



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ALÍCIA CAVALCANTE FARIA

MODELAGEM DINÂMICA DE ELETROLISADORES PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE
ELETROMECCÂNICA DE PLANTAS DE HIDROGÊNIO VERDE

Recife
2025

ALÍCIA CAVALCANTE FARIA

MODELAGEM DINÂMICA DE ELETROLISADORES PARA ANÁLISE DE
ESTABILIDADE ELETROMECCÂNICA DE PLANTAS DE HIDROGÊNIO VERDE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Engenheiro Eletricista.

Orientador(a): Prof. Dr. José Filho da Costa Castro

Coorientador: Prof. Dr. Douglas Contente Pimentel Barbosa

Recife
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Faria, Alícia Cavalcante.

Modelagem Dinâmica de Eletrolisadores para Análise de Estabilidade Eletromecânica de Plantas de Hidrogênio Verde / Alícia Cavalcante Faria. - Recife, 2025.

73 p. : il., tab.

Orientador(a): José Filho da Costa Castro

Coorientador(a): Douglas Contente Pimentel Barbosa

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, apêndices.

1. eletrolisador PEM. 2. hidrogênio verde. 3. estabilidade eletromecânica. 4. CDUEdit. 5. ANATEM. 6. modelagem dinâmica. I. Castro, José Filho da Costa. (Orientação). II. Barbosa, Douglas Contente Pimentel . (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

ALÍCIA CAVALCANTE FARIA

MODELAGEM DINÂMICA DE ELETROLISADORES PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE ELETROMECCÂNICA DE PLANTAS DE HIDROGÊNIO VERDE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em: 11/04/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Filho da Costa Castro (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Douglas Contente Pimentel Barbosa (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. M.Sc. Artur Muniz Szpak Furtado (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Eng. M.Sc. Silas Gonzaga Tenório (Examinador Externo)
ESC Engenharia

À minha filha, Ellie, que salvou a minha vida. E àqueles que comigo partilharam a responsabilidade de cuidar da dela.

AGRADECIMENTOS

À minha família e à nova família que meu melhor amigo e companheiro de vida, Iago, me trouxe. Em especial, à minha filha Ellie e às minhas mães Josivane, Rivane e Suely. Aos meus pais Pedro, Josias e Edvar.

Agradeço aos professores que me ofereceram a oportunidade de participar do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento H2GREEN e que me acompanharam ao longo deste trabalho: Professor José Castro e Professor Douglas Contente. Estendo meus agradecimentos a todos os envolvidos no projeto.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia Elétrica, pelos ensinamentos e oportunidades ao longo do curso. Em especial, aos professores Geraldo Torres, Vicente Simoni e Ronaldo Aquino.

Sou especialmente grata aos meus colegas da SM Energy e ao Silas Gonzaga, pelo conhecimento compartilhado ao longo dessa jornada.

Aos amigos que fiz durante o curso, com destaque para o “trio de automação” e o grupo insólido. À Laura e sua família, meu sincero agradecimento.

Tudo o que temos de decidir é o que fazer com o
tempo que nos é dado.
(Gandalf)

RESUMO

A crescente participação de fontes renováveis intermitentes no Sistema Interligado Nacional (SIN) tem ampliado os desafios operacionais relacionados à estabilidade eletromecânica e ao aproveitamento do excedente energético. Nesse contexto, os eletrolisadores de membrana de troca protônica (PEM) surgem como alternativa promissora para conversão de energia excedente em hidrogênio verde (H2V), contribuindo para a flexibilização da rede. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo dinâmico preliminar de eletrolisador PEM compatível com o software ANATEM, ferramenta utilizada nos estudos de estabilidade do sistema elétrico brasileiro, com ênfase para as células de produção. A metodologia compreendeu a análise de modelos da literatura, a simulação do comportamento dinâmico em MATLAB/Simulink e a implementação no ambiente CDUEdit, com posterior exportação para o ANATEM. Os resultados indicam que a constante de tempo associada ao modelo permanece inalterada frente a diferentes formas de associação dos eletrolisadores, demonstrando a escalabilidade da estrutura. O modelo desenvolvido, embora ainda em fase prototípica, oferece subsídios para investigações futuras e pode ser integrado a estudos que visem avaliar a atuação de plantas de eletrólise na mitigação de rampas de carga e no suporte à estabilidade da rede elétrica.

Palavras-chave: eletrolisador PEM; hidrogênio verde; estabilidade eletromecânica; CDUEdit; ANATEM; modelagem dinâmica.

ABSTRACT

The increasing integration of intermittent renewable sources into the Brazilian National Interconnected Power System (SIN) has intensified challenges related to electromechanical stability and the efficient use of surplus energy. In this context, Proton Exchange Membrane Electrolyzers (PEMELs) have emerged as a promising alternative for converting surplus electricity into green hydrogen (H₂V), thus contributing to grid flexibility. This work presents the development of a preliminary dynamic model of a PEM electrolyzer, compatible with the ANATEM software used in stability studies of the Brazilian power system. The methodology involved the analysis of literature-based models, simulation of dynamic behavior in MATLAB/Simulink, and implementation within the CDUEdit environment, followed by export to ANATEM. Results show that the model's time constant remains consistent across different equipment configurations, confirming its scalability. Although still in a prototypical stage, the proposed model provides a foundation for future studies and can be incorporated into simulations that assess the role of electrolyzer units in load ramp mitigation and support for grid stability.

Keywords: PEM electrolyzer; green hydrogen; electromechanical stability; CDUEdit; ANATEM; dynamic modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Emissões de dióxido de carbono equivalente do Brasil em 2024.	19
Figura 2 - Capacidade instalada no SIN 2025/2029.....	23
Figura 3 - Curva do pato.	24
Figura 4 - Topologia simplificada do sistema.	26
Figura 5 - Condição operacional.	27
Figura 6 - Desconexão da carga.	28
Figura 7 - Diferentes trajetórias para o ângulo do rotor.....	29
Figura 8 - Esquema básico eletrólise.	32
Figura 9 - Camadas de isolamento no eletrolisador PEM	34
Figura 10 - Esquema de eletrólise no PEM.....	35
Figura 11 - Identificação da constante de tempo.....	36
Figura 12 - Modelo elétrico equivalente.	37
Figura 13 - Modelo elétrico ajustado.	41
Figura 14 - Primeira parte do diagrama.....	46
Figura 15 - Segunda parte do diagrama.....	47
Figura 16 - Circuito do eletrolisador.	49
Figura 17 - Subsistema formado por cem eletrolisadores ligados em série.	50
Figura 18 - Subsistemas ligados em paralelo.....	51
Figura 19 - Estrutura da configuração B em detalhes.	51
Figura 20 - Aplicação de degrau de corrente na estrutura original.....	52
Figura 21 - Ajuste para a estrutura original no simulink.	53
Figura 22 - Diagrama de blocos do sistema.	54
Figura 23 - Arquivo .stb	55
Figura 24 - Resposta ao degrau para configuração A.....	56
Figura 25 - Resposta ao degrau para a configuração B.	57
Figura 26 - Resposta ao degrau para a estrutura original.	58
Figura 27 - A condutância como saída do sistema.....	59
Figura 28 - Simulação no PlotCepel.....	60
Figura 29 - Modelo do eletrolisador como uma carga dinâmica.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais aplicações PtX.	21
Tabela 2 - Parâmetros dos circuitos RC paralelo.	38
Tabela 3 - Parâmetros do modelo.	39
Tabela 4 - Parâmetros atualizados.	41
Tabela 5 - Blocos IMPORT e EXPORT para cargas dinâmicas.	44
Tabela 6 - Parâmetros em pu.	46
Tabela 7 - Entradas do diagrama de blocos.	47
Tabela 8 - Parâmetros do eletrolisador.	49
Tabela 9 - Comparação entre a constante de tempo de cada configuração.	58
Tabela 10 - Códigos de execução utilizados.	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEL	<i>Alkaline Electrolyser</i>
ANATEM	Análise de Transitórios Eletromecânicos
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BoP	<i>Balance of Plant</i>
CAISO	<i>California Independent System Operator</i>
CDU	Controles Definidos pelo Usuário
CDUEdit	Editor de Controladores Definidos pelo Usuário
CO ₂ e	Dióxido de Carbono Equivalente
COP	Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
G20	Grupo dos 20
GDL	<i>Gas Diffusion Layer</i>
GEE	Gases do Efeito Estufa
H2V	Hidrogênio Verde
IEA	<i>International Energy Agency</i>
LCK	Lei das Correntes de Kirchhoff
LSR	<i>Least Squares Regression</i>
NDC	<i>National Determined Contribution</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PEM	<i>Proton Exchange Membrane</i>
PEMEL	<i>Proton Exchange Membrane Electrolyser</i>
PARPEL	Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo do SIN
PNE	Plano Nacional de Energia
PtX	<i>Power to X</i>
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SIN	Sistema Interligado Nacional
SOEL	<i>Solid Oxide Electrolyser</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Geral	16
1.1.2	Específicos	16
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
2	CADEIAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO	18
2.1	FONTES DE BAIXO CARBONO E ELETRIFICAÇÃO	20
2.2	USO EFICIENTE DOS RECURSOS ENERGÉTICOS	21
2.3	ESTABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	25
2.4	ELETROLISADORES	31
2.4.1	O Eletrolisador PEM	33
2.4.2	Modelagem Elétrica	35
2.4.2.1	<i>Ânodo e Cátodo como Circuitos RC Paralelo</i>	37
2.4.2.2	<i>Membrana PEM como Resistência Interna</i>	38
2.4.2.3	<i>Representação do Sistema em Espaço de Estados</i>	39
2.4.2.4	<i>Modelo com apenas um loop RC</i>	41
2.5	MODELAGEM NO CDUEDIT	42
2.5.1	Blocos no CDUEdit	44
2.5.2	Diagrama de Blocos	46
3	METODOLOGIA – REPRESENTAÇÃO DE ELETROLISADORES	48
3.1	CONSTANTE DE TEMPO	48
3.1.1	Configuração A	50
3.1.2	Configuração B	51
3.1.3	Estrutura Original	52
3.2	AJUSTE PARA SAÍDA	53
4	RESULTADOS	56
5	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	62
	REFERÊNCIAS	64
	APÊNDICES	66

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda global por energia elétrica está diretamente relacionado ao avanço econômico e social dos países. À medida que nações se industrializam e expandem suas áreas urbanas, o consumo de energia tende a aumentar consideravelmente (VAZ e FARRET, 2020). No entanto, a forte dependência dos combustíveis fósseis tem gerado preocupações ambientais significativas, como o agravamento das mudanças climáticas, impulsionando a transição para fontes de energia mais sustentáveis. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA - *International Energy Agency*), a demanda mundial por petróleo, gás e carvão deve atingir seu pico até o final desta década, dando início a uma nova fase no setor energético, caracterizada pela redução gradual do uso de combustíveis fósseis e pela maior participação da eletricidade na matriz energética global (IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2024).

Nesse contexto, a expectativa é de que fontes renováveis desempenhem um papel central na matriz energética do futuro. Entretanto, fontes como a solar e a eólica apresentam um desafio inerente: sua intermitência, uma vez que sua geração depende de variáveis climáticas. Para minimizar os impactos e assegurar a estabilidade do sistema elétrico, soluções de armazenamento de energia, como baterias, têm sido alvo de pesquisas. Entre essas alternativas, o Hidrogênio Verde (H2V) desponta como uma solução promissora. Obtido a partir da eletrólise da água utilizando eletricidade proveniente de fontes renováveis, o H2V pode ser armazenado e convertido novamente em eletricidade ou empregado em processos industriais, aumentando a flexibilidade e a resiliência do sistema energético.

Com a matriz energética predominantemente renovável, o Brasil possui um potencial significativo para a produção de hidrogênio verde. Além disso, a integração de plantas de eletrólise ao Sistema Interligado Nacional (SIN) pode contribuir para a absorção do excedente energético gerado por fontes intermitentes, especialmente durante períodos de baixa demanda. Essa estratégia é capaz de auxiliar na estabilidade do sistema elétrico e evitar desperdícios de energia, complementando a geração renovável existente.

Em (SILVA, 2024), são discutidas as tecnologias de produção, armazenamento, transporte e distribuição do H₂V. Com destaque para o potencial estratégico do Brasil para se consolidar como líder no mercado global de hidrogênio verde, aproveitando sua capacidade instalada de geração renovável e a carência de carga para acomodação dos momentos de alta geração do SIN. Além disso, são realizadas simulações que incorporaram novos pontos de carga no sistema elétrico, representando unidades de produção de H₂V. Os resultados mostram que essa abordagem contribui para reduzir sobrecargas na transmissão e otimiza o uso de energia que poderia ser restringida de acordo com as limitações sistêmicas de exportação e controle de frequência. Uma das propostas de continuidade desse estudo é a expansão das simulações para o regime dinâmico, a fim de avaliar o impacto na resposta do sistema durante o período transitório.

Considerando que o H₂V pode ser produzido através de eletrolisadores e, embora existam diversas propostas e desenvolvimentos na literatura para modelagem desse equipamento, a aplicação desses modelos em estudos de estabilidade eletromecânica no Brasil enfrenta desafios específicos. O principal obstáculo é a ausência de um modelo de eletrolisador nos conjuntos de modelos nativos (built-in) do software Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM), ferramenta utilizada no país para simulações de estabilidade do SIN. Essa limitação impede uma análise mais aprofundada da interação dos eletrolisadores com o sistema elétrico e suas possíveis contribuições para a estabilidade da rede. A proposta do presente desenvolvimento é mapear a dinâmica das plantas de produção descritas em (SILVA, 2024) com base na dinâmica dos eletrolisadores, permitindo a investigação de seus impactos à rede e avaliando seu potencial como elemento de suporte ao atendimento às rampas de carga comumente experimentadas pelo SIN.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Aprofundar a compreensão sobre as particularidades do Eletrolisador de Membrana de Troca Protônica (PEMEL - *Proton Exchange Membrane Electrolyser*), com ênfase nos aspectos que influenciam sua dinâmica.

1.1.2 Específicos

- Analisar os principais modelos para dinâmica de eletrolisadores de grande porte encontrados na literatura.
- Analisar as particularidades das ferramentas utilizadas nos estudos de transitórios eletromecânicos e como se relacionam com os modelos mapeados.
- Desenvolver um modelo preliminar para representar esse tipo de carga.

1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos e um anexo. A introdução apresenta a contextualização do problema a ser investigado, destacando a crescente demanda por energia elétrica, a intermitência associada às fontes renováveis e o papel estratégico do hidrogênio verde como elemento de suporte à estabilidade do Sistema Interligado Nacional.

O segundo capítulo é dedicado ao levantamento e análise dos principais conceitos necessários à compreensão da proposta. Inicialmente, a abordagem discute as diretrizes da descarbonização e os desafios enfrentados pela transição energética, com ênfase nas soluções *Power-to-X* e no papel da eletrificação dos setores. Em seguida, é introduzido o conceito de estabilidade do Sistema Elétrico de Potência (SEP), com foco na resposta do sistema frente a grandes perturbações e no impacto da redução da inércia decorrente da elevada penetração de fontes intermitentes. A

seção discute sobre diferentes tipos de eletrolisadores, dando ênfase ao PEMEL, suas propriedades físico-química, funcionamento e modelos elétricos propostos na literatura, com destaque para aqueles que representam adequadamente sua resposta transitória. O capítulo também apresenta as ferramentas ANATEM e CDUEdit, descrevendo algumas funcionalidades e principais características. Finalizando com as adaptações necessárias no diagrama de blocos, que incluem a definição de variáveis de saída compatíveis com a estrutura de carga dinâmica, a montagem do arquivo .stb e a utilização dos principais códigos de execução da simulação.

O Capítulo 3 descreve a abordagem adotada para construção e avaliação do modelo. Neste capítulo são apresentados os casos simulados no ambiente MATLAB/Simulink, com diferentes arranjos de eletrolisadores de 400 W em série e paralelo, buscando identificar a influência da estrutura sobre a constante de tempo.

Em seguida, o quarto capítulo reúne e discute os resultados obtidos durante as simulações, com ênfase na validação da constância da constante de tempo do eletrolisador, independentemente da associação dos módulos.

Por fim, o capítulo 5 discute a viabilidade de modelar eletrolisadores PEM como cargas dinâmicas em estudos de estabilidade eletromecânica e propõe diretrizes para continuidade da pesquisa, incluindo a expansão do modelo para sistemas conectados à rede, simulações com distúrbios reais e avaliação da localização estratégica das plantas de hidrogênio verde no sistema.

