *et al.* **A Comprehensive Survey of Alkaline Electrolyzer Modeling: Electrical Domain and Specific Electrolyte Conductivity**. *Energies*, v. 15, n. 9, p. 3452, 2022.

GAUTAM, D. S.; BHAT, A. K. S. **A Comparison of Soft-Switched DC-to-DC Converters for Electrolyzer Application**. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 28, n. 1, p. 54–63, jan. 2013.

GODULA-JOPEK, A.; STOLTEN, D. (EDS.). **Hydrogen Production: by Electrolysis**. 1st edition ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2015.

GRDEŇ, M. *et al.* **Electrochemical Behaviour of Palladium Electrode: Oxidation, Electrodissolution and Ionic Adsorption**. *Electrochimica Acta*, v. 53, n. 26, p. 7583–7598, nov. 2008.

GRIGORIEV, S. A. *et al.* **Current Status, Research Trends, and Challenges in Water Electrolysis Science and Technology**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 49, p. 26036–26058, out. 2020.

GUILBERT, D.; COLLURA, S. M.; SCIPIONI, A. **DC/DC Converter Topologies for Electrolyzers: State-of-the-Art and Remaining Key Issues**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 42, n. 38, p. 23966–23985, set. 2017.

GUO, X. *et al.* **A New Multi-Mode Fault-Tolerant Operation Control Strategy of Multiphase Stacked Interleaved Buck Converter for Green Hydrogen Production**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 47, n. 71, p. 30359–30370, ago. 2022.

HART, D. W. **Eletrônica de Potência: Análise e Projetos De Circuitos**. McGraw Hill Brasil, 2016.

HASSAN, A. *et al.* **Power Electronics for Green Hydrogen Generation with Focus on Methods, Topologies, and Comparative Analysis**. Scientific Reports, v. 14, n. 1, p. 24767, 21 out. 2024.

HASSAN, Q. *et al.* **Hydrogen as an Energy Carrier: Properties, Storage Methods, Challenges, and Future Implications**. Environment Systems and Decisions, v. 44, n. 2, p. 327–350, jun. 2024.

HE, M. *et al.* **A Generic Equivalent Circuit Model for PEM Electrolyzer with Multi-Timescale and Stages Under Multi-Mode Control**. Applied Energy, v. 359, p. 122728, abr. 2024.

HENKENSMEIER, D. *et al.* **Overview: State-of-the Art Commercial Membranes for Anion Exchange Membrane Water Electrolysis**. Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage, v. 18, n. 2, p. 024001, 1 maio 2021.

HELMHOLTZ, H. **Ueber einige Gesetze der Vertheilung elektrischer Ströme in körperlichen Leitern, mit Anwendung auf die thierisch-elektrischen Versuche (Schluss.)**. Annalen der Physik, v. 165, n. 7, p. 353–377, jan. 1853.

HODSON, T. O. **Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not**. Geoscientific Model Development, v. 15, n. 14, p. 5481–5487, 19 jul. 2022.

HOLST, M. *et al.* **Cost Forecast for Low-Temperature Electrolysis-Technology Driven Bottom-Up Prognosis for PEM and Alkaline Water Electrolysis Systems**. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE: Freiburg, Germany, 2021.

HOSSAIN, M. D. B. *et al.* **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, nov. 2023.

HOU, J.; YANG, M. **Green Hydrogen Production by Water Electrolysis**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2024.

HUANG, D. *et al.* **A Multiphysics Model of the Compactly-Assembled Industrial Alkaline Water Electrolysis Cell**. Applied Energy, v. 314, p. 118987, 2022.

IEA. **CO₂ Emissions in 2023**. International Energy Agency, Paris, 2024a.

IEA. **Global Hydrogen Review 2024**. International Energy Agency, Paris, 2024b.

IEA. **Hydrogen demand – Global Hydrogen Review 2024 – Analysis**. International Energy Agency, Paris, 2024c. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/hydrogen-demand>. Acesso em: 15 dez. 2024.

IEA. **Hydrogen production – Global Hydrogen Review 2024 – Analysis**. International Energy Agency, Paris, 2024d. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/hydrogen-production>. Acesso em: 15 dez. 2024.

IEA. **State of Energy Policy 2024**. International Energy Agency, Paris, 2024e.

