



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**JOÁS RONÁLDY DE HOLANDA SANTOS**

**TÉCNICA DE MONTE CARLO APLICADA AO DIMENSIONAMENTO DE UMA  
GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM UMA MICRORREDE COM ESTAÇÕES DE  
RECARGA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E A HIDROGÊNIO**

**Recife  
2024**

Joás Ronáldy de Holanda Santos

**TÉCNICA DE MONTE CARLO APLICADA AO DIMENSIONAMENTO DE UMA  
GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM UMA MICRORREDE COM ESTAÇÕES DE  
RECARGA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E A HIDROGÊNIO**

Projeto de Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Área de concentração:** Processamento de Energia.

**Orientador:** Prof. Dr. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino.

**Coorientador:** Prof. Dr. Douglas Contente Pimentel Barbosa

Recife

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Santos, Joás Ronáldy de Holanda.

Técnica de Monte Carlo aplicada ao dimensionamento de uma geração fotovoltaica em uma microrrede com estações de recarga de veículos elétricos e a hidrogênio / Joás Ronáldy de Holanda Santos. - Recife, 2024.

96 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Elétrica, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2024.

Orientação: Dr. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino.

Coorientação: Dr. Douglas Contente Pimentel.

1. Microrrede; 2. Hidrogênio Verde; 3. Veículos Elétricos. I. Aquino, Ronaldo Ribeiro Barbosa de - Orientação. II. Pimentel, Douglas Contente - Coorientação. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

CDD 621.3

**JOÁS RONÁLDY DE HOLANDA SANTOS**

**“TÉCNICA DE MONTE CARLO APLICADA AO  
DIMENSIONAMENTO DE UMA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM  
UMA MICRORREDE COM ESTAÇÕES DE RECARGA DE  
VEÍCULOS ELÉTRICOS A A HIDROGÊNIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de concentração em Processamento de Energia.

Aprovada em: 31/07/2024

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>o</sup>. Douglas Contente Pimentel Barbosa  
(Coorientador e Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Pedro André Carvalho Rosas  
(Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Milde Maria da Silva Lira  
(Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

Ao finalizar este trabalho, elevo meus pensamentos em gratidão a Deus, fonte de sabedoria e inspiração, que iluminou cada passo desta jornada.

Um agradecimento especial à minha família, o suporte emocional e o incentivo incondicional foram fundamentais. Ao meu pai e minha mãe, cujo amor e dedicação me proporcionaram as condições necessárias para que eu pudesse me dedicar a este projeto. Ao meu irmão, pela paciência e companheirismo, e à minha tia, por suas palavras de encorajamento e sabedoria.

Também agradeço a minha namorada pela força e suporte em todos momentos.

Expresso minha gratidão ao pessoal do laboratório, em especial aos meus orientadores Dr. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino e Dr. Douglas Contente Pimentel Barbosa, cuja colaboração e amizade tornaram os desafios mais leves e as conquistas mais gratificantes. Aos amigos, que compartilharam comigo as alegrias e as dificuldades do percurso acadêmico, meu sincero obrigado.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à ENEVA, que financiou minha bolsa de estudos e tornou possível a realização desta pesquisa. Agradeço também à CPFL, por fornecer os dados essenciais sobre o carregamento de veículos elétricos, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. A contribuição de ambas as empresas foi inestimável para o sucesso deste projeto.

Por fim, mas não menos importante, agradeço ao meu professor orientador Ronaldo, cuja orientação e apoio foram essenciais para a realização deste trabalho. Sua paciência e conhecimento foram faróis que guiaram minha pesquisa e escrita.

A todos vocês, meu profundo e sincero agradecimento.

## RESUMO

Esta dissertação investiga a adaptação de postos de combustível para veículos elétricos e movidos a hidrogênio, através do desenvolvimento de uma microrrede utilizando a técnica de Monte Carlo para modelar cenários de demanda energética variável e otimizar a potência de eletrolisadores e geração fotovoltaica. O trabalho contextualiza a transição para energias renováveis, destacando microrredes e hidrogênio verde, e explora a aplicação de métodos de Monte Carlo na engenharia elétrica. A metodologia inclui uma análise detalhada dos componentes da microrrede, como eletrolisadores, células de combustível, sistemas de armazenamento de bateria (BESS) e geração fotovoltaica, com foco na gestão de energia através de um barramento AC. Os resultados demonstram a eficiência da microrrede em gerenciar a oferta e demanda de energia, avaliando a performance do sistema e considerando suas limitações.

**Palavras-chave:** Microrrede, Hidrogênio Verde, Eletrolisador, Célula combustível, Monte Carlo, Veículos Elétricos, Veículos a Hidrogênio.

## **ABSTRACT**

This dissertation study investigates the adaptation of fuel stations to support electric and hydrogen-powered vehicles through the development of a microgrid, employing the Monte Carlo technique to model variable energy demand scenarios and optimize power settings for electrolyzers and photovoltaic generation. The research contextualizes the transition to renewable energies, emphasizing the importance of microgrids and green hydrogen, and explores the application of Monte Carlo methods in electrical engineering. The methodology includes an in-depth analysis of microgrid components such as electrolyzers, fuel cells, battery storage systems (BESS), and photovoltaic generation, focusing on energy management through an AC bus. Results show the microgrid's efficiency in managing energy supply and demand, particularly in the operation of the electrolyzer and storage systems, while also addressing the study's limitations.

**Keywords:** Microgrid, Green Hydrogen, Electrolyzer, Fuel Cell, Monte Carlo, Electric Vehicles, Hydrogen Vehicles.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Aruitetura de uma Microrrede .....	14
Figura 2 : Cadeia de Produção e Distribuição do Hidrogênio .....	16
Figura 3 : Sistemas de Armazenamento para FCEVs e FCHEVs .....	17
Figura 4 : Estimativa de Vendas de Veículos por Tipo .....	17
Figura 5 :Representação do Átomo de Hidrogênio.....	22
Figura 6 :Formas do Hidrogênio na Natureza.....	22
Figura 7 : Rotas do H2.....	23
Figura 8 : Diagrama de Modelos de uma Célula Combustível.....	25
Figura 9 : Diagrama Completo de Operação de uma Célula Combustível.....	27
Figura 10 : Diagrama de Troca de Calor da Célula Combustível.....	28
Figura 11 : Parâmetros e Curva de Tensão em Função da Corrente em uma FC Para Valores Distintos de Temperatura .....	30
Figura 12 : Partes do Eletrolisador do Tipo PEM .....	32
Figura 13 : Fluxograma do funcionamento de um eletrolisador do Tipo PEM.....	32
Figura 14 : Circuito Equivalente de um Eletrolisador do Tipo PEM.....	33
Figura 15 : Curva de Tensão do Eletrolisador em Função da Corrente. ....	34
Figura 16 : Circuito Equivalente de um Eletrolisador do Tipo PEM.....	35
Figura 17 : Hierarquia de Controle de Frequência em um Sistema Elétrico .....	38
Figura 18 : BESS com Função Peak-Shaving .....	40
Figura 19 : Deslocamento de Carga, Armazenamento e Despacho de Energia .....	41
Figura 20 : Eletroposto Localizado em Campinas.....	44
Figura 22 : Modelo Matemático da Demanda de Hidrogênio ao Longo de 7 Dias ....	48
Figura 23 : Demanda Semanal Acumulada Para uma Estação de Recarga do Tipo "Urban Medium" .....	49
Figura 24 : Tipos de Armazenamento de Hidrogênio .....	50
Figura 25 : Descrição do Processo de Monte Carlo .....	55
Figura 26 : Descrição do Processo em uma Simulação Monte Carlo .....	56
Figura 27 : Probabilidade da Ocorrência do Evento em Função do Número de Iterações das Simulações Monte Carlo .....	62
Figura 28 : Diagrama da Microrrede Simulada .....	65
Figura 29 : Representação do Conceito do Eletroposto junto com Estações de Recargas de FCEVs .....	65

Figura 30 : Representação do Algoritmo .....	68
Figura 31 : Descrição da Árvore Decisão do Controle .....	72
Figura 32 A: Gráficos de Potência da Geração Fotovoltaica (Curva amarela), Consumo dos Veículos Elétricos (Curva Azul), Potência Consumida pelo Eletrolisador (Cinza), Potência da Bateria (Curva Verde), Potência da Rede (Vermelho), Potência Consumida de FC (Curva Rosa).....	81
Figura 33 : SOC e SOCH .....	81
Figura 34 : Demanda de Gás Hidrogênio e Déficit .....	81
Figura 35 : Representação do Primeiro Dia Simulado .....	82
Figura 36 : Evolução da Variável Demanda Não Atendida ao Longo das Iterações .	85
Figura 37 : Exemplo 1 de Convergência do Valor Médio ao Longos das Iterações ..	86
Figura 38 : Exemplo 2 de Convergência do Valor Médio ao Longos das Iterações ..	86
Figura 39 : Evolução do Desvio Padrão ao Longo das Iterações .....	87
Figura 40 : Relação de Demanda de Hidrogênio não Atendida (Déficit) com Potência Nominal Solar e Potência Nominal Solar .....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 : Parâmetros da Fuel Cell .....	29
Tabela 2 : Descrição das Resistências do Circuito do Modelo de Eletrolisador PEM .....	33
Tabela 3 : Estação de Recarga .....	45
Tabela 4 : Especificações Técnicas dos Carregadores .....	46
Tabela 5 : Descrição das Variáveis Utilizadas na Simulação .....	67
Tabela 6 : Parâmetros da Equação que são Amostrados Experimentalmente da Célula Combustível .....	75

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SIGLA	SIGNIFICADO	UNIDADES
BESS	Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias (Battery Energy Storage Systems)	-
BEVs	Veículos elétricos a bateria	-
CoP	Chance de Perda	-
F	Constante de Faraday	C/mol
FCEVs	Veículos elétricos a célula de combustível	-
I	Corrente Elétrica	A
LCs	Controladores de Carga (Load Controllers)	-
MCs	Controladores de Microrrede (Microgrid Controllers)	-
MGCC	Controlador Central da Microrrede (Microgrid Central Controller)	-
NFCTEC	National Fuel Cell Technology Evaluation Center	-
$n_p$	Número de Células em Paralelo	-
$n_s$	Número de Células em Série	-
$P_{bat}$	Potência da Bateria	W
$P_{bat}^*$	Potência de Referência da Bateria	W
$P_{batmax}$	Potência máxima da bateria (potência nominal)	W
PCC	Point of Common Coupling	-
Peletrolisador nominal	Potência nominal do eletrolisador	W
PEM	Membrana de Troca Próton-Próton (Proton Exchange Membrane)	-
PEMFC	Célula a Combustível de Membrana de Troca de Prótons (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	-

$P_{Ev}$	Potência de consumo dos veículos elétricos	W
$P_{fc}$	Potência da Célula de combustível	W
$P_{fc\ nominal}$	Potência nominal da célula combustível	W
$P_{grid}^*$	Potência de referência da rede elétrica	W
$P_{liquida}$	Diferença entre a potência da geração fotovoltaica e potência requerida pelos carregadores elétricos	W
$P_{solar}$	Potência da Geração Fotovoltaica	W
R	Constante Universal dos Gases	J/(mol·K)
$R_i$	Resistência Interna da Célula PEM	$\Omega$
$R_1$	Resistência do circuito elétrico externo	$\Omega$
$R_{anode}$	Origina-se do sobrepotencial da reação do oxigênio na superfície no ânodo	$\Omega$
$R_{bubble,O2}$	Resistência devido à cobertura parcial do ânodo pelas bolhas de oxigênio	$\Omega$
$R_{membrane}$	Resistência causada pela membrana	$\Omega$
$R_{ions}$	Resistência causada pelo eletrólito	$\Omega$
$R_{bubble,H2}$	Resistência devido à cobertura parcial do ânodo pelas bolhas de hidrogênio	$\Omega$
$R_{cathode}$	Origina-se do sobrepotencial da reação do oxigênio na superfície no cátodo	$\Omega$
$R_1$	Resistência do circuito elétrico externo (variação ou erro de medição)	$\Omega$
SOC	Estado de carga do BESS	%
SOCH	Estado de carga do reservatório de Hidrogênio	%
SOCH <sub>2 min</sub>	Estado mínimo de carga do reservatório de	%

	Hidrogênio	
SOCH2 <sub>max</sub>	Estado mínimo de carga do reservatório de Hidrogênio	%
SOECs	Células de Eletrólise de Óxido Sólido (Solid Oxide Electrolysis Cells)	-
T	Temperatura	K
V	Potencial da Célula ou do Conjunto de Células	V
VA	Volt-Ampère	VA
var	Volt-Ampère Reativo	var
V2G	Tecnologia veículo-para-rede	-
VaR	Valor em Risco	-
W	Watt	W

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO .....	10
1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	11
1.2 OBJETIVOS .....	17
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	18
CAPÍTULO 2: REFERENCIAL TEÓRICO .....	20
2.1 PROPRIEDADE DO GÁS HIDROGÊNIO .....	21
2.2 CÉLULA COMBUSTÍVEL .....	24
2.2.1 Descrição Teórica .....	24
2.2.2 Modelo Matemático .....	24
2.3 ELETROLISADOR .....	31
2.3.1 Modelo Matemático .....	34
2.4 BESS .....	37
2.4.1 Modelo Matemático .....	41
2.5 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA .....	42
2.6 DEMANDA ENERGÉTICA .....	43
2.6.1 Carga Elétrica .....	43
2.6.1.1 Aquisição de Dados e Metodologia .....	44
2.6.1.2 Integração e Análise de Dados .....	45
2.6.2 Demanda por hidrogênio .....	46
2.7 SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO .....	50
2.7.1 Modelo do armazenamento .....	51
CAPÍTULO 3: TÉCNICA DE MONTE CARLO .....	53
3.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	54
3.2 CRITÉRIO DE PARADA .....	56
3.2.1 Critério de Parada via Inequação de Chebyshev .....	57
3.2.2 Critério de Parada da Distribuição de Gauss .....	58
3.2.3 Critério de Parada da Estimação da Variância .....	59
3.2.4 Comparação dos métodos de parada .....	60

CAPÍTULO 4: ESTABELECIMENTO DO CONTROLE HIERÁRQUICO DA MICRORREDE E OS ORGANOGAMA DA SEQUÊNCIA DA SIMULAÇÃO .....	63
4.2 DESCRIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS ...	64
4.3 CRITÉRIOS DE DESPACHO DE POTÊNCIA .....	66
4.4 DESCRIÇÃO DO ALGORITMO .....	67
CAPÍTULO 5: ANÁLISES DOS RESULTADOS .....	78
5.1 ANÁLISE .....	79
CAPÍTULO 7: CONCLUSÃO .....	90
REFERÊNCIAS .....	93

## CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Na jornada em direção a uma economia global de baixo carbono, o hidrogênio verde emerge como uma solução energética promissora e versátil, crucial para a descarbonização de setores onde a eletrificação direta se mostra desafiadora. Este vetor energético, produzido através da eletrólise da água usando eletricidade gerada por fontes renováveis, como solar e eólica, emite baixíssima quantidade de carbono em seu uso, alinhando-se perfeitamente com os objetivos globais de redução de emissões de gases de efeito estufa (IRENA, 2020).

O papel do hidrogênio verde vai além de simplesmente ser uma fonte de energia limpa. Ele oferece uma alternativa viável para a descarbonização de indústrias pesadas e setores de transporte de longa distância, como marítimo e aviação, que enfrentam grandes obstáculos na substituição de combustíveis fósseis por eletricidade. Além disso, o hidrogênio verde pode desempenhar um papel fundamental na estabilização das redes elétricas, armazenando energia excedente de fontes renováveis e fornecendo flexibilidade ao sistema energético (WASEEM et al., 2023).

À medida que os países avançam em direção a metas ambiciosas de redução de emissões, a exploração do potencial do hidrogênio verde torna-se crucial para alcançar emissões líquidas zero, particularmente em setores onde as opções para descarbonização são limitadas. A transição de mercado para o uso da eletrólise, impulsionada por energias renováveis, desempenha um papel fundamental não apenas na redução das emissões de gases de efeito estufa, mas também na adição de flexibilidade ao sistema elétrico (O. e W., 2015).

Em consonância com essa transformação energética, os veículos elétricos a célula de combustível (FCEVs, do inglês, *Fuel Cell Electric Vehicles*) surgem como uma inovação significativa, atuando como verdadeiras usinas de energia móveis. A integração desses veículos com a infraestrutura de microrredes e tecnologias de hidrogênio verde pavimentam um novo caminho para o armazenamento e a distribuição eficaz de energia renovável. Utilizando a tecnologia veículo-para-rede (V2G, do inglês, *Vehicle-to-grid*), os FCEVs têm o potencial de desempenhar um papel crucial no armazenamento descentralizado de energia, contribuindo significativamente para a estabilidade e eficiência do sistema elétrico. Além disso, proporcionam uma solução de mobilidade sustentável e limpa, alinhada aos objetivos de uma transição energética verde (Manoharan et al., 2019).

A construção de infraestruturas de carregamento compatíveis tanto com veículos elétricos quanto com veículos a hidrogênio é um marco essencial nesse processo. Esse desenvolvimento não apenas facilita a adoção mais ampla de soluções de mobilidade limpa, mas também reforça o conceito de um futuro energético sustentável e interconectado, onde as microrredes desempenham um papel fundamental. Assim, à medida que nos movemos em direção a esse futuro, torna-se evidente que o hidrogênio verde e as tecnologias associadas, como os FCEVs e a infraestrutura de microrredes, são componentes indispensáveis para alcançar um sistema energético global que seja não apenas ambientalmente responsável, mas também resiliente e adaptável às necessidades emergentes da sociedade.

Essa transformação é apoiada por avanços significativos em tecnologias de armazenamento de hidrogênio, com metodologias variadas exploradas para otimizar o desempenho e a autonomia dos FCEVs. Diversos tipos de células de combustível, oferecem flexibilidade para atender diferentes necessidades energéticas, desde uso estacionário até mobilidade. No entanto, a jornada em direção à comercialização em larga escala dos FCEVs enfrenta desafios, como o desenvolvimento de uma infraestrutura de abastecimento de hidrogênio robusta e a necessidade de reduzir custos. Apesar desses obstáculos, a promessa de uma mobilidade limpa e eficiente, alinhada aos objetivos de sustentabilidade ambiental, permanece um poderoso motivador para a inovação contínua e o investimento em pesquisa e desenvolvimento, pavimentando o caminho para um futuro energético mais sustentável (MANOHARAN et al., 2019).

## **1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

No cenário atual de mudanças climáticas e busca por soluções energéticas sustentáveis, os sistemas de energia renovável surgem como alternativas promissoras para remodelar a forma como produzimos, distribuimos e consumimos energia. A integração da energia renovável em nossos sistemas de energia não apenas aborda a urgente necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa mas também oferece uma via para aumentar a segurança energética e reduzir a dependência de combustíveis fósseis e importados. Paralelamente, o

conceito de microrredes, conforme detalhado no livro (SOUSA, ZAMBRONI de; CASTILLA, Miguel, 2019), representa uma evolução significativa na distribuição de energia, destacando-se como sistemas de energia elétrica compactos que operam de forma autônoma ou em conjunto com a rede elétrica maior.

Microrredes são definidas como redes elétricas que incorporam uma diversidade de fontes de geração de energia, incluindo renováveis, sistemas de armazenamento de energia e cargas de consumo, tudo operando em uma escala local. Esses sistemas podem funcionar de maneira independente ou conectada à rede principal, adaptando-se às necessidades específicas da comunidade ou do ambiente em que estão inseridos (SOUSA, ZAMBRONI de; CASTILLA, Miguel, 2019). O aspecto mais revolucionário das microrredes é sua capacidade de oferecer operação eficiente e confiável, fornecendo energia de maneira autossuficiente durante interrupções na rede principal ou contribuindo ativamente para a estabilidade e eficiência do sistema elétrico mais amplo.

A importância dessas tecnologias vai além da sustentabilidade ambiental. Economicamente, microrredes e sistemas de energia renovável promovem a descentralização da produção de energia, potencialmente oferecendo redução de custos e maior eficiência por meio da produção localizada de energia. Essa descentralização não apenas aproxima a geração de energia de seu ponto de consumo, reduzindo as perdas associadas à transmissão de longa distância, mas também incentiva a resiliência energética, permitindo que comunidades mantenham a operação energética em face de desastres naturais ou falhas do sistema.

A aplicabilidade dessas inovações é vasta. Desde comunidades remotas e regiões insulares até grandes centros urbanos e instalações industriais, os sistemas de energia renovável e microrredes oferecem soluções adaptáveis e escaláveis para uma variedade de desafios energéticos. Em áreas isoladas, eles fornecem uma solução vital para a autossuficiência energética. Em contextos urbanos, facilitam a gestão da demanda de energia, promovem a integração de veículos elétricos e apoiam a transição para uma economia de baixo carbono.

As microrredes são compostas por uma variedade de componentes, incluindo fontes de geração distribuída, armazenamento de energia, cargas de consumo e sistemas de controle e comunicação (HATZIARGYRIOU, N. D. et al.2005). Esses elementos estão interconectados dentro de uma rede de distribuição local, podendo funcionar de maneira independente da rede principal de energia. Um ponto

importante na estrutura das microrredes, é o Ponto de Acoplamento Comum (PCC, do inglês, *point of common coupling*), que conecta a microrrede à rede principal e permite a transição entre os modos de operação conectado e ilhado. Além disso, os controladores locais (MCs, do inglês, *Microgrid Controllers* e LCs, do inglês, *Load Controllers*) e o controlador central da microrrede (MGCC, do inglês, *Microgrid Central Controller*) desempenham papéis essenciais na gestão da geração, do armazenamento e do consumo de energia dentro da microrrede.

Introduzindo uma camada adicional de controle e operação, o "Distribution Network Operator" (DNO, do inglês, *Operator de Rede de Distribuição*) é responsável pela operação das áreas de média e baixa tensão onde mais de uma microrrede pode existir. Paralelamente, o "Market Operator" (MO, do inglês, *Operador de Mercado*) gere a função de mercado específica da área, integrando as microrredes ao mercado energético mais amplo.

As microrredes podem operar em dois modos principais: conectado à rede e ilhado. No modo conectado, a microrrede trabalha em harmonia com a rede principal, podendo importar ou exportar energia conforme necessário. Este modo maximiza a eficiência do sistema ao permitir que a microrrede aproveite as fontes de energia disponíveis na rede maior ou forneça suporte à rede através de serviços auxiliares. O modo ilhado, por outro lado, é ativado durante interrupções na rede principal ou por escolha operacional, permitindo que a microrrede funcione de forma independente para garantir a continuidade do fornecimento de energia às cargas críticas. Essa capacidade de transição entre modos operacionais é fundamental para a resiliência e a sustentabilidade das microrredes, oferecendo uma solução confiável em face de falhas ou desastres que afetam a rede principal.

A gestão efetiva de uma microrrede requer um sistema de controle hierárquico que coordene as operações entre seus diversos componentes. O MGCC atua no topo da hierarquia, supervisionando a operação geral da microrrede e tomando decisões estratégicas baseadas em dados coletados de toda a rede. Os MCs são responsáveis pela regulação da geração e do armazenamento de energia, enquanto os LCs gerenciam as demandas das cargas de consumo. Este arranjo hierárquico permite uma resposta rápida a mudanças nas condições de operação e suporta a otimização da performance da microrrede, garantindo segurança, eficiência e confiabilidade no fornecimento de energia. A Figura 1 mostra de maneira geral, uma representação da arquitetura de uma microrrede.

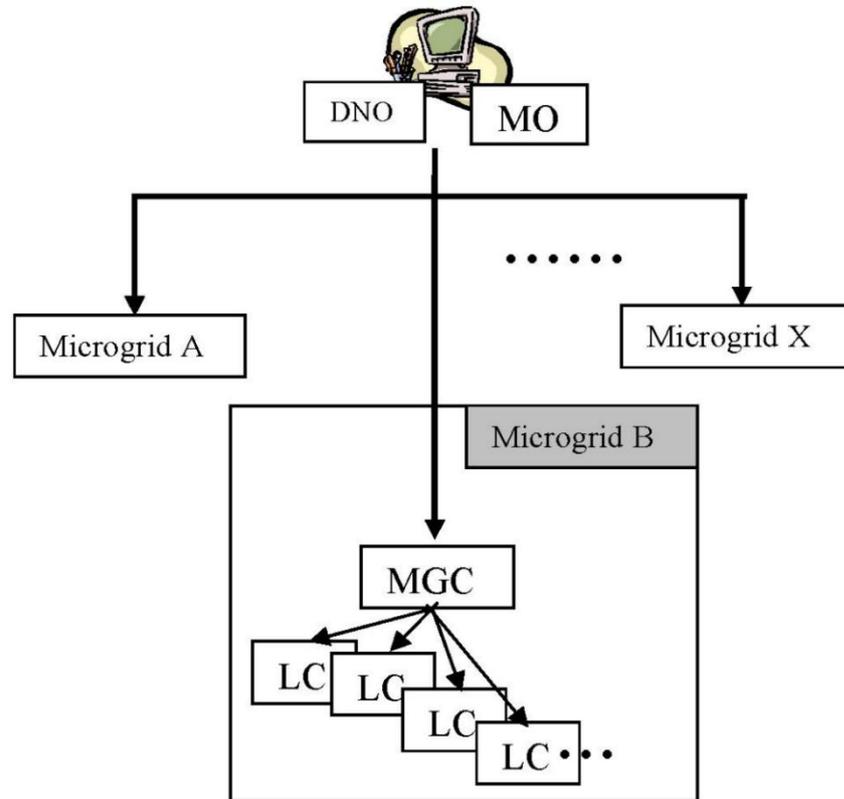


Figura 1: Aruitetura de uma Microrrede

Fonte: HATZIARGYRIOU, N. D. et al. (2005)

A transição para veículos elétricos e a hidrogênio complementa a adoção de microrredes e sistemas de energia renovável, criando um ecossistema energético mais sustentável e resiliente. A integração de veículos elétricos, incluindo FCEVs, em microrredes pode facilitar a implementação de soluções de Vehicle-to-Grid (V2G), onde os veículos não apenas consomem energia elétrica, mas também podem fornecer energia de volta à rede, ajudando a estabilizar a demanda de energia e promovendo o uso de energias renováveis. Essa sinergia entre veículos elétricos, tecnologias de hidrogênio e microrredes destaca uma abordagem holística para alcançar um futuro energético sustentável, demonstrando o potencial de transformação dessas tecnologias na redução da pegada de carbono do setor de transporte e na promoção da sustentabilidade ambiental (WASEEM et al., 2023).