2 CADEIAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

O planeta atingiu a era de Ebulição Global, caracterizada por eventos climáticos extremos resultantes do agravamento do Aquecimento Global. Com impactos significativos nos mais diversos âmbitos, este marco representa a transformação de exceções catastróficas em eventos cotidianos: ondas de calor mais severas e frequentes, com recordes de altas temperaturas sendo quebrados constantemente exemplificam bem essa questão (AMNUAYLOJAROEN, 2023).

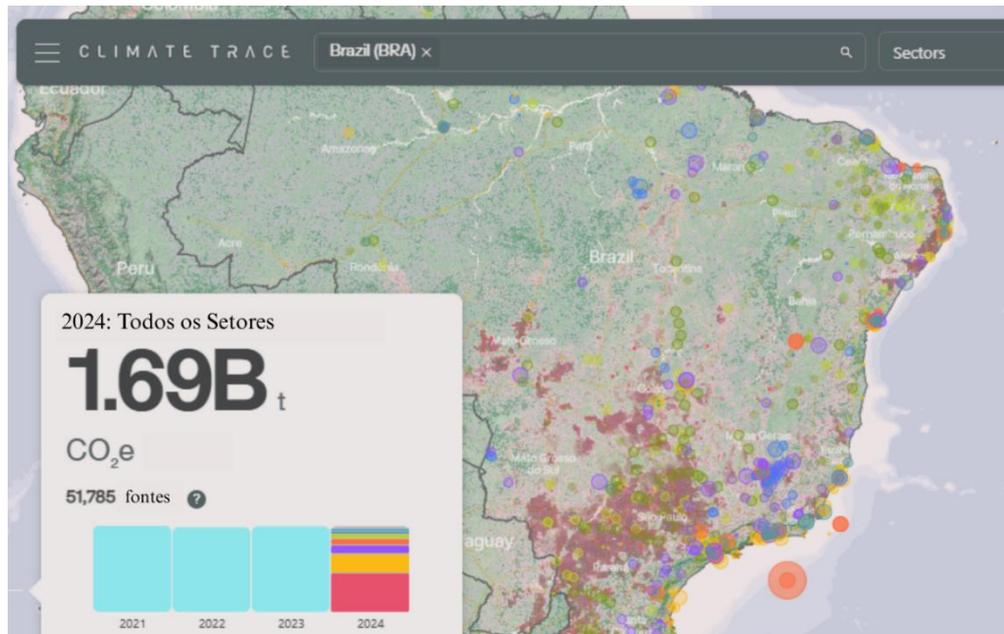
A principal medida de combate ao cenário apresentado é a redução das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) (HYDROGEN COUNCIL, 2020). Diante da perspectiva de limitar o aumento da temperatura a 1,5 °C em relação aos níveis pré-industriais, o estabelecimento da Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP) contabiliza uma série de debates e metas definidas como resultado da mobilização internacional contra as mudanças climáticas. Os destaques ao longo dessa jornada começam com o Protocolo de Kyoto durante a COP3, em 1997, no prelúdio do controle das emissões de GEE (UNFCCC, 2008). Seguindo com a meta limítrofe supracitada para aumento da temperatura, estabelecida no Acordo de Paris durante a COP21, em 2015.

Por fim, a COP29, do ano de 2024, traz a nova submissão da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do governo brasileiro, com compromisso assumido para 2035 que prevê redução de 59% a 67% da emissão de gases do efeito estufa com relação aos níveis de 2005. Dentre as estratégias discutidas no documento estão alguns direcionamentos sobre o Hidrogênio de Baixo Carbono, como as regulamentações para produção do ativo e para o mercado de carbono, além de mencionar incentivos para o desenvolvimento de tecnologias relacionadas (UNFCCC - CONFERENCE OF THE PARTIES, 2016) (MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA, 2024).

Dados extraídos da ferramenta Climate TRACE, com interface apresentada na Figura 1, apontam o G20 como responsável por mais de 70% das emissões globais de dióxido de carbono equivalente (CO₂e). Mais especificamente, o Brasil tem participação de 2,75% dessas emissões, justificando a relevância no posicionamento e comprometimento do país (Climate TRACE). Considerando que dentre as principais

atividades associadas à liberação de GEE, está a utilização de combustíveis fósseis, o papel da transição energética se torna evidente no processo de controle das emissões.

Figura 1 - Emissões de dióxido de carbono equivalente do Brasil em 2024.



Fonte: adaptado de (Climate TRACE)

O “Uso eficiente dos recursos energéticos” é um dos elementos apontados na base da descarbonização das matrizes, no relatório final do Plano Nacional de Energia (PNE) (EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020), que se intersecciona com o conteúdo apresentado neste trabalho, onde são elencadas sugestões para gestão do excedente de energia renovável predominantemente proveniente de fontes intermitentes, como eólica e solar. Outro tópico em comum é o de “Fontes de baixo carbono e eletrificação”, visto que a proposta do trabalho é pautada na rota verde para a produção do Hidrogênio de Baixo Carbono, advindo da eletrólise da água a partir de fontes renováveis, e com reconhecido potencial para atuar como vetor energético, substituindo combustíveis fósseis em suas mais diversas aplicações (IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2024).

2.1 Fontes de Baixo Carbono e Eletrificação

A eletrificação dos setores é considerada uma estratégia fundamental para a descarbonização, especialmente nos chamados setores de difícil abatimento (*hard-to-abate*), como as indústrias de aço, cimento, petroquímica, transporte marítimo e aviação. Esses setores enfrentam desafios significativos na redução de emissões devido à forte dependência de combustíveis fósseis e à complexidade de seus processos produtivos. Dentre as principais abordagens para viabilizar essa transição, destaca-se a substituição da queima direta de combustíveis fósseis por eletricidade gerada a partir de fontes renováveis, além do investimento contínuo em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitem a eletrificação de processos atualmente inviáveis. O avanço dessa estratégia também exige a implementação de políticas públicas e incentivos governamentais, como subsídios e créditos de carbono, para estimular a adoção de soluções elétricas e descarbonizadas. Além disso, o desenvolvimento de uma infraestrutura adequada, incluindo redes elétricas inteligentes e sistemas eficientes de armazenamento de energia, é essencial para garantir a segurança e a estabilidade do fornecimento elétrico em larga escala (IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2024; EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020).

Nesse contexto, são introduzidas as tecnologias *Power-to-X* (PtX), pois remetem ao conceito da conversão de eletricidade em outras formas de energia. De modo mais específico, esse tipo de tecnologia pode ser aplicado para transformar eletricidade proveniente de fontes renováveis em combustíveis ou produtos químicos sustentáveis, como o hidrogênio, facilitando a descarbonização de setores onde a eletrificação direta é desafiadora (IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020). O destaque atual entre as tecnologias PtX é o hidrogênio de baixo carbono. A Tabela 1 reúne suas principais aplicações, de modo que é possível identificar seu nível de relevância (MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021).

Tabela 1 - Principais aplicações PtX.

Designação	Descrição
Power-to-Power	Reconversão do hidrogênio verde em eletricidade para uso na rede elétrica. A reconversão pode ser feita por meio de células a combustível, turbinas ou geradores movidos a hidrogênio.
Power-to-Gas	Produção de gases utilizando H ₂ V em processos de combinação química. Exemplos incluem a produção de metano sintético a partir da reação entre H ₂ e CO ₂ , além da injeção de hidrogênio diretamente na rede de gás natural.
Power-to-Mobility	Uso da energia elétrica para abastecimento de veículos. Isso pode ocorrer diretamente pelo carregamento de baterias ou indiretamente pelo uso de H ₂ V em células a combustível para alimentar veículos elétricos.
Power-to-Fuel	Produção de combustíveis líquidos sintéticos a partir do H ₂ V combinado com CO ₂ . Esse processo gera óleo sintético, que pode ser utilizado para produzir gasolina sintética, diesel sintético ou querosene de aviação sintético.

Fonte: elaboração própria a partir de (MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021)

Um exemplo de como incentivos governamentais são responsáveis por impulsionar a transição energética é o caso da estratégia Power-to-X da Dinamarca. Com a meta de instalar entre 4 e 6 GW de capacidade de eletrólise para a produção de hidrogênio verde até 2030, o governo dinamarquês lançou um edital de 1,25 bilhão de coroas dinamarquesas em abril de 2023. O objetivo do investimento é apoiar a industrialização e a escalabilidade da produção de PtX no país, reduzindo os custos associados ao H₂V (IEA - INTERNACIONAL ENERGY AGENCY, 2023).

2.2 Uso Eficiente dos Recursos Energéticos

Com um território extenso e condições naturais privilegiadas, o Brasil é apontado no Relatório Final do PNE 2050 (EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020) como detentor de potencial energético capaz de superar a demanda projetada

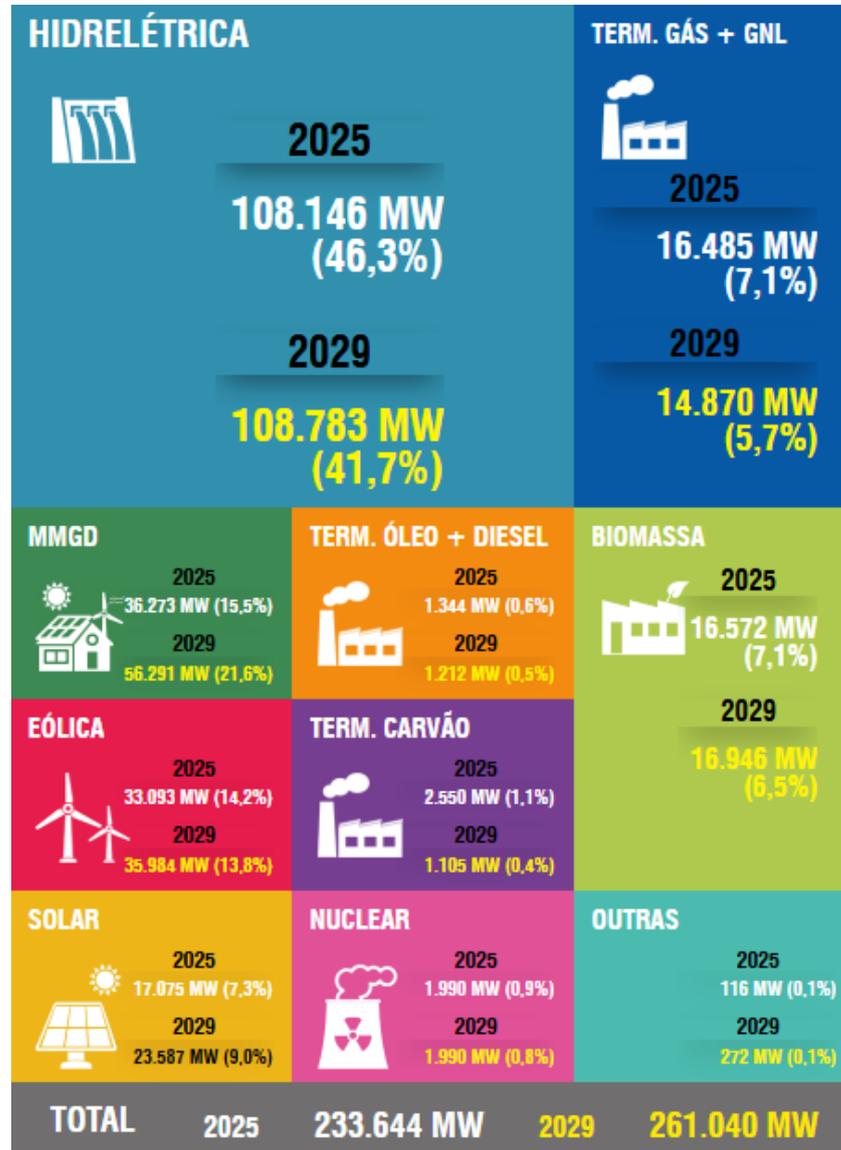
para as próximas décadas. Inserindo o país em um contexto de abundância energética e sugerindo sua recolocação no cenário global como um ofertante líquido de energia, resultado da diversidade de fontes renováveis disponíveis.

Analisando brevemente o histórico do setor elétrico brasileiro, de acordo com (EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020) é possível notar alguns mecanismos que culminaram em uma matriz baseada em fontes renováveis de energia, como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), o *net metering* (Sistema de Compensação de Energia, Resolução ANEEL nº 482/2012), os incentivos para estabelecimento da geração distribuída, especialmente energia solar fotovoltaica, os leilões de energia renovável etc. Essa característica tem duas principais implicações: o país assume uma posição privilegiada no que diz respeito à produção do hidrogênio verde e enfrenta aumento nos níveis de vertimento, representando ineficiência no manejo de excedentes de energia. Para reforçar os impactos da segunda implicação, o Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo do SIN (PARPEL) (ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2024) aponta a ausência de carga prevista para acomodar a geração renovável, trazendo outro ponto de destaque com a necessidade de aumento da flexibilidade do sistema quanto aos efeitos da rampa de geração a ser compensada com a saída da geração fotovoltaica no final do dia.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) projeta que a capacidade instalada total do Sistema Interligado Nacional aumentará de cerca de 233.000 MW em fevereiro de 2025 para pouco mais de 261.000 MW em dezembro de 2029, com expansão significativa das fontes renováveis e redução na participação do petróleo e seus derivados na oferta interna total de energia do SIN, maiores detalhes sobre os números podem ser conferidos na Figura 2. Ademais, há a tendência de diminuição da representatividade de gerações como hidrelétrica e térmica, principais responsáveis pelo fornecimento natural de inércia ao sistema, através das massas girantes presentes em máquinas síncronas. Enquanto isso, a geração eólica e solar no SIN tem desafios operacionais associados, devido à sua dependência de variáveis ambientais e à sazonalidade. Durante o dia, a geração solar atinge picos ao meio-dia, enquanto a eólica tem maior produção no fim da tarde e madrugada. Apesar da complementariedade entre essas fontes, a variação da geração exige maior

flexibilidade do sistema elétrico (ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2025; RAMPINELLI e JUNIOR, 2012).

Figura 2 - Capacidade instalada no SIN 2025/2029



Fonte: Retirado de (ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2025)

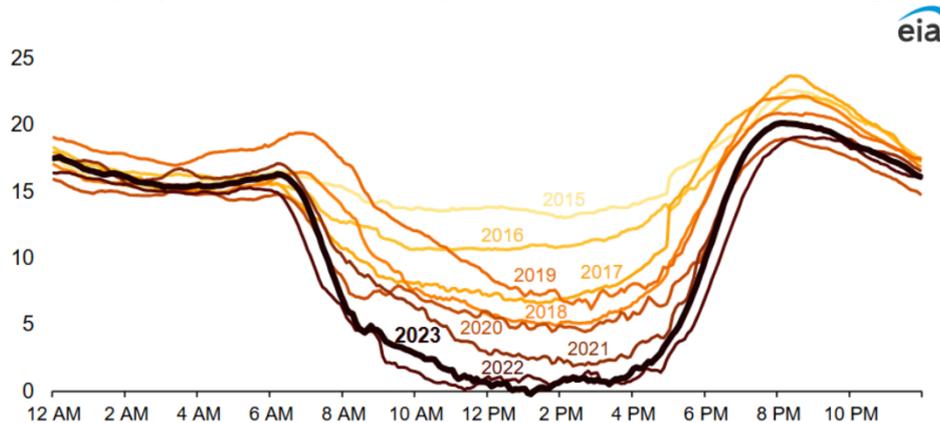
Comparando com o cenário global, de acordo com (ZHANG, WANG, *et al.*, 2021), o total de energia eólica e solar fotovoltaica desperdiçado na China entre 2015 e 2018 apresenta volume equivalente à produção anual de eletricidade da Tailândia. Refletindo um dos grandes desafios da alta integração de fontes renováveis na matriz energética: a necessidade de flexibilidade na rede elétrica para equilibrar oferta e

demanda. Outro fenômeno de mesma causa é identificado pelo *California Independent System Operator* (CAISO) (ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION - EIA, 2023).

O gráfico presente na Figura 3 recebe a designação de "curva do pato" e apresenta a interação da demanda elétrica ao longo do dia com o comportamento da geração solar, denunciando como a tendência de inserção de fontes intermitentes sem estratégias de manejo apropriadas pode tornar a rampa de compensação cada vez mais íngreme. Esse evento não se restringe apenas à Califórnia, foi classificado como característica inerente à sistemas onde a ascensão da capacidade de produção de energia solar tornou sua participação na geração total sobressalente em relação às fontes convencionais. O ponto de maior atenção reside na queda abrupta da produção fotovoltaica ao entardecer, coincidindo com o momento de pico da demanda da rede: a interrupção repentina do fornecimento pode causar queda na frequência da rede, visto que a inércia dos geradores síncronos impede a resposta imediata de compensação e o problema se torna mais crítico ao considerar que isso ocorre no momento onde a demanda por potência ativa está em alta (KUNDUR, 1994).

