



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

ANTONIO GUSTAVO EVANGELISTA MUNIZ SANTOS

**GERENCIAMENTO DE CÉLULA DE COMBUSTÍVEL EM MICRORREDE
OPERANDO NO MODO ILHADO**

Recife

2024

ANTONIO GUSTAVO EVANGELISTA MUNIZ SANTOS

**GERENCIAMENTO DE CÉLULA DE COMBUSTÍVEL EM MICRORREDE
OPERANDO NO MODO ILHADO**

Dissertação apresentada 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.

Recife

2024

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

S237g Santos, Antonio Gustavo Evangelista Muniz.
Gerenciamento de célula de combustível em microrrede operando
no modo ilhado / Antonio Gustavo Evangelista Muniz Santos, 2024.
106 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Recife,
2024.

Inclui referências.

1. Engenharia elétrica. 2. Recursos energéticos distribuídos. 3.
microrredes. 4. Célula de combustível. 5. Sistema de armazenamento
em baterias. 6. Máquina estado. 7. Lógica fuzzy. I. Aquino, Ronaldo
Ribeiro Barbosa de (Orientador). II. Título.

621.3 CDD (22. Ed.)

UFPE
BCTG / 2024 - 103

ANTONIO GUSTAVO EVANGELISTA MUNIZ DOS SANTOS

**GERENCIAMENTO DE CÉLULA DE COMBUSTÍVEL EM MICRORREDE
OPERANDO NO MODO ILHADO**

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: 23/02/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

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

Profa. Dra. Milde Maria da Silva Lira (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradecer primeiramente a Deus, por ter me concedido a graça de ter concluído o mestrado diante de todas as dificuldades. Momento que foi necessário ter resiliência, sabedoria, fé e força de vontade para superar as disciplinas, o desenvolvimento do trabalho e a distância de minha querida família.

De modo especial, agradeço aos meus pais Karolina Evangelista Muniz Santos e Antonio Pereira dos Santos, a minha avó Carmem Evangelista Muniz, que sempre batalharam e se esforçaram, prestando o suporte necessário para que eu pudesse concluir minha graduação e mestrado longe de casa. Mesmo distantes, vocês foram minha fonte de amor, cuidado e motivação, sendo fundamental para que eu superasse todos os obstáculos. Eu amo vocês.

Ao meu irmão Pedro Phelipe Muniz, meu parceiro de apartamento, que sempre me apoiou quando precisei de um ombro amigo e esteve comigo durante toda caminhada.

Ao professor Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino, que sempre foi solícito quando eu precisei de um direcionamento. Serei grato por esses dois anos de convivência, pelos ensinamentos e conhecimentos repassados. Sempre irei lembrar de sua forma maestral de tratar as pessoas.

Ao meu grande amigo Davidson Marques, que me acompanhou desde a graduação com o desenvolvimento do TCC. Agradeço imensamente por me motivar a ingressar no mestrado e pela disposição em ajudar e compartilhar seus conhecimentos para conclusão deste trabalho.

Ao professor José Castro, que tenho admiração pela forma que trabalha, com compromisso e sempre disposto a auxiliar quem está ao seu lado. Sou grato por todas as vezes que me ajudou. Também agradeço a professora Milde Lira, por aceitar o convite de participar da banca e pela convivência durante os dois anos que fiquei no LDSP.

Aos meus grandes amigos, João Pedro, Felipe Diógenes, Alex Ferreira, Guilherme Soriano, Joás Holanda, Pablo Tabosa, Gustavo Duarte, Vitor Campinho, Osvaldo Xavier, Jeydson Lopes, Jonata Campêlo e Bruno Jerônimo que compartilharam os momentos bons e ruins desta caminhada. Obrigado pelas conversas (resenhas), conselhos e motivação.

Ao professores Pedro Rosas e Douglas Contente, por terem me oferecido a oportunidade e a confiança de trabalhar no projeto H2Green (Eneva), que foi um motivador para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também pela convivência e ensinamentos repassados.

A CAPES, por todo o auxílio financeiro prestado durante o mestrado, tornando essa conquista possível.

“Tudo tem seu tempo determinado, e há tempo para todo propósito debaixo do céu”.
Eclesiastes 3, 1-2.22

RESUMO

O cenário atual do sistema energético é impulsionado pela inserção dos Recursos Energéticos Distribuídos (RED), que incluem a Geração Distribuída (GD) e os Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE). A partir deste contexto, uma alternativa potencial para integração dos RED com o sistema elétrico são as microrredes. A microrrede (MR) é capaz de fornecer uma melhor confiabilidade para a operação do sistema devido a sua característica *plug-and-play*, ou seja, capacidade de operar nos modos conectado e desconectado da rede principal. Para a MR ser capaz de fornecer suporte à integração dos RED é fundamental a presença de um sistema de gerenciamento de energia (EMS, do inglês *Energy Management System*), responsável por gerenciar os recursos energéticos que compõem a MR. Com o gerenciamento de energia, é possível garantir o despacho de cada recurso energético considerando suas restrições, além de atender alguma solicitação associada a um requisito operacional ou econômico. Visando avaliar o desempenho do EMS no cenário de MR, este trabalho propõe avaliar estratégias de gerenciamento de energia em uma MR desconectada da rede principal, formada por gerador a diesel, célula de combustível (FC, do inglês *Fuel Cell*), sistema de armazenamento de energia em baterias (BESS) e sistema geração fotovoltaica (FV). Dessa forma, o trabalho considera duas estratégias de gerenciamento de energia: máquina de estado e lógica *fuzzy*, implementadas através da ferramenta computacional Matlab/Simulink. O objetivo das estratégias será realizar o despacho de cada recurso energético da MR na ocorrência de alguma perturbação associada às variações de geração ou de carga. Além disso, as estratégias visam o funcionamento da FC na região de melhor eficiência com o suporte do BESS. Por fim, com base nos resultados verifica-se que operar a FC na região de melhor eficiência reduz o consumo de oxigênio e hidrogênio e melhora o perfil de tensão do barramento CC.

Palavras-chave: recursos energéticos distribuídos; microrredes, célula de combustível; sistema de armazenamento em baterias; máquina estado; lógica fuzzy.

ABSTRACT

The current scenario in the energy system is driven by the insertion of Distributed Energy Resources (DER), which include Distributed Generation (DG) and Energy Storage Systems (ESS). In this context, a potential alternative for integrating DER with the electrical system are microgrids. The microgrid (MG) is capable of providing better reliability for system operation due to its plug-and-play characteristic, that is, the ability to operate in connected and disconnected modes from the main grid. For the microgrid to be capable to provide support for the integration of DERs, it is essential to have the presence of an energy management system (EMS), responsible for managing the energy resources that is part of the MG. With energy management, it is possible to guarantee the dispatch of each energy resource considering its restrictions, in addition to meeting any request associated with an operational or economic requirement. Aiming to evaluate the performance of the EMS on a MG, this work proposes to evaluate EMS strategies in an MG disconnected from the main grid, composed by a diesel generator, fuel cell (FC), battery energy storage system (BESS) and photovoltaic (PV) generation system. Therefore, the work considers two energy management strategies: state machine and fuzzy logic, implemented using the Matlab/Simulink computational tool. The objective of the strategies is to dispatch each MG energy resource when there is any disturbance associated with variations in generation or load. Furthermore, the strategies aim to operate the FC in the region of best efficiency with the support of BESS. Finally, based on the results operating the FC in the region of best efficiency reduces the consumption of oxygen and hydrogen and improves the voltage profile of the DC bus.

Keywords: distributed energy resources; microgrids, fuel cell; battery storage system; state machine; fuzzy logic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Preços dos contratos de leilão de energia solar e eólica	15
Figura 2 - Topologia de MR - exemplo.	23
Figura 3 - Previsão de crescimento da microrredes.	25
Figura 4 - Arquitetura de MR CC.	27
Figura 5 - Arquitetura de MR CA.	28
Figura 6 - Arquitetura de MR híbrida.	28
Figura 7 - Interface com um único estágio de conversão.	30
Figura 8 - Interface com dois estágios de conversão.	30
Figura 9 - VSC conectado à rede elétrica.	31
Figura 10 - VSC controlado por corrente.	33
Figura 11 - Estrutura genérica da FC do tipo PEM.	35
Figura 12 - Capacidade instalada de FC no mercado global.	36
Figura 13 - Unidades instaladas de FC no mercado global.	36
Figura 14 - Circuito equivalente da FC no <i>Matlab/Simulink</i>	38
Figura 15 - Curva $v \times i$ da FC - Modelo <i>Simulink</i>	40
Figura 16 - Curva de potência da FC - Modelo <i>Simulink</i> - 6kW.	41
Figura 17 - Curva de eficiência da FC.	41
Figura 18 - Análise da curva de eficiência e potência da FC.	42
Figura 19 - Sistema da FC conectado ao barramento CA.	43
Figura 20 - BESS conectado à rede elétrica.	45
Figura 21 - Capacidade instalada de BESS íon de lítio.	46
Figura 22 - Circuito equivalente da bateria no <i>Matlab/Simulink</i>	47
Figura 23 - Sistema do BESS conectado ao barramento CA.	48
Figura 24 - Circuito equivalente da <i>PV Array</i> no <i>Matlab/Simulink</i>	50
Figura 25 - Configuração do Sistema FV.	51
Figura 26 - Sistema FV conectado ao barramento CA.	52
Figura 27 - Exemplo de funcionamento da estratégia máquina de estado.	55
Figura 28 - Comparativo entre os controles tradicional e <i>fuzzy</i>	56
Figura 29 - Exemplo de funções de pertinência.	57
Figura 30 - Conjunto das funções de pertinências.	58
Figura 31 - Fluxograma completo da lógica <i>fuzzy</i>	58
Figura 32 - Estrutura elétrica da MR utilizada nas simulações.	60

Figura 33 - Unidades de condicionamento de energia da MR.....	61
Figura 34 - Controle do BESS conectado à MR.	62
Figura 35 - Controle da FC conectado à MR.....	63
Figura 36 - Modo de operação do BESS.....	64
Figura 37 - Modelo da Gerador Síncrono do Matlab/Simulink.....	65
Figura 38 - Árvore de decisões da estratégia SM.	67
Figura 39 - Exemplo de funções de pertinência para SoC	68
Figura 40 - Exemplo de funções de pertinência para ΔP	69
Figura 41 - Exemplo de funções de pertinência para PFC	70
Figura 42 - Estrutura do sistema <i>fuzzy</i>	71
Figura 43 - Sistema de inferência do sistema fuzzy.....	72
Figura 44 - Perfil de carga da MR.	75
Figura 45 - Fluxo de potência da MR sem gerenciamento.....	76
Figura 46 - Eficiência da FC sem gerenciamento.....	77
Figura 47 - Consumo de combustível da FC sem gerenciamento.....	78
Figura 48 - Tensão na saída do VSC da FC sem gerenciamento.	78
Figura 49 - Corrente na saída do VSC da FC sem gerenciamento.	79
Figura 50 - Tensão do barramento CC da FC sem gerenciamento.....	79
Figura 51 - Fluxo de potência da MR com EMS-SM.	81
Figura 52 - Eficiência da FC com EMS-SM.....	81
Figura 53 - Consumo da FC com EMS-SM.....	82
Figura 54 - Tensão na saída do VSC da FC com EMS-SM.	83
Figura 55 - Corrente na saída do VSC da FC com EMS-SM.	83
Figura 56 - Tensão do barramento CC da FC com EMS-SM.....	84
Figura 57 - SoC do BESS com EMS-SM.	84
Figura 58 - Corrente CC do BESS com EMS-SM.	85
Figura 59 - Tensão do barramento CC do BESS com EMS-SM.....	85
Figura 60 - Tensão na saída do VSC do BESS com EMS-SM.....	86
Figura 61 - Corrente na saída do VSC do BESS com EMS-SM.....	86
Figura 62 - Funções de pertinência ΔP para estratégia <i>fuzzy</i>	88
Figura 63 - Funções de pertinência da potência FC para estratégia <i>fuzzy</i>	89
Figura 64 - Fluxo de potência da MR com EMS- <i>fuzzy</i>	90
Figura 65 - Eficiência da FC com EMS- <i>fuzzy</i>	90
Figura 66 - Consumo de combustível da FC com EMS- <i>fuzzy</i>	91