IEA. **World Energy Outlook 2024 – Analysis**. International Energy Agency, Paris, 2024f.

IRENA. **100% Renewable Energy Scenarios: Supporting Ambitious Policy Targets**. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2024a.

IRENA. **Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5 °C Climate Goal**. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020.

IRENA. **Hydrogen**. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2024b. Disponível em: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen>. Acesso em: 15 dez. 2024.

IRENA. **Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2024**. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2024c.

IRENA. **World Energy Transitions Outlook 2024 – 1.5 °C Pathway**. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2024d.

IRIBARREN, A. *et al.* **Modelling and Operation of 6-Pulse Thyristor Rectifiers for supplying High Power Electrolyzers**. 2022 IEEE 23rd Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). jun. 2022.

ITM. **Products | Electrolyzers | ITM**. Disponível em: <https://itm-power.com/products/>. Acesso em: 6 ago. 2024.

IYER, R.; KELLY, J.; ELGOWAINY, A. **Electrolyzers for Hydrogen Production: Solid Oxide, Alkaline, and Proton Exchange Membrane**. Energy Systems and Infrastructure Analysis Division. Argonne National Laboratory. Chicago, oct. 2022.

JAKOBSEN, R. *et al.* **Large-scale Electrolyzer Plant Integration to the Electrical Grid: Preliminary Investigation of VSC-Based Solutions**. Energy Reports, v. 9, p. 478 – 483, out. 2023.

JÄRVINEN, L. *et al.* **Experimental Study of Alkaline Water Electrolyzer Performance and Frequency Behavior Under High Frequency Dynamic Operation**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 67, p. 50–61, maio 2024.

KAPLAN, B. Y. *et al.* **Hydrogen Production Via Electrolysis: Operando Monitoring and Analyses**. Chem Catalysis, v. 3, n. 5, 2023.

KOJIMA, H. *et al.* **Influence of Renewable Energy Power Fluctuations on Water Electrolysis for Green Hydrogen Production**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 48, n. 12, p. 4572–4593, fev. 2023.

KOPONEN, J. **Review of Water Electrolysis Technologies and Design of Renewable Hydrogen Production Systems**. Master's Thesis – Lappeenranta University of Technology, LUT School of Energy Systems, Degree Programme in Electrical Engineering. 2015.

KOUNDI, M. *et al.* **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, 23 abr. 2023.

KOUROUGIANNI, F. *et al.* **A Comprehensive Review of Green Hydrogen Energy Systems**. Renewable Energy, v. 231, p. 120911, set. 2024.

KUMAR, S. *et al.* **Synthesis of Titanium (IV) Oxide Composite Membrane for Hydrogen Production Through Alkaline Water Electrolysis**. South African Journal of Chemical Engineering, v. 25, p. 54–61, jun. 2018.

KUMAR, S.; HIMABINDU, V. **Hydrogen Production by PEM Water Electrolysis – A Review**. Materials Science for Energy Technologies, v. 2, n. 3, p. 442–454, dez. 2019.

KUMAR, S.; LIM, H. **An overview of Water Electrolysis Technologies for Green Hydrogen Production**. Energy Reports, v. 8, p. 13793–13813, 2022.

LAHRICHI, A. *et al.* **Advancements, Strategies, and Prospects of Solid Oxide Electrolysis Cells (Soecs): Towards Enhanced Performance and Large-Scale Sustainable Hydrogen Production**. Journal of Energy Chemistry, v. 94, p. 688–715, jul. 2024.

LAVORANTE, M. J.; REYNOSO, C. Y.; FRANCO, J. I. **Water Electrolysis with Zirfon® as Separator and NaOH as Electrolyte**. Desalination and Water Treatment, v. 56, n. 13, p. 3647–3653, 2015.

LEONZIO, G.; SHAH, N. **Recent Advancements and Challenges in Carbon Capture, Utilization and Storage**. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, v. 46, p. 100895, abr. 2024.

LIU, L. *et al.* **Recent Advances and Challenges in Anion Exchange Membranes Development/Application for Water Electrolysis: A Review**. Membranes, v. 14, n. 4, p. 85, 5 abr. 2024.

LOPES, F. da C.; WATANABE, E. H. **Experimental and Theoretical Development of a PEM Electrolyzer Model Applied to Energy Storage Systems**. 2009 Brazilian Power Electronics Conference. set. 2009.