Figura 3 - Curva do pato.

Curva do pato da Califórnia está se aprofundando
CAISO: Carga líquida mínima diária a cada primavera (março-maio, 2015–2023), em gigawatts.



Fonte: adaptado de (California ISO)

2.3 Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência

Estabilidade de maneira geral é a habilidade de um sistema manter o equilíbrio perante pequenas ou grandes perturbações. Considerando a condição inicial, o equilíbrio alcançado pós-perturbação pode ser o mesmo, em sua vizinhança, ou um novo ponto de equilíbrio. Quando o sistema oscila em torno de sua condição de equilíbrio inicial, retornando ao mesmo ponto ou para algum ponto em sua vizinhança, é possível concluir que o sistema é localmente estável, ou estável para pequenas perturbações. Um exemplo característico desse tipo de perturbação é a variação periódica da carga durante o dia (KUNDUR, 1994).

Por outro lado, a estabilidade transitória está associada a perturbações grandes e rápidas, como perda súbita de uma grande carga ou perda de uma unidade de geração. Se o sistema é estável para esse caso, grandes oscilações de potência deslocam o novo ponto de operação para uma região distante do ponto inicial (KUNDUR, 1994).

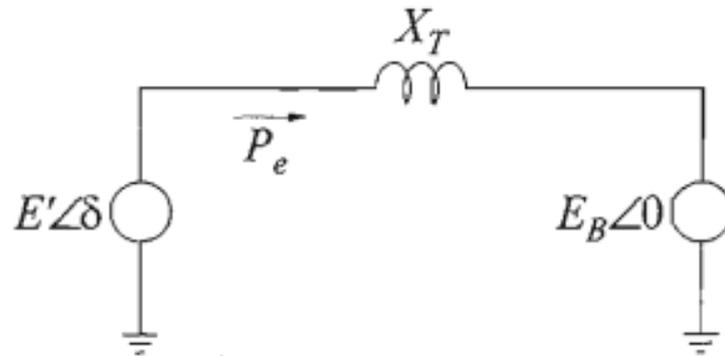
Para melhor compreensão da problemática discutida no tópico anterior, a expressão (2.1) descreve a interação entre a potência mecânica fornecida ao gerador e a potência elétrica entregue à carga (KUNDUR, 1994):

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.1)$$

Onde, H é a constante de inércia, em $MW.s/MVA$. t é o tempo em segundos e δ é o ângulo do rotor em radianos elétricos. A potência mecânica fornecida ao gerador P_m , em pu e a potência elétrica exportada para a rede P_e , também em pu.

A simplificação adotada para abordagem do assunto é capaz de explorar e exemplificar os principais conceitos envolvidos na análise, consistindo em considerar a topologia de circuito elétrico da Figura 4. Nesse caso, as unidades de geração estão concentradas e representadas por uma tensão com módulo E' e fase δ , o fluxo de potência entregue a carga P_e saindo do que seriam os terminais do gerador, transitando através da reatância X_T até o restante do sistema elétrico modelado como uma barra infinita com módulo de tensão E_B e fase 0.

Figura 4 - Topologia simplificada do sistema.



Fonte: retirado de (KUNDUR, 1994)

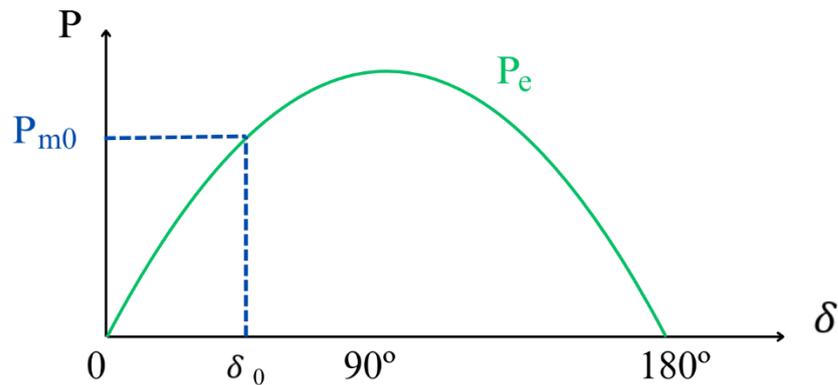
Segundo (KUNDUR, 1994), a estabilidade do sistema de potência depende diretamente da capacidade das máquinas síncronas de permanecerem em sincronismo diante de perturbações transitórias severas, como perda de uma parcela significativa da geração e conexão ou desconexão de grandes cargas. Essa condição é influenciada pela dinâmica dos ângulos dos rotores do gerador e pelas relações entre potência e ângulo, assim como explorado na expressão (2.1).

Prosseguindo com a análise de estabilidade, a condição operacional é tal que P_e deve ser igual a P_m durante o regime permanente, desde que a geração receba uma entrada de potência mecânica P_m . A relação da potência nos terminais do gerador com o ângulo δ é apresentada em (2.2) (KUNDUR, 1994).

$$P_e = P_{max} \sin\delta \quad (2.2)$$

A condição operacional descrita pode ser melhor compreendida através da Figura 5, ressaltando a característica senoidal de P_e de acordo com a escolha de P_m e suas respectivas relações com o ângulo do rotor. Considerando que esse é o cenário imediatamente anterior à desconexão de uma carga de grande porte, o efeito para o sistema é a redução na demanda de potência nos terminais do gerador, conseqüentemente diminuindo o valor de P_{max} e “achatando” a curva de P_e .

Figura 5 - Condição operacional.

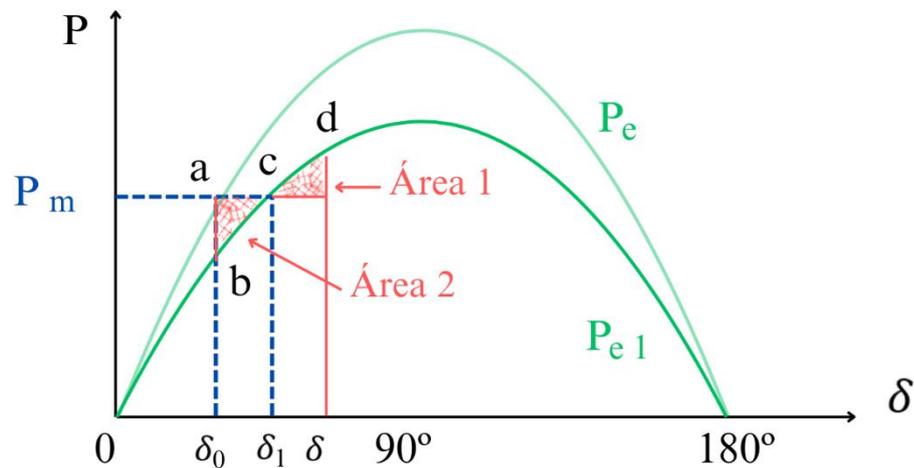


Fonte: elaboração própria a partir de (KUNDUR, 1994)

É possível acompanhar a evolução gráfica do caso na Figura 6, onde o ponto inicial é sinalizado pela letra **a**. Ao desconectar a carga, a curva de potência exportada deixa de ser P_e e passa a ser P_{e1} , nesse momento é esperado que o ângulo do rotor mude do valor inicial δ_0 para δ_1 , sendo esse o novo ponto de operação do sistema. Essa mudança é postergada devido sua inércia: ao mudar de curva, variando subitamente do ponto **a** até o ponto **b**, P_m passa a ser superior à potência exportada para a carga (P_{e1}). De acordo com a expressão (2.1), o rotor passa a acelerar positivamente até alcançar o novo ponto de equilíbrio em **c**.

Devido a energia cinética acumulada na área **2**, em seu período de aceleração, o rotor continua com esse movimento até atingir o ponto **d**, descrevendo a trajetória onde toda a energia presente na área **2** foi transferida para a área **1**. Nesse ponto, P_{e1} é superior a P_m , implicando que a aceleração imposta é negativa e o ângulo do rotor deve transitar de δ_m até δ_1 , onde o ponto de operação navega de **d** até **c**. Caso o amortecimento seja desconsiderado, o rotor continuaria oscilando com amplitude constante entre os pontos **b-c-d** para um valor definido de δ_m , ângulo de máxima excursão, tal que a área **1** seja igual a área **2**, essa condição é designada “Critério das Áreas Iguais” e se apoia na premissa de que a energia do sistema é conservada. Isso significa que há um limite inferior para o novo arranjo de potência exportada à carga, se o limite for ultrapassado a área **1** será fatalmente inferior a área **2** e o rotor continuaria acelerando indefinidamente, acarretando a perda de sincronismo (KUNDUR, 1994).

Figura 6 - Desconexão da carga.



Fonte: elaboração própria a partir de (KUNDUR, 1994)

O caso discutiu a desconexão de uma carga de grande porte. Se o evento considerado fosse a conexão do mesmo tipo de carga, uma análise semelhante poderia ser aplicada: existiria um valor de limite superior para P_e tal que o ângulo de máxima excursão δ_m fosse capaz de definir uma trajetória onde a área que representa a energia cinética a ser transmitida ao sistema fosse igual a área compreendida no período de desaceleração imposta pela condição momentânea em que P_e foi superior a P_m .

Um aspecto interessante a ser notado é que os efeitos na frequência da rede, introduzidos anteriormente durante as discussões sobre o fenômeno da curva do pato, na Figura 3, podem ser facilmente associados às análises recém-construídas através da relação (2.3).

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega_r \quad (2.3)$$

Ainda de acordo com (KUNDUR, 1994), ω_r é a velocidade angular do rotor, em radianos elétricos por segundo. Visto que a frequência está relacionada com a velocidade angular de acordo com (2.4):

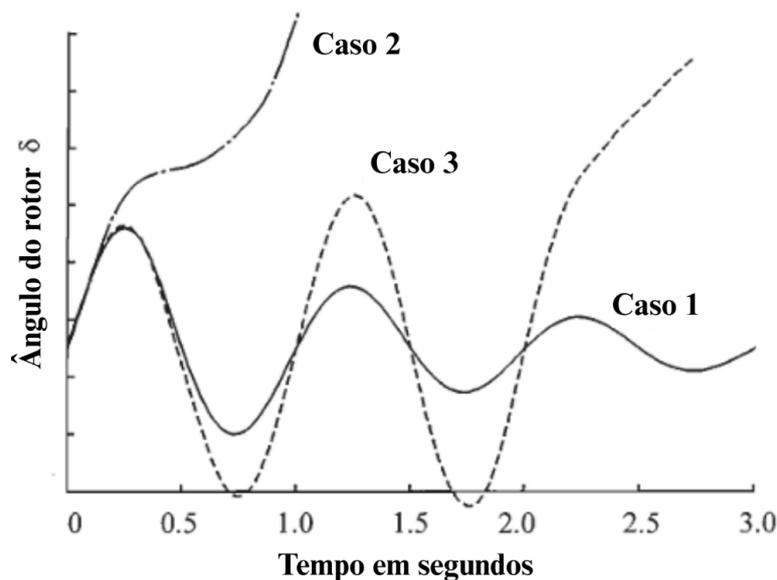
$$\omega = 2\pi f \quad (2.4)$$

No momento de aceleração negativa ($\frac{d^2\delta}{dt^2} < 0$) é esperado o efeito de redução da frequência. Isso acontece quando P_m é inferior a P_e , assim como no ponto central da análise sobre a curva do pato.

Em contrapartida, cenários onde a produção de energia renovável, como solar e eólica, excede a capacidade de absorção do sistema ($P_m > P_e$), a fim de manter os limites sistêmicos de transmissão e controle da frequência, são aplicados cortes de geração. Esse fenômeno é designado **curtailment** e se intensifica à medida que cresce a participação de fontes intermitentes (SATTAR, GHOSH, *et al.*, 2024).

Caso esse tipo de medida não seja implementado, dependendo da intensidade e duração do desequilíbrio, o sistema pode ser incapaz de restabelecer o sincronismo entre suas unidades geradoras: os ângulos dos rotores de diferentes máquinas passam a divergir sem controle e o sistema pode atingir a condição de instabilidade. A Figura 7 ilustra esse fenômeno, apresentando três diferentes curvas que representam a evolução do ângulo do rotor ao longo do tempo, após uma perturbação.

Figura 7 - Diferentes trajetórias para o ângulo do rotor.



Fonte: adaptado de (KUNDUR, 1994)

No Caso 1, o sistema responde de forma estável. Após a perturbação, o ângulo do rotor aumenta até um valor máximo, devido à aceleração causada pelo

desequilíbrio temporário entre a potência mecânica e a elétrica. Em seguida, o rotor desacelera e oscila em torno de um novo ponto de equilíbrio, com amplitudes que diminuem progressivamente, indicativo da presença de amortecimento. Esse comportamento mostra que o sistema consegue se adaptar à nova condição operacional e mantém o sincronismo entre as unidades.

O Caso 2 representa uma situação de instabilidade de primeira oscilação, onde o ângulo do rotor aumenta indefinidamente após a perturbação. O Caso 3 é mais sutil e representa um tipo de instabilidade tardia, associada à condição pós-falha. Nesse caso, o sistema parece inicialmente se recuperar, pois o ângulo do rotor oscila com certa regularidade, indicando uma resposta dinâmica aparentemente controlada. No entanto, essas oscilações não se amortecem, em vez disso tornam-se gradualmente maiores com o tempo, revelando que o novo ponto de equilíbrio ao qual o sistema tenta se ajustar não é estável. Assim, mesmo que o sistema não perca o sincronismo na primeira oscilação, ele acaba se desestabilizando devido ao crescimento progressivo das oscilações.

Atualmente, o desperdício de energia gerado pelo aumento nos níveis de *curtailment* é uma condição preocupante para o Sistema Elétrico Brasileiro (SEB). Em (SILVA, 2024) são discutidas as principais características do SEB e como a alocação estratégica de plantas de H2V impacta positivamente os limites de intercâmbios entre as regiões, representando uma solução tanto para a otimização do uso dos recursos renováveis quanto para a sobrecarga causada pelo escoamento de energia. A grande extensão do sistema interligado é uma particularidade interessante no que diz respeito à flexibilidade no intercâmbio de energia, possibilita melhor aproveitamento sobre a sazonalidade das bacias hidrográficas e outros tipos de fontes do país. Entretanto, a capacidade de transmissão necessita de atenção especial: os limites de fluxo entre as interligações precisam ser respeitados para garantir a segurança energética. Desse modo, são discutidas diretrizes para determinação da localização adequada das plantas de produção de H2V, onde regiões com elevado escoamento de geração de energia e com baixos incrementos de demanda são mapeadas. O desenvolvimento acompanha a construção de caso para análise de fluxo de potência em regime permanente no software ANAREDE, contando com a aplicação de plantas de H2V, em pontos estratégicos do SIN, que foram modeladas como cargas de acordo com os Procedimentos de Rede do ONS. Apoiando-se na premissa de que “o corte de energia

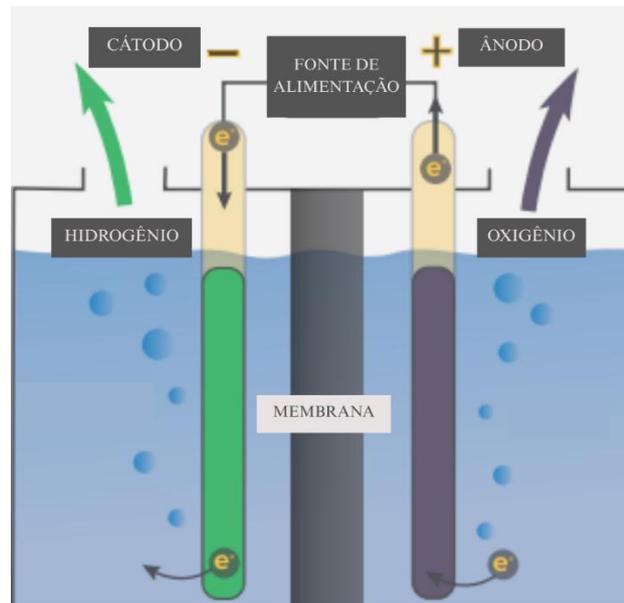
elétrica em grande escala poderia ser utilizado para a produção e armazenamento de H₂V, a partir do *Power to Hydrogen* e da coordenação da sazonalidade da eletricidade com a cadeia de suprimento de H₂.”, (SILVA, 2024) também justifica a viabilidade econômica do empreendimento.

2.4 Eletrolisadores

Por definição, uma das formas de produção do hidrogênio verde envolve eletrolisadores como dispositivos fundamentais para dividir a molécula de água (H₂O) em hidrogênio (H₂) e oxigênio (O₂) através da energia elétrica (NELSON, LIN, *et al.*, 2020). No contexto do *Balance of Plant* (BoP) da produção de hidrogênio, componentes como conversores de potência, transformadores e sistemas de controle já possuem um comportamento amplamente conhecido e modelado em diversas aplicações industriais (CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, 2024). Enquanto as unidades de eletrólise ainda carecem de estudos mais aprofundados acerca de sua resposta dinâmica frente as interações com o SEP (ZHENG, 2023).