Atualmente, os veículos elétricos a bateria (BEVs, do inglês, *Battery Electric Vehicle*) e os veículos elétricos a célula de combustível (FCEVs) são reconhecidos por suas emissões zero, posicionando-os como soluções promissoras para a eletrificação do sistema de transporte. Os FCEVs, em particular, são destacados

como uma tecnologia complementar aos BEVs, especialmente em aplicações que exigem longos alcances de condução e tempos de recarga rápidos, onde os BEVs podem encontrar limitações devido ao tamanho e peso das baterias e ao tempo necessário para recarga.

Apesar do potencial, existem desafios significativos que precisam ser superados para a adoção mais ampla dos FCEVs. Estes incluem o desempenho ainda insatisfatório das células de combustível em certas condições, problemas de partida em temperaturas frias, preocupações com sistemas de armazenamento de hidrogênio, redução de custos, considerações de segurança, otimização dos sistemas de armazenamento de energia e sistemas de tração. Além disso, a infraestrutura de abastecimento de hidrogênio permanece como um obstáculo significativo, com a necessidade de desenvolvimento de estações de reabastecimento de hidrogênio para suportar a operação eficiente dos FCEVs.

As perspectivas futuras para os veículos elétricos e a hidrogênio são promissoras, com avanços tecnológicos contínuos e apoio político sendo fundamentais para superar os desafios existentes. A integração de sistemas de armazenamento de energia híbridos, que combinam as vantagens de baterias e supercapacitores com células de combustível, apresenta uma oportunidade para melhorar o desempenho e a eficiência dos FCEVs. Além disso, o desenvolvimento e a implementação de políticas de promoção, conscientização comunitária, expansão da infraestrutura de reabastecimento de hidrogênio e redução de custos serão cruciais para aumentar a adoção dessas tecnologias.

Na Figura 2 é apresentado o ciclo de vida do hidrogênio, apresentando de forma esquemática as várias etapas associadas à produção, armazenamento, distribuição e utilização do hidrogênio como vetor energético. Este diagrama destaca a importância do hidrogênio verde, produzido por meio de processos que não emitem carbono, como a eletrólise da água utilizando eletricidade gerada a partir de fontes renováveis. A Figura 2 ilustra como o hidrogênio pode ser produzido (produção), armazenado e transportado (armazenamento e distribuição), e finalmente utilizado em diversas aplicações, incluindo a geração de eletricidade, mobilidade (veículos a hidrogênio), e em processos industriais. O ciclo completo enfatiza a versatilidade do hidrogênio como um portador de energia limpa, capaz de desempenhar um papel significativo na descarbonização de múltiplos setores da economia.

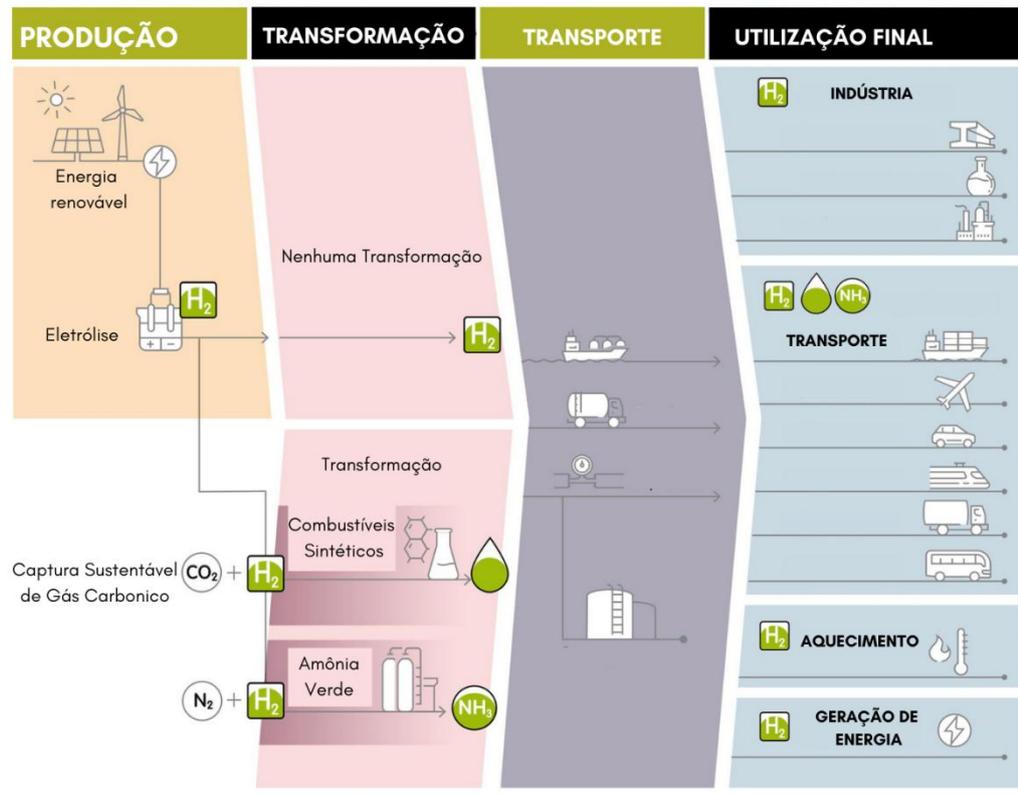


Figura 2: Cadeia de Produção e Distribuição do Hidrogênio

Fonte: Adaptado de IRENA (2020)

Por outro lado, a Figura 3 aborda a integração de veículos elétricos a célula de combustível (FCEVs) dentro do conceito de microrredes inteligentes, mostrando como esses veículos podem interagir com a rede elétrica de forma bidirecional. Esta interação é central para o conceito de Vehicle-to-Grid (V2G), onde os FCEVs não apenas consomem energia da rede para carregar suas células de combustível ou baterias, mas também têm a capacidade de devolver energia à rede durante períodos de alta demanda ou quando a geração de energia renovável é insuficiente (WASEEM, M. et al., 2023).

A Figura 4 destaca o potencial dos FCEVs em contribuir para a estabilidade e eficiência da rede elétrica, ao mesmo tempo que promove a utilização de fontes de energia renováveis. Isso reforça o papel dos veículos a hidrogênio como elementos ativos na transição energética, colaborando tanto para a redução de emissões no setor de transporte quanto para o aumento da penetração de energias renováveis no *mix* energético.

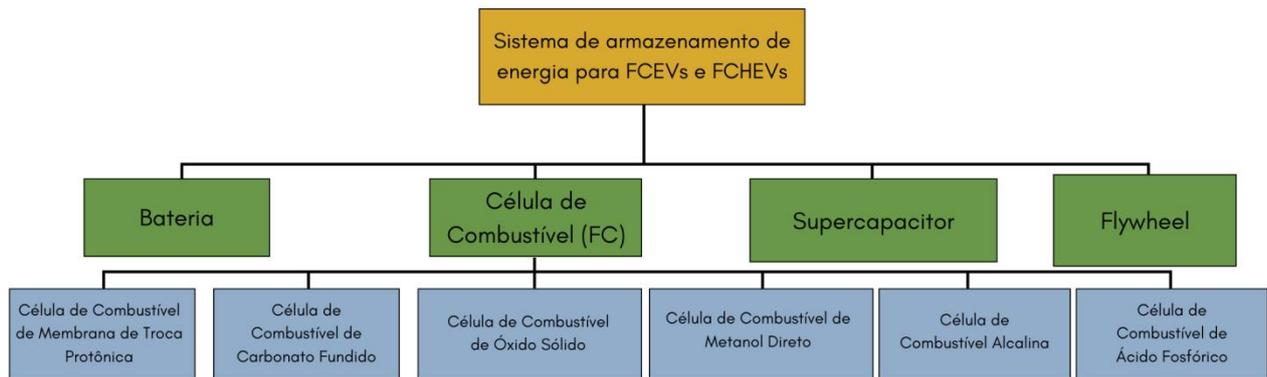


Figura 3: Sistemas de Armazenamento para FCEVs e FCHEVs

Fonte: Adaptado de WASEEM, M. et al. (2023)

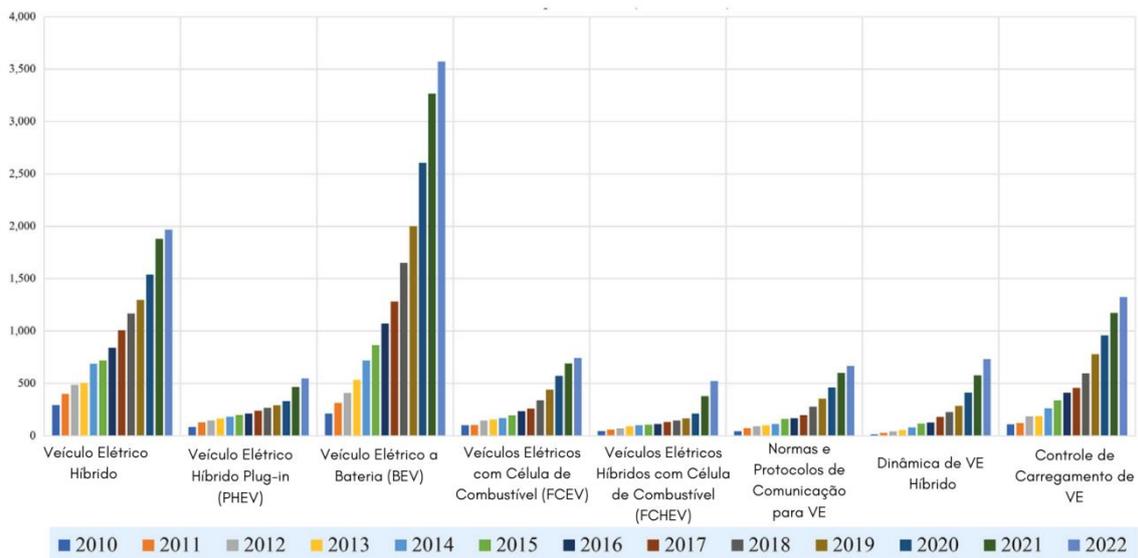


Figura 4: Estimativa de Vendas de Veículos por Tipo

Fonte: Adaptado de WASEEM, M. et al. (2023)

## 1.2 OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo avaliar como os postos de combustível podem se adaptar para atender carros elétricos e a hidrogênio. O foco é dimensionar os elementos de uma microrrede que satisfaça a demanda de abastecimento desses veículos, minimizando o déficit de hidrogênio demandado. Para isso, serão modelados os componentes de geração fotovoltaica, armazenamento, célula a combustível, eletrolisador e carga e aplicada a técnica de Monte Carlo para simular cenários variados de demanda energética. O objetivo é determinar as potências

nominais ideais para o eletrolisador e a geração fotovoltaica, aproximando-se de um fornecimento contínuo de hidrogênio nas estações de recarga. Em resumo, busca-se encontrar as potências nominais para o eletrolisador e a geração fotovoltaica de forma a minimizar o déficit de hidrogênio.

### **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Na introdução da dissertação, começamos contextualizando o cenário global de energia, ressaltando a importância das microrredes, do hidrogênio verde e da transição energética de combustíveis fósseis para fontes mais sustentáveis. A relevância do estudo se acentua pelo desenvolvimento de infraestruturas de carregamento para veículos elétricos e a hidrogênio. Aqui, declaramos o problema central: a necessidade de dimensionar eficientemente uma microrrede para postos de carregamento, levando em consideração diversas variáveis e incertezas. Definimos também os objetivos do trabalho, incluindo o principal e os secundários relacionados ao dimensionamento da microrrede e análise de seu desempenho.

Na seção de revisão de literatura, abordamos os sistemas de energia renovável e microrredes, elucidando seus conceitos, importância e aplicabilidade. Investigamos o estado atual, desafios e perspectivas futuras dos veículos elétricos e a hidrogênio, além de analisar as metodologias de Monte Carlo em engenharia elétrica e sistemas de energia.

A metodologia descreve o uso da metodologia de Monte Carlo para o dimensionamento da microrrede, as ferramentas matemáticas e o software empregados nas simulações e análise de dados. Detalhamos a modelagem dos componentes da microrrede, incluindo eletrolisador e célula de combustível, bateria, e a geração fotovoltaica, junto com a descrição de como as medições foram realizadas e integradas ao modelo.

O desenvolvimento do modelo de simulação é apresentado em detalhes, explicando o modelo de Monte Carlo, os critérios de parada da simulação e a análise de sensibilidade para identificar os parâmetros mais influentes no desempenho da microrrede.

Na seção de resultados, divulgamos os achados das simulações e discutimos o dimensionamento ótimo da microrrede, abrangendo o tamanho do eletrolisador, da

célula de combustível e da capacidade de geração fotovoltaica necessários para satisfazer as demandas.

A discussão compara os resultados com estudos anteriores e teorias existentes, reflete sobre o impacto dos resultados no desenvolvimento de postos de carregamento sustentáveis e contempla as limitações do estudo.

Nas conclusões e recomendações, fazemos um sumário dos principais achados e como contribuem para o campo de estudo, sugerindo pesquisas futuras e aplicações práticas dos resultados. Refletimos sobre a importância do estudo para a transição energética e a sustentabilidade.

Por fim, as referências bibliográficas listam todos os documentos, artigos, livros e outras fontes consultadas.

## CAPÍTULO 2: REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo explora as bases teóricas essenciais para entender a utilização do hidrogênio como fonte de energia em sistemas integrados de microrredes, além de discutir as tecnologias que viabilizam seu uso eficiente. A análise começa com uma exploração das propriedades fundamentais do hidrogênio. Como o elemento mais leve e com a maior capacidade energética por massa entre todos os elementos conhecidos, o hidrogênio se apresenta como um vetor energético promissor para aplicações em ambientes sustentáveis e como uma alternativa aos combustíveis fósseis.

A discussão segue para as células a combustível, que são dispositivos cruciais para a conversão do hidrogênio em eletricidade de forma eficiente. O funcionamento, os tipos, a eficiência e as aplicações práticas dessas células são detalhados, com um foco particular em seu uso em veículos e em sistemas de energia renovável. Em seguida, o texto aborda a tecnologia dos eletrolisadores, especialmente o tipo PEM (Proton Exchange Membrane), que desempenha um papel vital na produção de hidrogênio verde a partir de eletricidade gerada por fontes renováveis, como a solar e a eólica. A operação, os parâmetros e a eficiência energética dos eletrolisadores são explorados para ilustrar como eles são integrados em sistemas de energia renovável.

A geração fotovoltaica é então discutida como uma das principais fontes de energia para a eletrólise do hidrogênio. A integração de sistemas fotovoltaicos com eletrolisadores representa uma combinação poderosa para maximizar o uso de energias renováveis e mitigar os efeitos das flutuações na produção de energia. O texto detalha como esses sistemas são dimensionados e gerenciados para otimizar a produção de hidrogênio em microrredes.

Finalmente, a infraestrutura necessária para a carga de veículos elétricos e a hidrogênio é examinada, destacando as tecnologias, demandas e desafios associados ao abastecimento de veículos com estas duas formas de energia. A análise inclui uma visão sobre o design e a operacionalização de estações de recarga, tanto para veículos elétricos quanto para aqueles movidos a hidrogênio, refletindo sobre como essas infraestruturas precisam evoluir para atender ao aumento da demanda por soluções de transporte limpo.

## 2.1 PROPRIEDADE DO GÁS HIDROGÊNIO

A história da produção de hidrogênio é extensa, iniciando-se no século XVIII. O gás hidrogênio foi identificado como um elemento distinto em 1776 pelo cientista britânico Henry Cavendish, que produziu hidrogênio ao reagir zinco com ácido clorídrico. No início do século XIX, especificamente por volta de 1800, os cientistas britânicos William Nicholson e Sir Anthony Carlisle descobriram que a eletrólise da água libera oxigênio e hidrogênio. Posteriormente, em 1838, o químico suíço Christian Friedrich Schoenbein descobriu o efeito de célula de combustível, que produz água e corrente elétrica a partir da combinação de hidrogênio e oxigênio. Em 1845, esse princípio foi utilizado pelo cientista inglês e juiz Sir William Grove para criar uma espécie de bateria a gás (KEÇEBAŞ et al, 2019).

Ainda no século XX, mais precisamente em 1929, Karl Friedrich Bonhoeffer e Paul Harteck, expandindo trabalhos teóricos anteriores, mostraram que o hidrogênio é uma mistura de duas formas moleculares, o hidrogênio *orto* e *para*. A exploração do hidrogênio como combustível para foguetes e células de combustível pela NASA (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço) começou em 1958 e prossegue até hoje. Em 1959, Francis T. Bacon desenvolveu a primeira célula de combustível prática usando hidrogênio e ar. A concepção da economia do hidrogênio foi introduzida em 1970 pelo eletroquímico John O'M. Bockris, e após o embargo de petróleo da OPEC em 1973, intensificou-se o desenvolvimento de células de combustível a hidrogênio como alternativas energéticas. Em resposta às flutuações globais no fornecimento e demanda de petróleo, a Agência Internacional de Energia (IEA) foi estabelecida em 18 de novembro de 1974, visando promover tecnologias que conduzam ao desenvolvimento econômico por meio de novas fontes de energia (JONAS, J., 2009).

O hidrogênio é uma substância elementar composta por dois átomos de hidrogênio, unidos por uma ligação covalente. Devido às suas propriedades moleculares, notadamente sua baixa massa molar, o hidrogênio é mais leve que o ar. Adicionalmente, apresenta características de inflamabilidade e, em altas concentrações, pode ser potencialmente asfixiante quando inalado.

Na Figura 5, o elemento químico hidrogênio é representado. Este elemento ocorre naturalmente em três isótopos, como ilustrado na Figura 6. O Protium, que

consiste em um próton e um elétron, o Deuterium, que adiciona um nêutron, e o Tritium, que inclui um próton e dois nêutrons, além de um elétron.

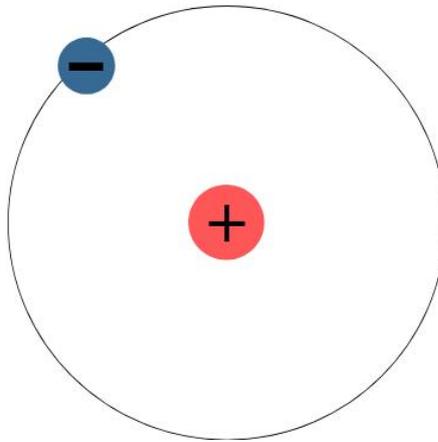


Figura 5: Representação do Átomo de Hidrogênio.

Fonte: Próprio Autor

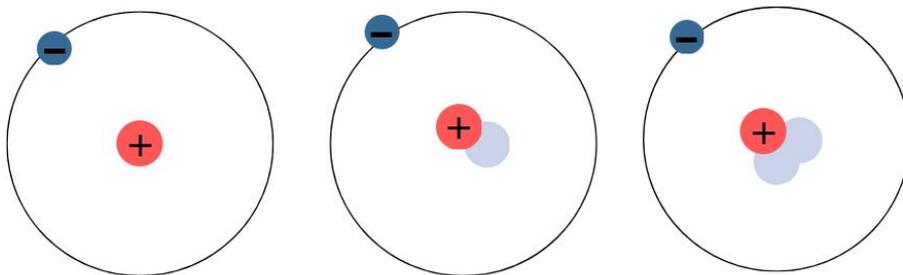
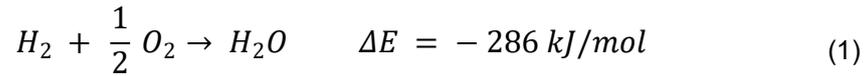


Figura 6: Formas do Hidrogênio na Natureza.

Fonte: Próprio Autor

O hidrogênio é conhecido por sua inflamabilidade e elevada energia de ligação, características que resultam em uma significativa liberação de calor quando queimado. A reação de combustão do hidrogênio, juntamente com a quantidade de energia que ela libera, é exemplificada na Equação 1. Essa dinâmica será explorada em profundidade nas sessões subsequentes dedicadas às células de combustível e aos eletrolisadores.



Apesar da abundância de hidrogênio, sua obtenção na forma elementar é complexa. Não é o constituinte do ar, e os caminhos para obtê-lo são através da divisão da molécula da água (eletrólise ou térmica), conversão termoquímica de combustíveis fósseis e processos biológicos Figura 7. O caminho mais simples é a divisão da água, mas não tem sido tradicionalmente favorecido como resultado de sua alta demanda de energia.

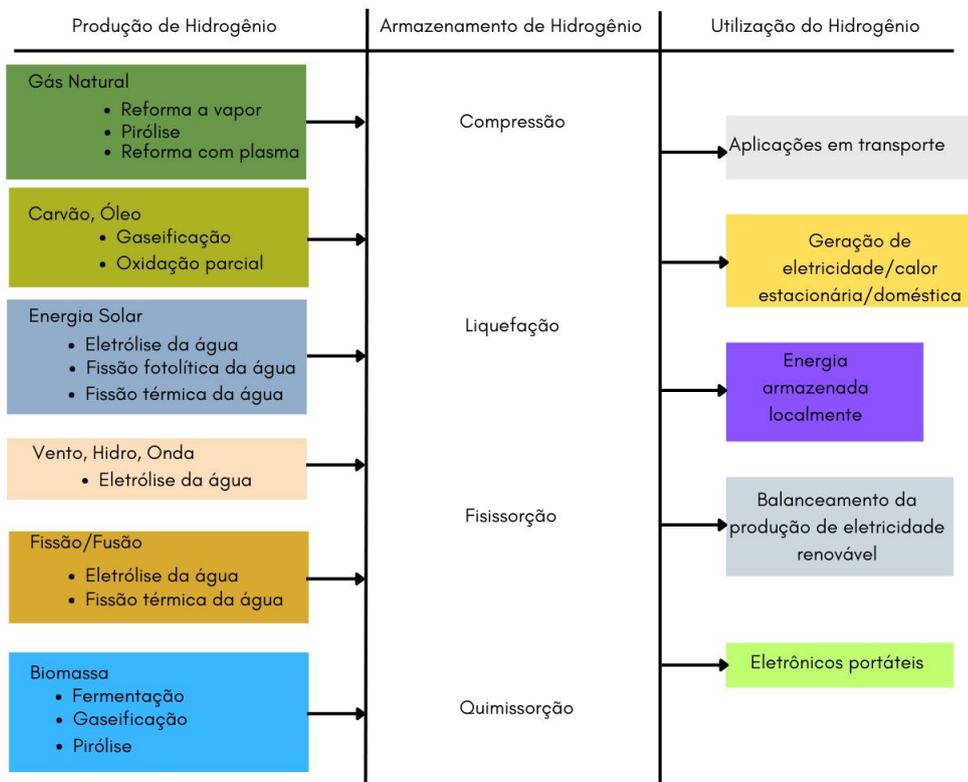


Figura 7: Rotas do H<sub>2</sub>

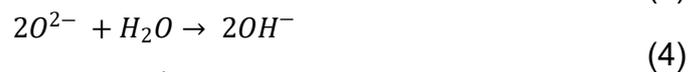
Fonte: Adaptado de ABDIN, Z. et al. (2020)

## 2.2 CÉLULA COMBUSTÍVEL

### 2.2.1 Descrição Teórica

Uma célula de combustível é um dispositivo eletroquímico que converte a energia química de um combustível em energia elétrica. As células de combustível geralmente consistem em um ânodo, um cátodo e um eletrólito. O combustível é alimentado para o ânodo e o oxidante (geralmente oxigênio) é alimentado para o cátodo. No ânodo, o combustível é oxidado e libera elétrons, que fluem através de um circuito externo para o cátodo, onde o oxidante é reduzido e combina com os elétrons e íons hidrogênio (ou outros íons) para formar água ou outros subprodutos. A energia elétrica é gerada no circuito externo pela passagem dos elétrons do ânodo para o cátodo. As células de combustível são uma tecnologia promissora para a geração de energia limpa e eficiente, com aplicações em veículos, sistemas de energia estacionários e dispositivos portáteis (KABZA, Alexander, 2016).

As reações químicas que ilustram o funcionamento da liberação de energia elétrica a partir do gás oxigênio e do gás hidrogênio estão descritas abaixo (equações 2, 3, 4 e 5).



### 2.2.2 Modelo Matemático

Para o trabalho em questão é importante definir um modelo matemático que seja capaz de atender satisfatoriamente ao que o estudo se propõe a resolver. Diante desse contexto, a Figura 8 ilustra as possibilidades para obter o modelo matemático mais adequado para o trabalho.