Figura 67 - Tensão na saída do VSC da FC com EMS-fuzzy.	91
Figura 68 - Corrente na saída do VSC da FC com EMS-fuzzy	92
Figura 69 - Tensão do barramento CC da FC com EMS-fuzzy.....	92
Figura 70 - SOC do BESS com EMS-fuzzy.....	93
Figura 71 - Corrente CC do BESS com EMS-fuzzy.	93
Figura 72 - Tensão do barramento CC do BESS com EMS-fuzzy.	94
Figura 73 - Tensão na saída do VSC do BESS com EMS-fuzzy.....	95
Figura 74 - Corrente na saída do VSC do BESS com EMS-fuzzy.....	95
Figura 75 - Comparativo do consumo da combustível da FC.	96
Figura 76 - Comparativo da tensão do barramento CC da FC.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Definições de RED.....	24
Tabela 2 - Tecnologias de FC do Simulink.....	39
Tabela 3 - Bateria do Simulink.	47
Tabela 4 - Exemplo da estratégia SM com base no SoC.....	56
Tabela 5 - Parâmetros dos RED da MR utilizada na simulação.....	60
Tabela 6 - Estados operacionais da estratégia SM para simulação.....	66
Tabela 7 - Exemplos de regras para o sistema de inferência.	72
Tabela 8 - Testes para funções de pertinência para estratégia <i>fuzzy</i>	87
Tabela 9 - Regras do EMS com base na técnica <i>fuzzy</i>	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFC	<i>Alkaline Fuel Cell</i>
BESS	<i>Battery Energy Storage System</i>
BMS	<i>Battery Monitoring System</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DMFC	<i>Direct Methanol Fuel Cell</i>
EMS	<i>Energy Management System</i>
ESS	<i>Energy Storage System</i>
FC	<i>Fuel Cell</i>
FLC	<i>Fuzzy Logic Control</i>
FV	Fotovoltaica
GD	Geração Distribuída
LF	Lógica Fuzzy
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
MR	Microrrede
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PAFC	<i>Phosphoric Acid Fuel Cell</i>
PCS	<i>Power Conversion System</i>
PCU	<i>Power Conditioning Unit</i>
PEMFC	<i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RED	Recursos Energéticos Distribuídos
RER	Recursos Energéticos Renováveis
SAE	Sistema de Armazenamento de Energia
SC	Supercapacitor
SM	<i>State Machine</i>
SoC	<i>State of Charge</i>
SOFC	<i>Solid Oxide Fuel Cell</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
VSC	<i>Voltage-Source Converter</i>

SUMÁRIO

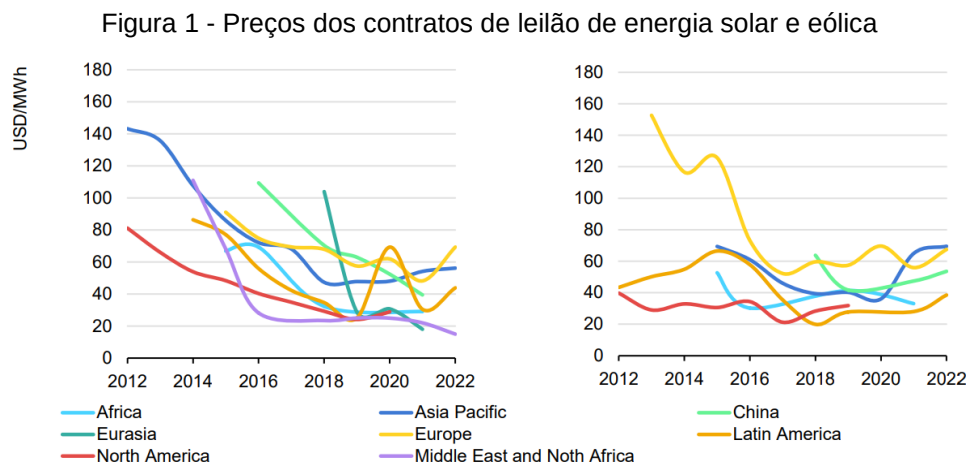
1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação e Relevância.....	17
1.2	Objetivos	19
1.3	Contribuições.....	20
1.4	Estrutura da dissertação.....	20
2	MICRORREDE E MODELOS DOS RED.....	22
2.1	Microrrede	22
2.1.1	Conceito de microrredes.....	25
2.1.2	Arquiteturas de microrredes.....	26
2.2	Sistema de condicionamento de energia dos RED.....	29
2.3	Modelos dos RED	33
2.3.1	Modelo FC	34
2.3.2	Modelo BESS	44
2.3.3	Modelo FV	49
2.4	Sistema de gerenciamento de energia.....	53
2.4.1	Máquina de Estado (<i>State Machine</i> – SM)	54
2.4.2	Lógica <i>Fuzzy</i>	56
3	METODOLOGIA E SIMULAÇÃO	60
3.1	Estrutura da Microrrede	60
3.2	Estratégia de controle baseada máquina de estado (SM).....	65
3.3	Estratégia de controle baseada em lógica <i>fuzzy</i> (LF).....	68
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
4.1	Cenário de operação da Microrrede.....	74
4.1.1	Operação da MR sem gerenciamento de energia	76
4.1.2	Operação da MR com gerenciamento baseado em máquina de estado	80
4.1.3	Operação da MR com gerenciamento baseada na estratégia <i>fuzzy</i>	87
4.2	Comparativo entres as técnicas de gerenciamento de energia	95
5	CONCLUSÃO.....	98
5.1	TRABALHOS FUTUROS	99
	REFERÊNCIAS	101

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da procura por energia elétrica nas últimas décadas, os sistemas de energia modernos estão passando por transformações relacionadas a geração, transmissão e distribuição. Dentre as principais mudanças, a inserção e popularidade de recursos energéticos renováveis (solar e eólica) estão em crescimento devido a diminuição dos efeitos ambientais que são capazes de proporcionar (SAEED et al., 2021).

Em 2021, a capacidade instalada de geração renovável sem considerar a hidrelétrica, foi cerca de 1674 GW, com 825 GW de usinas eólicas e 849 GW de usinas solares. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), estima-se que entre 2020 e 2026 a capacidade global instalada de fontes renováveis aumente mais de 60%, atingindo um patamar de mais de 4800 GW. Este crescimento é equivalente a capacidade energética global associada aos combustíveis fósseis e energia nuclear. Os principais responsáveis pela expansão da geração renovável são China, Europa, Estados Unidos e Índia (IEA, 2021a; UFA et al., 2022).

Com um forte apoio político e o objetivo de cumprir as metas climáticas, outra motivação importante para integração de fontes renováveis no mundo está relacionada com diminuição do custo das tecnologias na última década. A Figura 1 apresenta o comportamento decrescente dos preços de contratos de leilão de energia solar (lado esquerdo) e eólica (lado direito) por região (IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2022).



Fonte: (IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2022).

Os incentivos financeiros que impulsionaram a integração de recursos renováveis no sistema elétrico, juntamente com a redução do uso dos combustíveis fósseis, proporcionaram a inserção de geração distribuída (GD) renovável como solução para geração de eletricidade. Esta perspectiva motivaram as concessionárias de energia a descentralizar suas topologias de rede, tornando as unidades de GD mais próximas a carga.

A integração de GD apresenta benefícios para o funcionamento do sistema elétrico desde que os recursos energéticos sejam corretamente coordenados e integrados ao sistema elétrico. Como a GD pode ser conectada diretamente ao sistema de distribuição ou próximo ao consumidor final, as perdas técnicas ocasionadas pela transmissão e distribuição de energia podem ser reduzidas. Outra funcionalidade dos sistemas de GD está relacionada a fornecer suporte durante pico de carga na rede elétrica, assim como atender cargas críticas de forma autônoma (ADEFARATI; BANSAL, 2016).

Outros benefícios da inserção da GD podem ser elencados, como: maior confiabilidade do sistema elétrico, maior diversidade de recursos energéticos, melhoria na qualidade e perfil da tensão, melhor controle da potência reativa, contribuição para serviços auxiliares, O&M fácil etc. Com o cenário de GD nos sistemas modernos de energia, outra mudança ocasionada por esta perspectiva tem relação com a inserção de Microrrede (MR). A MR tem se tornado uma solução para aumentar a resiliência do sistema de distribuição de energia, sendo um novo paradigma com capacidade promissora (ADEFARATI; BANSAL, 2016; UFA et al., 2022).

Supondo que a integração de GD renováveis não possua o dimensionamento e a localização adequada no sistema de distribuição, pode ocasionar impactos negativos na operação do sistema elétrico: aumento do nível de tensão, fluxo reverso na rede elétrica, instabilidade de frequência, acréscimos de perdas nas linhas de distribuição/transmissão, formação de harmônicos e pioramento na qualidade de tensão (ADEFARATI; BANSAL, 2016; OYEKALE et al., 2020).

Para inserir os recursos energéticos distribuídos (RED), em que a base da geração de energia são os recursos renováveis, é fundamental compreender os desafios de integrá-los ao sistema elétrico. A maioria dos desafios de integrar os RED renováveis, principalmente geração solar e eólica, estão associados a natureza variável do recurso primário. A partir deste perfil variável, ou intermitente, os sistemas

de energia formados por recursos renováveis são caracterizados como fontes não despacháveis (OYEKALE et al., 2020).

Para mitigar os problemas decorrentes da integração dos RED renováveis com a rede elétrica é fundamental buscar soluções técnicas adequadas para atender continuamente a demanda energética. Uma solução para operação do sistema elétrico de base renovável são os sistemas de armazenamento de energia (ESS – *Energy Storage System*), capazes de armazenar ou injetar potência em momentos distintos, possibilitando a interface dos RED com a rede elétrica e o aumento da controlabilidade (OYEKALE et al., 2020; SINSEL; RIEMKE; HOFFMANN, 2020).

Na literatura, existem várias tecnologias de ESS para auxiliar na integração de RED renováveis. Uma tecnologia promissora está associada ao armazenamento por meio do hidrogênio, utilizando a energia excedente para produzir hidrogênio (via eletrólise), que pode ser armazenado e posteriormente ser convertido em energia elétrica (via célula de combustível) quando houver uma solicitação de potência. Além das tecnologias, o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento de energia torna-se uma solução viável para integração das fontes renováveis (KUMAR et al., 2020; UFA et al., 2022).

Para desenvolver estratégias de gerenciamento de energia para um sistema formado por RED renováveis é fundamental ter conhecimento das particularidades de cada recurso energético, definindo as restrições operacionais. Outro ponto importante está relacionado com a definição da estratégia de gerenciamento, ou seja, qual meta deve ser alcançada. Neste trabalho, será proposto o uso de estratégias de gerenciamento de energia no cenário de MR, permitindo avaliar o desempenho de cada estratégia implementada.

1.1 Motivação e Relevância

Como forma de avaliar a importância do sistema de gerenciamento de energia (EMS, do inglês *Energy Management System*) na rede elétrica, o presente trabalho propõe implementar estratégias de EMS em um cenário de MR, formada por um sistema de geração fotovoltaica (FV), gerador a diesel, sistema de armazenamento por meio de baterias (BESS, do inglês *Battery Energy Storage System*), célula de combustível (FC, do inglês *Fuel Cell*) e cargas.

A definição da topologia da MR proposta no trabalho teve como base a estrutura disponível no LAM (Laboratório de Armazenamento e Mobilidade), localizado no Departamento de Engenharia Elétrica da UFPE. Atualmente, o LAM é formado por um sistema que pode operar no modo on-grid (conectado à rede elétrica) ou off-grid (sem conexão com a rede elétrica), sendo capaz de simular o comportamento real de uma MR. Os componentes que compõem o LAM são: sistema FV, gerador a diesel, BESS, FC, fontes simuladoras (permitem emular o comportamento de diversos recursos energéticos) e cargas.

A topologia do LAM permite simular modelos de estratégias de gerenciamento de energia em um sistema que possui fontes renováveis, avaliando sua integração com a rede elétrica. Partindo desta perspectiva, este trabalho irá apresentar a importância do gerenciamento de energia, desenvolvendo estratégias que poderão ser utilizadas como base para serem implementadas no LAM.