Os principais tipos de eletrolisadores são o Alcalino, o de Membrana de Troca de Prótons e o de Óxido Sólido. Apesar de cada tipo possuir suas características específicas capazes de influenciar na integração com a rede elétrica, todos apresentam os elementos essenciais para a eletrólise, como eletrólitos, membrana e conexão à fonte de alimentação, como ilustrado na Figura 8 (MOHAMMADI e MEHRPOOYA, 2018).

Figura 8 - Esquema básico eletrólise.



Fonte: adaptado de (NELSON, LIN, *et al.*, 2020)

O Eletrolisador Alcalino (AEL) é a tecnologia mais consolidada e comercialmente disponível, sendo amplamente utilizado devido ao seu custo relativamente baixo e à durabilidade dos seus componentes. Apesar de possuir boa eficiência, na faixa de 60% (OLGA BIČÁKOVÁ, 2012), o AEL tem uma resposta operacional mais lenta, o que pode dificultar sua adaptação a variações bruscas de oferta de energia. Isso ocorre porque seu processo de separação dos gases requer a presença de separadores porosos que aumentam a resistência elétrica e reduzem sua capacidade de operação dinâmica (ZHENG, 2023). Enquanto o Eletrolisador de Óxido Sólido (SOEL), apontado como tecnologia emergente, é capaz de operar em temperaturas elevadas, na faixa de 700 a 900°C: diferente dos outros eletrolisadores, ele utiliza um material cerâmico como eletrólito sólido, permitindo uma maior eficiência teórica, que pode ultrapassar 90%, pois parte da energia necessária para a eletrólise é fornecida na forma de calor (OLGA BIČÁKOVÁ, 2012).

O SOEL tem o potencial de ser o eletrolisador mais eficiente, pois sua operação em altas temperaturas reduz a energia elétrica necessária para quebrar as ligações químicas da água. No entanto, essa tecnologia ainda enfrenta desafios para sua comercialização, devido ao desgaste dos materiais cerâmicos em condições extremas e à necessidade de integração com processos industriais que possam fornecer calor residual para melhorar sua eficiência (ZHENG, 2023).

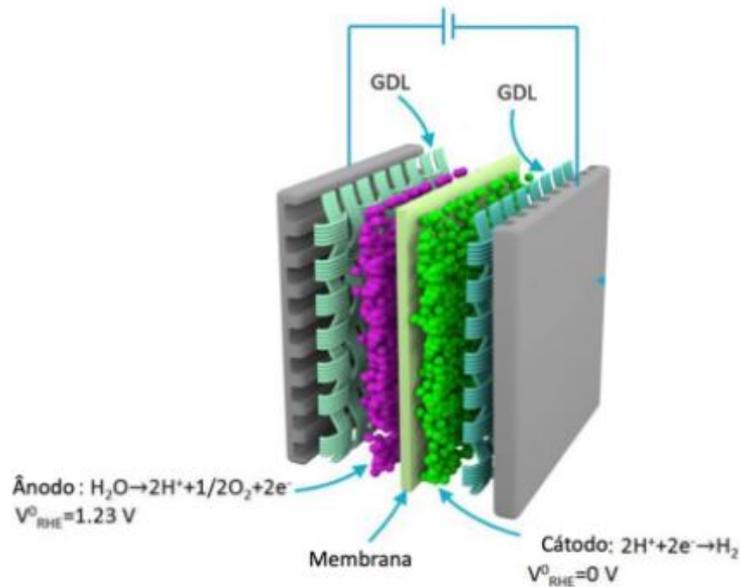
Por fim, o Eletrolisador de Membrana de Troca de Prótons utiliza uma membrana polimérica como eletrólito sólido, permitindo uma operação mais compacta e eficiente. Sua eficiência energética fica por volta de 70% (OLGA BIČÁKOVÁ, 2012) e sua principal vantagem está na rápida resposta às oscilações no fornecimento de energia, fator decisivo na escolha do tipo de eletrolisador utilizado nesse desenvolvimento. Outro destaque do PEMEL é a operação em pressões mais elevadas, reduzindo a necessidade de compressores para o armazenamento do hidrogênio produzido (ZHENG, 2023).

Em (MOHAMMADI e MEHRPOOYA, 2018) são discutidos alguns pontos de melhoria, como o alto custo de seus materiais e a degradação da membrana ao longo do tempo, impactando sua vida útil e manutenção. Essas constatações ratificam a importância do investimento em Pesquisa e Desenvolvimento sobre o tema: (MELO, 2023) propõe a utilização de biopolímeros como materiais alternativos à diversos polímeros sintéticos, reduzindo o custo de produção da membrana condutora de prótons. Na pesquisa, o comportamento de membranas de quitosana com adição de nanocelulose e óxido de grafeno foi investigado com o intuito de verificar a relação entre suas propriedades mecânicas e elétricas. Importante destacar que a quitosana foi obtida a partir de carapaças de camarão e a nanocelulose foi extraída de fibras de bambu.

2.4.1 O Eletrolisador PEM

A membrana de condução protônica desempenha um papel essencial no PEMEL, atuando como um separador físico entre o ânodo e o cátodo, sua principal função é impedir a troca de fluidos e gases, enquanto permitinde a passagem seletiva de prótons. A Figura 9 ilustra a estrutura detalhada de uma célula de eletrólise PEM, composta por uma membrana polimérica eletrólita, revestida com um catalisador, além das camadas de difusão de gás (GDL - *Gas Diffusion Layers*) e placas bipolares.

Figura 9 - Camadas de isolamento no eletrolisador PEM

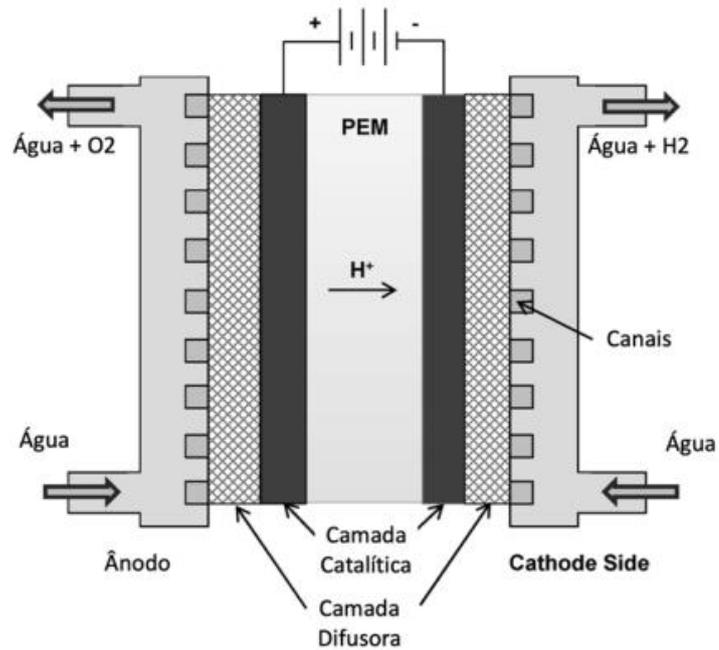


Fonte: retirado de (MELO, 2023)

O esquema apresentado representa uma célula de eletrólise PEM, cuja membrana polimérica, responsável por representar o eletrólito sólido, desempenha um papel crítico na separação dos produtos da eletrólise ao garantir que o hidrogênio gerado no cátodo e o oxigênio produzido no ânodo permaneçam isolados, evitando misturas indesejadas. Para que isso ocorra, o modelo exige duas entradas independentes de água e a aplicação de uma corrente contínua, que impulsiona a movimentação dos prótons (FENG, YUAN, *et al.*, 2017; MELO, 2023).

Na Figura 10, a estrutura da célula de eletrólise PEM é composta por placas condutoras anódica e catódica, que permitem a difusão gasosa, além das camadas catalíticas correspondentes, da membrana de troca de prótons e de um sistema elétrico responsável pela condução da corrente gerada. No lado anódico, o hidrogênio é inserido e se difunde através da GDL até alcançar a camada catalítica. Em contato com o catalisador, as moléculas de hidrogênio são dissociadas, liberando prótons e elétrons. Os prótons atravessam a membrana de troca de prótons em direção ao cátodo, enquanto os elétrons seguem um caminho externo pelo circuito elétrico, gerando corrente elétrica. No lado catódico, os elétrons chegam à GDL catódica, onde se recombina com os prótons que atravessaram a membrana, completando a reação e garantindo a produção de hidrogênio no cátodo (MELO, 2023).

Figura 10 - Esquema de eletrólise no PEM



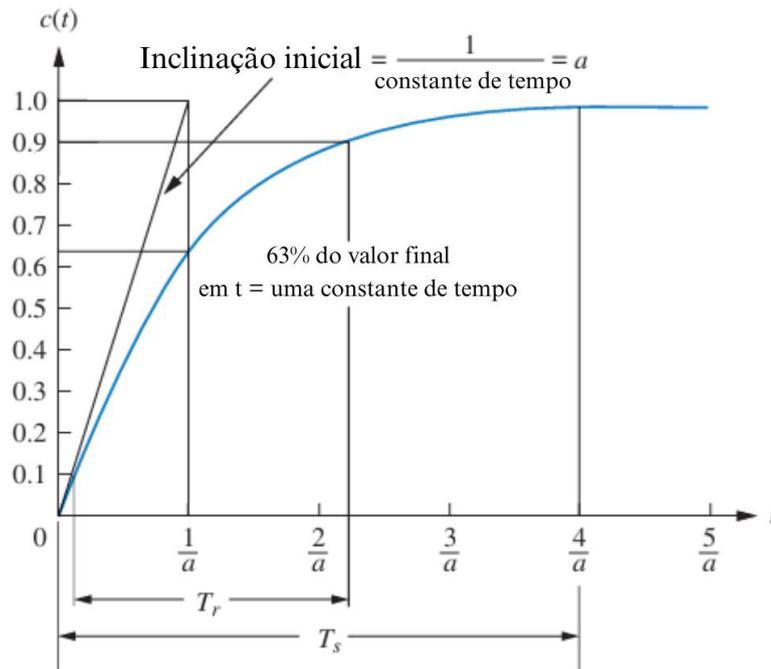
Fonte: retirado de (MELO, 2023)

2.4.2 Modelagem Elétrica

A modelagem elétrica do PEMEL como um circuito equivalente envolve representar seus componentes físicos e eletroquímicos de forma simplificada, garantindo que suas características dinâmicas sejam corretamente descritas. A dinâmica trata do comportamento dos sistemas ao longo do tempo, seja atingindo um estado de equilíbrio, oscilando indefinidamente ou apresentando comportamentos mais complexos (STROGATZ, 2018). Para acompanhar a evolução das variáveis envolvidas, um conceito importante é o de constante de tempo, associado à memória do sistema, velocidade de sua resposta a mudanças.

Analisando a resposta de um sistema de primeira ordem, como na Figura 11, seja α a inclinação inicial da curva, a constante de tempo é definida como sendo $1/\alpha$ e é capaz de indicar o tempo necessário para que a resposta natural de um sistema decaia para 37% de seu valor inicial (NISE, 2015).

Figura 11 - Identificação da constante de tempo.



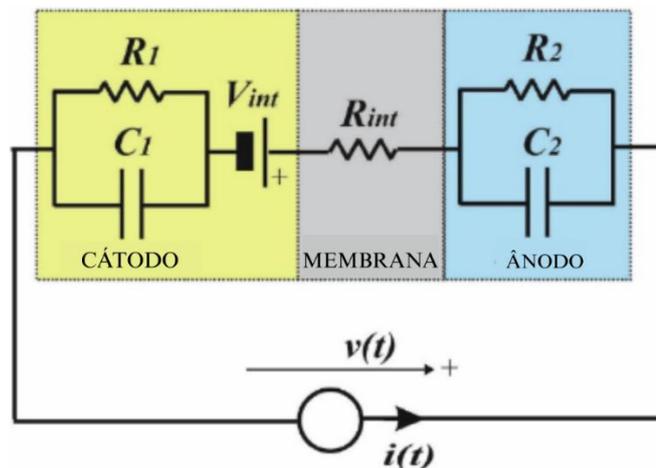
Fonte: retirado de (NISE, 2015)

O desenvolvimento apresentado em (GUILBERT e VITALE, 2018; GUILBERT e VITALE, 2019) investiga o comportamento dinâmico do PEMEL sob variações rápidas de corrente para simular a resposta elétrica do sistema a fim de apresentar um modelo elétrico dinâmico baseado na resposta transitória do eletrolisador. O trabalho introduz a topologia com circuito RC paralelo para cada eletrólito, tensão reversa a ser vencida para a passagem de corrente e resistência interna representando a membrana, como exibido na Figura 12, além de sua implementação no domínio da frequência utilizando o ambiente MATLAB/Simulink.

A validação experimental consiste na aplicação de perfis dinâmicos de corrente, permitindo a comparação entre os resultados simulados e experimentais. O modelo é concebido a partir de testes experimentais, a primeira etapa conta com ajustes de um algoritmo de regressão por mínimos quadrados (LSR - *Least Squares Regression*) para determinar a característica estática do sistema. Em seguida, as constantes de tempo do modelo dinâmico também são identificadas através do método LSR, possibilitando a posterior determinação das resistências e capacitâncias equivalentes. O resultado retorna dois polos não interativos, cada um contribuindo separadamente

para a função de transferência do modelo. Assim como no trabalho em questão, uma consideração importante é evidenciada: o PEMEL apresenta capacidade de operar com uma ampla faixa de potência, garantindo compatibilidade com fontes de energia renováveis.

Figura 12 - Modelo elétrico equivalente.



Fonte: adaptado de (GUILBERT e VITALE, 2019)

2.4.2.1 Ânodo e Cátodo como Circuitos RC Paralelo

Assim como discutido na seção 2.4.1, o principal aspecto da membrana presente no PEMEL é o isolamento dos eletrólitos, decorrente do estabelecimento de uma dupla camada elétrica (camada catalítica e camada difusora) (MELO, 2023), onde ocorre a separação de cargas, resultando em um efeito capacitivo, pois as cargas requerem um intervalo de tempo finito para se movimentar dentro dos eletrodos (GUILBERT e VITALE, 2018). Sob a constatação de que a quantidade de carga envolvida é a mesma, as capacitâncias são consideradas iguais.

O processo de eletrólise no PEMEL envolve duas sub-reações que ocorrem nos eletrodos. A oxidação da água, separando prótons e elétrons, como descrito na equação (2.5). E a formação do hidrogênio após a captação dos prótons pela membrana, apresentada na equação (2.6).



As resistências de ativação estão relacionadas às perdas devido às reações eletroquímicas apresentadas, influenciando diretamente a impedância do circuito equivalente. Os valores dos resistores diferem, pois modelam fenômenos distintos: o ânodo está associado com a energia de Gibbs e perdas térmicas, enquanto no cátodo, a resistência se limita às perdas térmicas. Em contrapartida, outro elemento presente na topologia sugerida para o cátodo é a tensão reversa (V_{int}) e reflete o potencial intrínseco que deve ser superado para que a reação ocorra, definida termodinamicamente pela energia de Gibbs livre da reação eletroquímica (GUILBERT e VITALE, 2018).

A Tabela 2 reúne os valores das constantes de tempo envolvidas, importante ressaltar que essas constantes representam dois polos não interativos, i.e., seus efeitos no comportamento do sistema podem ser analisados independentemente, visto que não há acoplamento entre eles.

Tabela 2 - Parâmetros dos circuitos RC paralelo.

τ_1	τ_2
1,304 s	11,848 s

Fonte: retirado de (GUILBERT e VITALE, 2018)

2.4.2.2 Membrana PEM como Resistência Interna

Representada por R_{int} , a membrana de troca protônica é associada à resistência ôhmica à passagem de prótons entre o ânodo e o cátodo. Seu valor depende de fatores como o nível de hidratação da membrana e sua temperatura, afetando diretamente a eficiência da célula e a queda de tensão interna (GUILBERT e VITALE, 2018). A Tabela 3 apresenta o valor de todos os elementos presentes na topologia de circuito sugerida.

Tabela 3 - Parâmetros do modelo.