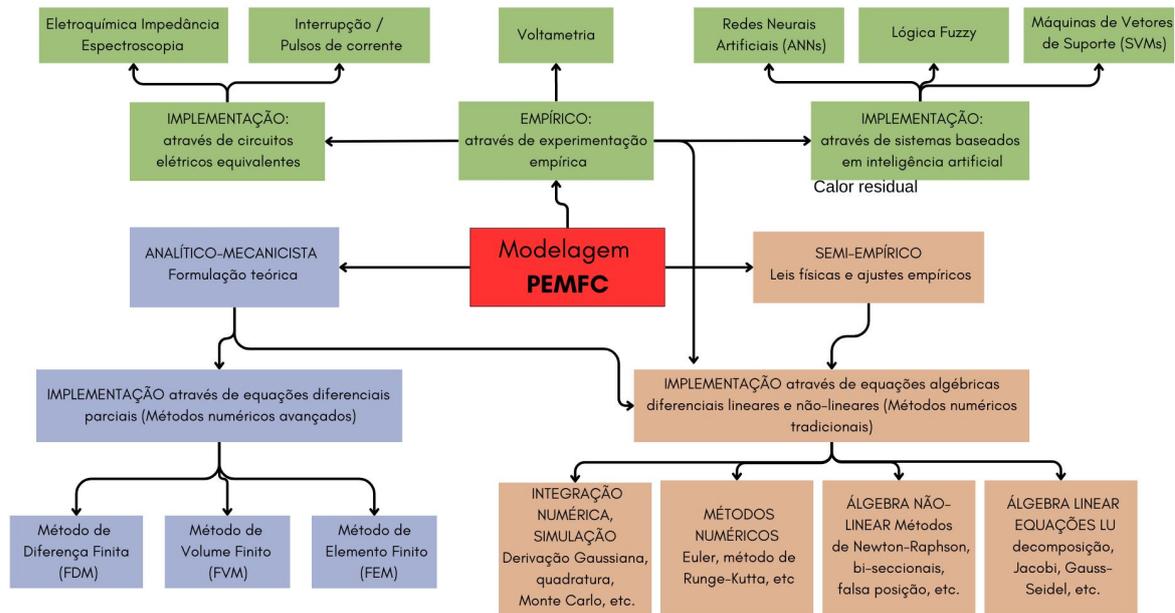


Figura 8: Diagrama de Modelos de uma Célula Combustível

Fonte: Adaptado de ASENSIO, F.J. et al. (2019)

Existem três técnicas de modelagem para célula combustíveis do tipo PEM: abordagens analítico-mecânicas, semi-empíricas e empíricas. A abordagem analítico-mecânica é a mais complexa e incorpora mais detalhes, enquanto a abordagem empírica é a mais simples e baseia-se apenas em experimentação física com o sistema real ou em bancos de dados experimentais. A abordagem semi-empírica é uma combinação das duas primeiras, utilizando formulações analíticas complementadas por dados experimentais para simplificar as equações matemáticas complexas (ASENSIO et al., 2019).

A abordagem semi-empírica, é uma combinação das abordagens analítico-mecânicas e empíricas, utilizando formulações analíticas complementadas por dados experimentais para simplificar as equações matemáticas complexas. Os modelos semi-empíricos são desenvolvidos com base em uma compreensão teórica dos fenômenos físico-químicos que ocorrem dentro da célula de combustível, mas também levam em consideração dados experimentais para ajustar e validar o modelo. Esses modelos são menos complexos do que os modelos analítico-mecânicos, mas ainda são capazes de fornecer informações detalhadas sobre o desempenho da célula de combustível. A abordagem semi-empírica é frequentemente usada quando o objetivo do modelo é ser usado em uma estratégia

de controle ou integrado a outros sistemas, para que possa emular apenas as variáveis necessárias para permitir seu controle ou integração. Esses modelos são comumente conhecidos como modelos de caixa cinza.

A abordagem empírica é baseada apenas em experimentação física com o sistema real ou em bancos de dados experimentais, sem levar em consideração equações físicas ou leis. Os modelos desenvolvidos usando técnicas puramente empíricas podem ser classificados em dois grupos: modelos elétricos ou modelos baseados em inteligência artificial. Esses modelos são conhecidos como modelos de caixa preta e são deduzidos apenas por meio de experimentação física com o sistema real ou por meio de bancos de dados experimentais. Embora os modelos empíricos sejam menos precisos do que os modelos analítico-mecânicos ou semi-empíricos, eles ainda podem fornecer informações úteis sobre o desempenho da célula de combustível (ASENSIO et al., 2019). A abordagem empírica é frequentemente usada quando não há informações suficientes disponíveis sobre o sistema ou quando a complexidade do sistema é muito grande para ser modelada usando abordagens analíticas ou semi-empíricas.

A Figura 9 mostra um diagrama esquemático de um sistema de célula de combustível de hidrogênio. No diagrama, as várias partes do sistema são interconectadas por linhas que representam o fluxo de ar, água e hidrogênio. O fluxo é indicado por setas azuis e vermelhas. A descrição das partes e o fluxo do sistema, da esquerda para a direita é (LISO et al., 2014):

- Compressor Elétrico de Ar: Admite o ar para o sistema.
- Reservatório de Água: Água é utilizada no processo, seguindo o fluxo azul que indica sua movimentação.
- Resfriador de Ar: Resfria o ar antes de ser umidificado.
- Umidificador: Adiciona umidade ao ar antes de sua entrada na célula de combustível.
- Pilha PEM (Célula a Combustível de Membrana de Troca de Prótons): Onde o hidrogênio reage com o oxigênio do ar para gerar eletricidade, calor e água como subprodutos.
- Radiador com Ventilador de Refrigeração: Dissipa o calor gerado pelo processo.
- Válvula de Expansão: Controla o fluxo de hidrogênio para a célula de combustível.

- Compressor Elétrico de Recirculação: Recicla o hidrogênio não consumido de volta para a célula de combustível.
- Tanque de Hidrogênio: Armazena hidrogênio que é alimentado para a célula de combustível.
- Ejetor: Ajuda na recirculação do hidrogênio no sistema.

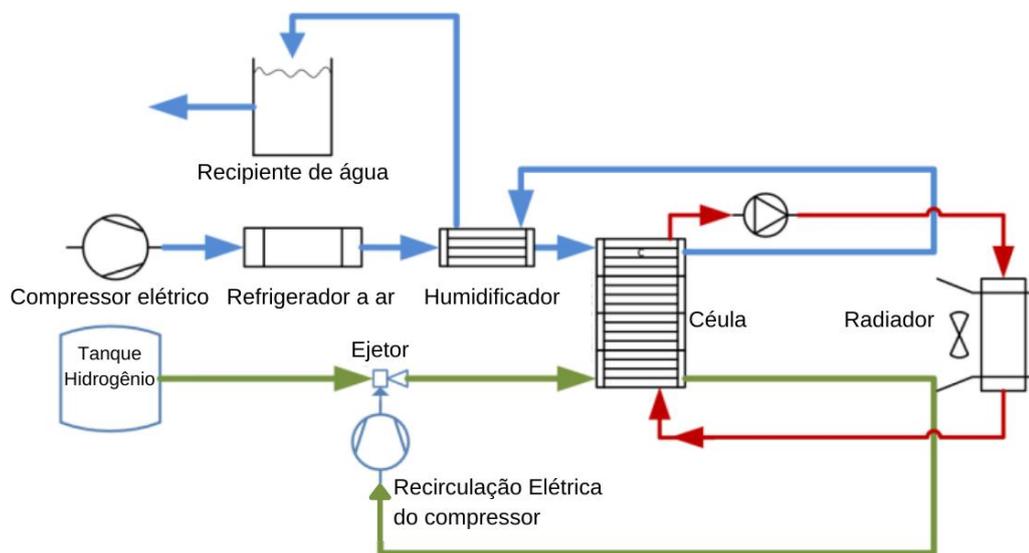


Figura 9: Diagrama Completo de Operação de uma Célula Combustível

Fonte: Adaptado de LISO, Vincenzo et al. (2014)

A pressão de trabalho escolhida para a célula durante o trabalho em questão foi de 1,0 e 1,5 atm (KAZIM, 2004).

A Figura 10 mostra um diagrama esquemático do sistema de refrigeração de uma célula de combustível de maneira mais simplificada que a representada na Figura 9. O esquema é dividido em várias partes principais que ilustram como o calor é gerenciado e dissipado dentro do sistema. Aqui está uma descrição detalhada das partes:

- Célula PEM (Célula a Combustível de Membrana de Troca de Prótons): Representada no lado esquerdo, onde o calor é gerado durante o processo de geração de energia.

- Canal de Resfriamento da Célula de Combustível: O calor da célula é absorvido pelo líquido de resfriamento que flui através de canais na célula de combustível. O fluxo do líquido de resfriamento é indicado por setas vermelhas.
- Convecção: O calor é transportado pelo líquido de resfriamento e levado para fora da célula de combustível.
- Ventilador de Resfriamento e Trocador de Calor Ar-Líquido de Resfriamento: No centro direito, o calor é transferido do líquido de resfriamento para o ar ambiente, auxiliado por um ventilador. O ar aquecido é então dissipado para o ambiente como calor residual.

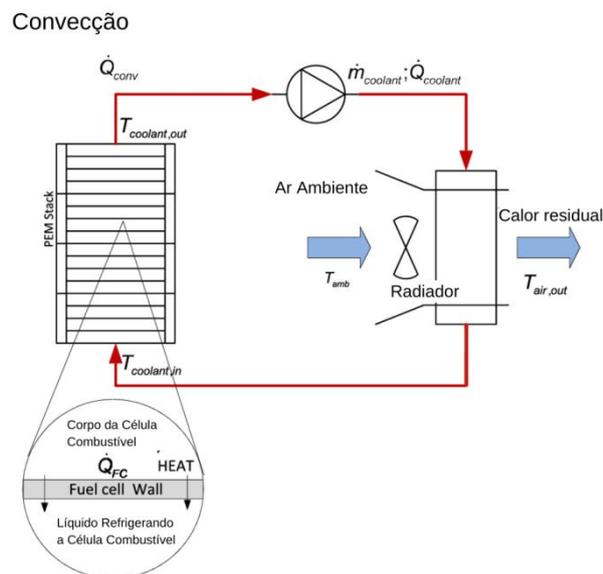


Figura 10: Diagrama de Troca de Calor da Célula Combustível

Fonte: Adaptado de LISO, Vincenzo et al. (2014)

O modelo matemático apresentado no artigo descreve a curva de polarização de uma célula a combustível de membrana de troca de prótons (PEMFC) como uma função da temperatura. A equação que descreve o modelo é baseada na equação de Nernst e leva em consideração os efeitos de sobretensão de ativação, sobretensão de difusão e sobretensão ôhmica. A Equação 6 é apresentada na forma é apresentada na forma (LAURENCELLE et al., 2001):

$$V_{cell} = E_0 - b \cdot \ln I - R \cdot I - m \cdot e^{-nI} \quad (6)$$

Onde  $V_{cell}$  é a tensão da célula,  $E_0$  é a tensão de circuito aberto (que também pode obtida via equação de Nernst),  $i$  é a densidade de corrente,  $b$ ,  $R$ ,  $m$  e  $n$  são parâmetros ajustáveis que dependem das características da célula e da temperatura. Esses parâmetros são determinados a partir de dados experimentais e podem ser usados para prever o desempenho da célula em diferentes condições de operação. O modelo não leva em consideração todos os mecanismos de PEMFC e os efeitos de transporte de água, como canais bloqueados ou água no meio de gás de difusão. No entanto, a equação separa as sobretensões contribuintes acima e fornece uma boa indicação do comportamento das células a combustível. O modelo é validado por dados experimentais e pode ser usado para otimizar o desempenho da célula a combustível em diferentes aplicações.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de ajuste da curva de polarização da célula a combustível obtidos a partir dos dados experimentais. Esses parâmetros são usados para descrever a relação entre a tensão da célula e a densidade de corrente em diferentes condições de operação. A tabela inclui os valores dos parâmetros  $E_0$ ,  $b$ ,  $R$  e  $m$ , que representam a tensão de circuito aberto, o coeficiente de ativação, a resistência ôhmica e o coeficiente de transporte de massa, respectivamente. Além disso, a tabela apresenta os valores médios e o desvio padrão dos parâmetros para diferentes temperaturas. Os valores dos parâmetros são importantes para avaliar o desempenho da célula a combustível e para comparar diferentes sistemas de célula a combustível.

Tabela 1: Parâmetros da Fuel Cell

Fonte: Adaptado de LAURENCELLE, F. et al. (2001)

Parâmetro	Valor
$E_0$ (V)	1.05
$b$ (V)	$4.01 \times 10^{-2} - 1.40 \times 10^{-4} T$
$R$ ( $k\Omega \text{ cm}^2$ )	$4.77 \times 10^{-4} - 3.32 \times 10^{-6} T$
$m$ (V): $T \geq 39 \text{ /C}$	$1.1 \times 10^{-4} - 1.2 \times 10^{-6} T$
$m$ (V): $T < 39 \text{ /C}$	$3.3 \times 10^{-3} - 8.2 \times 10^{-5} T$
$n$ ( $\text{cm}^2 \text{ mA}^{-1}$ )	$8.0 \times 10^{-3}$

A Figura 11 apresenta um gráfico que mostra a relação entre a tensão média da célula de uma célula de combustível e a densidade de corrente, em diferentes

temperaturas operacionais. As curvas representam temperaturas que variam de 24°C a 72°C, indicadas por diferentes símbolos para cada temperatura:

- 72°C: marcada com "+"
- 56°C: marcada com "x"
- 39°C: marcada com "●"
- 31°C: marcada com "◆"
- 24°C: marcada com "■"

Cada curva mostra a diminuição da tensão da célula à medida que a densidade de corrente aumenta, o que é típico no comportamento das células de combustível devido à queda de tensão interna causada por fatores como resistência ôhmica, sobretensões de ativação e concentração.

O gráfico inclui uma linha tracejada horizontal que representa o limite inferior de tensão, abaixo do qual a operação da célula de combustível pode não ser eficiente ou segura.

No canto superior direito, há um gráfico menor inserido, que é um gráfico de dispersão que representa os dados normalizados, mostrando as variações ou desvios em relação a uma média. Os símbolos representam valores de tensão normalizados para diferentes temperaturas, com linhas de desvio padrão de "+3 $\sigma$ " e "-3 $\sigma$ " (três desvios padrão acima e abaixo da média), o que ajuda na análise da consistência dos dados ou na identificação de *outliers*.

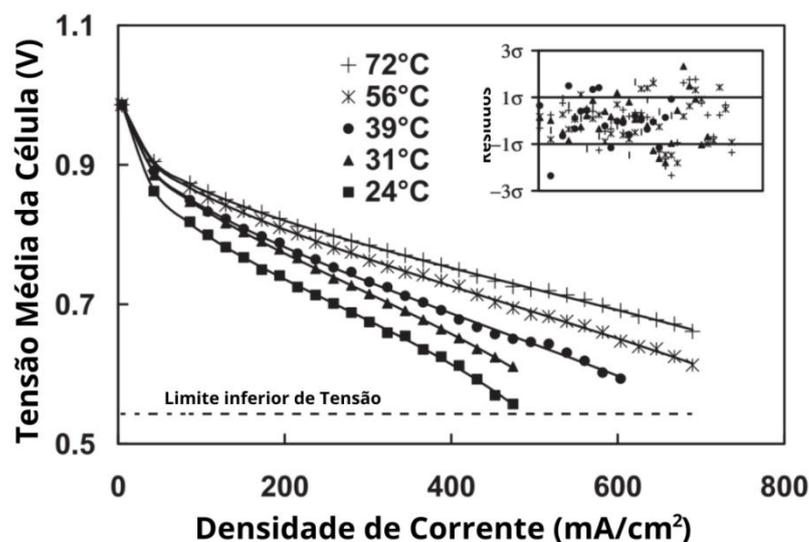


Figura 11: Parâmetros e Curva de Tensão em Função da Corrente em uma FC Para Valores Distintos de Temperatura

Fonte: Adaptado de LAURENCELLE, F. et al. (2001)

A produção de hidrogênio é dada pela Equação 7 (RAZZHIVIN et al., 2022).

$$m_{H_2} = \frac{n_{cell} \cdot I_{el}}{Z \cdot F} n_f \quad (7)$$

Onde  $m_{H_2}$  é a massa consumida,  $n_{cell}$  o número de células de,  $Z$  o número de *mols* da molécula transferida por *mol* de água,  $I_{el}$  é a corrente de entrada do eletrolisador e  $N_f$  a eficiência da célula que tipicamente está em torno de 95%.

### 2.3 ELETROLISADOR

Um eletrolisador é um dispositivo projetado para realizar a eletrólise em um dado material. Esse aparato usualmente consiste de dois eletrodos metálicos submersos em uma solução, um recipiente que aloja essa solução e os eletrodos, e uma membrana que separa fisicamente os íons após a reação. Frequentemente, os termos eletrolisador e célula combustível são usados de forma intercambiável; o primeiro é empregado quando a eletricidade é usada para produzir hidrogênio, enquanto o segundo quando o hidrogênio é utilizado para gerar eletricidade. No entanto, para este estudo, é crucial modelar ambos os dispositivos separadamente devido à necessidade de uma precisão elevada.

Segundo Panorama do Hidrogênio no Brasil ,no mercado, diversos tipos de eletrolisadores empregam métodos variados para produzir os resultados das reações químicas. Alguns exemplos incluem: a eletrólise alcalina, a célula com membrana polimérica trocadora de prótons (PEM, do inglês, Proton Exchange Membrane) e as células de eletrólise de óxido sólido (SOECs). Existem também modelos menos comuns de eletrolisadores, como o eletrolisador de plasma, o eletrolisador de difusão de vapor e o eletrolisador com membrana de troca de ânions, que são utilizados esporadicamente no mercado.

O eletrolisador do tipo PEM, diferentemente do tradicional modelo que utiliza duas placas metálicas imersas na solução, é composto por uma membrana transportadora de íons  $H^+$ , fabricada em material polimérico, placas de grafite, coletores de corrente elétrica, placas de terminais de circulação de água, gás hidrogênio e gás oxigênio (MARIANI et al., 2021). A Figura 12 ilustra os componentes do eletrolisador PEM.

A Figura 13, por sua vez, ilustra um diagrama detalhado do processo de fabricação do hidrogênio.

É essencial entender o comportamento elétrico deste tipo de eletrolisador, especialmente porque a produção do gás requerido depende da aplicação de uma tensão elétrica teórica de 1.48 V nos coletores de corrente (KEÇEBAŞ et al, 2019). Esta tensão poderia ser reduzida se a eficiência da reação alcançasse 100%; contudo, o processo envolve perdas inerentes.

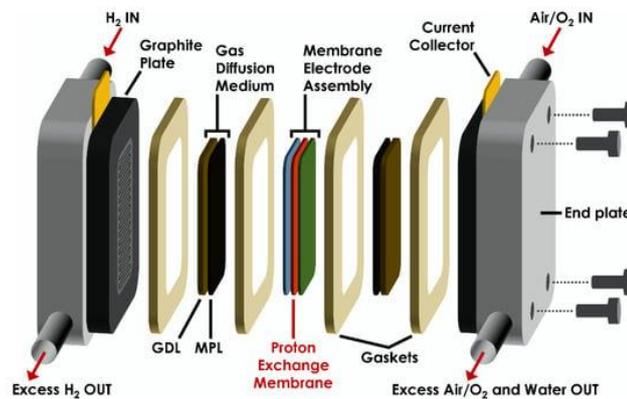


Figura 12: Partes do Eletrolisador do Tipo PEM

Fonte: MARIANI, M. et al. (2021)

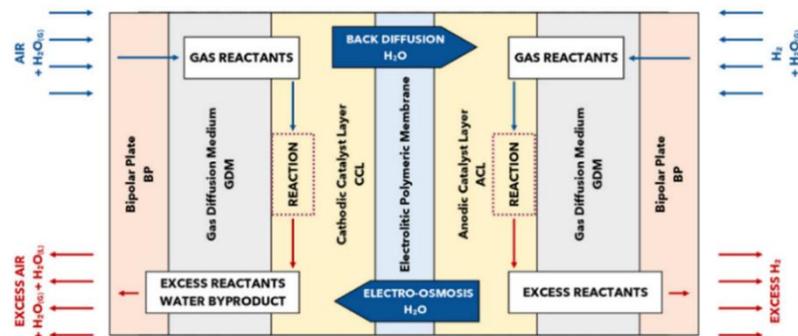


Figura 13: Fluxograma do funcionamento de um eletrolisador do Tipo PEM.

Fonte: Adaptado de MARIANI, M. et al. (2021)

A Figura 14 ilustra um modelo elétrico do eletrolisador, usando uma série de resistências elétricas para representar os obstáculos encontrados pela reação química, e uma fonte de tensão elétrica como a provedora de energia. A Tabela 2 explica o significado de cada resistência mostrada na Figura 14. O modelo adotado inclui, além das dinâmicas resistivas evidenciadas na Figura 14, outras dinâmicas resultantes do comportamento não linear da tensão terminal em relação à corrente.

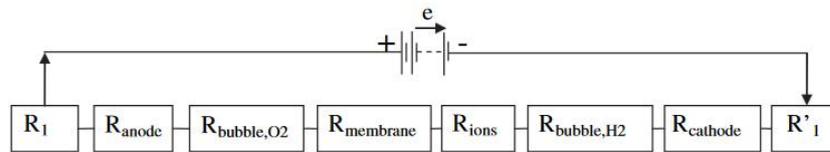


Figura 14: Circuito Equivalente de um Eletrolisador do Tipo PEM.

Fonte: Adaptado de MARIANI, M. et al. (2021)

Tabela 2: Descrição das Resistências do Circuito do Modelo de Eletrolisador PEM.

Fonte: Adaptado de MARIANI, M. et al. (2021)

$R_1$	Resistência do circuito elétrico externo
$R_{anode}$	Origina-se do sobrepotencial da reação do oxigênio na superfície no ânodo
$R_{bubble,O2}$	Resistência devido à cobertura parcial do ânodo pelas bolhas de oxigênio
$R_{membrane}$	Resistência causada pela membrana
$R_{ions}$	Resistência causada pelo eletrólito
$R_{bubble,h2}$	Resistência devido à cobertura parcial do ânodo pelas bolhas de hidrogênio
$R_{cathode}$	Origina-se do sobrepotencial da reação do oxigênio na superfície no cátodo
$R'_1$	Resistência do circuito elétrico externo

A Figura 15 apresenta a curva de polarização do eletrolisador PEM evidenciando que existem não linearidade da tensão terminal em função da corrente.

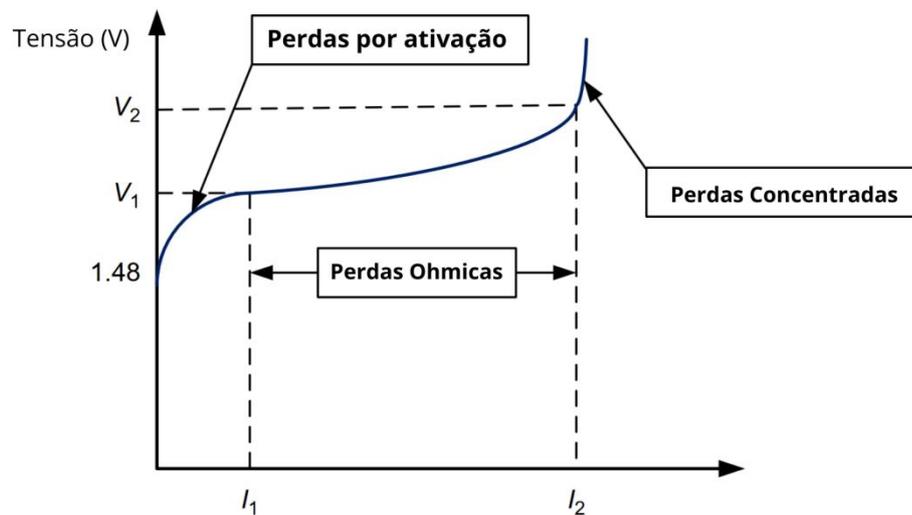


Figura 15: Curva de Tensão do Eletrolisador em Função da Corrente.

Fonte: Adaptado de KEÇEBAŞ et al. (2019)

A partir da Figura 15 é possível observar três principais regiões e relacioná-las à perspectiva das perdas resistivas presentes no modelo citado anteriormente:

- Perdas por ativação: região de operação cujo potencial elétrico fornecido pela fonte é insuficiente para iniciar o funcionamento do eletrolisador.
- Perdas ôhmicas: região de operação não-linear, no entanto, o comportamento se assemelha à um resistor linear.
- Perdas concentradas: região do gráfico cujo a tensão de entrada dos eletrodos atinge um patamar de saturação.

O Eletrolisador do tipo PEM foi escolhido neste trabalho para compor a microrrede pois, comparado aos demais eletrolisadores ele possui um alto grau de escalabilidade graças ao fato da sua topologia ser composta por um conjunto células individuais. Tal característica, possibilitará encontrar, via aplicação da técnica de Monte Carlo a posteriori um número ótimo de células que o sistema da microrrede necessitará para atender à demanda do sistema.

### 2.3.1 Modelo Matemático

O modelo matemático escolhido, busca representar as dinâmicas e o caráter não linear do eletrolisador e é representado na Figura 15. A modelagem do eletrolisador PEM é apresentada através de uma abordagem baseada em circuito elétrico equivalente (ATLAM et al., 2011). A Figura 14 detalha a configuração

experimental e posteriormente a formulação matemática empregada para modelar a célula do eletrolisador PEM é apresentada ao longo do texto. A célula utilizada foi submetida a testes para determinar suas características corrente-tensão (I-V) em condições estáveis. Para isso, o eletrolisador foi conectado a uma fonte de alimentação DC ajustável, permitindo a realização de medições de corrente em diversas tensões aplicadas. Simultaneamente, as taxas de produção de hidrogênio foram quantificadas com base na potência elétrica de entrada, em condições de temperatura ambiente de 20°C e pressão atmosférica padrão.