Além disso, o trabalho será desenvolvido como forma de fomentar estudos no projeto H2Green – ENEVA, o qual utilizará o hidrogênio para atender a demanda de refrigeração dos geradores, responsáveis pela geração da usina termoeletrica. O excedente do hidrogênio poderá ser utilizado na FC para gerar energia elétrica com objetivo de atender uma solicitação de carga, aplicação denominada *power-to-power*. Desta forma, o gerenciamento da operação da FC é crucial, pois permite analisar o comportamento de seus parâmetros como: consumo de combustível e eficiência, que serão estudados neste trabalho.

A literatura apresenta diversas estratégias de gerenciamento de energia que podem ser empregadas no contexto de MR. Em (AGRAWAL; CHORSIYA; PALWALIA, 2018), é proposto um sistema de gerenciamento com objetivo de controlar o fluxo de potência de uma rede autônoma formada por geração FV e eólica, BESS e FC. As técnicas de gerenciamento foram baseadas em redes neurais artificiais (RNA) e lógica *fuzzy*.

(KAMAL et al., 2016) propõe um algoritmo de gerenciamento e controle de energia de base clássica, capaz de gerenciar uma topologia de rede formada por uma turbina eólica, BESS e FC. O objetivo do algoritmo é atender a carga quando houver diferentes condições de velocidade de vento, que impactam no perfil de geração eólica.

(KAMEL; REZK; ABDELKAREEM, 2021) descreve a importância do gerenciamento de energia para detectar, monitorar e controlar a integração de

diferentes recursos energéticos. No estudo, é proposta estratégia de gerenciamento com base na lógica *fuzzy* e máquina estado, para gerenciar uma rede composta por geração FV, FC, BESS e supercapacitor. As estratégias desenvolvidas visam obter o valor mínimo de consumo de hidrogênio.

1.2 Objetivos

Neste trabalho, o objetivo geral está associado a desenvolver estratégias de gerenciamento de energia no cenário de MR, formada por sistema FV, gerador a diesel, BESS, FC e cargas. As estratégias desenvolvidas permitem gerenciar os recursos energéticos para atender as variações de demanda energética na MR.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Apresentar uma revisão bibliográfica relacionada aos conceitos de GD e MR; abordar as principais topologias de MR e os modos de operação;
- Apresentar os sistemas de condicionamento de energia dos RED, que são responsáveis por realizar a interface do recurso energético com a rede elétrica;
- Definir quais tecnologias de RED serão estudadas no trabalho, detalhando suas particularidades e como podem ser conectadas à rede elétrica;
- Avaliar a metodologia de implementação das estratégias de gerenciamento de energia, definidas a partir do conceito de Máquina de Estado (SM, do inglês *State Machine*) e Lógica *Fuzzy*. Além disso, definir as restrições que serão utilizadas nas estratégias;
- Modelar as tecnologias de RED estudadas neste trabalho através da ferramenta computacional *Matlab/Simulink*, que possui modelos dos RED disponíveis em sua biblioteca;
- Simular o cenário de operação da MR considerando o sistema sem gerenciamento de energia e comparando com as estratégias implementadas;
- Comparar o desempenho de cada estratégia de gerenciamento de energia com relação a eficiência e ao consumo de oxigênio e hidrogênio da FC.

1.3 Contribuições

A contribuição da dissertação está associada ao desenvolvimento computacional de estratégias de gerenciamento de energia em microrredes no modo de operação ilhada. Com a presença de diferentes tecnologias de recursos energéticos, o trabalho propõe apresentar o funcionamento e as particularidades de cada recurso, além de abordar sobre os sistemas de condicionamento de energia e de controle.

Relacionado ao crescimento do hidrogênio de baixo carbono, as aplicações a partir da tecnologia FC torna-se um tema importante, pois a integração deste recurso com a rede elétrica pode gerar impactos operacionais. A partir desta perspectiva, o trabalho visa contribuir no gerenciamento de energia da FC inserida na MR com outros recursos energéticos. Por fim, este trabalho irá contribuir na identificação dos aspectos operacionais da FC, como: curva característica de tensão e corrente, curva de eficiência e curva de potência e consumo de combustível.

1.4 Estrutura da dissertação

O desenvolvimento da dissertação está estruturado da seguinte forma:

- **Capítulo 2** - Revisão bibliográfica sobre o conceito de GD e microrredes, detalhando as arquiteturas de microrredes e os modos de operação. Apresenta o sistema de condicionamento de energia, que desempenha a função de realizar a interface dos RED com a rede elétrica. Além disso, descreve os modelos dos RED que serão abordados no trabalho – BESS, FC e sistema FV – e seus respectivos controles para o sistema de condicionamento de energia. Por fim, apresenta as estratégias de gerenciamento de energia (SM e *Fuzzy*).
- **Capítulo 3** - Apresenta a estrutura da MR que será implementada no *Matlab/Simulink* e os parâmetros de cada recurso energético. Descreve as malhas de controle para os sistemas de condicionamento dos RED. Por fim, desenvolve a metodologia das estratégias de gerenciamento e suas restrições.

- **Capítulo 4** - Detalha o cenário de operação da MR e as perturbações relacionadas a variação de potência, acarretadas por variações de carga ou de geração FV. Apresenta os resultados da operação da MR sem e com gerenciamento de energia, com foco no consumo de combustível da FC.
- **Capítulo 5:** Apresenta as conclusões da dissertação e os trabalhos futuros que poderão ser realizados a partir deste trabalho.

2 MICRORREDE E MODELOS DOS RED

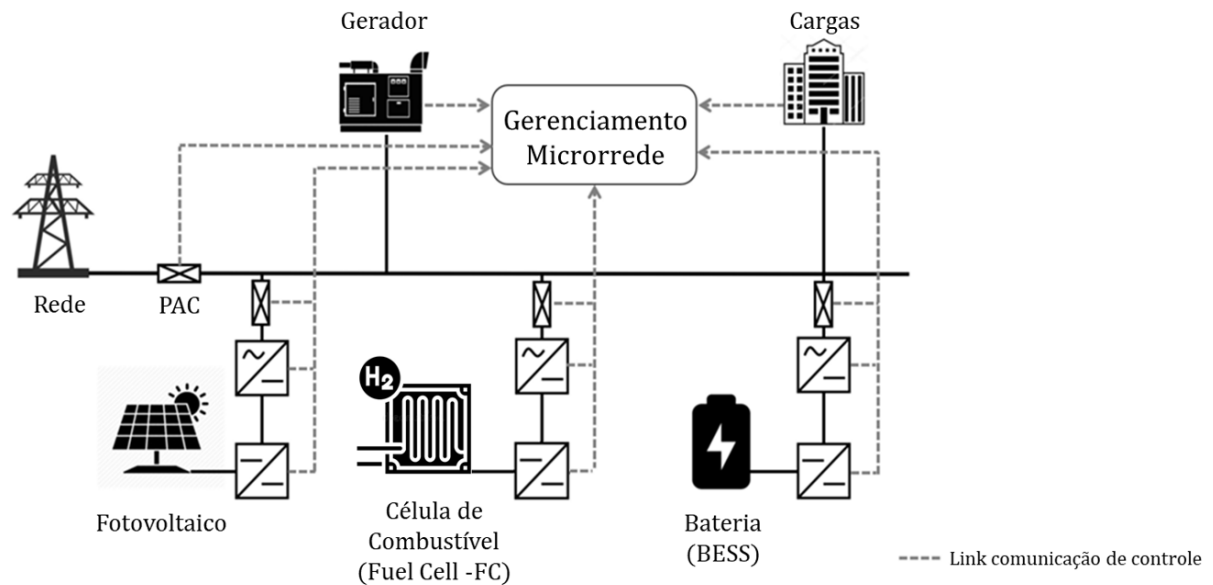
No presente capítulo, inicialmente será abordado o conceito de microrrede, avaliando definições e particularidades associadas a cada topologia. Posteriormente, serão apresentados quais recursos energéticos distribuídos podem constituir uma microrrede, considerando suas características de funcionamento. Além disso, será abordado sobre a importância do sistema de gerenciamento de energia (EMS – *Energy Management System*) na MR, levando em consideração as particularidades operacionais de cada recurso energético. Como foco deste trabalho, as estratégias com base em tomada de decisões/máquina estado (SM – *State Machine*) e lógica fuzzy serão detalhadas, permitindo avaliar o desempenho da MR.

2.1 Microrrede

O funcionamento da rede elétrica convencional está em um processo de modernização decorrente do crescimento da inserção de recursos energéticos renováveis (RER). A presença dos RER permite a concepção de novas soluções que podem ser integradas a rede elétrica, como geração distribuída (GD), microrrede (MR) baseada em fontes renováveis e sistemas de armazenamento de energia (SAE), alterando a configuração da rede (SAEED et al., 2021).

Uma MR consiste em uma estrutura energética composta por sistemas descentralizados de geração (renovável ou não renovável), armazenamento e cargas locais para atender regiões na qual a demanda por energia é crítica. A Figura 2 apresenta um exemplo de topologia de MR, com a presença de geração baseado em energia solar, diesel, célula de combustível, sistema de armazenamento baseado em baterias e cargas, com um ponto de acoplamento comum (PAC) com a rede principal. A presença do PAC permite que a MR seja capaz de fornecer estabilidade ao sistema em momentos de interrupções na rede principal.

Figura 2 - Topologia de MR - exemplo.



Fonte: Adaptado de (FARROKHABADI et al., 2019).

Outros elementos que constitui o funcionamento adequado da MR são: redes de distribuição responsáveis pela interligação dos RED, sistema de proteção para identificar o modo de operação da MR (conectada ou não a rede principal), sistema de monitoramento para supervisionar os parâmetros (tensão, frequência, qualidade de energia), sistema de conversão de energia que são empregados na interface dos RED e cargas com às linhas de distribuição e o sistema de controle que é responsável por realizar o gerenciamento da MR (PLANAS et al., 2015).

A partir da topologia da Figura 2, pode-se representar uma MR como sendo uma estrutura com a presença de Recursos Energéticos Distribuídos (RED, ou *Distributed Energy Resources* – DER em inglês). Segundo a EPE, os RED podem ser definidos como sendo tecnologias de geração e/ou armazenamento de energia elétrica, localizados dentro dos limites da área de uma determinada concessionária de distribuição, normalmente próximo a unidades consumidoras, atrás do medidor (*“behind-the-meter”*) (EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, [s.d.]).

A definição dos RED não é única e depende de qual contexto e finalidade de quem emprega o termo. Apesar de algumas organizações apresentarem suas próprias definições, conforme Tabela 1, os DER são comumente descritos como qualquer recurso conectado à rede de distribuição de energia. O recurso pode abranger uma vasta gama de tecnologias, independentemente do local em que se conecta com a rede de distribuição e do combustível utilizado (IEA, 2022).

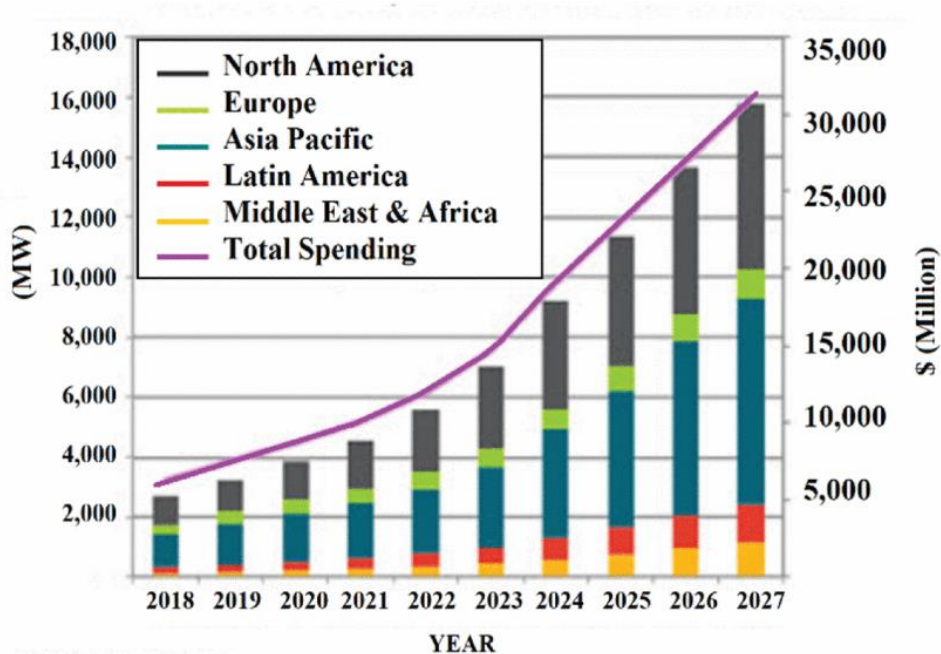
Tabela 1 - Definições de RED.