R_1	C_1	V_{int}	R_2	C_2	R_{int}
0,035 Ω	37,26 F	4,38 V	0,318 Ω	37,26 F	0,088 Ω

Fonte: retirado de (GUILBERT e VITALE, 2018)

2.4.2.3 Representação do Sistema em Espaço de Estados

Para análise da dinâmica do modelo apresentado na Figura 12, uma etapa importante é estabelecer a representação do sistema em espaço de estados. Segundo (KUNDUR, 1994), as variáveis de estado devem ser selecionadas de modo que a interação com os sinais de entrada seja capaz de fornecer informações sobre o comportamento do sistema e sua evolução ao longo do tempo, determinando quaisquer outras variáveis envolvidas. Ademais, como constatado em (DESOER e KUH, 1969), na maior parte dos casos, o estado de uma rede está intimamente associado às tensões nos capacitores (e às correntes nos indutores). Dessa forma, a equação de estado para a tensão de ativação no cátodo e no ânodo deriva da Lei das Correntes de Kirchhoff (LCK):

$$\frac{dv_{cat}}{dt} = \frac{1}{C_1} i_s - \frac{1}{\tau_1} v_{cat} \quad (2.7)$$

$$\frac{dv_{ano}}{dt} = \frac{1}{C_2} i_s - \frac{1}{\tau_2} v_{ano} \quad (2.8)$$

A equação de saída do sistema pode ser expressa da seguinte forma:

$$v_{saída} = v_{célula} - v_{int} \quad (2.9)$$

Onde,

$$v_{célula} = v_{cat} + v_{ano} + R_{int} i_s + v_{int} \quad (2.10)$$

Por fim, o sistema é representado a seguir:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{v}_{cat} \\ \dot{v}_{ano} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\tau_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{cat} \\ v_{ano} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ \frac{1}{C_2} \end{bmatrix} i_S \\ v_{saída} = [1 \quad 1] \begin{bmatrix} v_{cat} \\ v_{ano} \end{bmatrix} + R_{int} i_S \end{cases} \quad (2.11)$$

Com as matrizes A (matriz de estado), B (matriz de entrada), C (matriz de saída) e D (matriz de transição direta) definidas de acordo com a expressão (2.12).

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\tau_2} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ \frac{1}{C_2} \end{bmatrix}; C = [1 \quad 1]; D = [R_{int}] \quad (2.12)$$

Uma observação importante é que A é uma matriz diagonal, então seus autovalores aparecem explicitamente na definição em (2.12). Segundo (DESOER e KUH, 1969), a resposta completa seguiria o formato da equação (2.13).

$$v_{saída}(t) = K_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + K_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} + K_3 \quad (2.13)$$

Os dois primeiros termos da resposta completa têm característica transitória e são obtidos através da análise de topologia do sistema, sem considerar suas condições iniciais. Logo, é possível concluir que se trata da resposta natural, capaz de descrever como o sistema armazena e/ou dissipa energia. Além disso, os coeficientes K_1 e K_2 são combinações lineares dos autovetores associados aos autovalores de A (NISE, 2015; DESOER e KUH, 1969).

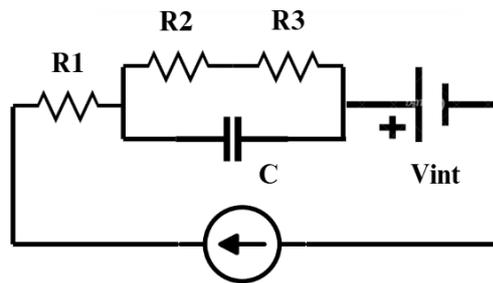
A estrutura da resposta completa contém duas parcelas: a resposta natural e a resposta forçada. Ao analisar as particularidades de cada parcela, informações valiosas acerca da evolução do sistema ao longo do tempo são reveladas. Por exemplo, a expectativa é de que a resposta natural eventualmente desapareça, restando apenas a resposta forçada, ou que se mantenha com oscilação bem definida, visto que enquanto o comportamento de sistemas lineares de primeira ordem basicamente está limitado a crescer, decair ou manter o equilíbrio, os sistemas de segunda ordem podem oscilar (STROGATZ, 2018; NISE, 2015). Caso isso não ocorra, e a resposta natural cresça indefinidamente, sua participação na resposta

completa seria tão sobressalente à resposta forçada que o controle sobre o sistema deixaria de existir (NISE, 2015).

2.4.2.4 Modelo com apenas um loop RC

Buscando escalar o modelo de (GUILBERT e VITALE, 2018) para eletrolisadores de maior porte, e com a constatação de que as constantes de tempo mapeadas não apresentam acoplamento, (HOSSAIN, ISLAM, *et al.*, 2023) apresenta a adaptação com apenas um *loop* RC, compatível com o equipamento de 400 W e validado para outro equipamento real de 1 MW. A nova topologia é apresentada na Figura 13, com seus parâmetros atualizados na Tabela 4.

Figura 13 - Modelo elétrico ajustado.



Fonte: adaptado de (HOSSAIN, ISLAM, *et al.*, 2023)

Tabela 4 - Parâmetros atualizados.

R_1	C	V_{int}	R_2	R_3
0,088 Ω	18,63 F	4,38 V	0,63636 Ω	0,0636 Ω

Fonte: adaptado de (HOSSAIN, ISLAM, *et al.*, 2023)

Durante o desenvolvimento do trabalho, é discutido sobre como associações série e paralelo da pequena estrutura de 400 W podem ser escaladas para 1 MW. Ao utilizar 2.500 equipamentos de menor porte, (HOSSAIN, ISLAM, *et al.*, 2023) consegue modelar o comportamento compatível com um eletrolisador real de grande porte, que retorna a constante de tempo de 13 segundos. As principais relações

definidas entre tensão, corrente e associação dos equipamentos são apresentadas nas equações em (2.14).

$$\begin{cases} V_{stack} = N_s V_{EL} \\ I_{stack} = N_p I_{EL} \\ P_{stack} = V_{stack} I_{stack} \end{cases} \quad (2.14)$$

Onde, V_{stack} e I_{stack} são a tensão e corrente correspondente à estrutura final formada pelos eletrolisadores de menor porte, respectivamente. N_s é a quantidade de elementos conectados em série e N_p é quantidade conectada em paralelo. V_{EL} e I_{EL} são tensão e corrente em cada elemento. Por fim, P_{stack} é a potência consumida pela estrutura final.

2.5 Modelagem no CDUEdit

De acordo com os Procedimentos de Rede discutidos em (ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2021), a ferramenta computacional apropriada para os estudos sobre estabilidade eletromecânica é o software ANATEM. Capaz de oferecer modelos adequados para representar as particularidades do sistema elétrico brasileiro, com robustez suficiente para carregar dados sobre o extenso sistema interligado nacional, o ANATEM se dedica à simulação dinâmica no domínio do tempo, sendo utilizado para a análise não linear de transitórios eletromecânicos.

O método numérico presente na resolução das equações diferenciais que descrevem o comportamento do sistema é o da Integração Trapezoidal, caracterizado por sua precisão na integração das equações ao longo do tempo, pois permite uma solução implícita dos modelos matemáticos, reduzindo os erros numéricos. Enquanto para a solução de equações algébricas, é empregada a fatoração LU, com a vantagem de o sistema ser descrito através de matrizes simétricas esparsas.

Além disso, o ANATEM é compatível com outros programas indicados para a realização de estudos elétricos, como o Análise de Redes Elétricas (ANAREDE) e a ferramenta de visualização gráfica de resultados. Outra integração importante do programa é com o CDUEdit, responsável pela interface visual para modelagem de Controles Definidos pelo Usuário (CDU), esse recurso surge para oferecer flexibilidade ao usuário quanto a definição de equipamentos que não foram previstos

nos blocos nativos (CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, 2024; ATKINSON, 1991; KUNDUR, 1994).

O Editor de Controladores Definidos pelo Usuário (CDUEdit) é um programa auxiliar, capaz de prover interface gráfica simples para facilitar a descrição de CDUs. Durante o estabelecimento do arquivo principal para a execução de análise com o ANATEM, o carregamento de arquivo com extensão .cdu é possível através do código DCDU. A introdução desse tipo de arquivo visa evitar a obsolescência dos softwares, pois é compatível com a entradas de novos equipamentos no sistema elétrico e a modernização dos sistemas de controle. Diante dessa perspectiva, controladores de grande porte podem representar uma preocupação no que diz respeito a descrição de suas dinâmicas, de modo que o CDUEdit é inserido nesse contexto para impulsionar o desenvolvimento das equipes de estudos elétricos (CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, 2024).

Essa ferramenta permite a exportação e importação de arquivos .stb, formato utilizado nas simulações com o ANATEM. Os arquivos gerados na exportação podem compor a estrutura definida para o código de execução DCDU, responsável pela leitura dos modelos CDU. Com a importação, é possível gerar o diagrama de blocos na interface gráfica, facilitando a reutilização de estruturas (CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, 2024).

Uma atribuição interessante é que dentre as simulações compreendidas pelo ANATEM está prevista àquela que se restringe ao modelo CDU, sem necessidade de conexão a quaisquer outras estruturas, permitindo melhor compreensão sobre o comportamento do modelo. Essa funcionalidade pode ser utilizada através dos códigos ANAT e ANAC no arquivo .stb, enquanto os sinais de entrada do diagrama de blocos podem ser modelados por uma composição de blocos na categoria de 'Funções Não Lineares' e IMPORT de tempo, por exemplo.

As simulações e modelagens desenvolvidas neste trabalho utilizaram as seguintes versões de software: ANATEM 12.3.0, EditCepel 1.4.32, CDUEdit 2.1.1 e PlotCepel 6.2.1.

2.5.1 Blocos no CDUEdit

O CDUEdit disponibiliza uma série de blocos para compor a estrutura do diagrama, são categorizados da seguinte forma: Aritméticos, Dinâmicos e Limites, Entrada e Saída, Comparadores, Operadores Lógicos, Trigonométricas, Potências e Logaritmos, Não Lineares, Sinal e Inteiros e Seletores, Atraso e Amostragem. Dentro da categoria de 'Entrada e Saída' estão os blocos de 'IMPORT' e 'EXPORT' responsáveis pela interação entre as variáveis da rede e as variáveis processadas pela ferramenta. Cada tipo de elemento do sistema é associado a uma lista de opções coerente com sua natureza, a Tabela 5 reúne a relação para carga dinâmica.

Tabela 5 - Blocos IMPORT e EXPORT para cargas dinâmicas.

Bloco	Descrição
PLDIN	Potência ativa consumida pelo grupo de carga dinâmica na barra, em pu.
QLDIN	Potência reativa absorvida pelo grupo de carga dinâmica na barra, em pu. Positiva para carga indutiva e negativa para carga capacitiva.
IADIN	Componente ativa da corrente drenada da barra pelo grupo de carga dinâmica, em pu.
IRDIN	Componente reativa da corrente drenada da barra pelo grupo de carga dinâmica, em pu. Positiva para carga indutiva e negativa para carga capacitiva.
GLDIN	Condutância correspondente à parcela ativa consumida pela carga dinâmica na barra, em pu.
BLDIN	Susceptância correspondente à parcela reativa absorvida pela carga dinâmica na barra, em pu. Positiva para carga capacitiva e negativa para carga indutiva.

Fonte: retirado de (CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, 2024)

Nesse contexto, a saída prevista anteriormente para o sistema não deveria ser tensão a qual a carga está submetida. Então, considerando as relações entre a potência complexa associada à carga e a tensão de saída do sistema descrito anteriormente, é possível estabelecer a condutância e susceptância relacionadas à carga como variáveis de saída a serem exportada para a análise. De acordo com (DESOER e KUH, 1969), as equações (2.15), (2.16) e (2.17) relacionam a potência complexa com tensão e condutância.

$$\vec{S} = \vec{V} \vec{I}^* \quad (2.15)$$

$$\vec{S} = \vec{V} (\vec{V} Y)^* \quad (2.16)$$

$$\vec{S} = \overline{|\vec{V}|^2} Y \quad (2.17)$$

Assim, o termo correspondente à tensão se torna um escalar. Então, aplicando os operadores Real e Imaginário na expressão (2.17), o sistema (2.18) é concebido (ZILL e SHANAHAN, 2011).

$$\begin{cases} Re\{\vec{S}\} = \overline{|\vec{V}|^2} Re\{Y\} \\ Im\{\vec{S}\} = \overline{|\vec{V}|^2} Im\{Y\} \end{cases} \quad (2.18)$$

Reescrevendo,

$$\begin{cases} P = \overline{|\vec{V}|^2} G \\ Q = \overline{|\vec{V}|^2} B \end{cases} \quad (2.19)$$

Ou ainda,

$$\begin{cases} G = \frac{1}{\overline{|\vec{V}|^2}} P \\ B = \frac{1}{\overline{|\vec{V}|^2}} Q \end{cases} \quad (2.20)$$

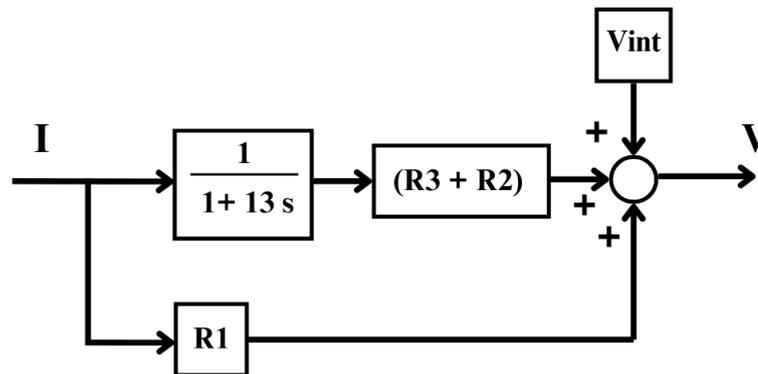
Onde, G é a condutância, B é a susceptância, P é a potência ativa e Q é a potência reativa (DESOER e KUH, 1969).

2.5.2 Diagrama de Blocos

O diagrama de blocos pode ser dividido entre duas partes: a primeira onde a saída é definida como a tensão sob o equipamento, e a segunda que se refere à adaptação das particularidades do programa, onde as saídas indicadas são condutância e susceptância.

Para tratar da primeira parte, Figura 14 apresenta sua estrutura genérica, onde os parâmetros devem estar no sistema por unidade, com os valores de base do equipamento (CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, 2024). Assim, a Tabela 6 reúne os valores adequados.

Figura 14 - Primeira parte do diagrama.



Fonte: Elaboração própria

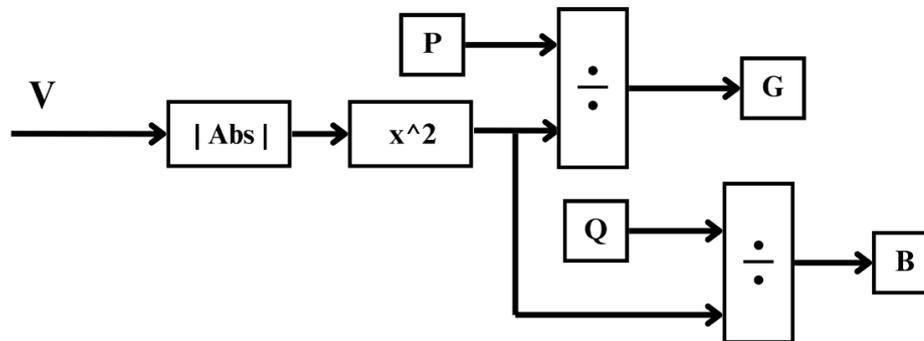
Tabela 6 - Parâmetros em pu.

Parâmetro	Valor (pu)
R1	0,55
R2	3,98
R3	0,39

Fonte: Elaboração própria

A segunda parte do diagrama de blocos elaborado tem sua estrutura evidenciada na Figura 15. Para concluir a construção do diagrama, a Tabela 7 reúne as entradas discutidas.

Figura 15 - Segunda parte do diagrama.



Fonte: Elaboração própria

Tabela 7 - Entradas do diagrama de blocos.

Entrada	Tipo	Valor	Unidade
Corrente	IMPORT	Retornado pelo ANATEM	pu
Potência Ativa	Parâmetro constante	Definido conforme necessidades do usuário	pu
Potência Reativa	Parâmetro constante	Definido conforme necessidades do usuário	pu
Tensão Reversa	Parâmetro constante	0,545	pu

Fonte: elaboração própria

3 METODOLOGIA – REPRESENTAÇÃO DE ELETROLISADORES

A metodologia do trabalho envolve a comparação entre diferentes configurações possíveis para o caso abordado em (HOSSAIN, ISLAM, *et al.*, 2023), com o intuito de investigar como os resultados obtidos em um eletrolisador de 1 MW podem ser expandidos para valores superiores de potência.