Na etapa de desenvolvimento do modelo, representado na Figura 16, foi construído um modelo de circuito elétrico equivalente fundamentado nos dados experimentais, que representam as características I-V da célula. Este modelo incorpora componentes que simbolizam a resistência interna da célula e o potencial reverso, cruciais para compreender as conversões de energia e as perdas inerentes ao processo. Para captar as nuances do comportamento da célula, foram desenvolvidas duas equações principais. A primeira, uma equação não-linear, foi formulada empiricamente para descrever as características I-V sob condições específicas de operação. A segunda, uma equação linear, simplifica a descrição das características I-V em condições estáveis, facilitando análises mais práticas e diretas.

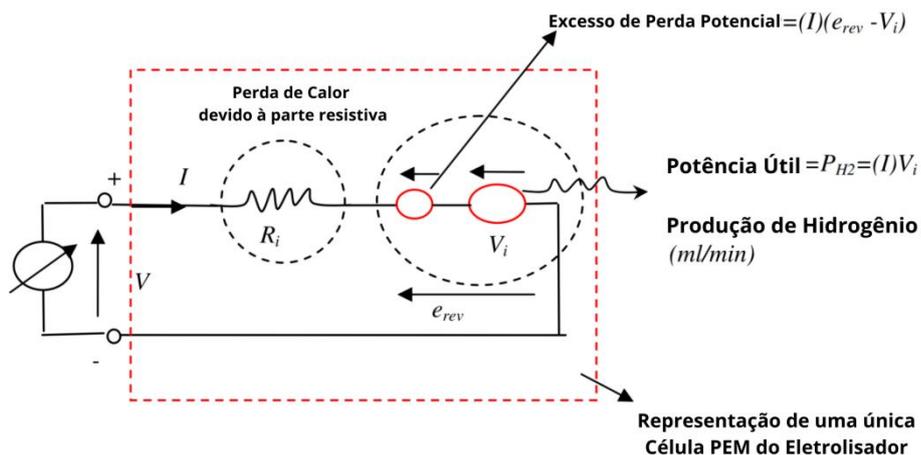


Figura 16: Circuito Equivalente de um Eletrolisador do Tipo PEM

Fonte: Adaptado de ATLAN, O. et al. (2011)

O modelo matemático (ATLAM et al., 2011) detalhado para descrever as características da eletrólise em uma célula de eletrólise PEM (Proton Exchange

Membrane) individual. O potencial de célula reversível e a resistência da célula PEM ( $R_i(T, p)$ ) são descritos como dependentes da temperatura e da pressão. A fórmula para o potencial da célula é dada pela Equação 8.

$$V(T, p) = e_{\text{rev}}(T, p) - e_{\text{rev}}(T, p)e^{-5I/0.02A} + I \cdot R_i(T, p) \quad (8)$$

e para um conjunto completo de células em um eletrolisador, a Equação 9.

$$V(T, p) = \frac{I \cdot R_i(T, p)}{n_s n_p} + n_s e_{\text{rev}}(T, p) \quad (9)$$

Onde:

- $V(T, p)$  é o potencial da célula ou do conjunto de células,
- $I$  é a corrente,
- $n_s$  é o número de células em série,
- $n_p$  é o número de células em paralelo.

O potencial reversível é calculado pela Equação 10.

$$e_{\text{rev}}(T, p) = e_{\text{rev}0} + \frac{R \cdot (273.15K + T)}{2F} \ln \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad (10)$$

e a resistência interna da célula é dado pela Equação 11.

$$R_i(T, p) = R_{i0} + k \cdot \ln \left( \frac{p}{p_0} \right) + dR_t(T - T_0) \quad (11)$$

onde  $R$  é a constante universal dos gases,  $T$  é a temperatura,  $F$  é a constante de Faraday,  $p$  e  $p_0$  são a pressão de trabalho e a pressão ambiente, respectivamente,  $k$  é o parâmetro derivado do ajuste da curva, e  $dR_t$  é o coeficiente de variação da resistência interna com a temperatura.

A taxa de produção de hidrogênio é dada pela lei de Faraday e é diretamente proporcional à corrente elétrica aplicada. A fórmula para a taxa de produção de hidrogênio é dado pela Equação 12 :

$$v_{H_2} = \frac{v_m \cdot N_c \cdot I}{2F} \quad (12)$$

Com  $v_{H_2}$  sendo a taxa de produção de hidrogênio,  $v_m$  o volume molar,  $N_c$  o número de células em série e  $I$  a corrente real em direção ao eletrolisador.

Esse modelo é essencial para compreender a eficiência e o desempenho de um eletrolisador PEM, que são críticos para otimizar a produção de hidrogênio, especialmente quando alimentado por fontes de energia renováveis flutuantes, como parte de um sistema de energia sustentável.

## 2.4 BESS

À medida que a demanda por energia elétrica continua a crescer em um ritmo acelerado, surge a necessidade de soluções inovadoras que possam estabilizar e otimizar o fornecimento de energia. Os Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica do tipo BESS (em inglês, Battery Energy Storage Systems) emergem como protagonistas nessa busca por uma rede elétrica mais eficiente, confiável e sustentável (MILANO et al., 2019).

Os BESS são dispositivos projetados para armazenar energia elétrica em baterias recarregáveis de alta capacidade. Esses sistemas desempenham um papel crucial na integração de fontes de energia renovável, como solar e eólica, à matriz elétrica convencional. Uma das principais vantagens dos BESS é a capacidade de armazenar o excesso de energia gerada durante os períodos de alta produção e disponibilizá-la durante os momentos de demanda elevada ou quando a geração de energia renovável é intermitente.

A seguir será apresentado no texto algumas aplicações do BESS para uma microrrede, como a do sistema simulado.

- **Controle de Frequência**

O problema do desvio de frequência em um sistema elétrico de potência se dá através do desequilíbrio entre a quantidade de potência gerada pelas usinas de geração de energia elétrica e a quantidade de potência que as cargas consumidoras exigem. Para esse valor se manter constante, é necessário que o valor da potência gerada seja sempre igual à potência demandada. No caso do Brasil, o sistema elétrico opera em 60 Hz, esse valor estará sempre variando devido à constante variação da carga do sistema elétrico, necessitando, assim, de mecanismos de controle que buscam sempre deixar o valor da frequência estável.

Em um sistema interligado, o controle de frequência é feito por mecanismos de controle para restabelecer a frequência estável do sistema durante perturbações. Esse controle é uma composição de várias etapas que acontecem em momentos

subsequentes ao outro e podem ser, basicamente, sequenciados da seguinte maneira, como demonstra a Figura 17 (MILANO; MANJAVACAS, 2019).

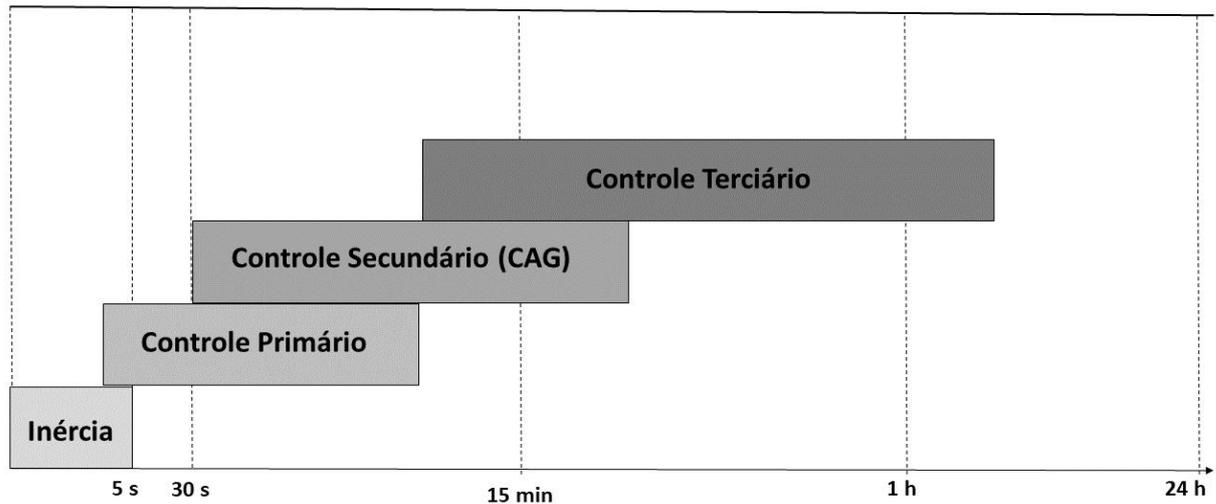


Figura 17: Hierarquia de Controle de Frequência em um Sistema Elétrico

Fonte: MILANO (2019)

A resposta inercial é equivalente a reserva de energia cinética girante contida nas pás das turbinas dos aerogeradores. Essa energia é consumida pelo sistema nos primeiros segundos de um desequilíbrio de geração e demanda na tentativa de manter o equilíbrio entre as mesmas, porém a quantidade de energia armazenada geralmente não é suficiente.

O controle primário entra para complementar a resposta inercial, onde geralmente há mecanismos de controle nos quais atuam no ângulo das pás das turbinas a fim de gerar mais energia, ou diminuir a geração, sempre buscando o equilíbrio.

O controle secundário, mais conhecido como controle automático de geração (CAG), são reservas de energia que tem como objetivo suprir a quantidade de potência que o controle primário não foi capaz de suprir. O mesmo sempre é acionado para corrigir o erro de regime permanente causado pelo controle primário.

O controle terciário é feito pelos operadores do sistema, no qual é feito todo um novo plano de despacho de energia.

- Suavização de Potência

A qualidade de energia produzida em fontes intermitentes de energia como eólica e solar está sujeita a flutuações que são inerentes à natureza da fonte primária de energia, nos respectivos casos são irradiância e vento. Flutuação, nesse caso, é uma variação indesejada da potência que pode causar perda na qualidade de energia produzida e desequilíbrio entre potência gerada e demandada.

As flutuações de potência não acontecem de qualquer maneira, elas possuem uma periodicidade as quais podem ser classificadas como de longa duração (aquelas que se repetem a cada hora ou até duram por horas) e de curta duração (as quais acontecem dentro do período de segundos a minutos).

- Peak Shaving

A demanda de energia elétrica possui variações durante o dia, podendo haver períodos de picos de consumo. A importância desses picos não somente é em termos de estabilidade da rede, mas também afetam as taxas a serem pagas pelo consumidor final, por uma razão simples: o sistema de energia deve ser projetado para os momentos de picos de carga, considerando que, em outras partes do dia, esse sistema será subutilizado. Dessa forma, os custos extras para acompanhar o pico de demanda são repassados para os clientes na forma de uma taxa de energia.

No setor de energia, o termo Peak-Shaving (em tradução livre, corte de pico) refere-se ao nivelamento nos picos de consumo de eletricidade. Com esse nivelamento, podem-se reduzir os altos custos anuais de eletricidade que são ocasionados por alguns picos de carga (em muitos países, os preços da eletricidade para consumidores em grande escala são definidos com referência a seu pico de carga máximo).

O pico de carga pode ser reduzido com a utilização de um sistema de armazenamento de energia com bateria. A Figura 18 ilustra o BESS realizando o Peak-Shaving. Nota-se que a curva em azul é a variação da demanda real requisitada de fonte geradora; já a curva vermelha é resultado da atuação do BESS, sendo programado para carregar durante o período de baixa demanda e descarregar durante os horários de pico de consumo.

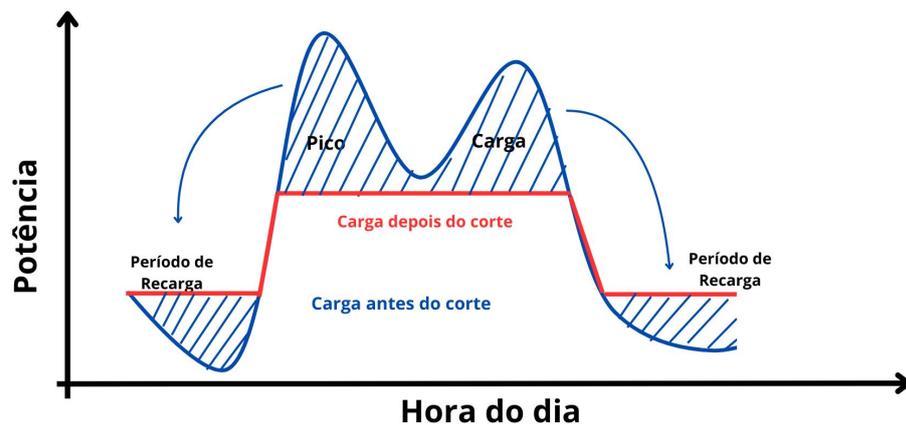


Figura 18: BESS com Função Peak-Shaving

Fonte: Próprio Autor

- Load Shifting

O sistema de armazenamento de energia da bateria é uma tecnologia-chave em redes inteligentes e deslocamento de carga, também conhecido na literatura como Load Shifting, apresenta-se como uma das suas funções fundamentais (ZHAO et al., 2015).

O termo Load Shifting é aplicado quando um BESS é instalado em alguma unidade consumidora, cujo objetivo é diminuir os custos para a mesma. Isso é feito através da injeção de potência pelo BESS em períodos de alto consumo de energia, carregando o mesmo em horários fora de pico, quando a energia é mais barata.

O gráfico da Figura 19 demonstra como o deslocamento de carga é realizado. A curva apresentada mostra que é necessário reduzir a carga do usuário em um determinado período de tempo, através do armazenamento e posterior descarga de energia, e em seguida carregar em outro período específico de tempo.

Isso é aplicável em casos de diferentes taxas de consumo de energia. Para os clientes, o deslocamento de carga tem benefícios econômicos devido a diferença da taxa de energia entre os períodos de pico e vale (DUSONCHET et al., 2020).

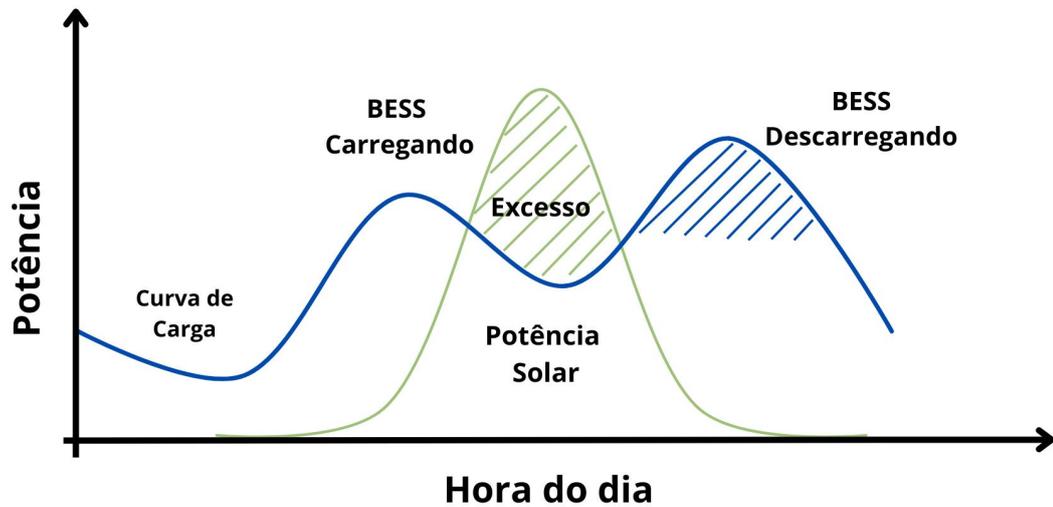


Figura 19: Deslocamento de Carga, Armazenamento e Despacho de Energia

Fonte: Próprio Autor

#### 2.4.1 Modelo Matemático

A potência de entrada da bateria ( $P_{BAT}$ ) é definida como a soma da potência fotovoltaica ( $P_{solar}$ ), da potência da célula a combustível ( $P_{Fuel Cell}$ ), e da potência da carga ( $P_{LOAD}$ ), com a potência da carga sendo subtraída da soma das outras duas. Esta relação é representada pela Equação 13:

$$P_{BAT} = P_{PV} + P_{FC} - P_{LOAD} \quad (13)$$

Esta equação reflete o balanço de potência dentro da bateria, onde ela pode tanto receber energia (carregando) quanto fornecer energia (descarregando) para a carga.

O estado de carga (SOC) da bateria, que indica o nível de energia atual em relação à capacidade máxima de energia, é calculado usando a potência da bateria e a eficiência. Isso é capturado na Equação 14, que integra a potência da bateria ao longo do tempo, levando em conta a eficiência durante o carregamento ( $\eta_{BAT}$ ) e o descarregamento:

$$SOC_{BAT} = \int (P_{BAT \text{ charging}} \times \eta_{BAT} - P_{BAT \text{ discharging}}) dt \quad (14)$$

O SOC atua como um sinal de controle para outros componentes: quando o SOC está abaixo de um determinado limiar, ele aciona a ativação da célula a combustível para fornecer energia adicional. Inversamente, quando o SOC excede

um limiar superior, indicando que a bateria está suficientemente carregada, a FC é desligada e o eletrolisador é ativado para começar a produção de hidrogênio, que é então armazenado para uso posterior.

## **2.5 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA**

No âmbito do desenvolvimento de projetos voltados para a sustentabilidade e inovação no setor de energia, foi realizada uma etapa crucial de aquisição de dados para a avaliação do potencial de geração fotovoltaica para um eletroposto localizado na região Sudeste do Brasil. Esta iniciativa, alinhada aos esforços globais para a transição energética e a promoção de fontes renováveis de energia, representa um passo significativo na direção da eletrificação dos transportes e da redução da pegada de carbono associada a essa atividade.

A metodologia adotada para a aquisição de dados envolveu o uso do software PVsol, uma ferramenta de referência no setor para a simulação de sistemas fotovoltaicos. As coordenadas geográficas precisas do local onde o eletroposto está instalado foram cuidadosamente inseridas no software, garantindo que a simulação refletisse de maneira acurada as condições solares específicas da região Sudeste do Brasil. Esta região, conhecida por seu potencial significativo de irradiação solar, apresenta condições favoráveis para a implantação de tecnologias fotovoltaicas.

Para a simulação, foi considerada uma configuração de sistema fotovoltaico com módulos e inversores que totalizavam uma potência nominal de 100 kWp. A escolha dos componentes buscou otimizar o desempenho do sistema, levando em conta não apenas a eficiência dos módulos fotovoltaicos mas também a adequação dos inversores para o manejo da energia produzida. A potência nominal de 100 kWp foi cuidadosamente escolhida para atender à demanda energética estimada do eletroposto, sem que houvesse sobrecarga do inversor, garantindo assim a eficiência e a confiabilidade do sistema. Além disso, esse valor foi escolhido devido à facilidade que este número inteiro proporciona no procedimento de cálculo das potências instantâneas. Na simulação desenvolvida neste trabalho, foram utilizadas curvas de geração fotovoltaica para 100 kWp, e, caso seja necessário simular para 50 kWp, por exemplo, basta dividir as curvas de 100 kWp por 2. Como mais adiante no trabalho serão realizadas simulações para várias potências nominais, como 20, 40, 60 kWp, por exemplo, a escolha de 100 kW se mostrou vantajosa por simplificar numericamente as normalizações necessárias.

Os módulos fotovoltaicos selecionados para a simulação são de última geração, oferecendo alta eficiência e durabilidade, enquanto os inversores são projetados para proporcionar uma conversão eficaz da energia solar em energia elétrica, com mínimas perdas. Essa configuração permite maximizar a geração de energia elétrica a partir da radiação solar disponível, assegurando que o eletroposto possa fornecer energia limpa e renovável para a recarga de veículos elétricos.

O processo de simulação no PVsol forneceu uma série de dados valiosos, incluindo estimativas de geração diária e mensal de energia, perfil de produção ao longo do ano e análise do desempenho do sistema sob diferentes condições meteorológicas. Esses dados são fundamentais para validar a viabilidade técnica e econômica do projeto, permitindo uma análise detalhada do retorno sobre o investimento e da contribuição do eletroposto para a redução de emissões de gases de efeito estufa na região.

Em suma, a aquisição de dados de geração fotovoltaica utilizando o software PVsol, aliada à seleção cuidadosa de módulos e inversores para compor um sistema de 100 kWp de potência nominal, constitui uma etapa fundamental na concepção do eletroposto na região Sudeste do Brasil. Este projeto não só demonstra o compromisso com a adoção de soluções energéticas sustentáveis mas também estabelece um modelo para o desenvolvimento de infraestruturas de recarga que suportem a crescente adoção de veículos elétricos, contribuindo assim para um futuro mais limpo e sustentável.

## **2.6 DEMANDA ENERGÉTICA**

### **2.6.1 Carga Elétrica**

No contexto do desenvolvimento e análise operacional do Eletroposto CPFL Decathlon, localizado em Campinas - SP, uma etapa crucial foi a aquisição de dados detalhados relativos à recarga de veículos elétricos. Para embasar tecnicamente este trabalho, procedeu-se à coleta de dados de operação dos carregadores elétricos, adotando uma taxa de amostragem de 5 em 5 minutos. Esta abordagem permitiu a captura de um perfil dinâmico e detalhado das atividades de recarga, essencial para a avaliação do desempenho do sistema e para a identificação de padrões de uso e demanda energética no eletroposto. A Figura 20 mostra o eletroposto que forneceu os dados.



Figura 20: Eletroposto Localizado em Campinas

Fonte: Próprio autor

### 2.6.1.1 Aquisição de Dados e Metodologia

A metodologia empregada na aquisição de dados envolveu o monitoramento contínuo dos carregadores elétricos instalados no eletroposto, incluindo tanto as estações de recarga rápida em corrente contínua (CC) de 60 kW quanto as estações de recarga em corrente alternada (AC) de 22 kW. A soma das potências individuais de cada carregador, registradas a cada 5 minutos, forneceu uma visão compreensiva da demanda energética imposta ao sistema, tanto pelo BESS quanto pela geração fotovoltaica e pela rede elétrica externa.

Esta granularidade de dados permitiu uma análise detalhada dos picos de demanda, da eficiência do processo de recarga e do desempenho do BESS em responder às variações de carga. Além disso, possibilitou a verificação da suficiência da capacidade de geração fotovoltaica instalada e a efetividade do BESS em gerenciar o fluxo de energia, otimizando a utilização de fontes renováveis e minimizando a demanda sobre a rede elétrica externa.

### 2.6.1.2 Integração e Análise de Dados

Os dados coletados foram submetidos a uma análise criteriosa, visando não apenas entender o comportamento operacional do eletroposto mas também identificar oportunidades de otimização. A integração desses dados com o sistema de gestão do eletroposto proporcionou informações valiosas para o aprimoramento contínuo da infraestrutura, a adoção de melhores práticas operacionais e a implementação de estratégias de gestão de energia mais eficazes.

A aquisição e análise de dados de recarga de veículos elétricos com uma taxa de amostragem de 5 em 5 minutos demonstraram ser instrumentais para o entendimento aprofundado das dinâmicas de uso do Eletroposto CPFL Decathlon. Este processo não apenas reforçou a base técnica para a operação eficiente do eletroposto, como também contribuiu para os esforços mais amplos de promoção da mobilidade elétrica sustentável. A capacidade de monitorar, analisar e responder às tendências de uso e demanda energética é fundamental para a otimização da infraestrutura de recarga de veículos elétricos e para a maximização do uso de energia renovável, alinhando-se assim com os objetivos de sustentabilidade e eficiência energética que norteiam o projeto. A Tabela 3 e a Tabela 4 fornecem informações complementares sobre os carregadores elétricos presentes na estação.

Tabela 3: Estação de Recarga

Fonte: Próprio Autor

Item	Quantidade	Descrição	
Carregador veicular	2	2 x 60 kW CC (+22 kW CA)	
Conector/Plugs	6	Estação 01: 1 x CA Tipo 2, 2 x CCS-2 (CC)	Estação 02: 1 x CA Tipo 2, 1 x CCS-2 (CC), 1 x CHAdeMO (CC)

Tabela 4 – Especificações Técnicas dos Carregadores

Fonte: Próprio Autor

Entrada CA	
Potência máxima (kVA)	63
Tensão CA (V)	400
Fator de potência	> 0,99
Eficiência (%)	95
Saída CC	
Potência máxima (kW)	60
Tensão CC (V)	150 - 1000
Corrente máxima (A)	200 (CCS), 125 (CHAdeMO)

### 2.6.2 Demanda por hidrogênio

Com o objetivo principal de construir um sistema sofisticado que possa prever de forma estocástica e dinâmica as demandas futuras, foi conduzido um estudo nos Estados Unidos da América, que propõe o desenvolvimento de um modelo preditivo avançado para estimar a demanda em estações de abastecimento de hidrogênio. O modelo emprega uma base de dados composta por registros reais de abastecimentos. Esses dados não só servem para treinar o modelo, mas também para validar sua precisão e robustez em cenários variados (KURTZ et al., 2019).

Este modelo inovador é projetado para ser uma ferramenta essencial na orientação estratégica do desenvolvimento e operacionalização das estações de abastecimento. Ele é adaptável às flutuações do mercado e às mudanças nos padrões de uso dos veículos alimentados por células de combustível. Ao integrar análises de dados históricos e projeções futuras, o modelo oferece suporte crítico para tomadas de decisão em relação à localização das estações, capacidade de abastecimento necessária, e estratégias de expansão da infraestrutura.

Além disso, o modelo é capaz de simular diversos cenários de demanda, considerando variáveis como o crescimento na adoção de veículos a hidrogênio, a expansão geográfica das redes de abastecimento e mudanças tecnológicas que possam impactar o consumo de hidrogênio. Esse enfoque analítico e preditivo facilita o planejamento a longo prazo e a otimização dos recursos, garantindo que as

infraestruturas de abastecimento sejam desenvolvidas de maneira sustentável e alinhada com as necessidades futuras de mobilidade sustentável.