Organização	Definição
Comissão Regulatória de Energia Federal US	Os RED são considerados qualquer recurso localizado no sistema de distribuição, em qualquer subsistema dele ou atrás de um medidor de consumidores. Os RED podem incluir armazenamento de energia, geração distribuída, resposta à demanda, eficiência energética, armazenamento térmico e veículos elétricos.
Comissão Europeia	Os RED consistem em recursos de pequena a média escala conectados principalmente aos níveis de tensão mais baixos (rede de distribuição) do sistema ou próximo do usuário final.
Comissão de Mercado de Energia Australiano	RED são dispositivos capazes de produzir, armazenar ou gerenciar energia em residências e empresas, às vezes referidos como dispositivos atrás do medidor. Os RED incluem sistema de energia solar no telhado, armazenamento de energia, resposta à demanda, veículos elétricos e sistemas de gerenciamento de energia, embora muitas dessas tecnologias não sejam encontradas exclusivamente atrás do medidor.

Fonte: (IEA, 2022)

Atualmente, as fontes que possuem baixa emissão de carbono são responsáveis por estimular o crescimento dos RED, por exemplo, sistema fotovoltaico distribuído, veículos elétricos e bombas de calor. À medida que o sistema energético global se descarboniza, o uso dos combustíveis fósseis é gradualmente eliminado, necessitando-se cada vez mais investir em opções alternativas, como os RED. O aumento de investimento dos RED permite uma expectativa de expansão no contexto mundial das microrredes. A Figura 3 mostra a previsão de crescimento e o investimento relacionados às microrredes no período de 2018-2027 (EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, [s.d.]; SAEED et al., 2021).

Figura 3 - Previsão de crescimento da microrredes.



Fonte: (SAEED et al., 2021)

A inserção de microrredes na rede elétrica apresenta vantagens funcionais com relação ao sistema convencional de energia, como: reserva energética em caso de queda de energia na rede principal, emissões de carbono reduzidas com a presença de RED renováveis, capacidade *plug-and-play* para alternar entre os modos conectado à rede e isolado, maior qualidade de energia através do gerenciamento de cargas locais, operação econômica por reduzir os custos de transmissão e distribuição et. al (PARHIZI et al., 2015; SAEED et al., 2021).

2.1.1 Conceito de microrredes

O conceito de microrrede (MR) foi elencado pela primeira vez na literatura técnica por (LASSETER, 2001), que definiu a MR como sendo um conjunto de microfontes, sistemas de armazenamento e cargas que se apresenta à rede como uma única estrutura energética capaz de responder aos sinais de comando de um controle central. Outro conceito que foi empregado inicialmente na literatura técnica foi definido por (LASSETER, 2002), no qual assume que MR é um conjunto de cargas e microfontes operando como um único sistema controlável que fornece energia e calor à sua área local. Estes conceitos forneceram um novo paradigma para definir o funcionamento da GD.

MR é um conceito amplo e não pode ser determinado apenas por uma definição técnica. Esta perspectiva está refletida na literatura acadêmica, concordando que não há uma definição universal para microrredes. Uma definição mais exata de MR é adotada pelo Departamento de Energia dos EUA, o qual conceitua a MR como um sistema de cargas e unidades de geração múltiplas que trabalham de forma coordenada, com ilhamento da rede elétrica, operando como uma estrutura controlável da perspectiva da rede principal e possui restrições baseadas em limites elétricos bem definidos (SAEED et al., 2021).

Para se obter uma definição funcional e legalizada com relação a MR, é necessário compreender o que são microrredes no sentido técnico e analisar em qual contexto econômico, social, ambiental e cultural estão inseridas. Nos EUA, por exemplo, as microrredes foram integradas para aumentar a resiliência do sistema elétrico contra eventos climáticos. Já na Europa, a inserção de microrredes está relacionada aos processos de descarbonização da matriz energética. A partir destas diferenças, é possível entender o contexto e discutir a melhor forma de regular as microrredes (MAUGER, 2023).

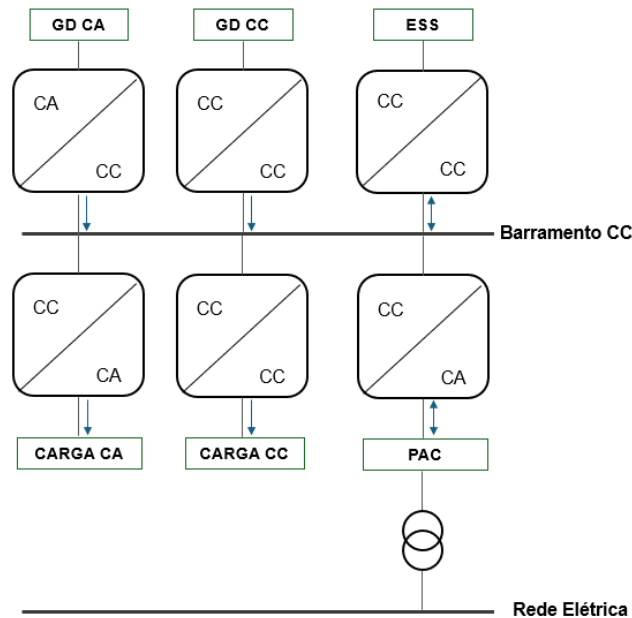
Diante da perspectiva que não existe uma definição global sobre MR, (MAUGER, 2023) realizou uma extensa revisão bibliográfica sobre MR e suas definições, com objetivo de fornecer um conceito legal para MR no contexto europeu, embora o estudo possa ser adaptado para outros países. O resultado do estudo apresenta que diante de todos os conceitos de MR, a primeira atribuição mais citada define a MR como sendo uma estrutura energética capaz de operar isoladamente da rede elétrica principal. Na segunda posição, os atributos mais citados nas definições foi a presença fontes/cargas controláveis e o armazenamento de energia, por serem tecnologias capazes de permitirem o equilíbrio entre a geração e consumo na MR, que possui um percentual significativo de RED variáveis. Em terceiro, a atribuição da localização é um dos pontos citados, enfatizando que a MR tem um espaço geográfico limitado.

2.1.2 Arquiteturas de microrredes

Considerando a MR como uma estrutura composta por RED, é válido ressaltar que devido a presença dos RED necessita-se de sistemas de conversão de energia, representados pelos conversores de potência. Em razão dessa característica, a MR

pode ser classificada de acordo o perfil de corrente utilizada no sistema de distribuição de energia, ou seja, pode ser classificada em MR de corrente alternado (CA) e MR de corrente contínua (CC). A Figura 4 representa uma arquitetura típica de uma MR CC.

Figura 4 - Arquitetura de MR CC.

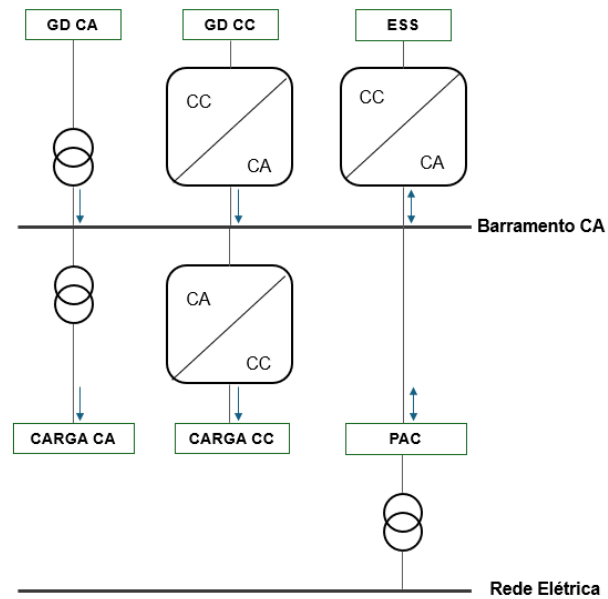


Fonte: (LOTFI; KHODAEI, 2015)

Na MR CC, é fundamental a presença de retificadores e transformadores CA-CC para realizar a interface entre os RED CA com o barramento CC, inversores monofásicos e trifásicos CC-CA para alimentar as cargas CA. Os conversores CC-CC são empregados para as cargas CC, RED CC e sistema de armazenamento, com objetivo de atender os requisitos de tensão do barramento CC. Para realizar a conexão do barramento comum (estrutura onde estão conectados os RED e cargas) com a rede elétrica no PAC, é utilizado um inversor trifásico. A direção das setas representa o sentido do fluxo de energia (ABBASI et al., 2023; LOTFI; KHODAEI, 2015).

NA Figura 5 é ilustrada uma arquitetura típica de uma MR CA, que possui inversores CC-CA para conectar os RED CC com o barramento comum, retificadores CA-CC para alimentar as cargas CC e transformadores. Diferentemente da MR CC, não é necessário um sistema de conversão para conectar a MR à rede elétrica no PAC, visto o que o barramento comum está em CA. A direção das setas está relacionada com o sentido do fluxo de energia (ABBASI et al., 2023; LOTFI; KHODAEI, 2015).

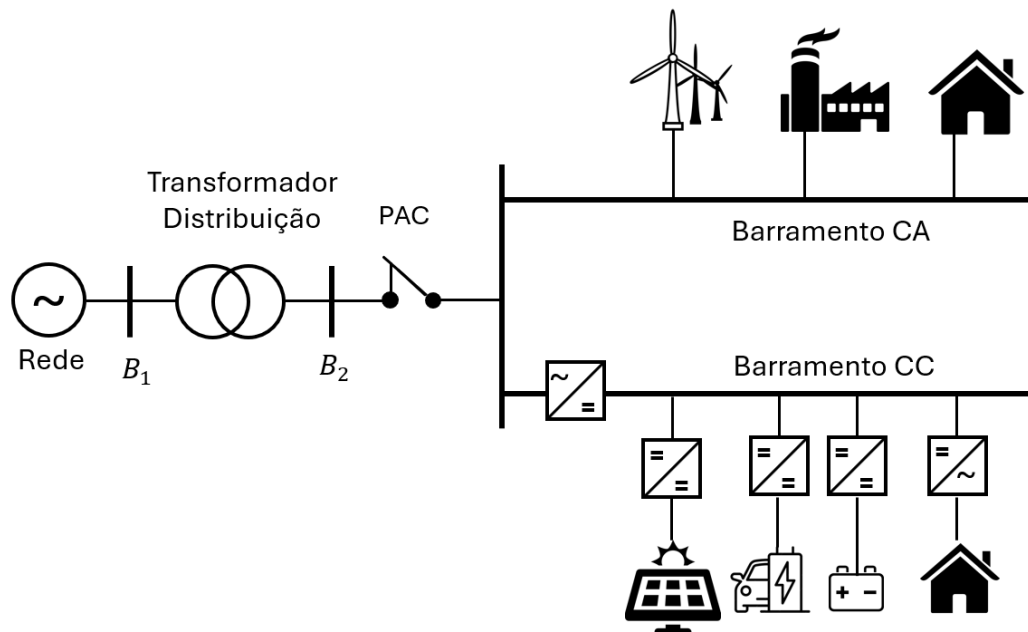
Figura 5 - Arquitetura de MR CA.



Fonte: (LOTFI; KHODAEI, 2015)

A partir da MR CA e CC, classifica-se uma outra arquitetura que considera as duas formas de distribuição de energia, denominada MR híbrida. A MR híbrida, representada na Figura 6, é composta dos mesmos elementos presente na MR CC e na MR CA, se beneficiando das funcionalidades de ambas as arquiteturas.