LV, X.-W.; TIAN, W.-W.; YUAN, Z.-Y. **Recent Advances in High-Efficiency Electrocatalytic Water Splitting Systems**. Electrochemical Energy Reviews, v. 6, n. 1, p. 23, dez. 2023.

MAREFATJOUIKILEVAEE, H.; AUGER, F.; OLIVIER, J. C. **Static and Dynamic Electrical Models of Proton Exchange Membrane Electrolysers: A Comprehensive Review**. *Energies*, v. 16, n. 18, p. 6503, 9 set. 2023.

MARTINSON, C. *et al.* **Equivalent Electrical Circuit Modelling of a Proton Exchange Membrane Electrolyser Based on Current Interruption**. 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). fev. 2013.

MERWE, V. D. J. *et al.* **Characterisation Tools Development for PEM Electrolysers**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 39, n. 26, p. 14212 – 14221, set. 2014.

MILLER, H. A. **Green Hydrogen from Anion Exchange Membrane Water Electrolysis**. *Current Opinion in Electrochemistry*, v. 36, p. 101122, dez. 2022.

MIRANDA, P. E. V. DE (ED.). **Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies: Hydrogen Production and Practical Applications in Energy Generation**. London, United Kingdom; San Diego, CA: Academic Press is an imprint of Elsevier, 2019.

NECHACHE, A.; HODY, S. **Alternative and Innovative Solid Oxide Electrolysis Cell Materials: A Short Review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 149, p. 111322, out. 2021.

NEL. **Hydrogen Production**. Disponível em: <https://nelhydrogen.com/market/hydrogen-production/>. Acesso em: 6 ago. 2024.

NI, M.; LEUNG, M. K. H.; LEUNG, D. Y. C. **Mathematical Modeling of the Coupled Transport and Electrochemical Reactions in Solid Oxide Steam Electrolyzer for Hydrogen Production**. *Electrochimica Acta*, v. 52, n. 24, p. 6707–6718, ago. 2007.

NUTTALL, L. J.; FICKETT, A. P.; TITTERINGTON, W. A. **Hydrogen Generation by Solid Polymer Electrolyte Water Electrolysis**. Em: VEZIROĞLU, T. N. (Ed.). *Hydrogen Energy*. Boston, MA: Springer US, 1975. p. 441–455.

OUIMET, R. J. *et al.* **Measurement of Resistance, Porosity, and Water Contact Angle of Porous Transport Layers for Low-Temperature Electrolysis Technologies**. *Frontiers in Energy Research*, v. 10, p. 911077, 31 maio 2022.

PALMAS, S. *et al.* **Anion Exchange Membrane: A Valuable Perspective in Emerging Technologies of Low Temperature Water Electrolysis**. *Current Opinion in Electrochemistry*, v. 37, p. 101178, fev. 2023.

PANDEY, D. K.; KUMAR, R.; KUMARI, V. **Glasgow Climate Pact and the Global Clean Energy Index Constituent Stocks**. *International Journal of Emerging Markets*, v. 19, n. 10, p. 2907–2927, 28 out. 2024.

PARACHE, F. *et al.* **Impact of Power Converter Current Ripple on the Degradation of PEM Electrolyzer Performances**. *Membranes*, v. 12, n. 2, p. 109, 19 jan. 2022.

RANA, M. M. *et al.* **Applications of Energy Storage Systems in Power Grids with and Without Renewable Energy Integration: A Comprehensive Review.** Journal of Energy Storage, v. 68, p. 107811, set. 2023.

RATIB, M. K. *et al.* **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, jan. 2024.

SALAWITCH, R. J. *et al.* **Paris Climate Agreement: Beacon of Hope.** Springer Nature, 2017.

SÁNCHEZ, L. *et al.* **Comparative Analysis of Power Converter Topologies for Hydrogen Electrolyzers.** IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, v. 12, n. 5, p. 4325–4341, out. 2024.

SHEN, F.; WANG, R.; TUCKER, M. C. **Long Term Durability Test and Post Mortem for Metal-Supported Solid Oxide Electrolysis Cells.** Journal of Power Sources, v. 474, p. 228618, out. 2020.