- Etapa 1 - Entrada de Dados: Na primeira etapa, o modelo interage com o usuário para receber parâmetros como o período de tempo, intervalo de tempo, demanda semanal alvo, limite de probabilidade para previsão, tipo de abastecimento (por exemplo, veículos leves ou pesados) e quantidade máxima de abastecimento.
- Etapa 2 - Geração de Dados: Esta etapa utiliza as variáveis definidas na Etapa 1 para determinar quais conjuntos de dados medidos podem ser usados para treinamento. O objetivo final dessa etapa é a criação de um conjunto de dados representativo para o treinamento.
- Etapa 3 - Treinamento: Aqui, distribuições de abastecimento (frequência, taxa, quantidade e tempo) são ajustadas para serem usadas na etapa de previsão. O modelo é treinado e validado utilizando dados reais do mundo, especificamente de mais de 440.000 abastecimentos em 30 estações de hidrogênio, fornecidos pelo National Fuel Cell Technology Evaluation Center (NFCTEC). O modelo se adapta a mudanças futuras no uso de veículos e estações à medida que mais dados do mundo real se tornam disponíveis.
- Etapa 4 - Previsão: Na etapa final, o modelo avalia a probabilidade de uma estação estar em um estado de abastecimento ou em espera, com base na interpretação da probabilidade e na sequência de abastecimentos para cada intervalo de tempo. O resultado da previsão traduz o estado da estação em um histórico de tempo de frequência e quantidade de abastecimentos como função do tempo.

A Figura 21 do documento apresenta os valores de demanda sintetizados a partir do modelo matemático da demanda de hidrogênio ao longo de 7 Dias. Este gráfico é estruturado para mostrar dois conjuntos de dados principais:

- Quantidade de Abastecimento (Eixo Y à Esquerda): Este eixo representa a quantidade de abastecimento em cada intervalo de tempo ao longo da semana. Os valores neste eixo mostram a quantidade de hidrogênio que é abastecida em cada intervalo, proporcionando uma visão clara de quão intensamente a estação está sendo utilizada em diferentes momentos.
- Hidrogênio Total Dispensado (Eixo Y à Direita): Este eixo representa o volume acumulado de hidrogênio dispensado ao longo da semana. É um indicador da

utilização total da estação de abastecimento ao longo do tempo, mostrando como a demanda por hidrogênio se acumula ao longo da semana.

Na Figura 22 é apresentado a demanda e o fluxo de abastecimento em estações de tipo *Urban Medium*, ou seja, estações de recarga projetada para um perfil urbano de médio porte, ao longo de 1 semana, em que os pontos em azul mostram a informação a cada instante e a curva laranja mostra a informação de demanda acumulada. Tal informação permite aos operadores e planejadores avaliar não apenas as necessidades de armazenamento e os horários de entrega de hidrogênio, mas também oferece informações sobre estratégias operacionais e dimensionamento de componentes. Esses dados serão utilizados para otimizar a operação da estação e garantir que ela atenda eficientemente às necessidades de abastecimento de hidrogênio no corrente trabalho.

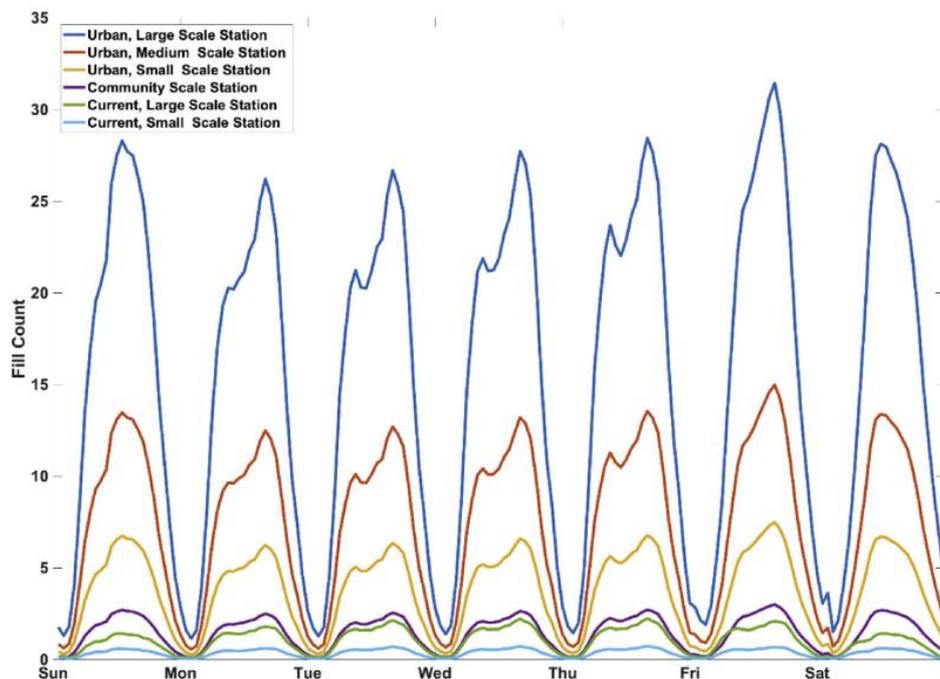


Figura 21: Modelo Matemático da Demanda de Hidrogênio ao Longo de 7 Dias

Fonte: KURTZ et al. (2019)

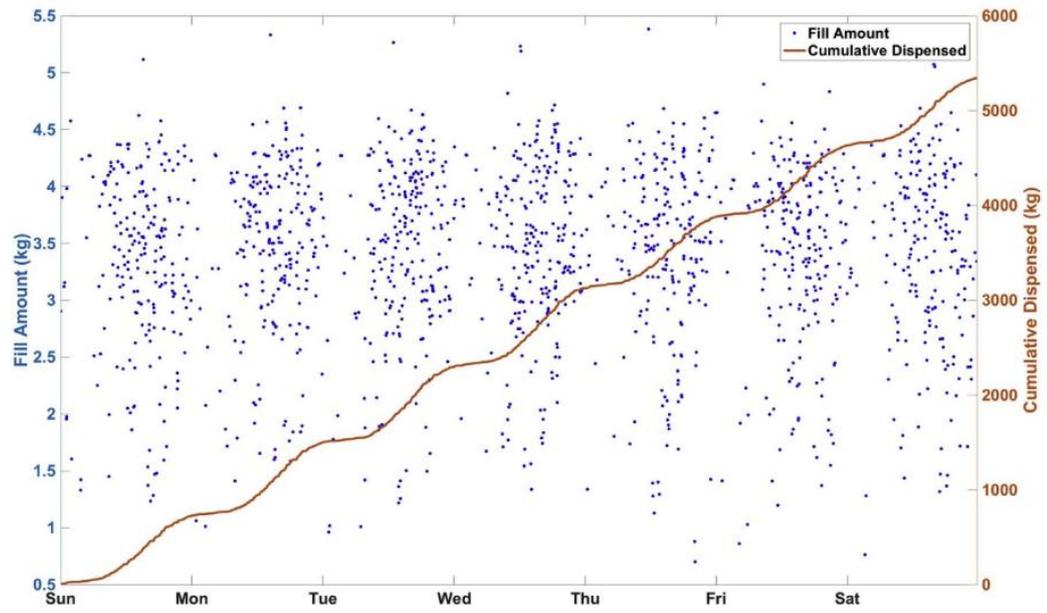


Figura 22: Demanda Semanal Acumulada Para uma Estação de Recarga do Tipo "Urban Medium"

Fonte: KURTZ et al. (2019)

## 2.7 SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO

Devido as propriedades do hidrogênio, o armazenamento deste produto é um dos pilares mais importantes desse tipo de sistema. Há diferentes modos de armazenar hidrogênio em função dos distintos estados físicos, volume, pressão, tempo de armazenamento e aplicação, conforme ilustrado na Figura 23.

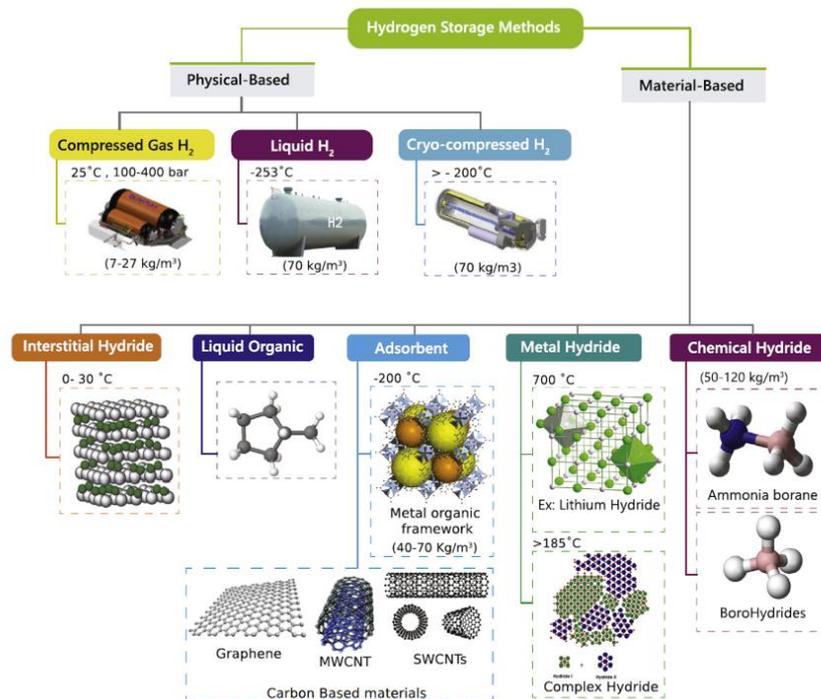


Figura 23: Tipos de Armazenamento de Hidrogênio

Fonte: LEBROUHI et al., (2022)

O armazenamento de hidrogênio em estado gasoso pode ser efetuado por meio de compressão em cilindros, tanques ou cavernas subterrâneas, sendo esta última uma das abordagens mais diretas. Apesar de o hidrogênio ter uma densidade energética elevada por massa, ele possui baixa densidade energética por volume quando comparado a combustíveis tradicionais. Essa característica demanda o uso de grandes espaços de armazenamento e altas pressões para reduzir o volume necessário dos reservatórios (LEBROUHI et al., 2022).

Quando se considera a fabricação de recipientes para o armazenamento de hidrogênio gasoso, é crucial escolher materiais que possam resistir às altas pressões resultantes da compressão. Geralmente, quatro tipos de recipientes de pressão são empregados. O primeiro é completamente metálico, feito de alumínio ou

aço, projetado para suportar até 50 MPa. O segundo, que incorpora um invólucro de fibra de vidro sobre o metal, custa aproximadamente 50% a mais que o primeiro e proporciona uma redução de 30 a 40% no peso. O terceiro tipo, combinando fibra de carbono com um revestimento metálico, é adequado para pressões até 45 MPa, mas falha em pressões de 70 MPa. Já o quarto tipo, inteiramente composto, utiliza polímeros como o Polietileno de Alta Densidade (HDPE) e reforço de fibra de carbono, suportando pressões de até 100 MPa, sendo, contudo, o mais oneroso.

As cavernas subterrâneas, oferecem uma solução ideal para o armazenamento de grandes volumes de hidrogênio sob pressão. Entre as diversas opções, como cavernas de sal, campos de óleo e gás, aquíferos e minas abandonadas, as cavernas de sal destacam-se pelas vantagens significativas como baixo custo de construção, rápida capacidade de injeção e retirada do gás, além de baixas taxas de vazamento e menor risco de contaminação. Contudo, as tecnologias de superfície para armazenamento em larga escala ainda necessitam de avanços significativos para alcançar viabilidade econômica (DUONG et al., 2019).

Por outro lado, segundo WASEEM, M. et al. (2023), o armazenamento criogásoso, a uma pressão de 200 bar e temperatura de 100 K, produz uma densidade de 39,52 kg/m<sup>3</sup>, superior à densidade de 39,22 kg/m<sup>3</sup> alcançada pelo hidrogênio gasoso a 700 bar. No entanto, esse método requer a manutenção de temperaturas criogênicas, o que introduz desafios adicionais para a implementação quando comparado ao armazenamento sob altas pressões no estado gasoso.

### **2.7.1 Modelo do armazenamento**

Diante da diversidade apresentada que tange aos métodos de armazenamento, o método escolhido um cilindro de hidrogênio na forma gasosa. Essa escolha foi a que mais fez sentido do ponto de vista de gasto energético, pois o eletrolisador produz hidrogênio na forma gasosa e, do mesmo modo, a célula combustível consome hidrogênio na forma de gás. Além disso, a estação de recarga necessita de hidrogênio gasoso para abastecer os veículos. Portanto, utilizar qualquer outra maneira de armazenamento a não ser a gasosa encareceria o sistema e adicionaria mais complexidades desnecessárias ao sistema.

O modelo escolhido é composto por um tanque que possui duas válvulas controladoras de fluxo, uma de entrada e outra de saída. Além disso, o sistema

possui um compressor responsável por manter o controle de pressão do tanque. A Figura A ilustra como o modelo do armazenamento foi projetado.

Para tornar possível a análise de *spillage*, ou seja, excesso de gás e indisponibilidade do sistema é necessário desenvolver um cálculo de SOCH (state of charge of Hidrogen) do armazenamento do gás. Para tal, é primordialmente definir que o SOCH será baseado em massa de hidrogênio e não em volume, visto que o volume de um gás não tem relação linear com sua massa quando considera-se possíveis variações de pressão e temperatura. Portanto, o SOCH para o cilindro foi definido como o percentual de massa atual, presente no tanque, em relação à sua capacidade máxima de armazenamento. A Equação 15 mostra como o SOCH é calculado.

$$\text{SOCH} = \frac{Q_{\text{mass atual}}}{Q_{\text{nominal}}} \quad (15)$$

Além disso, a quantidade de massa no instante atual, ou seja, o valor de massa que será utilizado a cada iteração no procedimento do calculo posteriormente, é definida considerando a quantidade de hidrogênio no instante anterior menos a quantidade de hidrogênio consumida pela célula combustível e pela estação de recarga somado à quantidade de hidrogênio gerado pela estação de recarga do veículo. A Equação 16 mostra como o balanço de massa é calculado.

$$Q_{\text{massa}(t)} = Q_{\text{massa}(t-1)} + Q_{\text{massa eletrolisador}(t)} - Q_{\text{massa FC}(t)} - Q_{\text{massa refuel}(t)} \quad (16)$$

### **CAPÍTULO 3: TÉCNICA DE MONTE CARLO**

O capítulo oferece uma investigação abrangente sobre os métodos e critérios essenciais para conduzir simulações de Monte Carlo, uma técnica altamente valiosa e amplamente empregada em diversas áreas para modelar sistemas complexos e realizar análises probabilísticas.

Inicialmente, é explorado a fundamentação teórica do Método de Monte Carlo, cuja formalização remonta a 1949, através do trabalho seminal de John Von Neumann e Stanislaw Ulam. Este método é uma ferramenta versátil que permite não apenas a obtenção de estatísticas descritivas, mas também a estimativa de distribuições de probabilidade, análise de sensibilidade, avaliação de riscos e otimização. É detalhado os principais passos envolvidos na aplicação do método, desde a modelagem do problema até a geração de valores aleatórios e o cálculo do resultado determinístico, destacando sua utilidade e aplicabilidade em uma variedade de cenários.

Em seguida, é abordado os critérios de parada, cruciais para determinar o momento adequado de interromper as simulações de Monte Carlo. Além disso, é mostrado três abordagens principais: a Regra de Parada da Desigualdade de Chebyshev, a Regra baseada na Distribuição Gaussiana e a Estimação da Variância. Analisamos suas vantagens e desvantagens, considerando sua eficácia em diferentes contextos e situações práticas.

Destaca-se também, a importância de uma seleção criteriosa do método de parada, levando em conta diversos fatores, como a natureza do problema, a distribuição dos resultados simulados e a precisão desejada. Concluímos que, embora cada método tenha suas próprias vantagens e limitações, a escolha do critério de parada mais adequado é crucial para garantir resultados precisos, eficientes e confiáveis nas simulações de Monte Carlo.

Este capítulo proporciona uma base sólida para compreender e aplicar os métodos e critérios essenciais em simulações de Monte Carlo, visando fornecer informações para a tomada de decisões em áreas como engenharia, ciência, finanças e saúde.

### 3.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Método de Monte Carlo foi formalizado em 1949, por meio do artigo intitulado “Monte Carlo Method”, publicado por John Von Neumann e Stanislaw Ulam. A simulação de Monte Carlo é uma ferramenta versátil que oferece diversas possibilidades de análise. Primeiramente, ela permite a obtenção de estatísticas descritivas, tais como média, mediana, moda, desvio padrão e intervalo interquartil, que resumem e descrevem os dados gerados pela simulação. Além disso, a simulação pode ser utilizada para estimar distribuições de probabilidade das variáveis de interesse, sendo possível visualizá-las através de histogramas, gráficos de densidade, box plot e whisker.

Outro aspecto importante é a análise de sensibilidade, que possibilita avaliar como a variação das variáveis de entrada influencia os resultados. Isso pode ser feito através de técnicas estatísticas como análise de correlação e regressão. Ademais, a simulação de Monte Carlo é uma ferramenta essencial para análise de risco, permitindo calcular métricas como o Valor em Risco (VaR) e a Chance de Perda (CoP), que ajudam a avaliar o risco associado a um projeto ou investimento.

Por fim, a simulação pode ser utilizada para otimização, buscando a combinação ótima de variáveis de entrada que maximizem ou minimizem uma métrica de desempenho específica. Métodos como análise de regressão, otimização estocástica e simulação de otimização são aplicáveis nesse contexto, proporcionando metodologias valiosas para tomadas de decisão.

A técnica de Monte Carlo é utilizada para criar diferentes cenários em um determinado sistema e observar a saída deste. Essa técnica pode seguir os seguintes passos para sua implementação: desenvolvimento de um modelo determinístico baseado no desempenho histórico e projeções futuras; incorporação de riscos através de variáveis estocásticas; realização de simulações para modelar as distribuições de probabilidade das variáveis de saída; e análise dos resultados para tomar decisões sob condições de incerteza (PEREIRA et al., 2018). A Figura 24 representa o processo de simulação de Monte Carlo, começando pela descrição das incertezas de valores e eventos, definida pelo analista e apoiada por software. Números aleatórios são gerados para simular a variabilidade dessas incertezas. As relações entre valores e eventos são determinadas para entender como as variáveis interagem dentro do modelo. Os resultados de cada simulação são acumulados e

analisados para identificar tendências e padrões. Por fim, um relatório é apresentado, resumindo as conclusões da simulação. Este processo é iterativo, com interações contínuas entre as etapas para refinamento e precisão dos resultados.

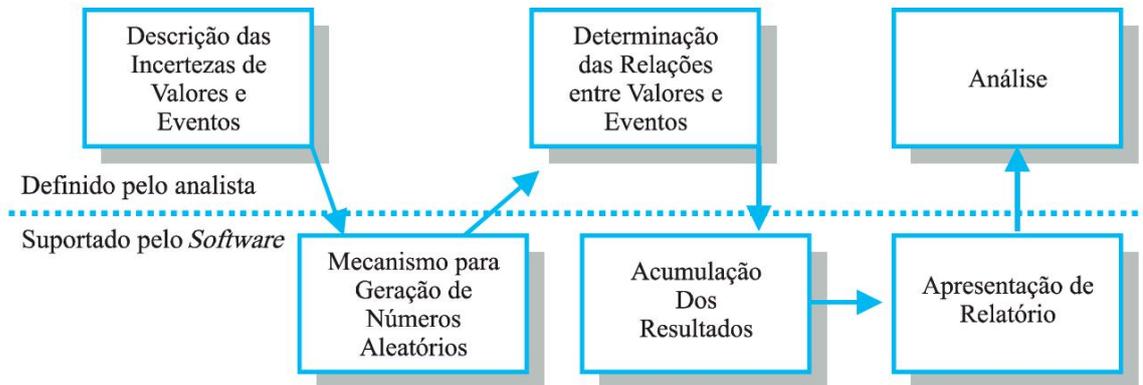


Figura 24: Descrição do Processo de Monte Carlo

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA, M. R. G. de; MEDEIROS NETO, L. B. de. (2012)

Além disso, a Figura 25 resume a sequência de uma simulação Monte Carlo, essas são:

1. Modelagem do problema: o problema é definido e cada uma de suas incertezas é representada por uma função de densidade de probabilidade (FDP).
2. Geração de valores aleatórios: valores pseudo-aleatórios são gerados a partir das FDPs definidas na etapa anterior.
3. Cálculo do resultado determinístico: os valores gerados são utilizados para substituir as incertezas do problema e obter uma observação do mesmo.
4. Repetição dos passos 2 e 3: os passos de geração de valores aleatórios e cálculo do resultado determinístico são repetidos até que se obtenha uma amostra com o tamanho desejado de realizações.

As incertezas do problema abordado neste trabalho envolve (falta e sobra) de energia e o objetivo principal será minimizar tamanhos de equipamentos da microrrede visando a integridade de operação do sistema. As variáveis cujo os valores serão definidos como aleatórios, ou seja as variáveis de incerteza, e as determinísticas serão definidas na Capítulo 4.

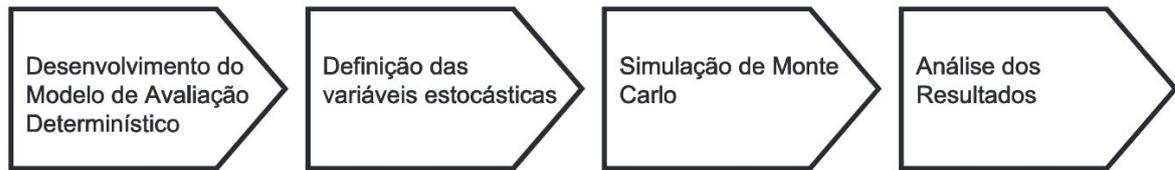


Figura 25: Descrição do Processo em uma Simulação Monte Carlo

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA, M. R. G. de; MEDEIROS NETO, L. B. de. (2012)

### 3.2 CRITÉRIO DE PARADA

Para garantir que a média da amostra seja uma aproximação representativa para a verdadeira média em simulações de Monte Carlo, algumas considerações importantes incluem (BICHER et al., 2022):

- **Número Suficiente de Repetições:** É essencial escolher um número adequado de repetições (replicações) para a simulação. Um número muito baixo pode resultar em uma média de amostra não representativa, enquanto um número muito alto pode consumir recursos computacionais desnecessários.
- **Conhecimento da Distribuição dos Resultados:** Em alguns casos, quando a distribuição dos resultados da simulação não pode ser determinada analiticamente, é útil executar um grande número de simulações para obter uma boa estimativa da distribuição. Isso pode ser feito através de técnicas como bootstrapping.
- **Avaliação dos Momentos da Distribuição:** É importante conhecer os momentos da distribuição dos resultados da simulação, como a média e a variância, para garantir que a média da amostra seja uma boa estimativa da verdadeira média.
- **Utilização de Métodos de Cálculo de Número Ótimo de Repetições:** Existem métodos disponíveis para calcular o número ideal de repetições em simulações de Monte Carlo, levando em consideração a precisão desejada e a eficiência computacional.

Ao considerar esses pontos e escolher cuidadosamente o número de repetições, os pesquisadores podem garantir que a média da amostra obtida por meio de simulações de Monte Carlo seja uma representação confiável da verdadeira média, permitindo análises precisas e significativas.

Os principais métodos para o critério de parada são analisados nas subseções subsequentes.

### 3.2.1 Critério de Parada via Inequação de Chebyshev

A Regra de Parada da Desigualdade de Chebyshev é uma técnica utilizada em simulações de Monte Carlo para determinar o momento adequado de interromper a simulação. Esta regra baseia-se na Desigualdade de Chebyshev, um princípio estatístico que oferece uma forma de avaliar quão distante os valores de uma variável aleatória podem estar de sua média.

Na prática, a desigualdade de Chebyshev Equações 17 e 18 afirma que, para uma variável aleatória com média  $\mu$  e desvio padrão  $\sigma$ , a probabilidade de que um valor se desvie mais do que  $k$  vezes o desvio padrão da média é, no máximo,  $1/k^2$ . Essa propriedade é particularmente útil porque não requer nenhuma suposição sobre a forma da distribuição da variável, sendo válida para qualquer distribuição com média e variância finitas.

$$P(|X - \mu| \geq k\sigma) \leq \frac{1}{k^2} \quad (17)$$

Em contextos de simulação de Monte Carlo, onde muitas repetições da simulação são executadas para estimar a média de um resultado, a regra de parada de Chebyshev pode ser aplicada para garantir que a média das simulações esteja suficientemente próxima da média real do processo modelado. A ideia é continuar realizando simulações até que a diferença entre a média das simulações e a média teórica esteja dentro de uma margem de erro ( $\delta$ ) com um nível de confiança especificado ( $p$ ). A aplicação desta regra na prática envolve calcular a quantidade mínima de repetições  $M$  necessárias para que:

$$P(|X_M - \mu| \leq \delta) \geq p \quad (18)$$

Onde  $X_M$  é a média amostral das  $M$  simulações. Utilizando a desigualdade de Chebyshev, ajustamos  $k$  de forma que  $k\sigma$  seja igual ao erro tolerável  $\delta$ , e calculamos  $M$  de modo que a condição de confiança seja satisfeita.

Apesar de sua utilidade e aplicabilidade geral, a regra de parada de Chebyshev tende a ser conservadora. Isso significa que, na prática, ela pode recomendar um número de simulações maior do que o realmente necessário para alcançar a precisão desejada. Isso ocorre porque a desigualdade de Chebyshev é projetada para ser válida sob as condições mais gerais possíveis e, portanto, não

leva em conta características específicas da distribuição da variável além de sua média e variância.