Figura 6 - Arquitetura de MR híbrida.



Fonte: (ABBASI et al., 2023)

O PAC é o local que possui disjuntor ou chave estática, permitindo a MR operar em dois modos: (1) modo conectado à rede elétrica e (2) modo desconectado ou ilhado. No modo conectado, a MR é integrada à rede elétrica por meio da chave estática presente no PAC. Quando conecta à rede, a MR pode compartilhar energia com a rede elétrica para manter o fornecimento de energia local, ou vice-versa, visto que o fluxo de energia na MR é bidirecional. No modo de operação conectado a frequência e tensão da MR são impostas pela rede externa (SHAHGHOLIAN, 2021).

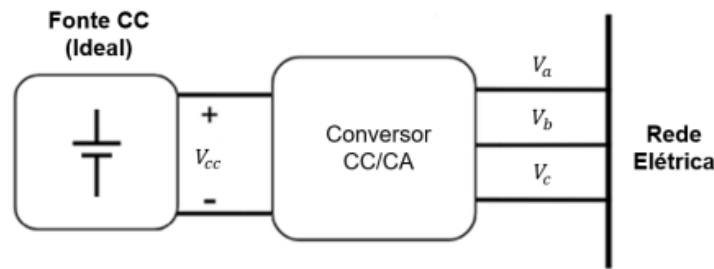
Já no modo ilhado, sem conexão com a rede elétrica, a MR opera com o objetivo de manter o equilíbrio de potência ativa e reativa de forma independente. Enquanto permanecer no modo ilhado, o fornecimento de energia da MR deve atender à demanda das cargas locais. Neste modo de operação é possível elencar dois principais desafios: manter a magnitude de tensão e frequência dentro dos limites operacionais e manter o equilíbrio entre a geração e o consumo na MR (BASAK et al., 2012; SHAHGHOLIAN, 2021).

2.2 Sistema de condicionamento de energia dos RED

Com a finalidade de simular o comportamento da MR, é necessário avaliar a representação dos modelos elétricos dos RED que compõem a MR, analisando o funcionamento dos conversores de potência, dos sistemas de controle e das fontes primárias. No presente trabalho, será enfatizado a descrição do sistema fotovoltaico, sistema de armazenamento por/em bateria (BESS – do inglês *Battery Energy Storage System*) e célula de combustível (FC – do inglês *Fuel Cell*), denominados RED que geram energia CC.

Quando os RED conectados à MR são sistemas de energia CC, como os que serão estudados no trabalho, a estrutura que engloba os conversores de potência é importante porque desempenhará o papel de realizar a interface dos RED com o barramento CA presente na MR. A Figura 7 apresenta uma fonte de energia CC ideal conectada ao conversor de potência CC/CA, responsável por exercer a interface com a rede CA. Como ilustrado, a topologia exemplifica um sistema de conversão de energia com apenas um estágio, ou seja, ocorre diretamente a conversão de CC para CA.

Figura 7 - Interface com um único estágio de conversão.

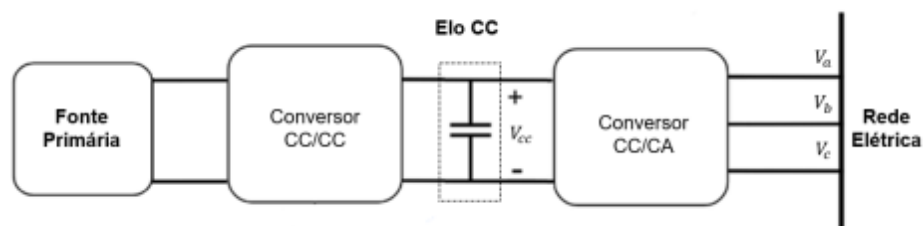


Fonte: Adaptado (YAZDANI; IRAVANI, 2010)

As configurações de estágio único implementam uma única unidade de condicionamento de energia (PCU – *Power Conditioning Unit*) para realizar a interface do barramento CC dos RED ao barramento CA da rede elétrica. Estas configurações apresentam menos eletrônica de potência, consequentemente, maior eficiência; no entanto, possuem um menor alcance operacional e flexibilidade de controle (KHALID; STEVENSON; SARWAT, 2021).

Na Figura 8, a topologia ilustra uma estrutura mais completa dos RED, com a fonte primária, o barramento CC e os sistemas de conversão CC/CC e CC/CA. Observa-se que a topologia apresenta dois estágios de conversão: o primeiro estágio é o conversor CC/CC, conectando a fonte primária ao barramento CC, enquanto o segundo estágio é o conversor CC/CA, dispositivo para realizar a interface com rede elétrica.

Figura 8 - Interface com dois estágios de conversão.



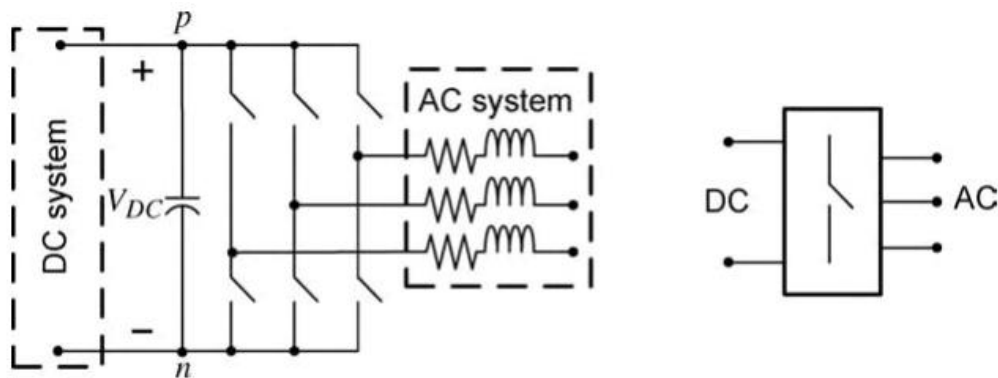
Fonte: Adaptado de (BAZARGAN; BAHRANI; FILIZADEH, 2018).

Configurações de estágio duplo são muito mais comuns em aplicações que incluem RED de geração CC, onde o primeiro conversor CC/CC de interface é usado para controlar a tensão do barramento CC – proporcionando uma tensão mais estável – e a potência de saída da fonte primária, enquanto o segundo inversor CC/CA de interface é usado para injetar potência ou manter a tensão. Em razão do barramento CC, a topologia de dois estágios é adequada para conexão de RED intermitentes, suprimindo as flutuações de tensão que podem ser ocasionadas pela conexão direta

à rede elétrica. Em contrapartida, a presença do barramento CC reduz a eficiência da PCU (KHALID; STEVENSON; SARWAT, 2021; KIRUBAKARAN; JAIN; NEMA, 2009).

Os conversores CC/CA, muitas vezes denominado inversores, são dispositivos responsáveis por integrar as fontes de energia CC ao sistema CA da MR. Os conversores CC/CA mais empregados para realizar esta função é o VSC (*Voltage-Sourced Converter*), com comportamento semelhante a uma fonte de tensão, ou seja, tensão CC constante (mesma polaridade) e corrente CC de polaridade variável de acordo com o sentido do fluxo de potência solicitado pelo inversor. A Figura 9 ilustra a representação do circuito do VSC trifásico conectado à rede (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

Figura 9 - VSC conectado à rede elétrica.



Fonte:(YAZDANI; IRAVANI, 2010).

Como mostra a Figura 9, o lado CC do VSC é conectado ao sistema CC através do barramento com a presença do capacitor submetido a tensão V_{cc} . As chaves serão comutadas com objetivo de gerar as tensões trifásicas senoidais na saída do VSC, lado no qual está conectado ao sistema CA. Quando o VSC considera a dinâmica da comutação das chaves, emprega VSC com modelo chaveado e para desconsiderar os efeitos da comutação nas grandezas elétricas se utiliza o VSC com valores médios (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

No VSC caracterizado pelo modelo chaveado a tensão gerada do lado CA é controlada por PWM (*Pulse Width Modulation*), de forma que a comutação das chaves segue um controle originado pelo produto do sinal de modulação – gerado por meio das malhas controles do conversor – com o sinal da onda portadora de alta frequência. Enquanto o modelo de valores médios desconsidera a dinâmica de alta frequência na comutação das chaves, o conversor não necessita de um controle por meio do PWM. Dessa forma, o VSC representado pelo modelo de valores médios utiliza apenas o

sinal de modulação, onde as tensões terminas geradas em cada fase do sistema são fornecidas por meio da Equações (1) (2) e (3):

$$v_{ta} = m_a \cdot \frac{V_{cc}}{2} \quad (1)$$

$$v_{tb} = m_b \cdot \frac{V_{cc}}{2} \quad (2)$$

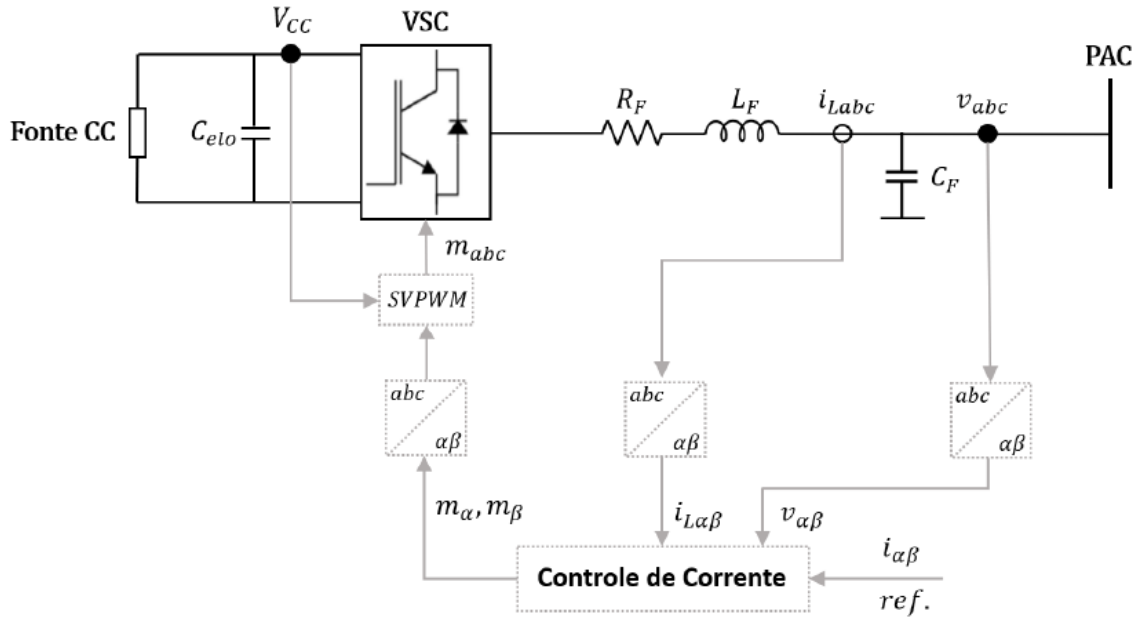
$$v_{tc} = m_c \cdot \frac{V_{cc}}{2} \quad (3)$$

Onde m_a , m_b e m_c são os sinais de modulação gerados pelas malhas de controles do VSC.

O VSC é comumente conectado em paralelo com a rede, possibilitando a capacidade de fornecer suporte a rede, mantendo a qualidade e fornecimento de energia à MR. Para atender os requisitos de suporte à rede, o controle do VSC precisa ser feito de maneira adequada. Existe diversas estratégias de como controlar o VSC, dentre elas, o trabalho irá abordar o VSC controlado por corrente (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

Para realizar o controle por corrente, as grandezas controladas podem ser representadas no referencial abc (ou trifásico/natural), referencial estacionário ($\alpha\beta$) ou referencial d-q. Do ponto de vista de esforço computacional as grandezas do VSC controlado por corrente serão representadas no referencial $\alpha\beta$. A Figura 10 ilustra o digrama de controle do VSC controlado por corrente, de forma que a corrente medida ($i_{L\alpha\beta}$) é comparada com o sinal da corrente de referência ($i_{Ref-\alpha\beta}$) no loop de controle de corrente. A corrente de referência pode ser obtida a partir de um loop externo associado a um controle de energia de uma fonte primária (ex.: rastreamento de máxima potência) ou para situações em que se deseja manter determinada grandeza do sistema de conversão no limite de operação adequada (ex.: controle da tensão do barramento CC) (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

Figura 10 - VSC controlado por corrente.