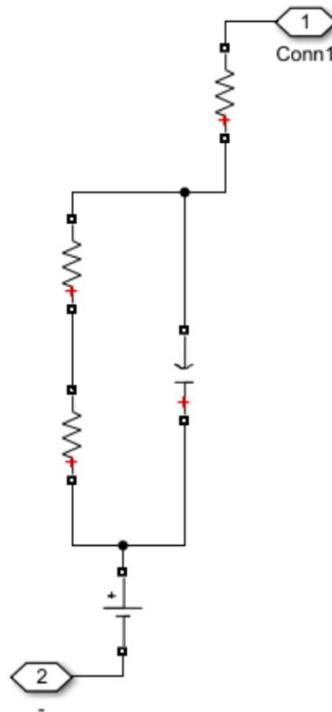
Além disso, o diagrama de blocos proposto é montado no CDUEdit e simulado no ambiente PlotCepel através de execução de arquivo no ANATEM para ser comparado com a idealização de sua estrutura realizada no MATLAB/*Simulink*.

3.1 Constante de Tempo

Para melhor compreensão sobre a dinâmica do modelo proposto por (HOSSAIN, ISLAM, *et al.*, 2023), dois casos com diferentes configurações são abordados a seguir. O primeiro avalia a saída de tensão considerando 25 subsistemas conectados em paralelo, cada subsistema é formado por 100 eletrolisadores de 400 W ligados em série. Visando avaliar um cenário de maior tensão nos terminais da estrutura final, o segundo caso conta com 5 subsistemas em paralelo, cada um deles é constituído de 500 eletrolisadores de 400 W em série.

A análise foi construída no ambiente MATLAB/*Simulink*. Na Figura 16, o subsistema fundamental é apresentado. Esse circuito é responsável por descrever o eletrolisador de 400 W e seus parâmetros são informados na Tabela 8.

Figura 16 - Circuito do eletrolisador.



Fonte: elaboração própria

Tabela 8 - Parâmetros do eletrolisador.

Parâmetros	Valor	Unidade
Potência elétrica nominal	400	W
Tensão do stack	8	V
Faixa de corrente do stack	0–50	A
Pressão máxima de saída	10,5	bar

Fonte: retirado de (GUILBERT e VITALE, 2019)

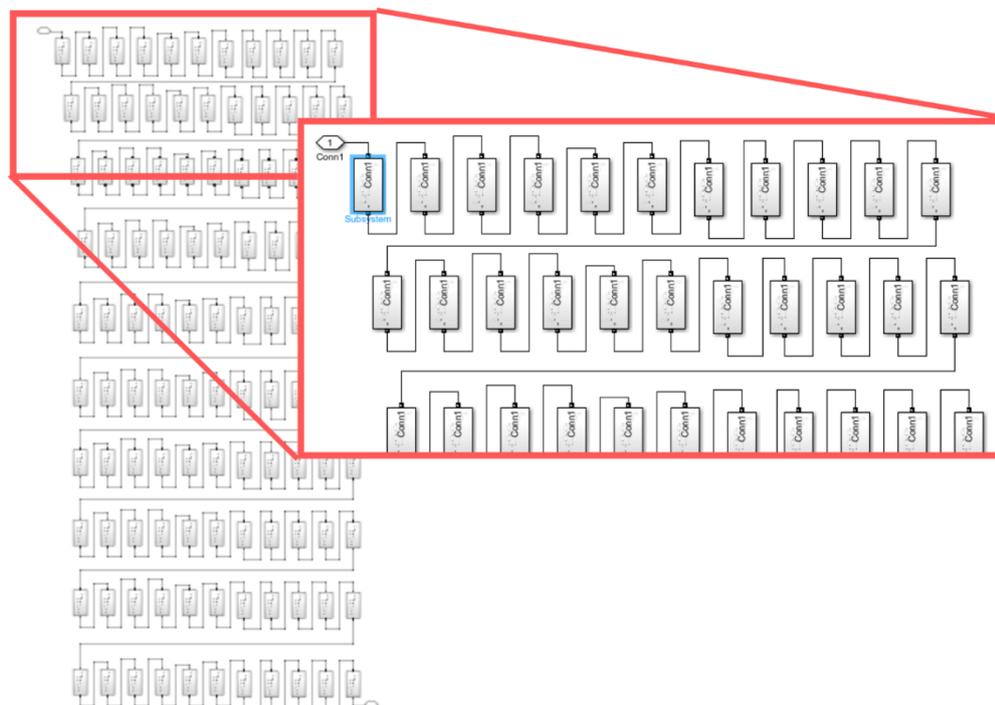
O alicerce das premissas adotadas na elaboração desse trabalho é eleger a planta de hidrogênio como uma carga, considerando os aspectos elétricos envolvidos no comportamento do módulo de eletrólise para investigar sua interação com o Sistema Interligado Nacional e os impactos associados à operação, especialmente sobre a estabilidade da rede. Dessa forma, a proposta é de que um número N de equipamentos, como o descrito na Tabela 8, seja conectado até atingir a demanda coerente com a problemática descrita.

O número N avaliado é igual a 2.500 para ambas as configurações, com o objetivo de comparar a dinâmica quando as associações são diferentes para a mesma potência (1MW). Posteriormente, a potência também sofre alterações.

3.1.1 Configuração A

A primeira configuração considera $N_s = 100$ e $N_p = 25$, como exibido na Figura 17. Para acompanhar a constante de tempo dessa configuração, a estrutura é conectada a uma fonte de corrente contínua controlada por função degrau.

Figura 17 - Subsistema formado por cem eletrolisadores ligados em série.



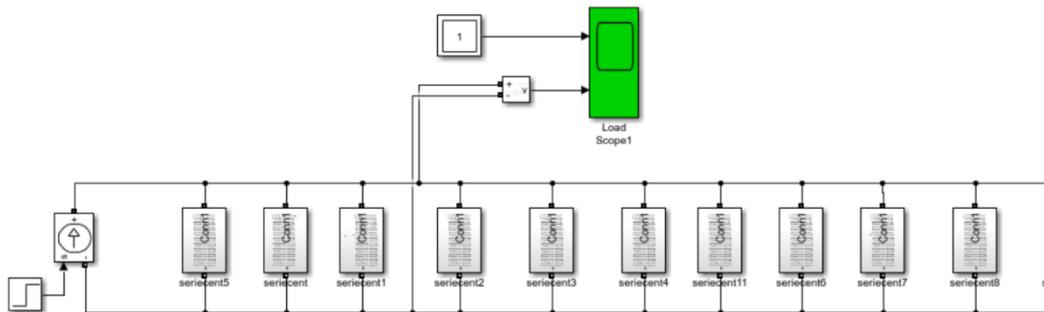
Fonte: Elaboração própria

O ajuste do degrau de corrente aplicado deve ser coerente com as relações descritas nas expressões (2.14). Dessa forma, a relação (2.15) retorna o valor adequado.

$$I_{stack} = N_p I_{EL} = 25 \times 50 = 1.250 A \quad (3.1)$$

Como supracitado, os vinte e cinco subsistemas, formados por cem estruturas fundamentais conectadas em série, são ligados em paralelo. A Figura 18 ilustra o arranjo final, onde é possível observar o sensor de tensão conectado ao bloco de 'scope' para que o comportamento da variável de saída seja monitorado.

Figura 18 - Subsistemas ligados em paralelo.

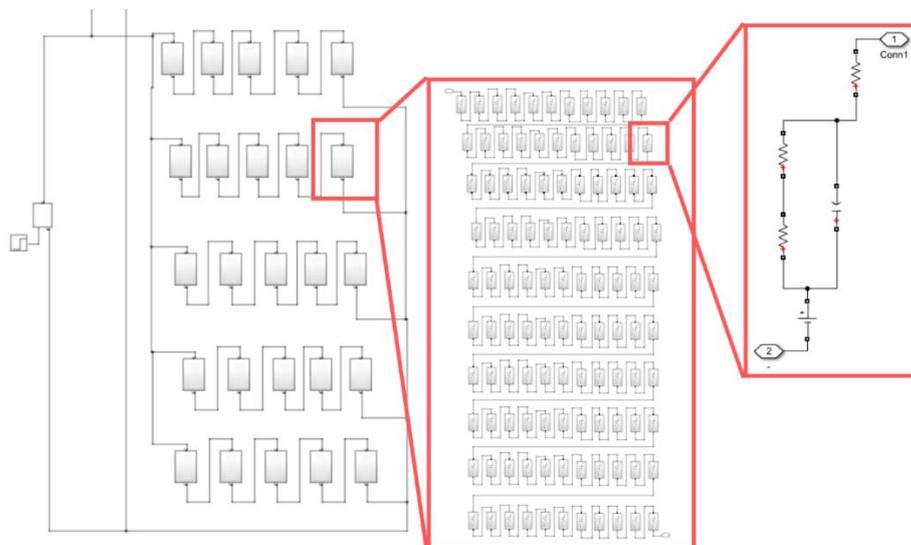


Fonte: Elaboração própria

3.1.2 Configuração B

Com procedimento semelhante ao proposto para a configuração anterior, o modelo da Figura 19 é constituído por fonte de corrente contínua controlada por função degrau e sensor de tensão.

Figura 19 - Estrutura da configuração B em detalhes.



Fonte: Elaboração própria

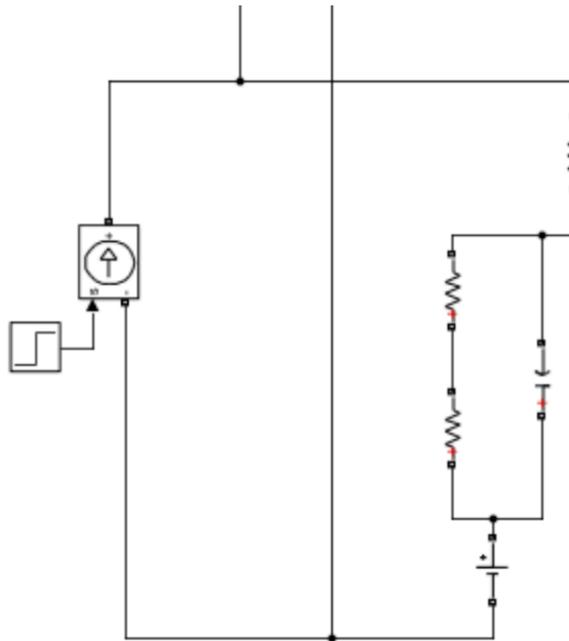
A configuração B é definida com $N_s = 500$ e $N_p = 5$. Enquanto a amplitude do degrau aplicado é obtida conforme a expressão (2.16).

$$I_{stack} = N_p I_{EL} = 5 \times 50 = 250 A \quad (3.2)$$

3.1.3 Estrutura Original

A fim de verificar a dinâmica para potências diferentes, a mesma estrutura de fonte de alimentação foi conectada ao subsistema fundamental, assim como ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Aplicação de degrau de corrente na estrutura original.



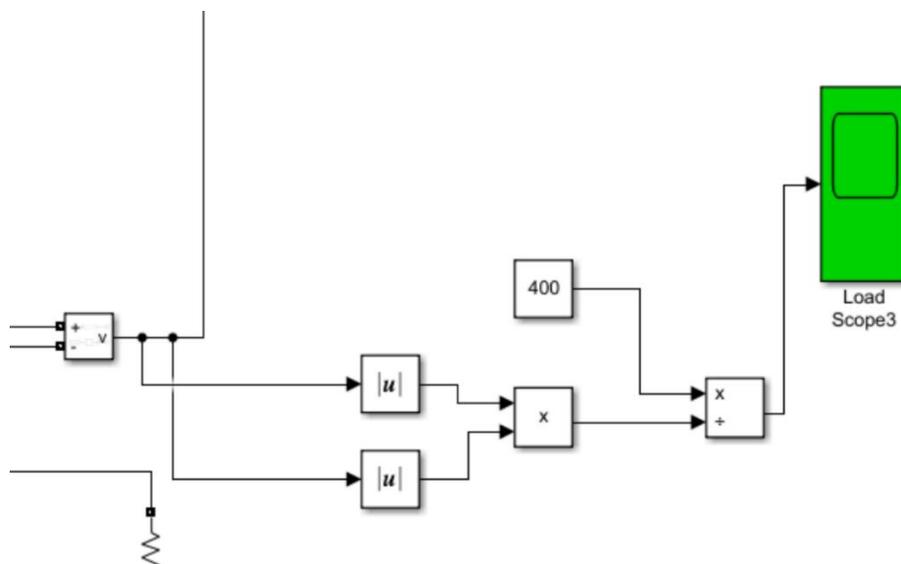
Fonte: Elaboração própria

Essa configuração, possui apenas um elemento. Dessa forma, a amplitude do degrau aplicado é igual a 50 A, como na descrição do equipamento.

3.2 Ajuste para Saída

Com o intuito de estabelecer valores de referência para avaliação da segunda parte do diagrama, outro tipo de simulação é executada no ambiente MATLAB/Simulink. Aproveitando a mesma estrutura utilizada na seção 3.1.3, a saída em tensão de um único equipamento de 400W é convertida em condutância através dos blocos de valor absoluto, multiplicação e divisão, além da entrada constante para inserir o valor de potência ativa. O esquema descrito é ilustrado na Figura 21.

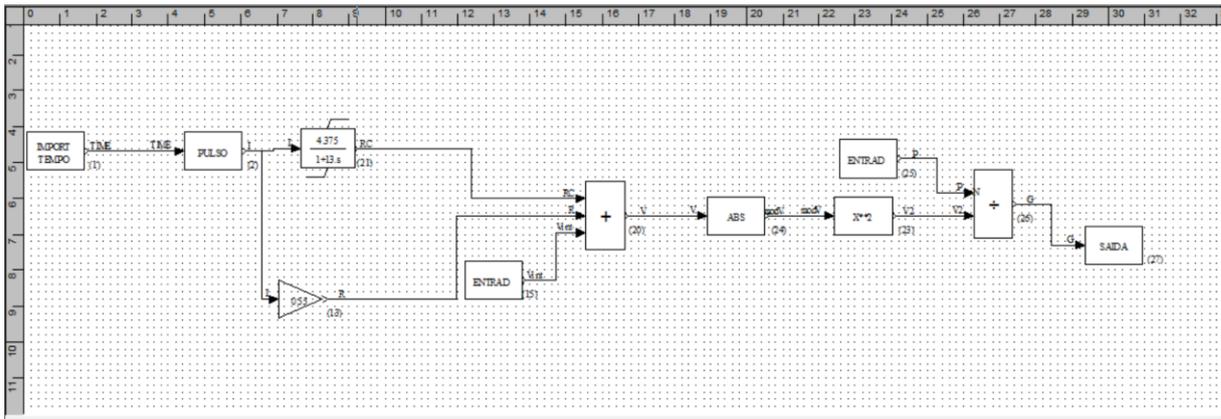
Figura 21 - Ajuste para a estrutura original no simulink.



Fonte: Elaboração própria

De acordo com a Figura 14 e Figura 15, o diagrama no ambiente CDUEdit é montado, como apresentado na Figura 22. Onde, para confirmar sua consonância com as discussões realizadas, as entradas e saídas são adaptadas de modo a possibilitar a utilização da ferramenta de simulação do CDU no ANATEM, como etapa preliminar à sua conexão com a rede elétrica. Assim, o arquivo .cde construído com a interface gráfica é exportado para um arquivo .stb e seu conteúdo pode ser modificado para se adequar aos requisitos de simulação do ANATEM.

Figura 22 - Diagrama de blocos do sistema.



Fonte: Elaboração própria

Uma amostra da estrutura configurada para o arquivo .stb é apresentada na Figura 23, seu conteúdo detalhado está presente no Apêndice A. Durante a exportação no CDUEdit, a parcela compreendida no código de execução 'DCDU' é gerada, o restante do código é construído baseado em (CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, 2024).