Assim, embora a regra de parada de Chebyshev ofereça uma abordagem segura para evitar subestimações do número necessário de simulações, ela também pode resultar em uma grande quantidade de cálculos desnecessários, aumentando o custo computacional sem necessariamente aumentar a precisão dos resultados de maneira proporcional. Por essa razão, em muitos casos práticos, investigações adicionais sobre as características da distribuição podem ajudar a ajustar a regra para torná-la mais eficiente.

### **3.4.2 Critério de Parada da Distribuição de Gauss**

A Regra de Parada baseada na Distribuição Gaussiana é uma técnica sofisticada e amplamente utilizada nas simulações de Monte Carlo, que se fundamenta no Teorema Central do Limite (TCL). Este teorema é um dos principais conceitos da teoria estatística e desempenha um papel crucial em garantir que, sob certas condições, a distribuição das médias amostrais de uma variável aleatória convergirá para uma distribuição normal à medida que o tamanho da amostra aumenta, independentemente da distribuição inicial dessa variável.

Na aplicação prática da simulação de Monte Carlo, frequentemente precisamos estimar a média de um processo que pode ser aleatório ou probabilístico por natureza. O objetivo é realizar repetições suficientes da simulação para que a média calculada das simulações seja uma representação precisa da média verdadeira do sistema modelado, dentro de uma margem de erro tolerável e com um nível de confiança especificado.

O TCL sugere que, para um grande número de simulações, a distribuição da média amostral se aproximará de uma distribuição normal com média igual à média verdadeira do processo ( $\mu$ ) e variância igual à variância do processo dividida pelo número de simulações ( $M$ ). Esse comportamento assintótico é o que fundamenta a regra de parada da distribuição gaussiana. Para implementar essa regra, primeiro definimos o intervalo de erro aceitável ( $\delta$ ) e o nível de confiança desejado ( $p$ ). Por exemplo, podemos querer que nossa estimativa da média esteja dentro de 0,5 unidades da média real com 95% de confiança. Com base nisso, o desafio é

determinar o número mínimo de simulações necessário para atender a esses critérios. Isso é feito ajustando a equação da distribuição normal padrão para garantir que a probabilidade de que a média amostral esteja dentro de  $\delta$  unidades da média real seja pelo menos  $p$ .

Utilizando a inversa da função de distribuição acumulada normal (função quantil), determinamos o valor crítico que corresponde ao nível de confiança desejado. Esse valor crítico, em seguida, nos permite calcular  $M$  de tal forma que (Equação 19):

$$P\left(\frac{X_M - \mu}{\sigma/\sqrt{M}} \leq \frac{\delta\sqrt{M}}{\sigma}\right) \geq p \quad (19)$$

Embora a regra de parada baseada na distribuição gaussiana seja robusta e teoricamente sólida, sua eficácia depende de algumas condições. A principal é que o número de simulações deve ser suficientemente grande para que a aproximação normal seja válida. Isso pode não ser verdadeiro para amostras pequenas ou para dados que não seguem bem a premissa de independência e identidade de distribuição.

Outro ponto crítico é a precisão na estimativa da variância dos dados. Uma subestimação ou superestimação da variância pode levar a conclusões errôneas sobre o número de simulações necessário, o que poderia resultar em intervalos de confiança imprecisos.

Portanto, enquanto a regra de parada da distribuição gaussiana oferece uma metodologia clara e orientada por princípios teóricos para determinar quando parar uma simulação de Monte Carlo, ela deve ser aplicada com consideração de suas premissas e limitações. Em muitos casos práticos, ajustes adicionais ou métodos complementares podem ser necessários para garantir a precisão e a eficiência das simulações.

### 3.4.3 Critério de Parada da Estimação da Variância

Existem duas abordagens principais para estimar a variância em simulações de Monte Carlo, ambas essenciais para aplicar regras de parada de maneira eficaz. A primeira abordagem envolve o cálculo da variância amostral. Esta é uma técnica padrão que utiliza os resultados diretamente obtidos da simulação (BICHER et al.,2022). A variância amostral é calculada tomando a média dos quadrados das

diferenças entre cada valor individual da simulação e a média amostral desses valores. Matematicamente, isso é expresso pela Equação 20, onde  $N$  representa o número de repetições da simulação e  $\bar{X}_N$  é a média dessas repetições. Essa abordagem é especialmente útil porque fornece uma medida direta da dispersão dos dados, que é crítica para avaliar a precisão das estimativas da média da simulação.

A segunda abordagem discutida no documento utiliza os limites conhecidos dos resultados da simulação para fornecer uma estimativa conservadora da variância. Quando os resultados da simulação estão restritos a um intervalo definido entre  $a$  e  $b$ , pode-se calcular uma estimativa superior da variância assumindo que a distribuição dos resultados é uniformemente distribuída entre esses limites. Isso resulta na Equação 21, que estabelece uma estimativa máxima sob a suposição de uma distribuição uniforme. Esta técnica é particularmente valiosa em situações preliminares ou quando informações detalhadas sobre a distribuição dos resultados não estão disponíveis, permitindo uma abordagem conservadora na análise dos dados.

$$s_N^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_N)^2 \quad (20)$$

$$\frac{(b-a)^2}{4} \quad (21)$$

Essas duas abordagens são fundamentais para a configuração e conclusão adequada das simulações de Monte Carlo, garantindo que as regras de parada sejam aplicadas com base em uma compreensão sólida e precisa da variabilidade dos dados simulados.

#### 3.4.4 Comparação dos métodos de parada

A seguir é apresentado um resumo com vantagens e desvantagens de cada método.

- Critério de Parada da Distribuição de Gauss:

- Vantagens:

- Baseia-se na distribuição normal dos resultados, o que pode ser apropriado para certos tipos de simulações com distribuições conhecidas. Além disso, pode fornecer uma estimativa rápida do número de iterações necessárias para atingir a precisão desejada.

➤ Desvantagens:

Pode ser sensível a distribuições assimétricas ou não normais, levando a uma subestimação do número de iterações necessárias. Além disso, a confiança do intervalo resultante pode não ser tão alta quanto o necessário em certos casos.

● Estimação da Variância:

➤ Vantagens:

Permite uma abordagem adaptativa e flexível, ajustando dinamicamente o critério de parada com base na variância estimada durante a simulação. Além disso, ajuda a otimizar o número de iterações necessárias, levando a uma utilização mais eficiente dos recursos computacionais. Outro ponto é que reduz o viés na estimativa final, fornecendo uma estimativa mais precisa e imparcial.

➤ Desvantagens:

Pode exigir um pouco mais de processamento para calcular a variância em cada iteração, o que pode aumentar o tempo de execução em comparação com métodos mais simples.

● Critério de Parada via Inequação de Chebyshev (método escolhido):

➤ Vantagens:

Fornece uma abordagem teórica sólida para determinar o número de iterações com base na desigualdade de Chebyshev. Além disso, pode ser útil quando a distribuição dos resultados não é conhecida ou é altamente variável.

➤ Desvantagens:

Pode resultar em um número excessivo de iterações, especialmente em casos onde a variância é pequena em relação à média. Além disso, pode ser menos eficiente em comparação com métodos adaptativos que levam em consideração a variância real dos resultados.

Conforme é possível visualizar na Figura 27, criada por (ALMEIDA et al., 2023) quanto mais se aumenta o número de iterações da simulação Monte Carlo, o resultado final da média das amostras tende a se estabilizar em torno do valor real segundo a regra de *Chebyshev Inequality*, por isso neste trabalho ela foi escolhida como critério de parada na simulação.

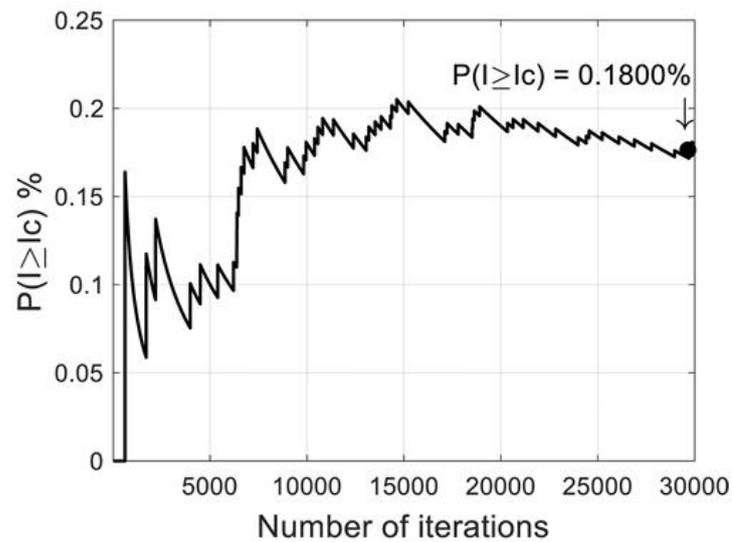


Figura 26: Probabilidade da Ocorrência do Evento em Função do Número de Iterações das Simulações Monte Carlo

Fonte: Adaptado de ALMEIDA, F. S., et al. (2023)

## **CAPÍTULO 4: ESTABELECIMENTO DO CONTROLE HIERÁRQUICO DA MICRORREDE E OS ORGANOGRAMA DA SEQUÊNCIA DA SIMULAÇÃO**

Este capítulo detalha um estudo compreensivo sobre a operação e otimização de uma microrrede integrada, que combina a geração fotovoltaica com tecnologias de armazenamento e conversão de energia, focando especialmente no método que foi empregado para simular o sistema bem como na descrição deste. Utilizando um sistema de controle heurístico adaptativo, o estudo modela a interação entre a geração de energia, o consumo e o armazenamento em um cenário de microrrede, destacando os desafios e os procedimentos utilizados na simulação.

Inicialmente, o relatório apresenta a arquitetura da microrrede, incluindo carregadores de veículos elétricos e a hidrogênio, eletrolisadores tipo PEM, células combustível, sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS), e conexões com a rede elétrica. A disposição e a funcionalidade de cada componente são exploradas para entender como eles contribuem para a eficiência e a operação do sistema.

O processo de simulação é descrito em detalhes, começando com a coleta de dados sobre geração fotovoltaica, demanda de hidrogênio e demanda elétrica de veículos, que são manipulados através de um algoritmo para simular diferentes cenários operacionais ao longo de uma semana. O método de controle heurístico, que atualiza a gestão da microrrede a cada cinco minutos, ajusta-se dinamicamente às condições de carga e geração, otimizando a distribuição de energia entre os carregadores, o BESS, e o eletrolisador.

A robustez e a confiabilidade do modelo são garantidas através de um rigoroso critério de parada baseado na estatística do coeficiente de variação, que mede a dispersão dos resultados das simulações. Se este coeficiente permanecer dentro de um limite estabelecido, o processo iterativo é considerado estável e os resultados confiáveis.

O capítulo finaliza destacando como o estudo fornece informações sobre a operação de microrredes integradas, com implicações práticas para o desenvolvimento de estratégias de gestão energética que são tanto sustentáveis quanto eficientes.

## 4.2 DESCRIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Inicialmente, é importante entender como a microrrede é do trabalho é composta. Conforme é possível visualizar na Figura 28, existem dois ramos principais, o ramo de energia elétrica (ilustrado em na cor preta) e o ramo de gás hidrogênio (ilustrado em na cor verde).

Os equipamentos em estudo que compõem a microrrede são:

- Carregador de carros a hidrogênio
- Carregador de carros elétricos
- Eletrolisador do tipo PEM
- Tanque de armazenamento à hidrogênio
- Célula combustível
- Bess (battery energy storage system)
- Gerador fotovoltaico
- Barramento AC
- Rede Elétrica

Portanto, é valido ressaltar que o barramento AC pode receber potência do sistema fotovoltaico, do BESS, da célula combustível e rede elétrica. Esse, por sua vez, pode fornecer potência para o eletrolisador, BESS, carregador de carros elétricos. A hierarquia de prioridades na distribuição de potência será discutido mais a frente ao longo deste capítulo.

Agora, analisando o ramo de fluxo de gás (representado pela cor verde), é possível observar que o gás pode ser utilizado pelo sistema de carregamento de carros a FC bem como pela célula de combustível para injetar energia para o barramento AC. Vale ressaltar que o eletrolisador desempenha o papel de alimentar o reservatório de hidrogênio.

A Figura 27 representa a microrrede onde as setas representa as possíveis direções do fluxo de potência.

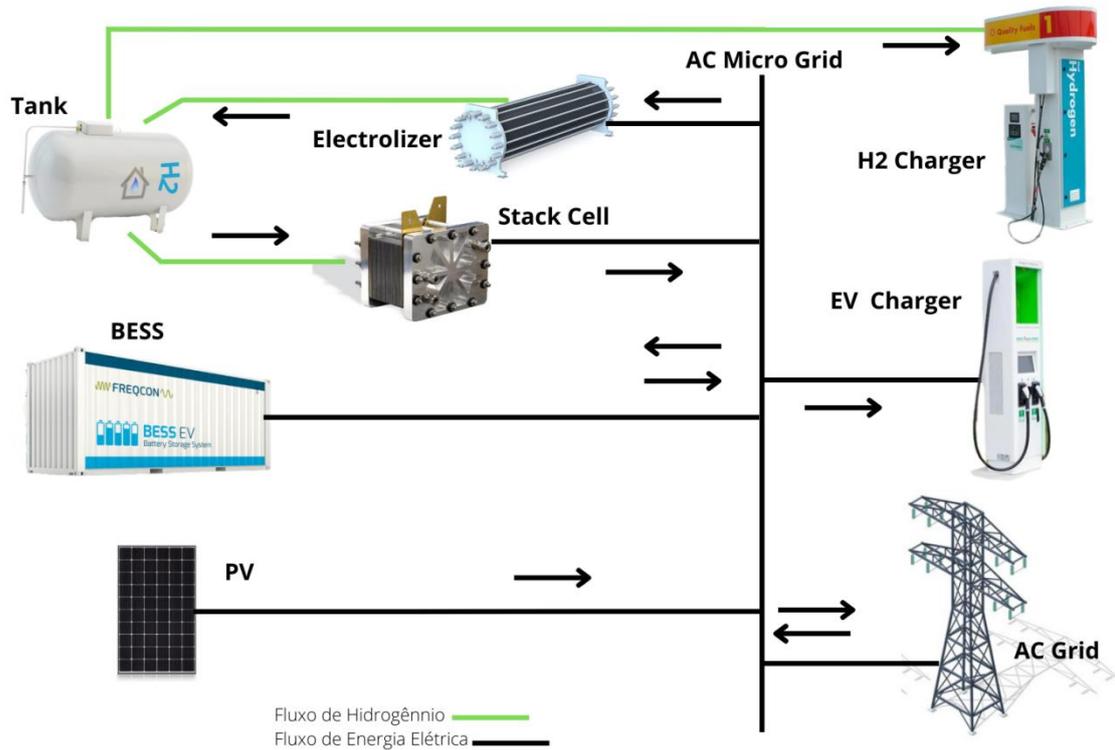


Figura 27: Diagrama da Microrrede Simulada

Fonte: Próprio Autor

A Figura 28 ilustra o conceito de um eletroposto juntamente com estações de recarga de veículos à hidrogênio.



Figura 28: Representação do Conceito do Eletroposto junto com Estações de Recargas de FCEVs

Fonte: Próprio Autor

### 4.3 CRITÉRIOS DE DESPACHO DE POTÊNCIA

A palavra "heurístico" é um termo que deriva do grego "heuriskein", que significa "encontrar" ou "descobrir". No contexto em que é frequentemente usado, como em "controle heurístico", "algoritmo heurístico" ou "método heurístico", refere-se a uma abordagem que se baseia em regras práticas, intuição ou experiência para resolver problemas complexos ou tomar decisões em situações em que a solução não é conhecida ou não pode ser encontrada de maneira algorítmica ou exata.

O controle heurístico de uma planta, que foi o utilizado na operação da microrrede em questão, se refere a uma abordagem de controle que se baseia em heurísticas, ou seja, regras práticas e intuitivas, em vez de algoritmos rigorosos ou modelos matemáticos precisos. Em contraste com os métodos de controle clássicos, que dependem fortemente de equações matemáticas e teoria de controle, o controle heurístico depende de princípios empíricos e conhecimento prático. Isso pode ser útil em situações em que o sistema a ser controlado é mal compreendido, altamente não linear ou sujeito a perturbações imprevisíveis. Além disso, diante do contexto da simulação que possui intervalos de discretização de 5 minutos, estabelecer um controle dinâmico não é significativo pois os equipamentos da microrrede possuem transitórios da ordem de alguns poucos segundos e assim buscar representá-los não traria mudança numérica nos resultados significativa.

Para determinar as regras de operação da planta, inicialmente é necessário definir as variáveis que balizarão as condições de ativação e os *setpoints* do sistema.

A Tabela 5 descreve as variáveis que serão controladas ou serão parâmetros utilizados no controle.

Variável	Característica
$P_{solar}$	Potência instantânea da Geração Fotovoltaica
$P_{Ev}$	Potência instantânea de consumo dos veículos elétricos
SOC	Estado de carga do BESS
SOCH	Estado de carga do reservatório de Hidrogênio
$SOC_{H2\ min}$	Estado mínimo de carga do reservatório de Hidrogênio
$SOC_{H2\ max}$	Estado máximo de carga do reservatório de Hidrogênio
$P_{bat}$	Potência da bateria
$P_{batmax}$	Potência máxima da bateria (potencia nominal)
$P_{fc}$	Potência da Célula de combustível
$P_{fc\ nominal}$	Potência nominal da célula combustível
$P_{eletrolisador\ nominal}$	Potência nominal do eletrolisador
$P_{liquida}$	Diferença entre a potência da geração fotovoltaica e potência requerida pelos carregadores elétricos
$P_{grid}^*$	Potência de referência da rede elétrica
$P_{bat}^*$	Potência de referência da bateria
$P_{eletrolisador}^*$	Potência de referência do eletrolisador
$P_{FC}^*$	Potência de referência da célula combustível

Tabela 5: Descrição das Variáveis Utilizadas na Simulação

Fonte: Próprio Autor

#### 4.4 DESCRIÇÃO DO ALGORITMO

Inicialmente é introduzido no algoritmo, três conjuntos de dados representando a geração fotovoltaica, a demanda elétrica do veículos elétricos e a demanda de hidrogênio ao longo de 7 dias (I). O processo inicia dividindo cada conjunto de dados em séries individuais, onde cada série corresponde a um dia específico. Em seguida, seleciona aleatoriamente 7 dias desses conjuntos de dados, ou seja ele executa um sorteio com reposição. Depois, combina os dados desses dias selecionados em uma única série para formar uma nova semana de dados, mantendo a ordem temporal dos dados dentro de cada dia (II). Esse processo é útil para reorganizar os dados de forma aleatória em análises que necessitem criar novas situações cujo o sistema possa ser submetido. A Figura 29 apresenta um fluxograma de como o algoritmo funciona.

Após o sorteio dos dados as variáveis de potencia solar, demanda por hidrogênio e demanda por energia elétrica, são inseridas na função de controle heurístico. Tal função apresenta-se descrita na Figura 30.

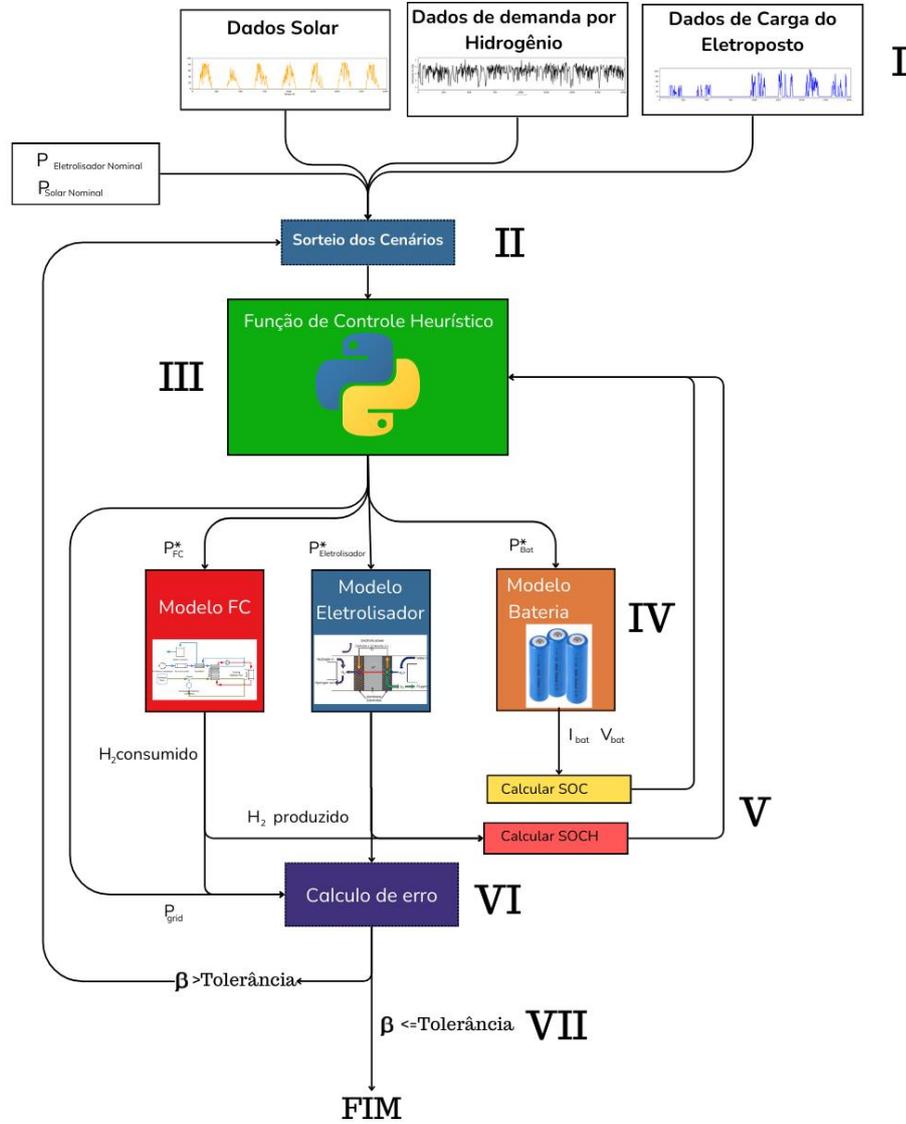


Figura 29: Representação do Algoritmo

Fonte: Próprio Autor

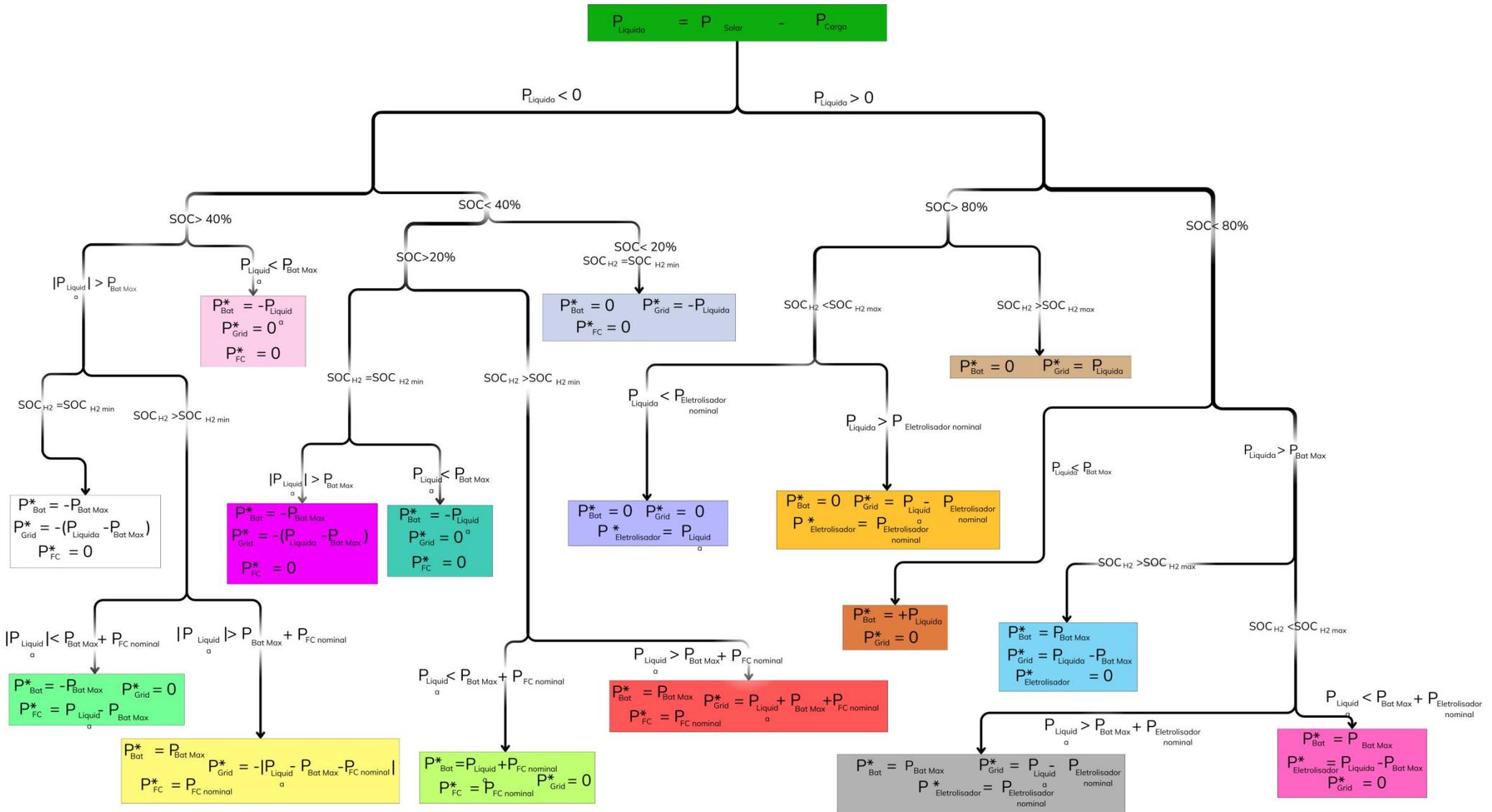


Figura 30: Descrição da Árvore Decisão do Controle

Fonte: Próprio Autor

A função de controle heurístico (III) executa a cada iteração, ou seja a cada intervalo de 5 minutos, a seguinte rotina: Primeiro calcula a diferença entre a potência da geração fotovoltaica e potência requerida pelos carregadores elétricos, essa subtração é chamada de potência líquida ( $P_{\text{liquida}}$ ). Esta, por sua vez pode ser positiva ou negativa a depender dos valores da geração ou do consumo dos carros elétricos (a operação está representada na Figura 30 pelo bloco na cor verde). Caso ela seja positiva (ramo da direita), a energia restante pode ser direcionada para o BESS, eletrolisador ou rede elétrica. Caso ela seja negativa (ramo da esquerda), é necessário utilizar energia dos sistemas secundários de abastecimento de energia para alimentar a carga elétrica, como BESS, célula combustível e rede elétrica. O que determinará o valor da potência de cada elemento será o estado de carga da bateria, denominado SOC e o estado de carga do tanque de hidrogênio denominado SOCH na corrente iteração.