Fonte: (DAVIDSON MARQUES, 2023).

Os blocos representados por $abc-\alpha\beta$ têm a função de transformar as grandezas trifásicas para o referencial estacionário alfabeta através da matriz de transformação representada na Equação (4):

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

A malha de controle presente na Figura 10 permite controlar a potência ativa/reactiva entre o VSC e o sistema CA. Quando o lado CC do VSC é conectado a uma fonte de tensão ideal que define a tensão do barramento CC, o VSC atua como um caminho de fluxo de energia bidirecional entre o sistema CA e fonte de tensão CC. Na prática, em aplicações como sistemas fotovoltaicos (FV) e células de combustível, o lado CC do VSC está conectado a fonte de energia CC que não impõe a tensão do barramento CC fixa. Nestas aplicações, a transferência de energia requer um sistema de condicionamento de energia, apresentado no tópico (2.3 Modelos dos RED).

2.3 Modelos dos RED

Nesta seção serão abordados os modelos dos RED que irão compor a MR implementada, realizando um detalhamento das principais particularidades de funcionamento de cada fonte primária e a representação dos seus respectivos

circuitos CC. Também será apresentado os conversores CC/CC adotados para conectar o circuito das fontes primárias com o barramento CC.

2.3.1 Modelo FC

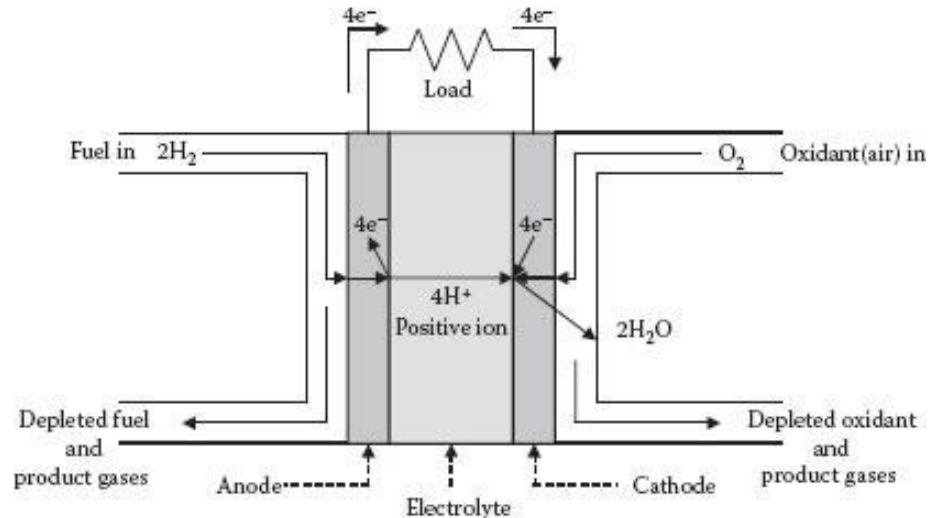
As células de combustível são dispositivos eletroquímicos que convertem a energia química dos reagentes – combustível (hidrogênio) mais oxidante (oxigênio) – em energia elétrica de forma contínua desde que os reagentes sejam fornecidos continuamente. Além da eletricidade, a FC produz como subproduto água e calor no processo final. A operação básica da FC de hidrogênio teve sua primeira demonstração realizada pelo advogado e cientista William Grove em 1839 (PUKRUSHPAN; STEFANOPOULOU; PENG, 2004a).

Há diversas tecnologias de FC e são categorizadas de acordo com o material utilizado no eletrólito. A classificação engloba as células a combustível de membrana de eletrólito de polímero ou troca de prótons (PEMFC – *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*), célula a combustível de óxido sólido (SOFC – *Solid Oxide Fuel Cell*), célula de combustível alcalina (AFC – *Alkaline Fuel Cell*), células a combustível de ácido fosfórico (PAFC – *Phosphoric Acid Fuel Cell*) e células a combustível de metanol direto (DMFC – *Direct Methanol Fuel Cell*) (GOU; NA; DIONG, 2016; SINGLA; NIJHAWAN; OBEROI, 2021).

Para ilustrar o comportamento interno da FC, a Figura 11 apresenta uma estrutura geral da PEMFC, de forma que o fornecimento de hidrogênio é realizado através do ânodo, enquanto o fornecimento de oxigênio é por meio do cátodo. O funcionamento da PEMFC ocorre da seguinte maneira, os átomos de hidrogênio ao ser inserido no ânodo da membrana – região em que há catalisadores – liberam seus elétrons e se tornam íons positivos H^+ (prótons), de acordo com a Equação (5). A membrana de troca de prótons (PEM) permite apenas a transferência de íons H^+ através de sua estrutura, enquanto os elétrons são coletados e utilizados como eletricidade em um circuito elétrico externo, representado pela carga. Após atenderem a carga, os elétrons são conectados aos íons H^+ que se difundem na membrana e combinam-se com o oxigênio no cátodo para formar água. A reação química realizada no cátodo também libera energia na forma de calor e está explicitada na Equação (6) (GOU; NA; DIONG, 2016; SINGLA; NIJHAWAN; OBEROI, 2021).



Figura 11 - Estrutura genérica da FC do tipo PEM.



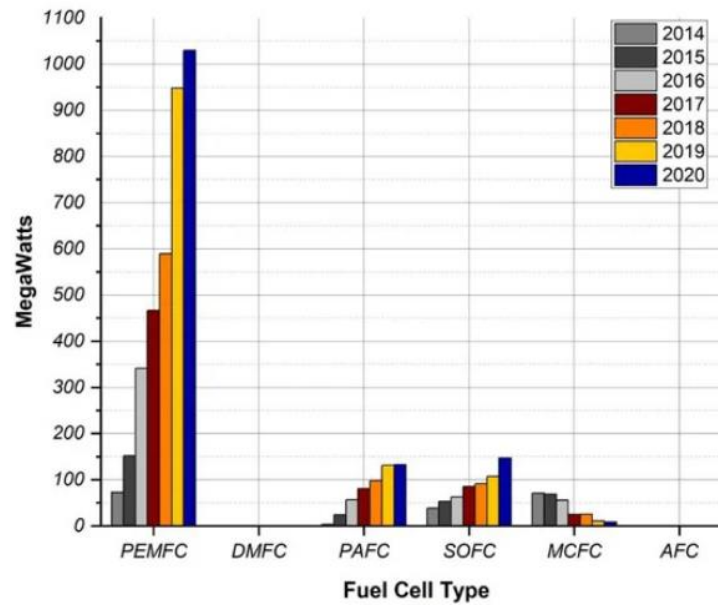
Fonte: (GOU; NA; DIONG, 2016).

O funcionamento adequado da FC requer a remoção da água com o objetivo de evitar acúmulo na célula. Com relação aos reagentes, qualquer quantidade de hidrogênio e oxigênio (ar) não utilizados são dispersados pelas saídas do ânodo e cátodo, respectivamente.

A reação química no cátodo só poderá ocorrer continuamente caso os elétrons gerados no ânodo fluam exclusivamente como uma corrente elétrica no circuito externo à FC ao mesmo tempo que os prótons fluam através do PEM. A reação que ocorre em uma única célula produz uma tensão CC de saída de aproximadamente 0,7V. Para atender aplicações gerais, as células são conectadas em série com a finalidade de formar uma pilha (*stack*) para obter o nível de tensão desejada (GOU; NA; DIONG, 2016).

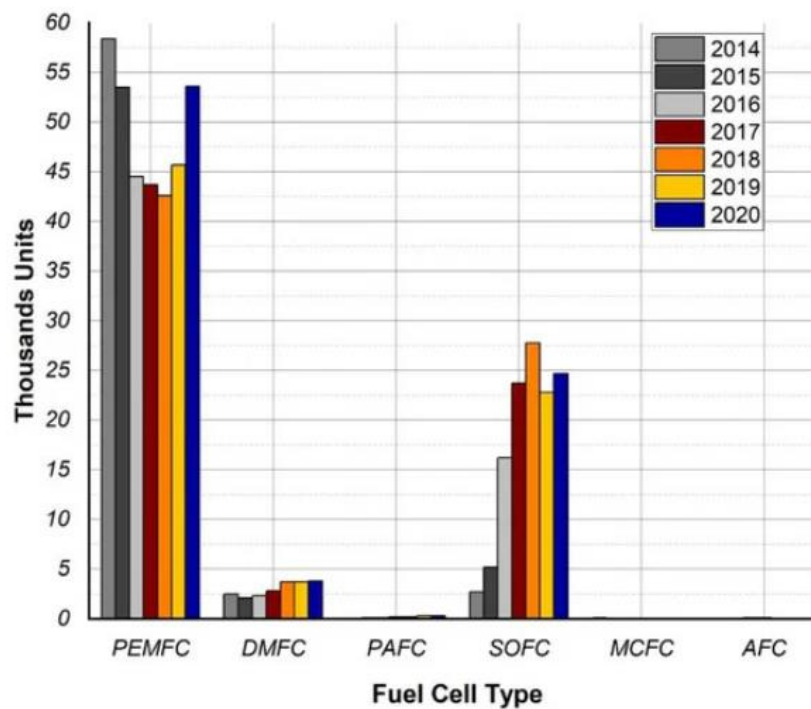
Tecnologia do tipo PEMFC possui vantagens específicas como: alta densidade de potência, temperatura de operação de 40-100°C, permitindo o início de funcionamento da célula de forma mais rápida, elevada energia específica, longa vida útil que está associada ao eletrólito sólido e baixa corrosão. Essas características tornaram a PEMFC uma tecnologia com posição de destaque, apontada nas Figura 12 e Figura 13, as quais apresentam respectivamente, a capacidade de potência instalada e a quantidade de células estabelecidas no mercado até o ano de 2020, considerando cada tipo de tecnologia (FAN; TU; CHAN, 2021; GOU; NA; DIONG, 2016; PUKRUSHPAN; STEFANOPOULOU; PENG, 2004a).

Figura 12 - Capacidade instalada de FC no mercado global.



Fonte: (CIGOLOTTI; GENOVESE; FRAGIACOMO, 2021).

Figura 13 - Unidades instaladas de FC no mercado global.



Fonte:(CIGOLOTTI; GENOVESE; FRAGIACOMO, 2021).