Figura 23 - Arquivo .stb

```

001 (=====)
002 ( TITULO DO CASO
003 (=====)
004 [ TITU
005 | MODELO ELETROLISADOR
006 | ( TCC - ALICIA FARIA
007 | (
008 | (=====)
009 | ( ASSOCIACAO DE ARQUIVOS
010 | (=====)
011 [ DARQ
012 | (..... Arquivos de Saida .....
013 | (Tipo) (C) ( Nome do Arquivo
014 |   OUT   .\OUT\
015 |   LOG   .\LOG\
016 |   PLT   .\PLT\
017 | (.....)
018 | 999999
019 | (
020 | (=====)
021 | ( SELECIONAR MODO DE EXECUCAO DO PROGRAMA
022 | (=====)
023 | ANAC
024 | (
025 | (=====)
026 | ( DADOS DE PADRAO PARA OPCOES DE EXECUCAO
027 | (=====)
028 [ DOPC IMPR CONT
029 | (Op) E (Op) E
030 | IMPR FILE CONT
031 | 999999
032 | (
033 | (=====)
034 | ( DADOS DE CDU
035 | (=====)
036 [ DCDU
037 | (ncdu) ( nome cdu )

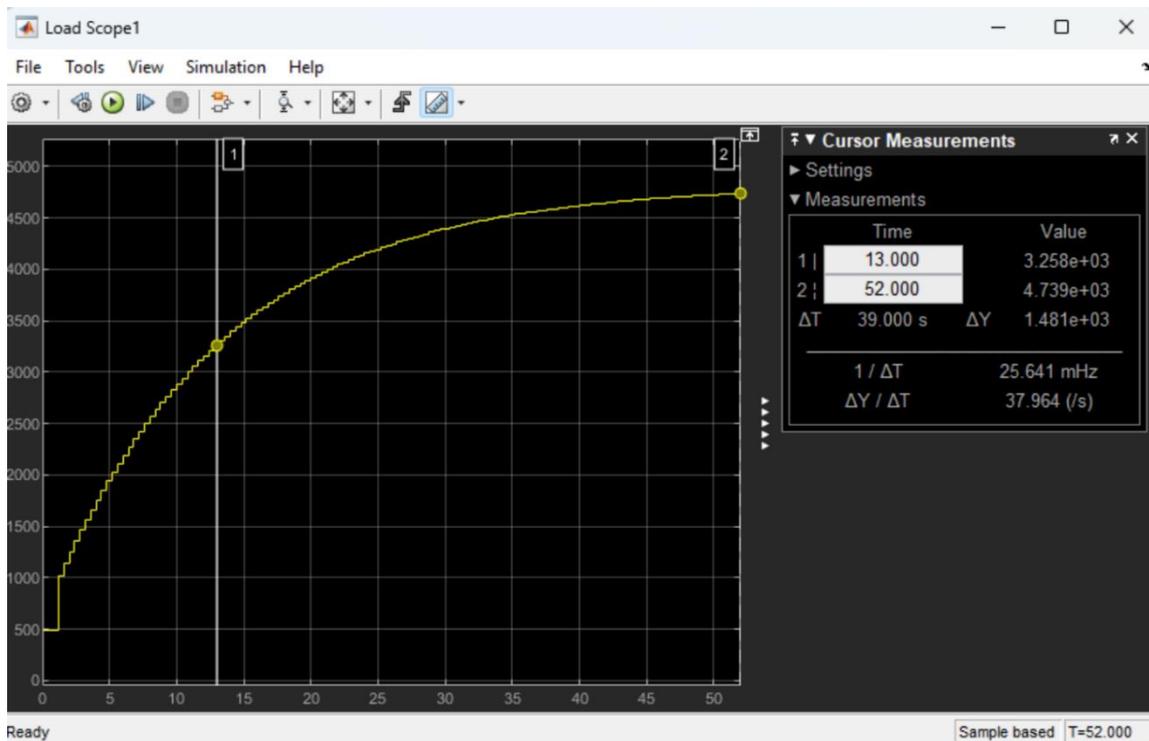
```

Fonte: elaboração própria

4 RESULTADOS

Após a execução da modelagem no MATLAB/Simulink, o monitoramento do comportamento para configuração A é apresentado na Figura 24. Para esse caso, a constante de tempo indicada é de 13 segundos, intervalo necessário para que a tensão atinja cerca de 63,2% de seu valor final.

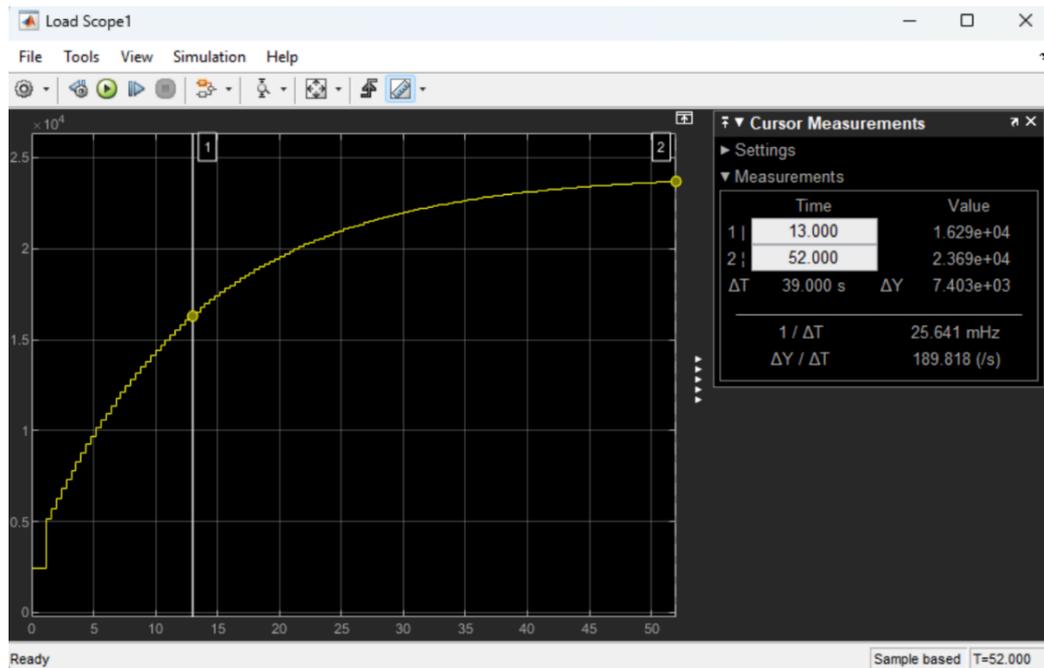
Figura 24 - Resposta ao degrau para configuração A.



Fonte: Elaboração própria

Com procedimento semelhante, a resposta para a configuração B é exibida na Figura 25. A constante de tempo para esse caso também é de 13 segundos, indicativo de que a característica não depende do arranjo escolhido para N_s e N_p .

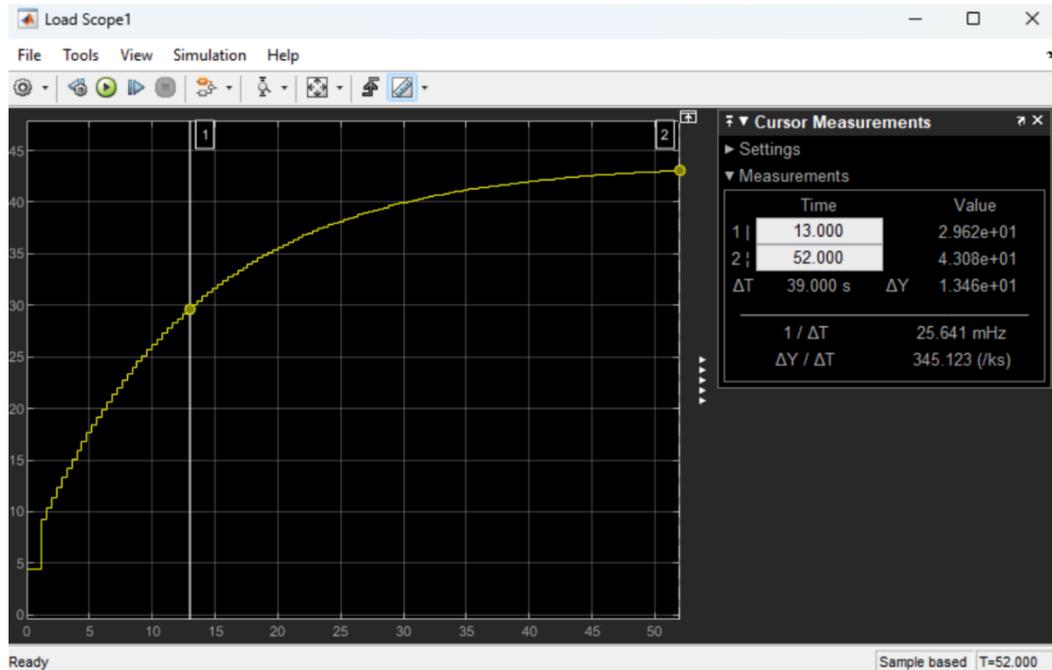
Figura 25 - Resposta ao degrau para a configuração B.



Fonte: Elaboração própria

A última configuração apontada para as investigações sobre o comportamento dinâmico do modelo considera o equipamento unitário. Importante destacar que os casos anteriores apresentaram o mesmo valor de potência total consumida. Apesar dessa estrutura ter requisito de potência diferente, de acordo com a Figura 26, a constante de tempo permanece igual.

Figura 26 - Resposta ao degrau para a estrutura original.



Fonte: Elaboração própria

A Tabela 9 reúne os principais resultados sobre os casos analisados, indicando que as alterações sobre potência consumida e os modos de associação dos equipamentos não interferem na constante de tempo.

Tabela 9 - Comparação entre a constante de tempo de cada configuração.

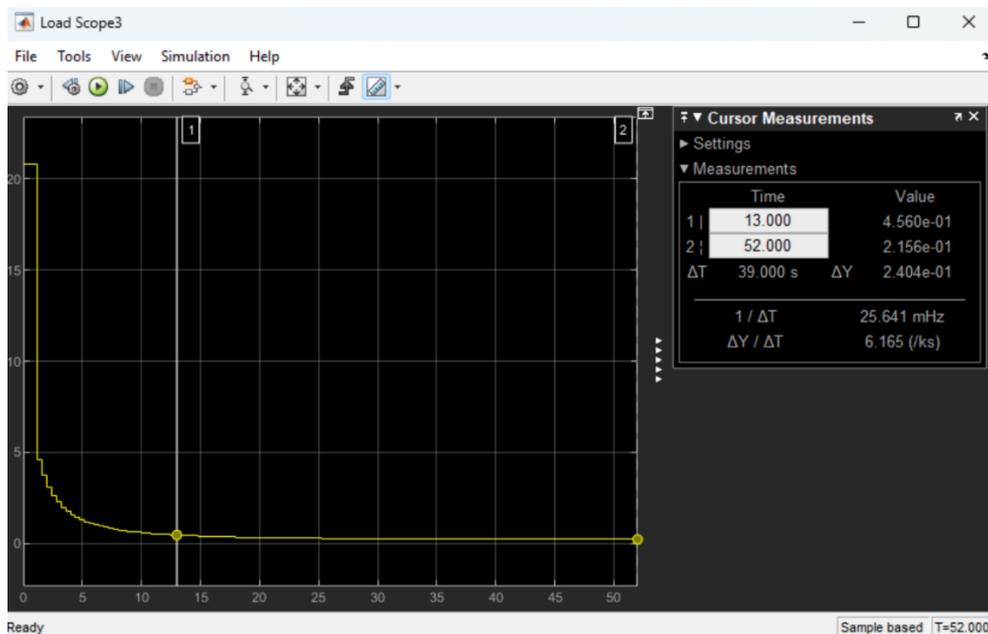
Configuração	N_S	N_P	N	Potência Consumida	τ
A	100	25	2.500	1 MW	13 s
B	500	5	2.500	1 MW	13 s
Unitária	1	1	1	400 W	13 s

Fonte: elaboração própria

As simulações conduzidas até o momento concentraram-se na validação do primeiro estágio do diagrama de blocos. A partir deste ponto, são apresentados os resultados referentes à estrutura completa do diagrama, com o objetivo de verificar a coerência entre a saída em condutância gerada no CDUEdit e o comportamento dinâmico previsto na modelagem realizada no MATLAB/Simulink.

Essa etapa permite validar a adaptação implementada no segundo estágio, cuja finalidade é compatibilizar a saída do sistema com a resposta esperada de uma carga dinâmica no contexto dos estudos de estabilidade. Ao executar a configuração de estrutura unitária com o ajuste de saída implementado, o resultado obtido é exibido na Figura 27. Retornando o valor de condutância de 0,216 mho.

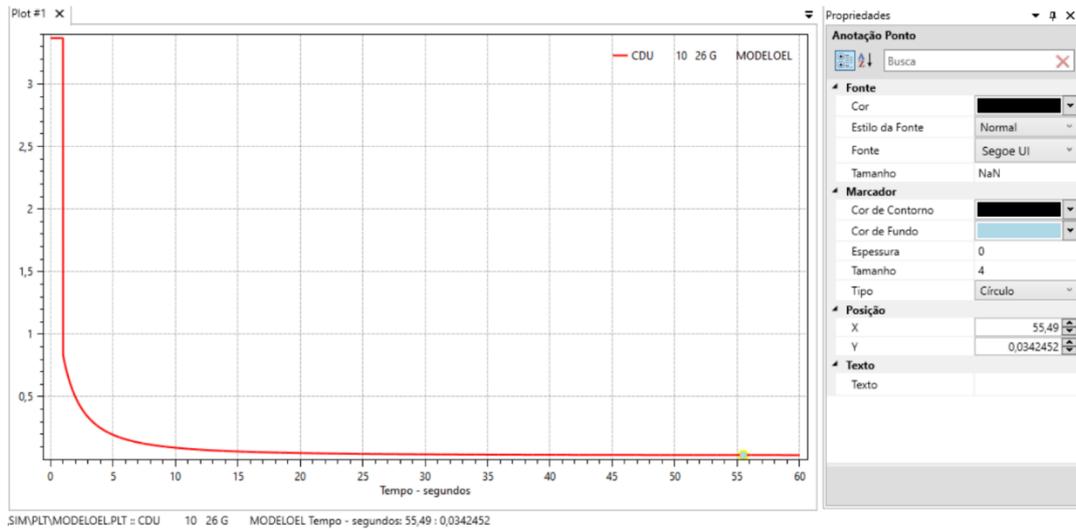
Figura 27 - A condutância como saída do sistema.



Fonte: Elaboração própria

No ambiente ANATEM, a simulação equivalente é ilustrada na Figura 28. Esse arquivo de plotagem é gerado e carregado na ferramenta PlotCepel.

Figura 28 - Simulação no PlotCepel.



Fonte: Elaboração própria

Apesar do valor para condutância $G = 0,0342$ retornado ser diferente com o encontrado na Figura 27, eles foram calculados de maneira distinta: nesse caso, os parâmetros do equipamento estão no sistema pu referente ao próprio equipamento. Enquanto na simulação realizada anteriormente, os mesmos parâmetros estão nas unidades do SI (Ω , V, A, W).

Assim, para compatibilizar os resultados é necessário corrigir o valor retornado de condutância. A expressão (4.1) retorna o valor de base para a condutância, enquanto a expressão (4.2) calcula o valor em pu da condutância obtida no MATLAB/Simulink.

$$G_{BASE} = \frac{P_{BASE}}{V_{BASE}^2} = 6,25 \quad (4.1)$$

$$G = \frac{0,2}{6,25} = 0,034 \quad (4.2)$$

O procedimento descrito também foi aplicado para a susceptância e confirmou a coerência do modelo em relação às saídas selecionadas.

Durante o desenvolvimento do trabalho, a modelagem proposta para a carga foi dividida em duas etapas, cada uma composta por um conjunto de simulações com naturezas distintas. A primeira etapa foi direcionada para a análise da dinâmica da

carga, com o objetivo de acompanhar o comportamento do sistema para diferentes arranjos e requisitos de potência. Essa fase permitiu a obtenção da constante de tempo, um parâmetro fundamental para representar a resposta dinâmica do modelo.

A segunda etapa verificou a compatibilidade da solução com a plataforma de simulação na qual o modelo será efetivamente utilizado. Como o modelo foi inicialmente concebido em uma ferramenta computacional distinta, foram realizadas simulações comparando a resposta do diagrama completo em seu ambiente original com os resultados obtidos na nova plataforma.

Ambas as etapas permitiram validar os resultados: a primeira permitiu determinar os parâmetros dinâmicos da carga, e a segunda confirmou a compatibilidade da modelagem com a nova plataforma de execução.

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

O presente trabalho teve como principal objetivo investigar a viabilidade da modelagem de eletrolisadores PEM como cargas dinâmicas, compatíveis com os procedimentos e ferramentas utilizadas em estudos de estabilidade eletromecânica no Brasil. Para isso, foi realizada uma análise da literatura especializada, contemplando diferentes abordagens de modelagem elétrica, com destaque para as representações em circuitos RC equivalentes, capazes de representar a dupla camada característica desse tipo de eletrolisador. A metodologia desenvolvida permitiu a simulação da dinâmica dos eletrolisadores no ambiente MATLAB/Simulink e a posterior adaptação do modelo para o ambiente CDUEdit, gerando estruturas compatíveis com o software ANATEM.