SIEMENS ENERGY. **Efficiency – Electrolysis White Paper.** 2021. Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/publications/whitepaper/download-electrolysis-white-paper.html>. Acesso em: 12 out.2024.

SIEMENS ENERGY. **Green Hydrogen Production.** Disponível em: <https://11nq.com/SIEMENS-ENERGY-Green-hydrogen-production>. Acesso em: 6 ago. 2024.

SIRACUSANO, S. *et al.* **Electrochemical Impedance Spectroscopy as a Diagnostic Tool in Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis.** Materials, v. 11, n. 8, p. 1368, 7 ago. 2018.

SMOLINKA, T. **Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications: Hydrogen Production by Water Electrolysis.** [s.l.] Elsevier, 2021.

SMOLINKA, T. *et al.* **The history of Water Electrolysis from Its Beginnings to the Present.** Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications. [s.l.] Elsevier, 2022. p. 83 – 164.

SRINIVASAN, S. **Fuel Cells from Fundamentals to Applications.** New York Springer, 2006.

STERN, O. **Zur Theorie Der Elektrolytischen Doppelschicht.** Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie, v. 30, n. 21–22, p. 508–516, 1924.

SUGSAISAKON, S.; KITTIPONGVISES, S. **Impacts of the Nationally Determined Contribution to the 1,5 °C Climate Goal and Net-Zero Target on Citywide Greenhouse Gas Emissions.** Environment, Development and Sustainability, 28 fev. 2024.

TENHUMBERG, N. **EU Regulatory Compliance of Renewable Fuels from Steel Mill Gases and Exhaust Gases.** Chemie Ingenieur Technik, v. 96, n. 9, p. 1299 – 1309, set. 2024.

TSOTRIDIS, Georgios *et al.* **EU Harmonised Terminology for Low-Temperature Water Electrolysis for Energy-Storage Applications.** Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2018.

TÜYSÜZ, H. **Alkaline Water Electrolysis for Green Hydrogen Production**. Accounts of Chemical Research, p. acs.accounts.3c00709, 9 fev. 2024.

ULLEBERG, O. **Modeling of Advanced Alkaline Electrolyzers: A System Simulation Approach**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 28, n. 1, p. 21–33, 2003.

URSÚA, A.; GANDIA, L. M.; SANCHIS, P. **Hydrogen Production from Water Electrolysis: Current Status and Future Trends**. Proceedings of the IEEE, v. 100, n. 2, p. 410–426, fev. 2012.

URSÚA, A.; SANCHIS, P. **Static-Dynamic Modelling of the Electrical Behaviour of a Commercial Advanced Alkaline Water Electrolyser**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 37, n. 24, p. 18598–18614, 2012.

WANG, T.; CAO, X.; JIAO, L. **PEM Water Electrolysis for Hydrogen Production: Fundamentals, Advances, and Prospects**. Carbon Neutrality, v. 1, n. 1, p. 21, dez. 2022.

WEI, P. *et al.* **Progress in Energy Storage Technologies and Methods for Renewable Energy Systems Application**. Applied Sciences, v. 13, n. 9, p. 5626, 3 maio 2023.

WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

ZENG, Y. *et al.* **Scheduling Multiple Industrial Electrolyzers in Renewable P2H Systems: A Coordinated Active-Reactive Power Management Method**. IEEE Transactions on Sustainable Energy, p. 1–15, 2024.

ZHANG, D. **Coefficients of Determination for Mixed-Effects Models**. Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics, v. 27, n. 4, p. 674 – 689, dez. 2022.

ZHANG, H.; LIN, G.; CHEN, J. **Evaluation and Calculation on The Efficiency of a Water Electrolysis System for Hydrogen Production**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 35, n. 20, p. 10851–10858, out. 2010.

ZHOU, Y. *et al.* **Effect of Electrolyte Circulation on Hydrogen-in-Oxygen in Alkaline Water Electrolysis**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 82, p. 143–149, set. 2024a.

ZHOU, Z. *et al.* **A Predictive Control Method for Multi-Electrolyzer Off-Grid Hybrid Hydrogen Production Systems with Photovoltaic Power Prediction**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 84, p. 383–393, set. 2024b.

ZOSKI, C. G. (Ed.). **Handbook of Electrochemistry**. Elsevier, 2006.