O combustível utilizado para o funcionamento contínuo da célula está relacionado com sua tecnologia. O estudo desenvolvido em (WILBERFORCE et al., 2016) apresenta os combustíveis usados em cada modelo de FC. A tecnologia

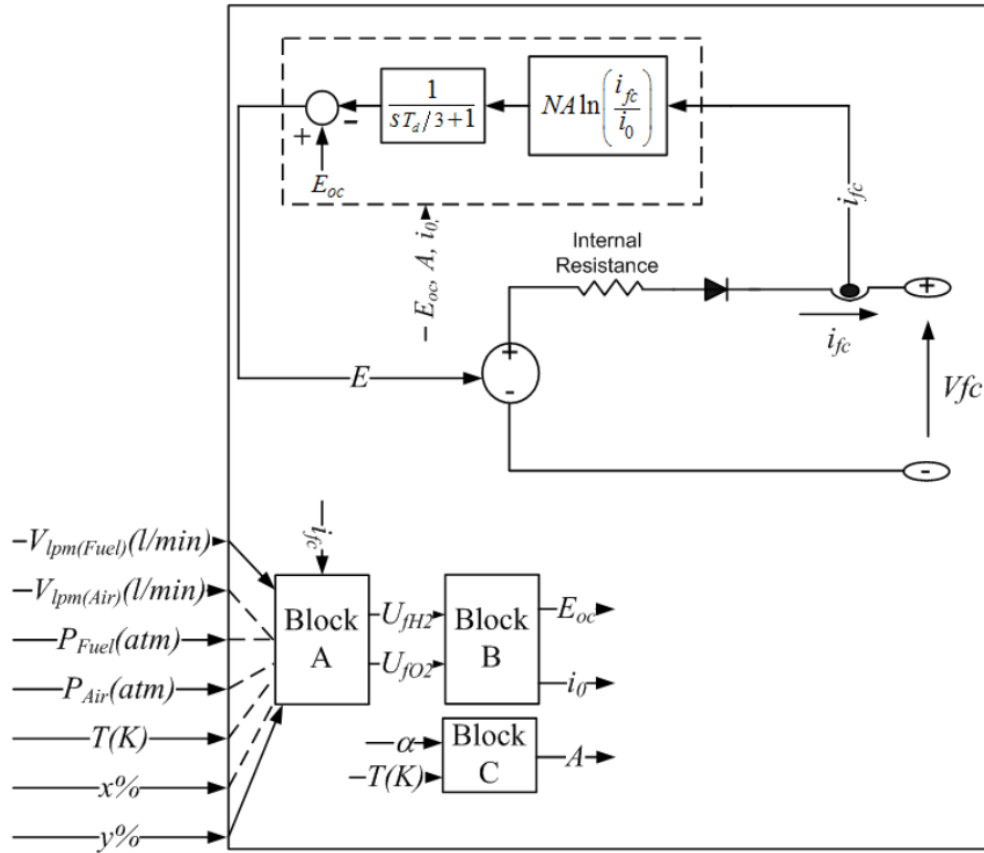
PEMFC opera através do hidrogênio como combustível, conseqüentemente, a inserção dessa tecnologia no mercado depende da economia de hidrogênio.

Atualmente, a economia de hidrogênio tem sido uma estratégia importante para os países atingirem suas metas de descarbonização. A inserção do hidrogênio de baixo carbono – gerado por meio de fontes renováveis – incentiva a descarbonização do setor industrial e energético. O hidrogênio de baixo carbono, denominado hidrogênio verde é considerado um vetor de energia, com uma gama de aplicações. Em aplicações destinadas ao usuário final, o hidrogênio de baixo carbono desempenha a função de insumo para que a FC seja utilizada no setor de transporte (veículos movidos a hidrogênio) e no setor energético (geração de eletricidade, geração de calor para edifícios) (IEA, 2023; IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2019; IRENA, 2021).

A geração de energia é um papel importante para o setor energético e, as tecnologias de turbinas a gás alimentadas a hidrogênio e as FCs estacionárias de grande escala são capazes de complementar a geração de outras fontes renováveis. Devido a sua modularidade, as FCs comumente são utilizadas em aplicações descentralizadas, fornecendo suporte à rede elétrica e proporcionando a capacidade de *black start* para MRs (IEA, 2023; IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2019; IRENA, 2021).

Com a finalidade de estudar a operação de uma FC no contexto de MR, utilizou-se o modelo elétrico *Fuel Cell Stack* do *Matlab®/Simulink®*, desenvolvido por (TREMBLAY; DESSAINT, 2009a), que representa modelos de células de combustível alimentadas com hidrogênio e oxigênio (ar). A partir desse modelo, é possível observar o comportamento da FC com relação ao consumo de hidrogênio e oxigênio, eficiência e os parâmetros como pressões, temperatura, composições do combustível etc. A Figura 14 ilustra o circuito equivalente detalhado da FC presente no *Simulink*.

Figura 14 - Circuito equivalente da FC no Matlab/Simulink.



Fonte: (TREMBLAY; DESSAINT, 2009a).

No modelo detalhado da FC, conforme Figura 14, a tensão no terminal e a corrente injetada pela FC são definidas como V_{fc} e i_{fc} , respectivamente. Os valores de V_{fc} e i_{fc} dependem da tensão de circuito aberto (E_{oc}) e da corrente de troca (i_0), que varia de acordo com os sinais de entrada

- $V_{lpm(Fuel)}$: Taxa de fluxo do combustível em l/min;
- $V_{lpm(Air)}$: Taxa de fluxo do ar em l/min;
- P_{Fuel} : Pressão absoluta de alimentação do combustível em atm;
- P_{Air} : Pressão absoluta de alimentação do ar em atm;
- T : Temperatura em Kelvin (K);
- $x\%$: Porcentagem de H_2 no combustível;
- $y\%$: Porcentagem de O_2 no oxidante.

Para o desenvolvimento do trabalho, não será considerado as variações desses sinais. A FC irá operar conforme a variação de uma demanda energética com base no fluxo da MR, analisando o comportamento da FC sujeita a diferentes condições de carga. Os parâmetros do modelo da FC do *Simulink* para tecnologia do tipo PEM está apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Tecnologias de FC do Simulink.

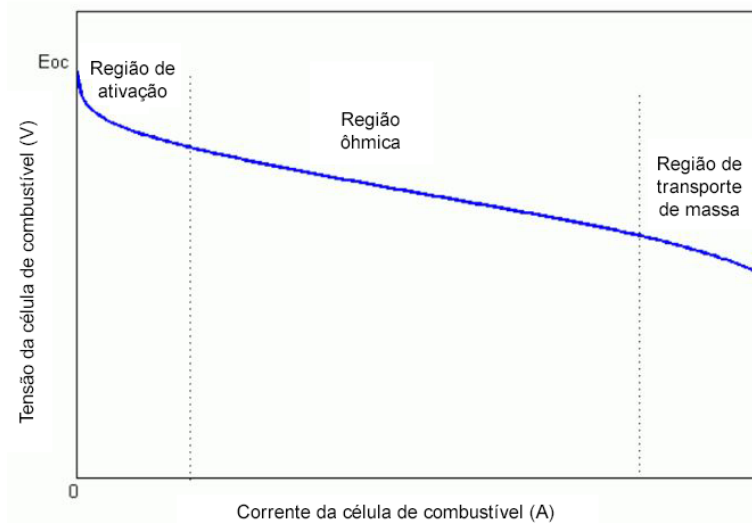
Modelos da FC	PEMFC/AFC/SOFC
Potência nominal (kW)	50
Número de células	900
Eficiência nominal (%)	55
Temperatura de operação (°C)	65
Taxa de fluxo nominal de Ar (lpm)	2100
Taxa de fluxo nominal de H2 (lpm)	417,3
Pressão de alimentação [H2(bar) e O2 (bar)]	[1,5; 1]
Concentração (%) [H2 O2 H2O (ar)]	[99,25; 21; 1]

Fonte: (MATHWORKS, 2024a).

O bloco *Fuel Cell Stack* do *simulink* apresenta três modelos de célula, PEMFC, AFC e SOFC. Considerando as vantagens operacionais, será selecionada a tecnologia PEMFC como um dos recursos energéticos da MR. O desempenho do funcionamento da FC tem como base sua curva característica de $v \times i$, conforme Figura 15.

A curva genérica ilustrada na Figura 15 apresenta três regiões operacionais para FC. A região de ativação, também denominada de perda de ativação ou sobretensão de ativação, representa a queda de tensão de ativação em decorrência da lentidão das reações químicas que ocorrem nas superfícies dos eletrodos. Uma parcela da energia disponível é perdida na condução da reação química responsável por transferir os elétrons entre os eletrodos.

Figura 15 - Curva $v \times i$ da FC - Modelo *Simulink*.



Fonte: (MATHWORKS, 2024a).

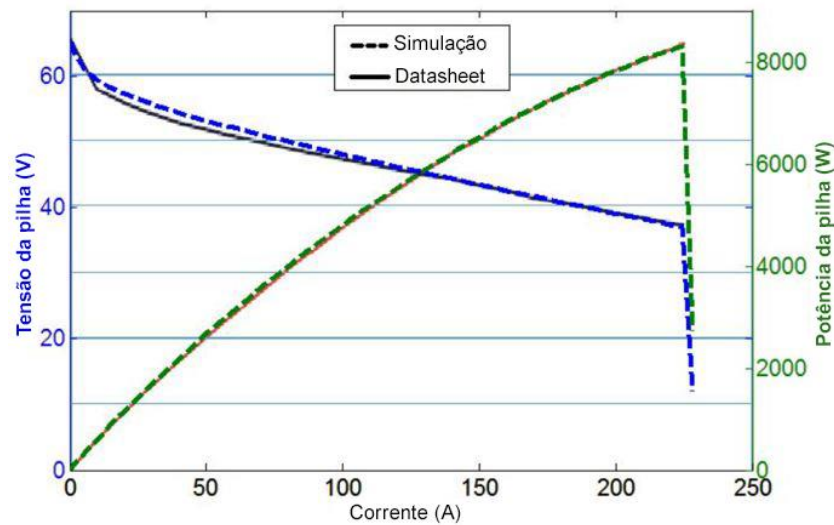
A perda de ativação ocorre em ambos os eletrodos da FC: ânodo e cátodo. Portanto, a queda de tensão ocorre predominantemente na reação de redução do oxigênio no cátodo, pois trata-se de uma reação mais lenta do que a reação de oxidação do hidrogênio no ânodo (MATHWORKS, 2024a; PUKRUSHPAN; STEFANOPOULOU; PENG, 2004b).

A região ôhmica está associada às perdas resistivas devido à resistência interna da pilha de células de combustível. As perdas ôhmicas ocorrem devido à resistência da membrana polimérica quando há a transferência de prótons, a resistência do eletrodo e a resistência da placa coletora, responsável pela transferência de elétrons. Como observado na Figura 15, a queda de tensão na região ôhmica é linearmente proporcional à densidade de corrente (MATHWORKS, 2024a; PUKRUSHPAN; STEFANOPOULOU; PENG, 2004b).

A última região representa a perda no transporte de massa ou perda por concentração. Essa perda surge como resultado da diminuição na concentração dos reagentes à medida que são consumidos na reação. Consequentemente, haverá uma rápida queda de tensão quando a densidade de corrente possuir um valor alto.

Outra característica operacional da FC é a curva de potência, conforme a Figura 16. A curva de potência tem como objetivo determinar o quanto de potência a FC consegue injetar no ponto de conexão. Na Figura 16, a FC pode operar no ponto de potência nominal (I_{nom} e V_{nom}) e no ponto de máxima potência ($I_{máx}$ e $V_{máx}$).

Figura 16 - Curva de potência da FC - Modelo *Simulink* - 6kW

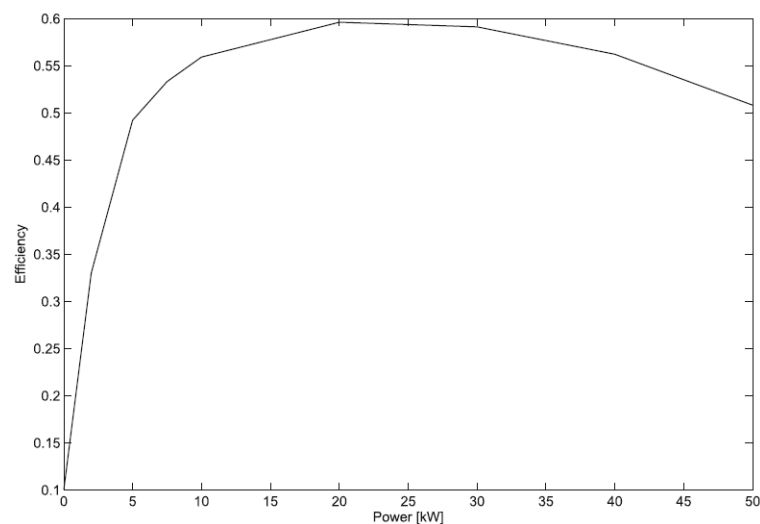


Fonte: (MATHWORKS, 2024a).

O ponto de máxima de potência não assegura de que a FC esteja operando de maneira eficiente. Para analisar a performance é importante compreender a eficiência da FC, que na célula é definida como sendo a razão entre a geração de energia útil (elétrica) e a entrada de energia (conteúdo de energia presente na massa de hidrogênio) (BASUALDO; FEROLDI; OUTBIB, 2011).

A Figura 17 ilustra o comportamento da eficiência em função da potência para uma FC de 50kW. Observa-se que há uma região na qual FC opera com melhor eficiência, mas com uma potência de saída menor do que a potência máxima. Garantir o funcionamento da FC na região de alta eficiência significa o bom uso da energia do combustível (hidrogênio) que é convertida em energia elétrica.