Ainda na Figura 30 é ilustrado as condições e as equações que regem a potência que cada elemento deve ter como referência na saída da função. Os elementos de saída que alimentarão os próximos blocos presentes na Figura 30, estão representados pelo símbolo “\*” como mencionado na Tabela 5.

Agora, quando a potência líquida for maior que 0 (ramo da direita), deverá ser verificado o estado de carga da bateria, caso esteja em um valor menor do que 80%, a potência líquida deve ser direcionada para carregar a bateria respeitando os limites de potencia nominal da mesma, ou seja se a potência líquida for maior do que a potência máxima ( $P_{\text{max}}$ ) suportada pela bateria, o excedente deve ser direcionado pelo ramo que permita o uso da energia pelo eletrolisador se o tanque ainda tiver capacidade de receber a produção de hidrogênio ( $\text{SOCH} < 100\%$ ) e, caso a potência da ultrapasse a potência máxima do eletrolisador ( $P_{\text{eletrosador}}^*$ ), o restante deve ser enviado para a rede elétrica ( $P_{\text{grid}}^*$ ), caso não ultrapasse, a potência do eletrolisador deve ser dado pela diferença entre a potência líquida e a potência máxima da bateria. Em resumo, hierarquicamente tem-se como prioridade a alimentação do carregador elétrico, posteriormente o BESS, depois a produção de hidrogênio e em ultimo lugar a potência deve ser direcionada à rede.

Agora, para a condição em que não há excesso e sim falta de energia na carga do veículo elétrico (ramo da esquerda), ou seja, o sistema necessita de potência para alimentar a carga gerada pelos carros elétricos. Portanto, é verificado na simulação o estado de carga do BESS. Caso, ele seja maior que 40% a carga

será alimentada pelo BESS. Vale ressaltar que se a potência requerida pela carga for maior que a nominal do BESS, verifica-se se existe hidrogênio disponível no reservatório e utiliza-se a energia da célula combustível. Caso as duas potências nominais somadas, bateria e célula combustível, não atendam a potência solicitada, será utilizada energia da rede. Já para a situação que a bateria está com o SOC igual ou abaixo de 40% e existe reserva de hidrogênio, célula e o bateria são utilizadas no intuito de preservar o nível de carga elétrica do BESS e semelhantemente ao caso anterior, caso a soma das duas potências nominais da célula e da bateria não sejam suficientes, em ultimo caso será utilizado a energia da rede para atender à carga. Por fim, para a situação em que a bateria esteja com o nível abaixo de 20% será utilizado a energia da célula e caso a potência da célula não seja suficiente ou não exista hidrogênio disponível, será utilizado energia da rede.

Após resolver as equações definidas no bloco Funções de Controle Heurístico, as informações das potências requeridas ou fornecidas para cada elemento (IV), agora denominadas potência de referência, são enviadas como variáveis de entrada para os blocos que possuem intrinsecamente as equações dos modelos matemáticos. As equações em questão são as citadas nas sessões de modelos matemáticos. Como as equações disponíveis geralmente possuem como tensão em função de alguns parâmetros que são constantes e também da corrente elétrica (Equação 6) é necessário adapta-las para que a entrada seja como variável potência. Portanto, as equações abaixo mostram como foi o processo para reescrever as equações da potência em função da corrente.

Multiplicando a Equação 6 por pela corrente elétrica tem-se:

$$I \cdot [V_{\text{cell}} = E_0 - b \ln I - R \cdot i - m e^{n \cdot I}] \quad (22)$$

Como a potência elétrica é dada pela Equação 23,

$$P = V \cdot I \quad (23)$$

Tem-se:

$$P = [E_0 - b \ln I - R \cdot i - m e^{n \cdot I}] \cdot I \quad (24)$$

Agora, como a Equação 25 possui uma termos não lineares e portanto, é necessário utilizar o método de Newton-Rapson para encontrar o valor de corrente e então encontrar o valor de tensão da célula e por fim, de posse desses parâmetros inserir na equação de produção de hidrogênio Equação 7.

A Tabela 6 mostra os parâmetros da Equação 6 que são amostrados experimentalmente por LAURENCELLE et al., 2001.

Tabela 6: Parâmetros da Equação que são Amostrados Experimentalmente da Célula Combustível

Fonte: Adaptado de LAURENCELLE, F. et al. (2001)

Parâmetro	Valor	Unidade de Medida
$E_0$	1,05	V
B	0,0352	V
R	0,0003608	$k\Omega \text{ cm}^2$
m	0,008	$\text{cm}^2 \cdot \text{mA}^{-1}$

O processo semelhante ocorre com as equações do eletrolisador. Aqui também é necessário multiplicar toda equação de tensão pela corrente para obter uma equação que envolva potência e corrente. Como a potência é determinada na etapa anterior através das equações na função de controle heurístico, é possível aplicando Newton-Rapson para encontrar o valor de corrente e depois substituir na equação inicial.

Vale ressaltar que tanto para a célula combustível quanto para o eletrolisador foi considerado uma temperatura de operação de 35° Celsius.

De posse da quantidade de hidrogênio produzida pelo eletrolisador, consumida pela célula combustível e pelos veículos a hidrogênio, foi utilizado a Equação 15 de SOCH.

Além disso, o processo semelhante ocorre com a bateria visto que temos a informação da potência definida, aplica-se a Equação 14 no procedimento para calcular o SOC.

Por fim, os de acordo com a quantidade de hidrogênio produzida ou consumida e de acordo com a quantidade de energia que a o BESS recebeu ou enviou, as informações de SOC e SOCH são atualizadas para a próxima iteração.

Após executar toda iteração, o processo se repete para completar as 2016 iterações que correspondem a uma semana de dados, visto que eles estão amostrados em intervalos de 5 minutos. A partir dessa etapa, é registrado a soma da quantidade de hidrogênio que foi solicitada pelos veículos a hidrogênio mas que não foi atendido pelo sistema devido à indisponibilidade, essa variável foi denominada de “demanda de H<sub>2</sub> não atendida”. Essa variável é armazenada e uma nova série temporal é iniciada (votando para a etapa II) dando início ao novo *loop* repetindo as

etapas III, IV e então, a partir da segunda iteração, é calculado uma média dos valores de demanda de H<sub>2</sub> não atendida e também calculado o desvio padrão dos valores médios. A Figura 26, explanada anteriormente, mostra um exemplo de como o valor médio tende a um resultado após várias iterações.

Para assegurar a confiabilidade e precisão das simulações realizadas no estudo do sistema energético, foi implementado um rigoroso critério de parada de (etapa VI) baseado no critério de Chebyshev Inequality Stopping Rule, descrito na Capítulo 3.4.1, e em análises estatísticas das simulações consecutivas. Esse critério é essencial para determinar a estabilidade dos resultados obtidos e garantir que o sistema está convergindo para uma solução consistente.

Após cada simulação, a soma da demanda de H<sub>2</sub> não atendida, que é um indicador crucial da performance do sistema, é extraído e armazenado numa lista acumulativa de resultados. Este procedimento é repetido a cada iteração do modelo, com o sistema sendo reavaliado e ajustado conforme necessário para refletir as condições variáveis e os inputs.

Quando a lista acumulativa de resultados atinge mais de um valor, é calculada a média desses valores, e em seguida, o desvio padrão da média. O desvio padrão da média é uma medida que indica a variação dos valores da demanda de H<sub>2</sub> não atendida em relação à média, fornecendo uma avaliação da dispersão dos resultados das simulações. Este valor é particularmente importante, pois pequenas variações podem significar grandes impactos na operacionalização do sistema energético modelado.

Para determinar a adequação dos resultados, o coeficiente de variação — que é a razão entre o desvio padrão da média e a média dos valores — é calculado.

Este coeficiente fornece uma medida relativa da dispersão dos dados, oferecendo uma visão clara da consistência dos resultados das simulações. A tolerância para este coeficiente foi previamente estabelecida em 1%, baseando-se na precisão desejada para as projeções do sistema energético. Caso o coeficiente de variação exceda esse limite de tolerância, o processo de simulação é continuado, indicando a necessidade de mais iterações para alcançar uma estabilidade desejável. Por outro lado, se o coeficiente estiver dentro do limite estabelecido, o processo iterativo é encerrado, concluindo que os resultados alcançaram uma confiabilidade aceitável.

Este método estatístico robusto permite uma avaliação meticulosa da estabilidade das simulações, assegurando que as decisões baseadas nos resultados do modelo sejam informadas e precisas. A implementação desse critério de parada não apenas fortalece a confiança nos dados gerados mas também otimiza o uso de recursos, evitando simulações desnecessárias e concentrando esforços nos ajustes e análises que realmente impactam os resultados finais.

Finalmente, ao término do processo iterativo, são reportadas informações detalhadas como o número da iteração em que o *loop* foi interrompido, o último valor da demanda de H<sub>2</sub> não atendida, o desvio padrão da média e a média dos valores calculados, oferecendo uma transparência completa sobre o desempenho e a confiabilidade do sistema simulado. Essas informações são cruciais para documentar o rigor e a precisão do estudo, servindo como referência para futuras análises e decisões relacionadas ao sistema energético em questão.

## CAPÍTULO 5: ANALISES DOS RESULTADOS

Neste capítulo, abordamos uma análise meticulosa das capacidades operacionais e das limitações sistêmicas de uma microrrede simulada, utilizando dados detalhados derivados de gráficos de potência instantânea e dos índices de State of Charge (SOC) e State of Charge of Hydrogen (SOCH). Estes parâmetros são cruciais para a avaliação da eficiência dinâmica e a integridade operacional das diversas componentes do sistema, fornecendo uma base sólida para a validação da metodologia empregada na simulação.

A investigação é estruturada em uma série de simulações iterativas, cujos resultados são essenciais para verificar as hipóteses iniciais e para identificar áreas críticas onde intervenções podem ser necessárias. Este estudo incorpora uma análise integrada de várias fontes de dados, incluindo potência solar, bateria, rede elétrica, célula de combustível, e demanda de carga de veículos elétricos, destacando a interconexão e a dependência mútua entre esses elementos dentro da microrrede.

Uma parte significativa deste capítulo é dedicada a explorar a correlação direta entre a geração de energia fotovoltaica e a demanda energética dos veículos a hidrogênio. Demonstramos como a energia solar excedente é estrategicamente canalizada para o eletrolisador para otimizar a produção de hidrogênio, alinhando picos de produção solar com operações aumentadas do eletrolisador. Este capítulo também analisa como o SOC da bateria e a potência da rede são integrados para regular a atividade energética dentro da microrrede, assegurando uma gestão equilibrada entre carga e descarga.

As repetições das simulações são fundamentais para a validação da robustez e precisão da metodologia adotada, permitindo a quantificação e análise de tendências a longo prazo no gerenciamento da demanda de hidrogênio não atendida. A utilização de desvio padrão como critério de parada é examinada, enfatizando sua importância no estabelecimento de um resultado representativo e tecnicamente adequado para o sistema.

## 5.2 ANÁLISE

A análise dos dados coletados fornece uma visão crítica das capacidades e limitações do sistema investigado, destacando o papel crucial da metodologia empregada na simulação da microrrede. Com base neste entendimento, será explorado a seguir os resultados dos gráficos de potência instantânea dos equipamentos da microrrede, bem como os valores de SOC e SOCH, que são fundamentais para avaliar a performance dinâmica das várias componentes do sistema. Este exame detalhado não apenas responde a questões específicas sobre o funcionamento da microrrede, mas também fornece insights valiosos para futuras melhorias e implementações. Portanto, adentrar nos gráficos e métricas específicos nos permite não apenas validar as hipóteses propostas, mas também identificar áreas críticas para intervenções futuras.

Analisando os resultados apresentados na Figura 32, Figura 33 e Figura 34, é válido destacar inicialmente 5 elementos gráficos.

O primeiro contém curvas de potência instantânea das grandezas em questão, a saber:

- Potência Solar (em laranja): a correspondendo à variação da disponibilidade de luz solar ao longo do dia. A potência atinge picos durante o que parece ser o meio do dia e diminui para zero durante a noite.
- Potência da Bateria (em verde) e Potência da Rede (em vermelho): Ambas são plotadas com seus valores invertidos no gráfico, indicando o fornecimento (valores positivos) ou o consumo (valores negativos) de energia. A potência da bateria mostra episódios de carga (quando os valores são negativos) e descarga (quando os valores são positivos). A potência da rede mostra que há momentos em que o sistema está fornecendo energia de volta à rede (valores negativos) e outros momentos em que está consumindo da rede (valores positivos).
- Potência da Célula de Combustível (em rosa): A presença de picos periódicos de ativação para suprir a demanda de energia e auxiliar o sistema no momento em que há excesso de hidrogênio e o BESS não é capaz de suprir a demanda.
- Carga EV (em azul): Esta linha representa a carga demandada pelos veículos elétricos. A carga varia ao longo do tempo, com alguns picos significativos, o que indica períodos de alta demanda de carga.
- Potência do Eletrolisador (em dourado): Mostra os períodos de atividade do eletrolisador, que está envolvido na produção de hidrogênio. Os picos podem ser

interpretados como períodos de alta produção, ou seja, quando há excesso de potência solar disponível.

Na Figura 32 elementos gráficos contém SOC do BESS e SOCH do tanque de hidrogênio. Observa-se que quando o SOC está fora das regiões definidas na 4.4 (Descrição do Algoritmo), a potência da bateria é zero.

A Figura 33 contém a informação da quantidade de hidrogênio demandado pelos veículos à hidrogênio, esta informação está representada pelo gráfico na cor preta onde o valor do eixo X é o tempo ao longo da semana e o valor do eixo Y é a massa em Kg. Analogamente, o gráfico plotado na cor rosa, presente na mesma Figura 33, representa a quantidade de hidrogênio que o sistema não conseguiu suprir, ou seja o déficit de hidrogênio.

Os gráficos mostram resultados para valores simulados para a potência solar nominal de 100 kWp, potência da bateria de 15 kW e capacidade de 3600 Ah, eletrolisador com 150kW de potência, e potência da célula combustível de 5 kW. Vale ressaltar que esses resultados são parte de 1 semana de simulação, portanto, o algoritmo continua o processo criando novas séries temporais e obtendo novos resultados para valores fixos de potência nominais de equipamentos.

A Figura 34 mostra o primeiro dia da semana simulado de forma ampliada para facilitar a compreensão. Essa imagem, corresponde à primeira parte do gráfico presente na Figura 31.

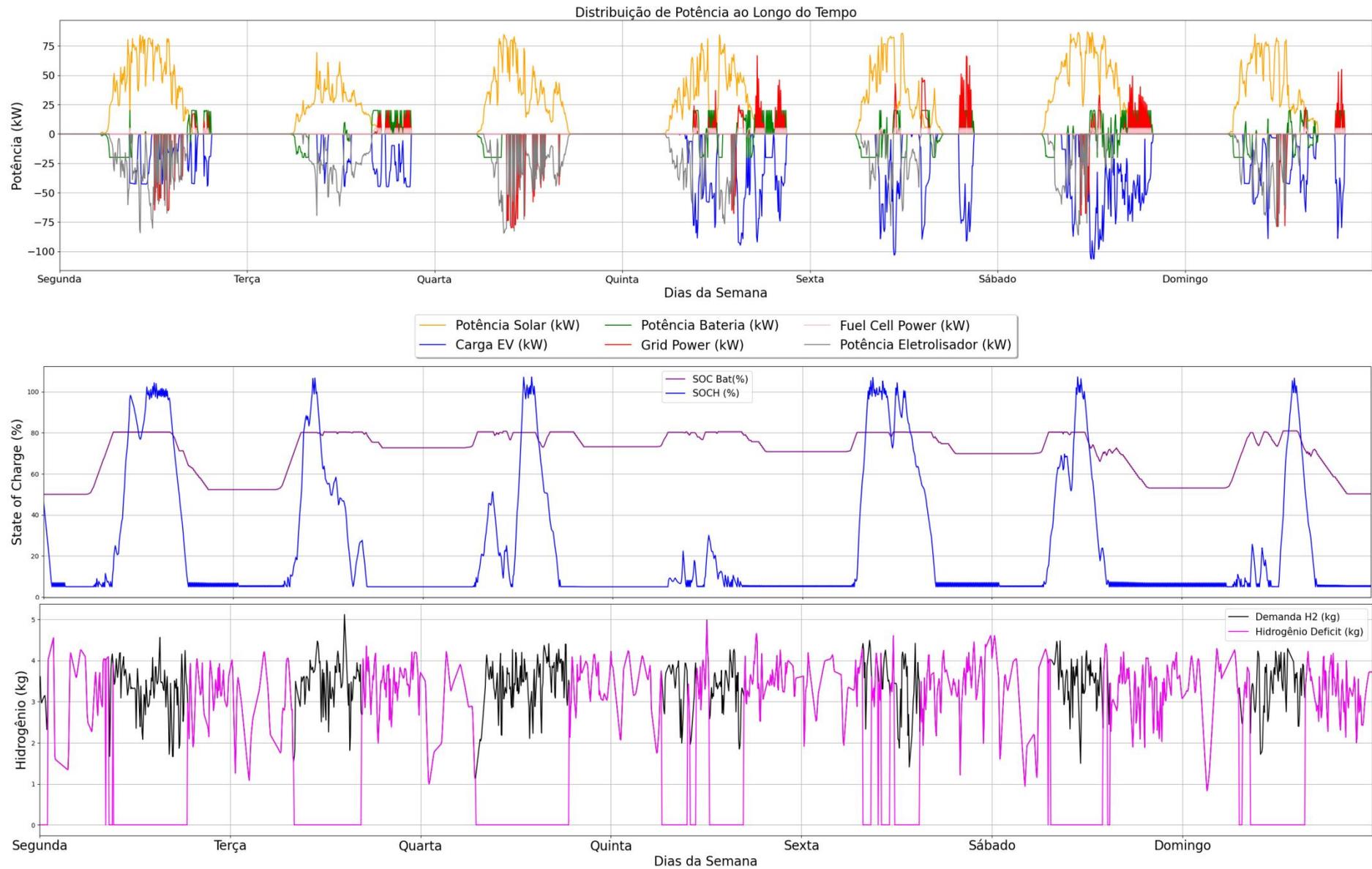


Figura 31 A: Gráficos de Potência da Geração Fotovoltaica (Curva amarela), Consumo dos Veículos Elétricos (Curva Azul), Potência Consumida pelo Eletrolisador (Cinza), Potência da Bateria (Curva Verde), Potência da Rede (Vermelho), Potência Consumida de FC (Curva Rosa);

Figura 32: SOC e SOCH

Figura 33: Demanda de Gás Hidrogênio e Déficit

Fonte: Próprio Autor

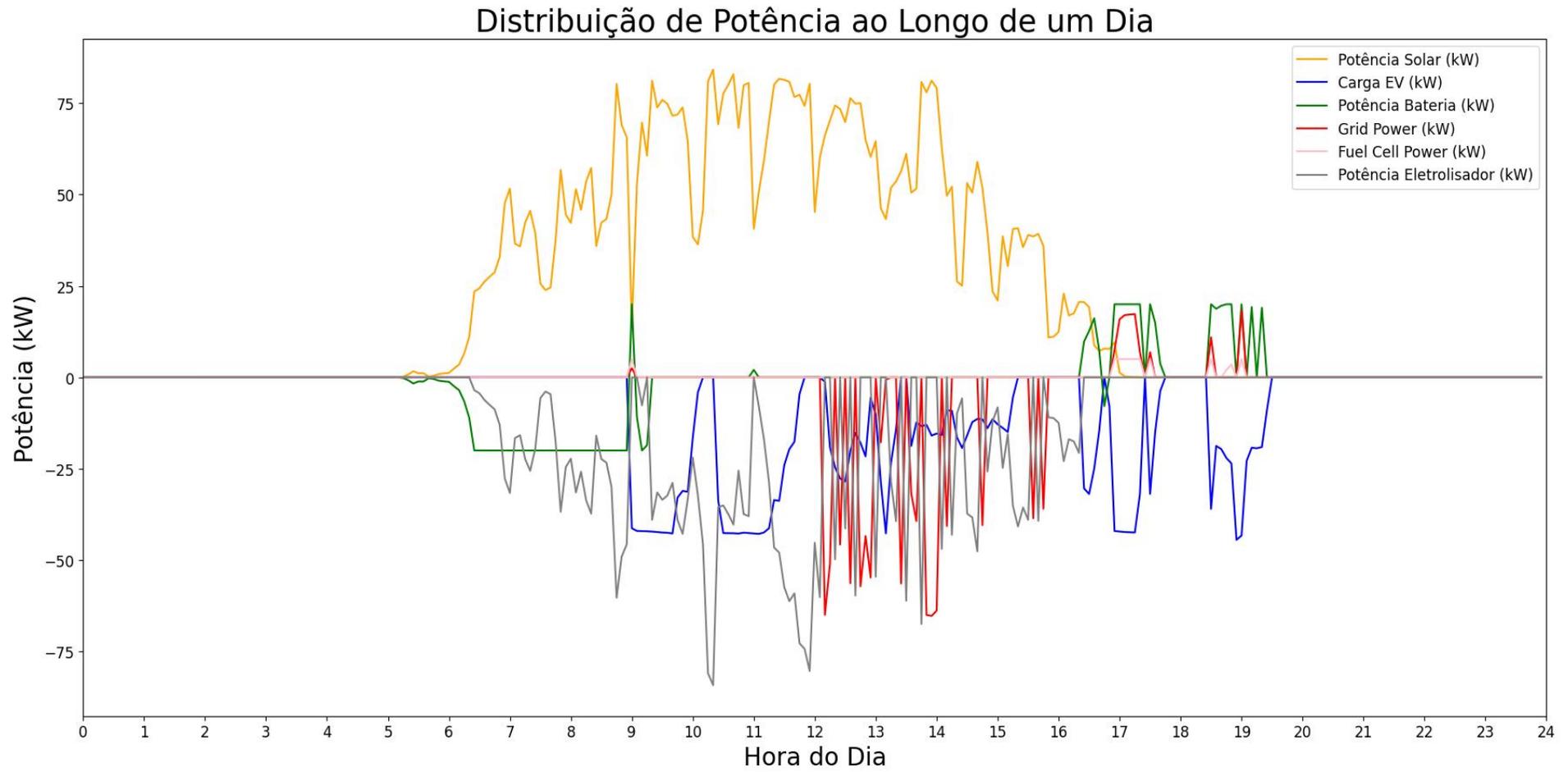


Figura 34: Representação do Primeiro Dia Simulado

Fonte: Próprio Autor

Observando o gráfico da geração fotovoltaica, percebe-se um padrão claro de pico e vale, correspondendo aos ciclos de dia e noite. A produção máxima ocorre durante as horas de sol pleno, com uma diminuição gradativa à medida que o sol se põe. Os padrões semanais indicam uma performance consistente e uma capacidade de geração alinhada com a expectativa de entrada de energia solar na microrrede. A demanda de energia pelos carros elétricos mostra variações significativas ao longo do dia, refletindo os padrões típicos de uso de veículos. As oscilações nos gráficos mostram o aumento de atividade durante as horas de início e final do dia, uma característica comum em estacionamentos de carros elétricos. A potência da bateria varia em resposta à demanda de energia da microrrede e à produção de energia solar.

O gráfico do SOC da bateria demonstra a relação direta entre carga e descarga da bateria e as atividades de carregamento dos veículos elétricos, bem como a geração fotovoltaica. Observa-se que o SOC é mantido dentro de um intervalo operacional seguro, evitando tanto a sobrecarga quanto a descarga excessiva, o que é crucial para a longevidade e eficácia da bateria. Os picos negativos na potência da rede representam períodos em que a microrrede está fornecendo energia de volta para a rede principal, enquanto os picos positivos representam momentos de consumo da rede. A potência gerada pela célula de combustível ilustra sua utilização para complementar a geração fotovoltaica e atender à demanda de carga quando necessário, particularmente fora do período de geração solar. O gráfico da potência do eletrolisador exibe a produção de hidrogênio, alinhada com os excedentes de energia gerados pela geração fotovoltaica. Os períodos de atividade mais intensa do eletrolisador coincidem com os picos de geração de energia solar, indicando uma gestão eficiente dos recursos energéticos.