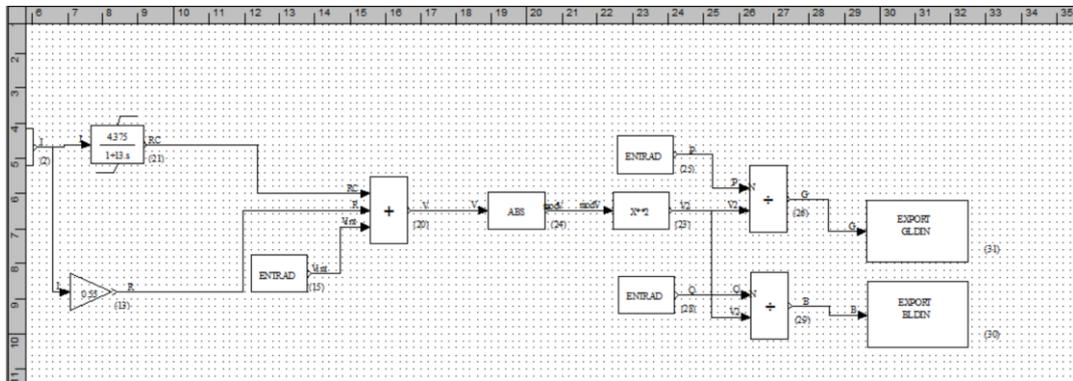
Ao apoiar-se nas validações compreendidas em (HOSSAIN, ISLAM, *et al.*, 2023), demonstrando flexibilidade para atender tanto a cargas de pequeno porte como em (GUILBERT e VITALE, 2018) tanto para cargas de maior porte como em (ABDIN, WEBB e GRAY, 2015), as análises realizadas no presente desenvolvimento mapearam a dinâmica para diferentes cenários a fim de justificar a expansão para cargas de potência ainda mais elevadas, alinhado à característica dos modelos inseridos no programa ANATEM que tem seus parâmetros informados com relação às bases do próprio equipamento, o único ajuste necessário de acordo com as especificações de carga para eletrolisador é a entrada de potência, assim como descrito na Tabela 7. Com respeito a dimensionamento e local de conexão da carga, as relações descritas em (2.14) são fundamentais para garantir que os níveis de tensão e corrente cuja estrutura de menor porte dentro da configuração está submetida estejam dentro de seus limites operativos, se adequando ao modelo proposto.

A principal contribuição deste trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo preliminar para o PEMEL, voltado para estudos de estabilidade eletromecânica no ambiente ANATEM, representando os primeiros passos na direção de incluir essa infraestrutura na biblioteca de modelos nativos da ferramenta. A adaptação do modelo ao ambiente ANATEM, através da exportação da condutância e da susceptância como variável de saída, demonstrou-se viável, permitindo a

simulação do comportamento dinâmico do eletrolisador como carga no sistema. Apesar disso, o modelo apresentado ainda demanda aprimoramentos e validações adicionais para representar com maior fidelidade as características operativas de plantas reais.

O estabelecimento de modelo do eletrolisador como carga dinâmica previu saídas do tipo 'EXPORT' das variáveis 'GLDIN' e 'BLDIN'. Assim como desenvolvido para a condutância, o ajuste para susceptância pode ser implementado, retornando a estrutura final apresentada na Figura 29.

Figura 29 - Modelo do eletrolisador como uma carga dinâmica.



Fonte: Elaboração própria

O modelo do PEMEL de 1MW, em (HOSSAIN, ISLAM, *et al.*, 2023), foi integrado a uma rede IEEE de 13 barras, através de conversor AC-DC-DC, e teve resultados otimistas quanto ao fornecimento de serviços ancilares de controle de frequência. Desse modo, as principais propostas de continuidade são a integração do modelo no Sistema Interligado Nacional, com cenários como descritos em (SILVA, 2024), por exemplo. Para isso, outra etapa são desenvolvimentos relacionados aos conversores envolvidos nesse processo.

Outra questão importante é a validação do modelo quanto à performance de equipamentos reais, onde experimentos desse porte ainda não foram encontrados na literatura.

REFERÊNCIAS

- ABDIN, Z.; WEBB, C.; GRAY, E. M. Modelling and simulation of a proton exchange membrane (PEM) electrolyser cell. **Int. J. Hydrogen Energy**, 2015. 13243–13257.
- AMNUAYLOJAROEN, Teerachai. Perspective on the Era of Global Boiling: A Future beyond Global Warming. **Advances in Meteorology**, Dezembro 2023. 12.
- ATKINSON, Kendall E. **An Introduction to Numerical Analysis**. 1991. 2^a. ed.
- CALIFORNIA ISO. **CAISO**. Disponível em: <<https://www.caiso.com/>>. Acesso em: 01 Janeiro 2025.
- CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual do ANATEM**. [S.l.]. 2024.
- CLIMATE TRACE. Disponível em: <<https://climatetrace.org/>>. Acesso em: 01 Janeiro 2025.
- DESOER, Charles A.; KUH, Ernest S. **Basic Circuit Theory**. 1969. 1^a. ed.
- ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION - EIA. As solar capacity grows, duck curves are getting deeper in California, 2023.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Relatório Final do PNE 2050. **Plano Nacional de Energia 2050**, 2020. Acesso em: 04 Janeiro 2025.
- FENG, Qi et al. A review of proton exchange membrane water electrolysis on degradation mechanisms and mitigation strategies. **Journal of Power Sources**, 2017. 33-55.
- GUILBERT, Damien; VITALE, Gianpaolo. Experimental Validation of an Equivalent Dynamic Electrical Model for a Proton Exchange Membrane Electrolyzer. **IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering**, 2018.
- GUILBERT, Damien; VITALE, Gianpaolo. Dynamic Emulation of a PEM Electrolyzer by Time Constant Based Exponential Model. **Energies**, 2019.
- HOSSAIN, Biplob et al. Dynamic Electrical Circuit Modeling of a Proton Exchange Membrane Electrolyzer for Frequency Stability, Resiliency, and Sensitivity Analysis. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS**, 2023.
- HYDROGEN COUNCIL. Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective, p. 1-88, 2020.
- IEA - INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. Denmark 2023, 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/denmark-2023>>. Acesso em: 05 janeiro 2025.
- IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **CCUS in Clean Energy Transitions**. Paris. 2020.
- IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Outlook, 2024.
- KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. 1994. 1^a. ed.
- MELO, SANTINO L. S. D. **COMPÓSITOS DE QUITOSANA ADITIVADOS COM NANOCELULOSE E ÓXIDO DE GRAFENO (GO) PARA ELETROLISADORES PEM**. UFC - UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Fortaleza. 2023.
- MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. **BRAZIL'S NDC National determination to contribute and transform**. Governo Brasileiro. Baku, p. 1-44. 2024.
- MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde, 2021.

- MOHAMMADI, Amin; MEHRPOOYA, Mehdi. A comprehensive review on coupling different types of electrolyzer to renewable energy sources. **Energy**, 2018.
- NELSON, L. et al. Green Hydrogen: Guidebook, 2020.
- NISE, Norman S. **Control Systems Engineering**. 2015. 7^a. ed.
- OLGA BIČÁKOVÁ, P. S. Production of hydrogen from renewable resources and its effectiveness. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2012.
- ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Submódulo 2.3: Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos, 2021.
- ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. PAR/PEL Planejamento Elétrico de Médio Prazo do SIN, 2024.
- ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. O Sistema em Números. **ONS**, 2025. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 25 Fevereiro 2025.
- RAMPINELLI, G. A.; JUNIOR, C. G. D. R. Análise da Geração Eólica na Matriz Brasileira de Energia Elétrica, 2012.
- SATTAR, Faisal et al. A predictive tool for power system operators to ensure frequency stability for power grids with renewable energy integration. **Applied Energy**, 2024. 0306-2619.
- SILVA, Brenda E. M. D. **POTENCIAL DO HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL FRENTE AOS DESAFIOS DA ALTA INTEGRAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS AO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL**. UFPE. Recife. 2024.
- STROGATZ, Steven H. **Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering**. 2018. 2^a. ed.
- UNFCCC - CONFERENCE OF THE PARTIES. Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015, p. 1-42, 2016.
- UNFCCC. KYOTO PROTOCOL REFERENCE MANUAL ON ACCOUNTING OF EMISSIONS AND ASSIGNED AMOUNT, 2008.
- VAZ, Émerson F.; FARRET, Felix A. Correlações de Pearson entre o Consumo de Energia Elétrica e os Índices de Desenvolvimento Humano e Econômico, 2020.
- ZHANG, Xian et al. What is driving the remarkable decline of wind and solar power curtailment in China? Evidence from China and four typical provinces. **Renewable Energy**, Agosto 2021. 31-42.
- ZHENG, Y. Power-to-Hydrogen Systems: Modelling, Operation and Techno-economic Analysis, 2023.
- ZILL, Dennis G.; SHANAHAN, Patrick D. **Curso Introdutório à Análise Complexa**. 2011. 2^a. ed.

APÊNDICES

APÊNDICE A – ARQUIVO DE DADOS DINÂMICOS E DE EXECUÇÃO DO ANATEM (.STB)

O código apresentado é referente a realização das simulações do comportamento dinâmico do CDU no modo desconectado da rede elétrica. Para sua execução no ANATEM 12.3.0, é necessário garantir a configuração adequada de alguns elementos fundamentais. Entre eles, destaca-se a definição do arquivo de plotagem, que determina quais variáveis devem ser monitoradas durante a simulação. Outro ponto crítico é a configuração do sinal de entrada. Nesse caso, o sinal foi implementado utilizando um bloco de função pulso associado a um bloco de tempo.

```
(=====
(  TITULO DO CASO
(=====
TITU
  MODELO ELETROLISADOR
( TCC - ALICIA FARIA
(
(=====
( ASSOCIACAO DE ARQUIVOS
(=====
DARQ
(..... Arquivos de Saída
(Tipo) (C) ( Nome do Arquivo
  OUT   .\OUT\
  LOG   .\LOG\
  PLT   .\PLT\
(.....
999999
(
```

```

(=====
( SELECIONAR MODO DE EXECUCAO DO PROGRAMA
(=====

ANAC

(
(=====

( DADOS DE PADRAO PARA OPCOES DE EXECUCAO
(=====

DOPC IMPR CONT

(Op) E (Op) E

IMPR FILE CONT

999999

(
(=====

( DADOS DE CDU
(=====

DCDU

(ncdu) ( nome cdu )

    0010 MODELOEL

(-----
(nb)i(tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
(-----

(
(-----

(nb)i(tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
(-----

    1 IMPORT TEMPO          TIME
    2 FUNCAO PULSO  TIME  I      1.    1.    200.  1.
    13 GANHO           I      R      0.55
    15 ENTRAD          Vint

```

```

20 SOMA          RC      V
                  R      V
                  Vint   V

21 ORD(1)       I      RC      4.375 0.    1.    13.

23 FUNCAO X**2  modV   V2

24 FUNCAO ABS   V      modV

25 ENTRAD                      P

26 DIVSAO      P      G
                  V2     G

27 SAIDA       G

(-----)
(DEFVA (stip) (vdef) ( d1 )( d2 )
(-----)

DEFVAL      Vint   0.545
DEFVAL      P      1

FIMCDU

(
999999

(
(=====)
( VARIAVEIS PARA PLOTAGEM
(=====)

DPLT

(
( ***** Sinais do CDU - MODELOEL *****
(Tipo)M( El ) ( Pa) Nc Gp ( Br) Gr ( Ex) (Bl) P
CDU          10                               26
999999

(
(=====)

```

(NUMERO MAXIMO DE ITERACOES PARA CONVERGENCIA

(=====

DCTE

(Ct) (Val)

ITMR 100

TEMD 1.E-2

999999

(

(=====

(DADOS DE SIMULACAO

(=====

DSIM

(Tmax) (Stp) (P) (I)

60.0 0.010 1

(=====

(EXECUCAO DO CASO

(=====

EXSI

(

(=====

(DADOS DE OPCOES DEFAULT DE EXECUCAO

(=====

DOPC

(Op) E (Op) E

IMPR D FILE D CONT D

999999

(

(=====

(SELECIONAR MODO DE EXECUCAO DO PROGRAMA

(=====

ANAT

(

FIM

Para melhor compreensão de seu funcionamento, a Tabela 10 detalha a função de cada código de execução como descrito no manual e discute como foi aplicado no arquivo em questão.

Tabela 10 - Códigos de execução utilizados.

Código de Execução	Descrição retirada do manual	Aplicação no arquivo
TITU	Leitura do título (identificação alfanumérica) do caso em estudo. Esta identificação é impressa pelo programa em todas as páginas dos relatórios de saída. Se este código de execução não for utilizado, o caso em estudo não terá identificação.	O título inserido foi 'MODELO ELETROLISADOR'.
DARQ	Leitura de dados de associação de arquivos de entrada e saída. Os seguintes tipos de arquivos podem ser associados por meio do código: Arquivo de relatório; Arquivo de mensagem; Arquivo de plotagem; Arquivo histórico do Anarede; Arquivo de modelos built-in; Arquivo de modelos Controladores Definidos pelo Usuário; Arquivo de dados e modelos; Arquivo do CDUEdit; Arquivo de plotagem de relés de impedância; Arquivo CSV de resultados da análise de Multi-Infeed; Arquivo CSV de resultados de inércia gerados	Todos os arquivos definidos são de saída, cada um com a indicação de onde o arquivo gerado será armazenado em pasta local. São eles: OUT (arquivo de relatório), LOG (arquivo de mensagem) e PLT (arquivo de plotagem).

Código de Execução	Descrição retirada do manual	Aplicação no arquivo
	pela opção; Arquivo snapshot; Arquivo de plotagem automática de variáveis de Controladores Definidos pelo Usuário; Arquivo de sinal externo.	
ANAC	Estabelecer o contexto de execução de simulação de sistemas de controle sem a presença de rede elétrica (contexto <i>ANACDU</i>). Ao se executar este código os dados na memória são inicializados, porém as associações das unidades lógicas feitas com o código <i>ULOG</i> são mantidas.	Apenas a inclusão ao código é suficiente para utilização, não necessita parâmetros.
DOPC	Leitura de dados de padrão para opções de controle de execução.	Opção utilizada foi a <i>IMPR</i> : De acordo com o código de execução em que é ativada, imprime os relatórios dos dados de entrada na Unidade Lógica #4 (arquivo <i>.OUT</i> definido em <i>DARQ</i>).
DCDU	Dados de controladores definidos pelo usuário. Leitura de dados de modelo de controlador definido pelo usuário (<i>CDU</i>). Possui diferentes réguas de preenchimento, a depender do contexto do dado a ser informado. É possível declarar mais de um controlador em um mesmo <i>DCDU</i> . Cada declaração de um controlador deve ser finalizado pelo comando <i>FIMCDU</i> .	Contém apenas o modelo construído e exportado com o <i>CDUEdit</i> .

Código de Execução	Descrição retirada do manual	Aplicação no arquivo
DPLT	Leitura de dados das variáveis a serem armazenadas no arquivo de plotagem.	<p>Esse código serve como um template, definindo quais informações devem conter no arquivo de plotagem que será utilizado no PlotCepel.</p> <p>Parâmetros: TIPO (CDU), EL (número de identificação do CDU, retirar informação em 'DCDU') e BL (a saída do bloco especificada nesse campo será plotada, preencher uma linha para cada variável a ser monitorada).</p> <p>No desenvolvimento atual, está sendo acompanhada a saída do bloco 26 do CDU 10. Correspondendo à saída do bloco de divisão: condutância.</p>
DCTE	Leitura e modificação dos dados de constantes utilizadas no programa. A especificação da constante a ser modificada é efetuada através do mnemônico correspondente.	<p>ITMR: Número máximo de iterações na solução das interfaces Modelo CA - Rede CA e Modelos CC - Rede CC. Valor: 100</p> <p>TEMD: Tolerância de convergência em erro relativo das variáveis dos modelos CA-CC. Valor: 1e-2</p>

Código de Execução	Descrição retirada do manual	Aplicação no arquivo
DSIM	Controle da simulação. Leitura de dados de simulação.	<p>Tmax: Tempo máximo de simulação, em segundos. Se for deixado em branco é assumido o valor 10. Valor: 60</p> <p>Stp: Passo de integração, em segundos. Se for deixado em branco é assumido o valor 0.001 Valor: 0.01</p> <p>P: Frequência de gravação dos valores das variáveis selecionadas para plotagem, em passos de integração. O valor a ser fornecido deve ser um número ímpar. Valor: 1</p>
EXSI	Executa a simulação do caso de estabilidade.	Apenas a inclusão ao código é suficiente para utilização, não necessita parâmetros.
ANAT	Estabelecer o contexto de simulação de casos de estabilidade (contexto ANATEM). Ao se executar este código os dados na memória são inicializados, porém as associações das unidades lógicas feitas com o código ULOG são mantidas. Quando se começa a execução do programa este é o contexto "default".	Apenas a inclusão ao código é suficiente para utilização, não necessita parâmetros.

Fonte: elaboração própria a partir de (CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, 2024)