O SOCH do tanque de hidrogênio reflete a quantidade de hidrogênio disponível, com um aumento progressivo conforme o hidrogênio é produzido e armazenado. A demanda de hidrogênio por veículos a hidrogênio, refletida no gráfico correspondente, indica o consumo de hidrogênio pelos veículos equipados com células de combustível de hidrogênio. Esta demanda é marcada por flutuações que presumivelmente correspondem aos ciclos de recarga desses veículos. Os picos no gráfico são indicativos de períodos de alta demanda de abastecimento, provavelmente alinhados com horários de pico de utilização ou recarga dos veículos a hidrogênio.

Agora, analisando a correlação entre as variáveis, observa-se uma correlação direta entre a geração de energia fotovoltaica e a demanda dos veículos a hidrogênio. Durante as horas de pico de produção solar, espera-se que a energia excedente seja direcionada ao eletrolisador para maximizar a produção de hidrogênio. Portanto, picos na geração fotovoltaica podem coincidir com aumentos na operação do eletrolisador, refletindo uma estratégia otimizada de aproveitamento de energia renovável para produzir combustível para veículos a hidrogênio. A potência da rede e o SOC (estado de carga) da bateria devem estar estreitamente interligados. Quando o SOC está alto, indicando que a bateria está quase cheia, a microrrede pode escolher reduzir a produção do eletrolisador ou fornecer energia para a rede externa. Inversamente, um SOC baixo pode sinalizar a necessidade de recarregar a bateria, possivelmente levando a microrrede a extrair energia da rede elétrica, caso a geração fotovoltaica e a potência da célula de combustível sejam insuficientes. O funcionamento do eletrolisador está diretamente relacionado ao SOCH do tanque de hidrogênio. Quando o eletrolisador está ativo, a expectativa é de um aumento gradual no SOCH, representando o armazenamento de hidrogênio produzido. Deve haver um equilíbrio delicado entre produção e consumo, onde o SOCH não exceda sua capacidade total, indicando um gerenciamento eficaz do ciclo de vida do hidrogênio dentro da microrrede. A potência da célula de combustível deve responder às necessidades de energia da microrrede, especialmente durante períodos de baixa ou nenhuma geração solar. Por exemplo, se a demanda de carros elétricos aumenta após o pôr do sol, a célula de combustível pode ser ativada para fornecer energia adicional, garantindo a estabilidade da microrrede. A demanda de energia dos veículos elétricos deve ter uma relação inversa com o carregamento da bateria. Durante os períodos de baixa demanda de carros elétricos, é uma oportunidade para a bateria se recarregar, armazenando energia solar excedente ou energia fornecida pela célula de combustível.

Como mencionado em capítulos anteriores, após o algoritmo simular 1 semana, ele cria novas séries temporais através do sorteio com reposição dos dias da semana pré-definidos. Após o sorteio, é aplicado novamente o processo de simular os dados para 1 semana. Sempre que a simulação de 1 semana se repete, o valor acumulado de demanda de hidrogênio não atendido pela geração é registrado para que, posteriormente, seja calculado o valor médio até o critério de parada ser atendido.

Após várias semanas de simulações, cada valor de demanda de hidrogênio acumulado é registrado e foi representado na Figura 35, a partir desses valores, é calculado o valor médio e a distribuição de densidade. Em suma, a Figura 35 é composta por: Curva Azul que representa a quantidade de hidrogênio não atendida, ou seja, flutuações ao longo das iterações da soma de hidrogênio ao longo de 1 semana que o sistema não conseguiu atender diante da demanda; Curva Laranja (Curva de Distribuição Densidade): densidade de probabilidade e deve ser interpretada observando o eixo horizontal superior, que mostra uma tendência decrescente no déficit de hidrogênio ao longo das iterações; Curva vermelha: representa a média da curva azul.

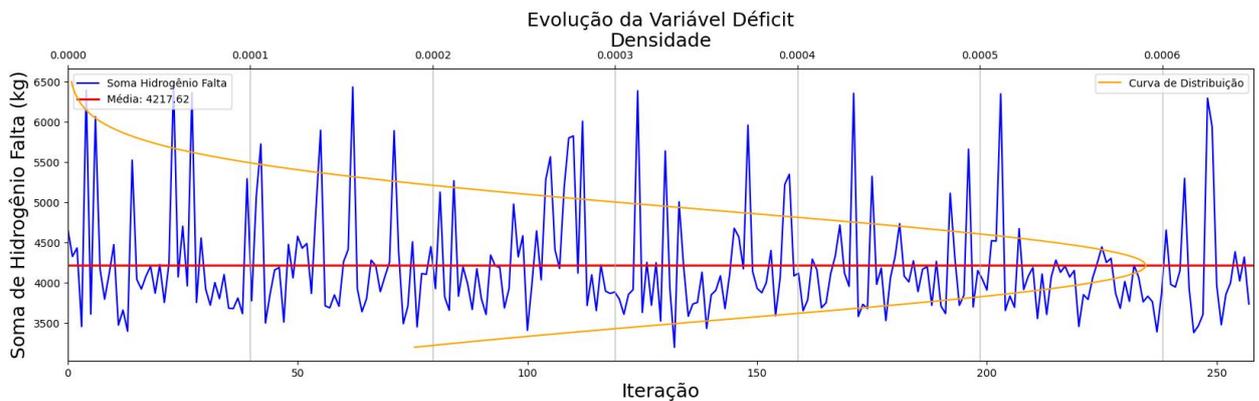


Figura 35: Evolução da Variável Demanda Não Atendida ao Longo das Iterações

Fonte: Próprio Autor

A Figura 36 e a Figura 37 mostram que para duas semanas distintas os valores da média converge para um certo valor específico (na Figura 35 é representado pela linha vermelha) evidenciando que a metodologia empregada está correta quando se compara com o perfil teórico elucidado no Capítulo 3.

A Figura 36 difere da Figura 37 pois na segunda foi necessário um número maior de iterações para convergência e para atender o critério de parada.

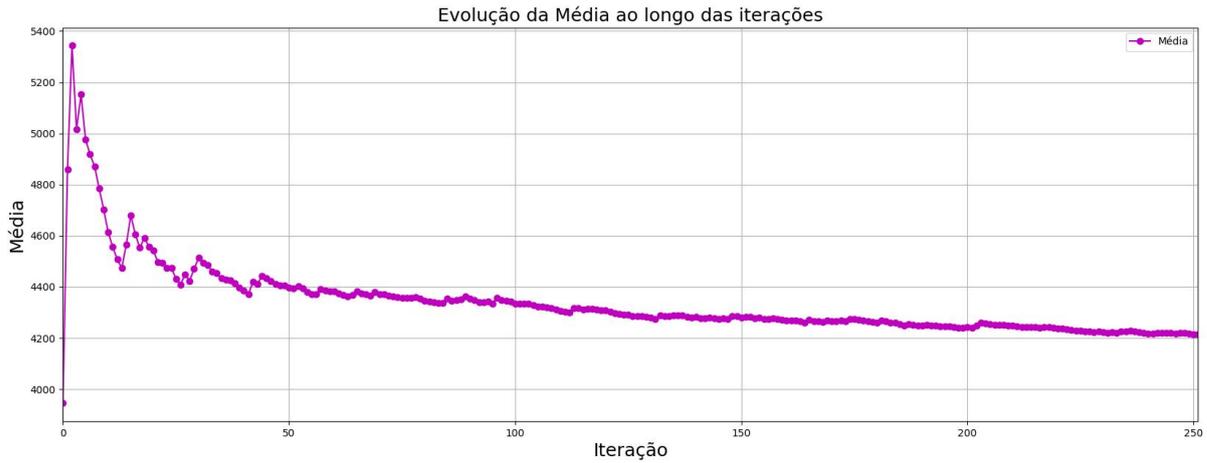


Figura 36: Exemplo 1 de Convergência do Valor Médio ao Longos das Iterações

Fonte: Próprio Autor

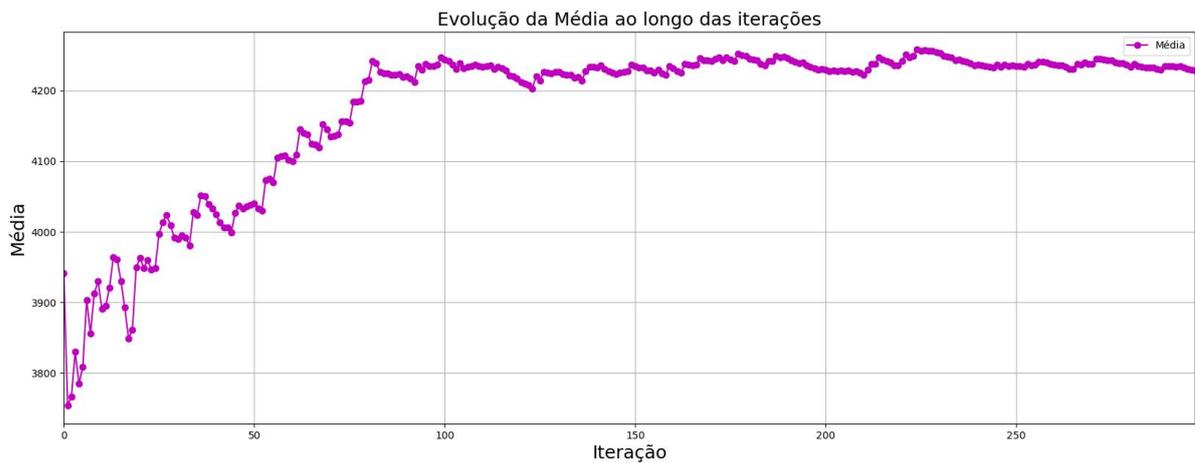


Figura 37: Exemplo 2 de Convergência do Valor Médio ao Longos das Iterações

Fonte: Próprio Autor

Outro parâmetro importante é o desvio padrão que é utilizado como critério de parada para obter um resultado suficiente adequado e que represente da maneira mais adequada o sistema. A Figura 38 mostra a evolução decrescente do desvio padrão reforçando o argumento que a média descrita na Figura 36 tende à um valor ao longo do tempo ao invés de oscilar com o tempo.



Figura 38: Evolução do Desvio Padrão ao Longo das Iterações

Fonte: Próprio Autor

Como destacado anteriormente na Seção 4.4 e ilustrado na Figura 30, Figura 31, Figura 32 e Figura 33, mesmo com valores idênticos de potência nominal dos equipamentos, as potências instantâneas de cada um podem variar significativamente. Isso ocorre porque, em cada nova iteração semanal, novas séries temporais são geradas como dados de entrada, conforme mencionado na Seção 4.4. No entanto, ao concluir uma simulação completa—isto é, após simular o número necessário de semanas para atingir o critério de parada definido no Capítulo 3—é possível, através da técnica de Monte Carlo, obter uma estimativa confiável do déficit de hidrogênio que se aproxima de um valor representativo da realidade.

Com base nesses dados, o gráfico 3D na Figura 39 correlaciona as variáveis mencionadas: potência nominal do eletrolisador, potência nominal da geração fotovoltaica e o déficit de hidrogênio obtido pelas simulações. O gráfico revela a relação não linear entre a quantidade de hidrogênio produzido e as potências nominais. Por exemplo, o aumento indiscriminado da potência nominal da geração fotovoltaica, sem considerar sua interação com a potência do eletrolisador, pode resultar em excesso de energia elétrica no sistema, uma vez que o eletrolisador não conseguirá processar toda a energia disponível. Analogamente, se a potência do eletrolisador for aumentada sem considerar a potência da geração fotovoltaica, ocorrerá uma deficiência de energia elétrica para a produção de hidrogênio, evidenciando a capacidade ociosa do eletrolisador.

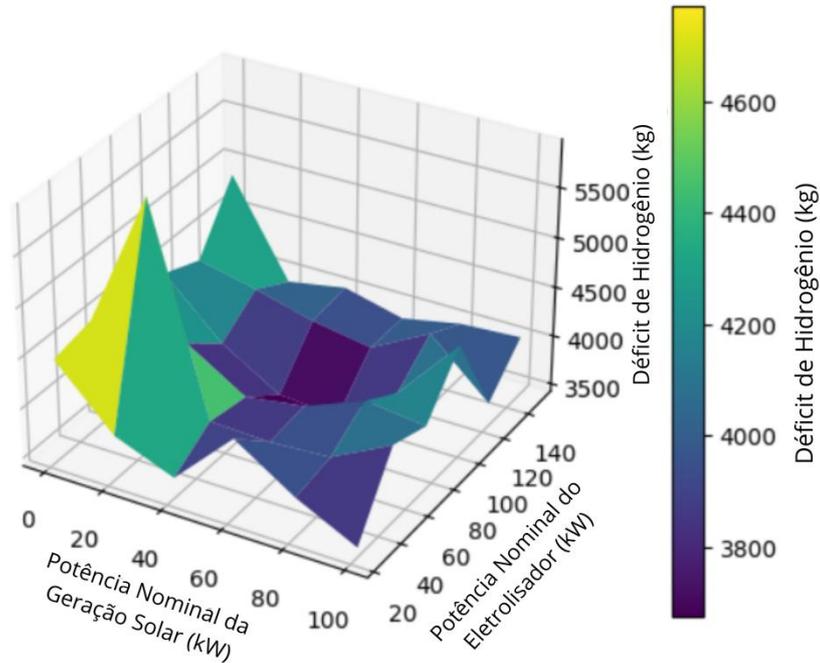


Figura 39: Relação de Demanda de Hidrogênio não Atendida (Déficit) com Potência Nominal Solar e Potência Nominal Solar

Fonte: Próprio Autor

Analisando o gráfico 3D que mostra a relação entre potência solar, potência do eletrolisador e produção de hidrogênio, é possível destacar que a combinação ótima que minimiza o déficit de hidrogênio ocorre em torno de 80 kW para a potência do eletrolisador e 50 kW para a geração fotovoltaica. Este resultado sugere que, para otimizar ainda mais os resultados e se aproximar dos valores reais, seria benéfico ajustar o passo de intervalo nas simulações futuras. Isso permitiria uma investigação mais detalhada das nuances das interações entre as variáveis.

Além disso, é importante considerar a incerteza inerente ao método de Monte Carlo, que, por sua natureza estocástica, não permite identificar o ponto de mínimo com precisão absoluta, como ocorre com qualquer método analítico de busca de mínimos. Em termos práticos, considerando que os equipamentos de eletrolisador disponíveis comercialmente são tipicamente oferecidos em unidades inteiras, a busca por uma precisão excessivamente alta não é necessária.

Importante ressaltar também que a diferença de desempenho entre o ponto mínimo e o máximo observado nas simulações indica uma melhora significativa de aproximadamente 22%. Esta melhora quantifica o benefício da otimização do sistema e

destaca a importância de selecionar as configurações de potência apropriadas para maximizar a eficiência da produção de hidrogênio.

Assim, as simulações demonstram que ajustes cuidadosos nas configurações de potência do eletrolisador e no sistema de geração fotovoltaica podem resultar em ganhos significativos de eficiência, apontando caminhos valiosos para aperfeiçoamento contínuo dos sistemas de energia renovável integrados à produção de hidrogênio. Aprofundar esses estudos e aplicar ajustes granulares pode levar a avanços substanciais no design e na operação eficiente de microrredes.

## CAPÍTULO 7: CONCLUSÃO

Esta dissertação investigou a operação e otimização de uma microrrede integrada, com foco na eficiência e funcionalidade de componentes críticos, como células de combustível, eletrolisadores, baterias e sistemas de geração fotovoltaica. A pesquisa partiu de uma revisão bibliográfica que estabeleceu a base necessária para a análise prática, com o objetivo de explorar as dinâmicas operacionais da microrrede.

As análises realizadas ao longo do trabalho evidenciaram a importância da calibração precisa entre a capacidade dos eletrolisadores e a geração fotovoltaica, minimizando déficits energéticos e destacando a eficácia de uma gestão energética integrada. As simulações mostraram que a combinação ótima para minimizar o déficit de hidrogênio ocorre em torno de 80 kW para a potência do eletrolisador e 50 kW para a geração fotovoltaica. Esses ajustes nas configurações de potência resultaram em uma melhoria significativa de aproximadamente 22% na eficiência da produção de hidrogênio.

O uso da técnica de Monte Carlo permitiu uma avaliação detalhada das dinâmicas operacionais da microrredes, apesar da incerteza inerente ao método. Embora não permita identificar o ponto de mínimo com precisão absoluta, os resultados indicam que ajustes futuros, como a redução do passo de intervalo nas simulações, poderiam fornecer uma análise ainda mais detalhada das interações entre as variáveis. Esses ajustes cuidadosos nas configurações de potência do eletrolisador e no sistema de geração fotovoltaica podem gerar ganhos significativos de eficiência, apontando caminhos valiosos para o aperfeiçoamento contínuo dos sistemas de energia renovável integrados à produção de hidrogênio.

As simulações também revelaram como o sistema de controle hierárquico se ajusta para otimizar a distribuição de energia em resposta a condições operacionais variáveis. A análise destacou a importância da calibração precisa entre a capacidade dos eletrolisadores e a geração fotovoltaica, minimizando déficits energéticos e evidenciando a eficácia de uma gestão energética integrada. O algoritmo desenvolvido no trabalho foi fundamental para esse processo, permitindo a manipulação eficiente dos dados e a seleção adequada das potências nominais do eletrolisador e da geração fotovoltaica, resultando em simulações semanais que garantiram a robustez dos resultados obtidos.

Os resultados das simulações forneceram informações importantes sobre a correlação entre as potências nominais do eletrolisador, a geração fotovoltaica e o déficit de hidrogênio. Foi demonstrado que a integração e otimização de recursos, como a canalização eficiente do excesso de energia solar para a produção de hidrogênio, podem melhorar significativamente a eficiência energética da microrrede. Essas descobertas são relevantes para o avanço de práticas de gestão energética que equilibram de forma eficaz a produção, o armazenamento e o consumo de energia.

A capacidade de redirecionar excessos de energia não apenas otimiza o uso de recursos renováveis, mas também alinha a operação do eletrolisador com os picos de geração solar, uma estratégia que maximiza a produção de hidrogênio e reduz a dependência de fontes de energia não renováveis. Este alinhamento mostra como os ajustes operacionais baseados em simulações podem influenciar diretamente a sustentabilidade e eficiência de sistemas de energia renovável.

Em conclusão, este estudo não apenas confirmou a viabilidade das microrredes integradas como soluções sustentáveis para o gerenciamento de energia, mas também destacou o potencial significativo para melhorias através de inovações tecnológicas e estratégias de controle avançadas. Deve-se destacar que um dimensionamento sem critérios adequados, particularmente em microrredes com carga dinâmica, pode resultar em aumentos indesejados no déficit de hidrogênio, comprometendo a eficiência do sistema. Portanto, é essencial que o dimensionamento e a configuração das microrredes sejam conduzidos com uma análise detalhada das interações entre os componentes e as variáveis operacionais.

A continuação desta pesquisa abre várias possibilidades para aprofundar e expandir os estudos sobre a operação e otimização de microrredes. Recomenda-se que trabalhos futuros implementem dados reais em estações de recarga de hidrogênio, substituindo os dados sintetizados usados nesta análise. Além disso, a sofisticação do processo de simulação Monte Carlo, incluindo mais variáveis ajustáveis, como a potência nominal da célula de combustível, a capacidade e potência da bateria, e a capacidade do tanque de armazenamento, pode otimizar ainda mais o sistema.

Outra modificação valiosa seria a aplicação de lógica fuzzy ou algoritmos de inteligência artificial para calibrar as condições heurísticas de controle, promovendo uma gestão de energia mais eficiente e adaptativa. Essas sugestões para trabalhos

futuros fortalecem a infraestrutura existente das microrredes e alinham o desenvolvimento tecnológico com as metas de sustentabilidade e eficiência energética. A inovação contínua e a pesquisa detalhada são essenciais para superar os desafios emergentes e garantir que as soluções de energia renovável sejam viáveis e benéficas tanto ambiental quanto economicamente.

## REFERÊNCIAS

**IRENA.** Green Hydrogen: A Guide to Policy Making. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2020.

**WASEEM, M.; AMIR, M.; LAKSHMI, G. S.; HARIVARDHAGINI, S.; AHMAD, M.** Recent Developments on Hydrogen Production Technologies: State-of-the-Art Review with a Focus on Green-Electrolysis. Journal Title, v. volume(issue), 2023.

**O. , V.; W., A.J.M.v.** Fuel cell electric vehicle as a power plant: Fully renewable integrated transport and energy system design and analysis for smart city areas. Journal Title, v. volume(issue), 2015.

**MANOHARAN, Y.; HOSSEINI, S. E.; BUTLER, B.; ALZHRANI, H.; SENIOR, B. T. F.; ASHURI, T.; KROHN, J.** (2019). Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect. Applied Sciences, 9(11), 2296. DOI: 10.3390/app9112296.

**SOUSA, Antonio Carlos Zambroni de; CASTILLA, Miguel (Eds.).** Microgrids: Design and Implementation. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2019. DOI: 10.1007/978-3-319-98687-6.

**KEÇEBAŞ, Ali; KAYFECIB, Muhammet.** Hydrogen Properties. In: Solar Hydrogen Production. Elsevier, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00001-1>.

**JONAS, J.** The History of Hydrogen. Altenergymag, 2009. Disponível em: <https://www.altenergymag.com/article/2009/04/the-history-of-hydrogen/555/>. Acesso em: 15 jun. 2024.

**KABZA, Alexander.** Fuel Cell Formulary. Auto-publicação, Alemanha, 2016. Disponível em: [https://www.pemfc.de/FCF\\_Smart.pdf](https://www.pemfc.de/FCF_Smart.pdf). Acesso em: 15 jun. 2024.

**ASENSIO, F.J.; SAN MARTÍN, J.I.; ZAMORA, I.; SALDAÑA, G.; OÑEDERRA, O.** Analysis of electrochemical and thermal models and modeling techniques for polymer electrolyte membrane fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109283.

**LISO, Vincenzo; NIELSEN, Mads Pagh; KÆR, Søren Knudsen; MORTENSEN, Henrik H.** Thermal modeling and temperature control of a PEM fuel cell system for forklift applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 39, p. 8410-8420, 2014. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.03.175.

**LAURENCELLE, F.; CHAHINE, R.; HAMELIN, J.; AGBOSSOU, K.; FOURNIER, M.; BOSE, T. K.; LAPERIÈRE, A.** Characterization of a Ballard MK5-E Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack. In: *Fuel Cells 2001*, v. 1, n. 1, 2001.

**MARIANI, Marco et al.** The Role of Fluorinated Polymers in the Water Management of Proton Exchange Membrane Fuel Cells: A Review. *Energies*, v. 14, p. 8387, 2021. DOI: 10.3390/en14248387.

**ATLAM, Ozcan; KOLHE, Mohan.** Equivalent electrical model for a proton exchange membrane (PEM) electrolyser. *Energy Conversion and Management*, v. 52, p. 2952–2957, 2011. DOI: 10.1016/j.enconman.2011.04.007.

**MILANO, Federico; MANJAVACAS, Álvaro Ortega.** Converter-Interfaced Energy Storage Systems. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. DOI: 10.1017/9781108363266.

**ALMEIDA, F. S.; SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S.** Review on Monte Carlo Simulation Stopping Rules: How Many Samples Are Really Enough? *Electric Power Systems Research*, 2023. DOI: 10.1016/j.epsr.2022.108797.

**ZHAO, Haoran et al.** Review of energy storage system for wind power integration support. *Applied Energy*, v. 137, p. 545–553, 2015. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.04.103.

**VIDAS, L.; CASTRO, R.** Recent Developments on Hydrogen Production Technologies: State-of-the-Art Review with a Focus on Green-Electrolysis. *Appl. Sci.* 2021, 11, 11363. DOI: <https://doi.org/10.3390/app112311363>

**DUSONCHET, L.; IPPOLITO, M.G.; TELARETTI, E.; ZIZZO, G.; GRADITI, G.** An optimal operating strategy for combined RES-based Generators and Electric Storage Systems for load shifting applications. *Journal of Clean Power and Energy*, 2020.

**KURTZ, Jennifer et al.** Predicting demand for hydrogen station fueling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.10.014.

**PEREIRA, J. M.; SCHIOZER, D. J.** Simulação de Monte Carlo e Valuation: Uma Abordagem Estocástica. *Revista de Administração e Inovação*, v. 15, n. 3, p. 221-235, 2018. DOI: 10.1016/j.rai.2018.06.001.

**KAZIM, A.** Exergy analysis of a PEM fuel cell at variable operating conditions. *Energy Conversion and Management*, v. 45, n. 11-12, p. 1949–1961, 2004. DOI: 10.1016/j.enconman.2003.09.030.

**HATZIARGYRIOU, N. D.; DIMEAS, A.; TSIKALAKIS, A. G.; LOPES, J. A. P.; KARNIOTAKIS, G.; OYARZABAL, J.** Management of microgrids in market environment. In: 2005 International Conference on Future Power Systems, 2005, Amsterdam. Proceedings. Amsterdam: [s.n.], 2005. DOI: 10.1109/FPS.2005.204225.

**RAZZHIVIN, I.A.; RUDNIK, V.E.; BAY, Y.D.; KIEVEC, A.V.** Coordinated control of a hybrid type 3 wind turbine and hydrogen energy storage model to provide efficient frequency control. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 85, p. 35947-35958, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.241>.

**LEBROUHI, B.E.; DJOUPO, J.J.; LAMRANI, B.; BENABDELAZIZ, K.; KOUSKSOU, T.** Global hydrogen development - A technological and geopolitical overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 11, p. 7016-7048, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.076>.