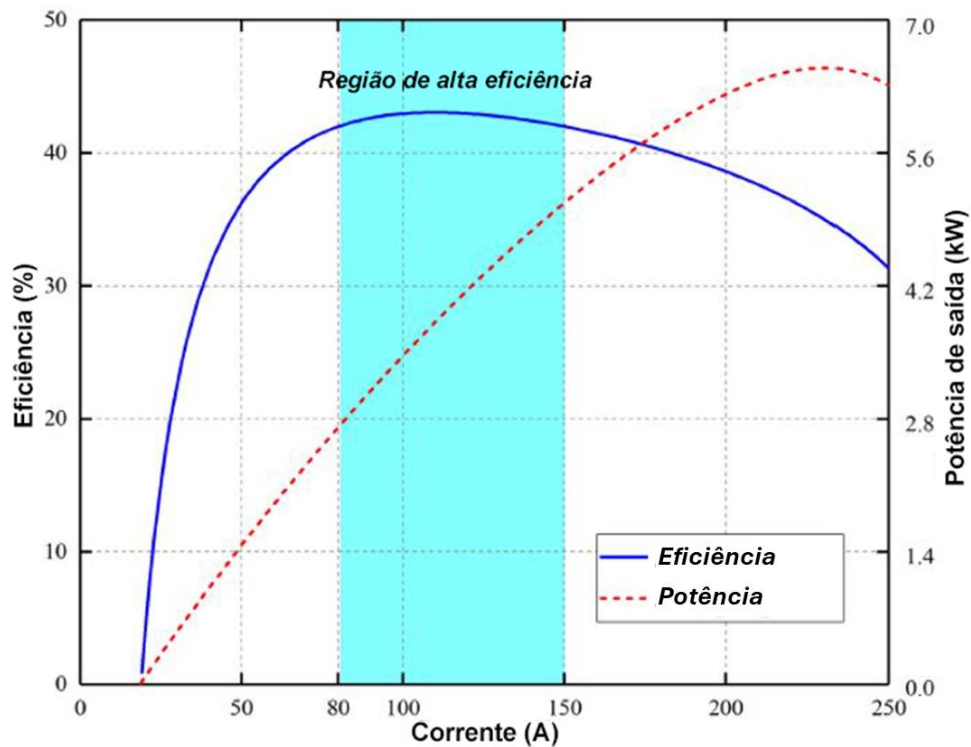
Figura 17 - Curva de eficiência da FC.



Fonte: (BASUALDO; FEROLDI; OUTBIB, 2011).

Segundo (ZHANG et al., 2021) a região de alta eficiência pode ser observada a partir da sobreposição da curva de eficiência com a curva de potência, conforme a Figura 18. Na Figura 18, observa-se que o funcionamento da FC na região de melhor eficiência ocorre limitando a corrente de saída da célula, e o ponto de máxima potência não corresponde uma boa performance.

Figura 18 - Análise da curva de eficiência e potência da FC.



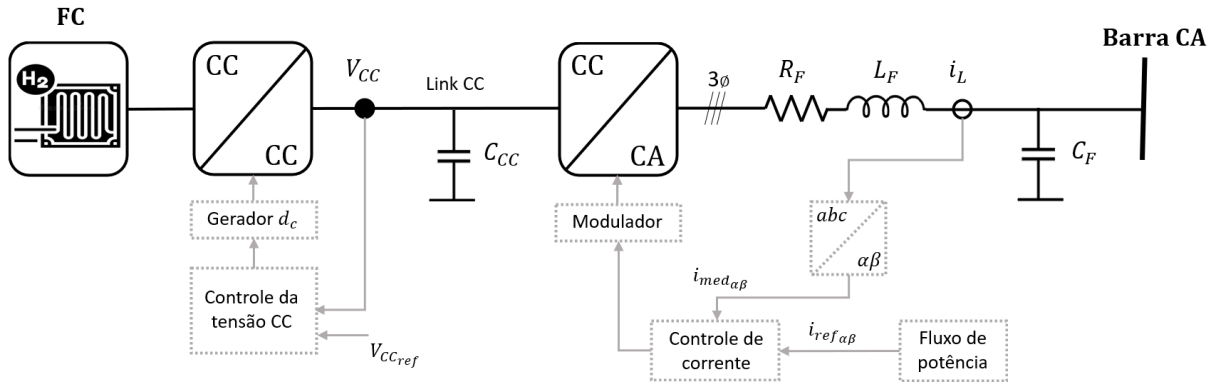
Fonte: Traduzida de (ZHANG et al., 2021)

Definida as regiões de operação, para inserir a FC na topologia de MR se faz necessário um sistema de condicionamento de energia, formado pelos conversores de potência. A função do condicionamento de energia é realizar a interface da FC – que gera de forma CC – com o barramento CA da MR, ou seja, permite a troca de energia entre dois subsistemas elétricos de maneira controlada. A conversão CC/CA foi abordada na seção (2.2), enquanto o condicionamento do sistema CC para FC será apresentado em sequência.

O comportamento da FC se assemelha a uma fonte de energia CC, sem capacidade de manter a tensão do barramento CC fixa, impossibilitando a transferência de energia entre sistema CC e CA. O sistema de condicionamento soluciona esta situação através do controle de tensão do barramento CC (KOLLI et al., 2015; YAZDANI; IRAVANI, 2010).

A Figura 19 apresenta o sistema da FC conectado ao barramento CA. Com base na Figura 19, nota-se que o sistema CC é composto pela FC e o conversor CC/CC conectado ao barramento CC. A interface do sistema CC com CA é realizada por meio do conversor CC/CA, representado pelo VSC citado na seção (2.2).

Figura 19 - Sistema da FC conectado ao barramento CA.



Fonte: Adaptado de (DAVIDSON MARQUES, 2023).

A malha de controle de tensão do barramento CC presente na Figura 19, tem como objetivo controlar tensão do barramento CC (V_{cc}), permitindo que a FC forneça energia ao sistema CA. O regulador de tensão é representado por controlador PID – Equação (7) – no qual a tensão medida no barramento CC (V_{cc}) é comparada com a tensão de referência (V_{cc-Ref}). Posteriormente, a malha de controle gera um sinal de referência – *duty cycle* (d_c) – para o funcionamento das chaves do conversor CC/CC.

$$G(s)_{PID} = k_p + k_i \cdot \frac{1}{s} + k_d s \quad (7)$$

Os parâmetros k_p , k_i e k_d são, respectivamente os ganhos proporcional, integrativo e derivativo do controlador PID.

O conversor CC/CC visa aumentar a baixa tensão nos terminais da célula para uma tensão fixa no barramento CC. Dessa forma, o conversor utilizado na FC será do tipo *boost*, com a função de elevar o nível da tensão do barramento CC ao valor mínimo necessário para transferência de energia da CC em CA (INCI; TÜRKSOY, 2019; KOLLI et al., 2015).

A dinâmica do barramento CC está associada à solicitação de potência da MR. Quando a potência injetada pelo VSC aumenta, a tensão do barramento CC diminui e consequentemente ficará menor do que o valor de referência. De maneira oposta, quando a potência do VSC diminui, a tensão do barramento CC aumenta e se torna maior do que o valor de referência. Em ambas as condições, o controle atua para

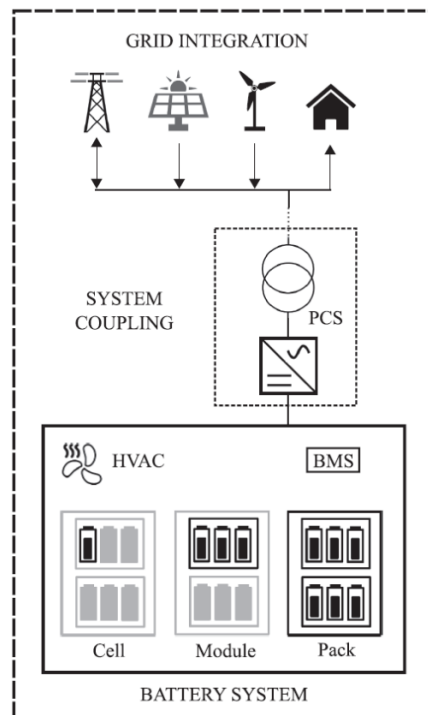
manter a tensão do barramento CC no valor de referência (GUO; LI; ZHAO, 2022; SUN et al., 2009).

2.3.2 Modelo BESS

Os sistemas de armazenamento de energia (SAE) são similares a qualquer fonte conectada por inversor, exceto pelo fluxo de potência bidirecional (LASSETER; ERICKSON, 2009). Os SAE podem ser empregados em diferentes níveis de aplicações no sistema elétrico, como: geração, transmissão/distribuição e consumidor final. Desta forma, é possível elencar categorias de aplicações para o sistema de armazenamento: suprimento de carga, serviços ancilares, suporte da transmissão e distribuição, serviços atrás do medidor e integração às renováveis.

Existem diversas tecnologias capazes de armazenar energia, sendo categorizadas com base na forma de como a energia é armazenada. No modelo do BESS o armazenamento acontece de forma eletroquímica. A Figura 20 apresenta um BESS conectado à rede elétrica e como estão dispostos seus elementos. Os módulos de bateria que compõem um sistema de armazenamento são formados por um conjunto de células conectadas (série e/ou paralelo) através de contadores CC. Os contadores CC possuem a função de desconectar uma bateria das outras quando estão em condições de falhas, por exemplo: sobretensão, afundamento de tensão, sobrecarga em uma determinada célula etc. Já o pack, denomina-se como sendo a estrutura formada por conjunto de módulos (BAZARGAN, 2014).

Figura 20 - BESS conectado à rede elétrica.



Fonte: (KILLER; FARROKHSERESHT; PATERAKIS, 2020).

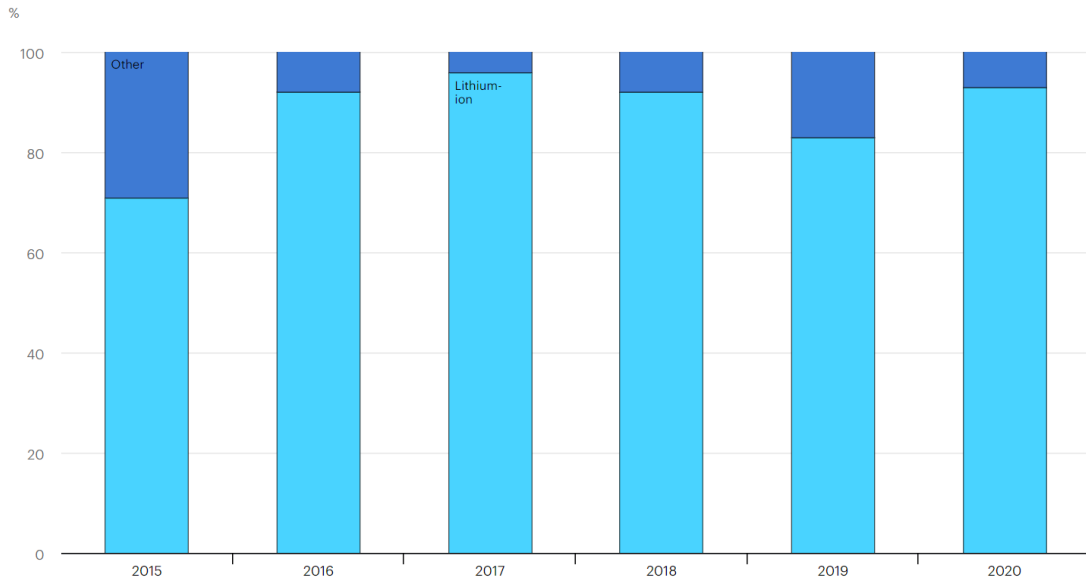
O BMS (*Battery Monitoring System*) representa a estrutura responsável por monitorar parâmetros (tensão, corrente, temperatura etc) e controlar a bateria, garantindo a operação segura das células. Segundo (BAZARGAN, 2014; KILLER; FARROKHSERESHT; PATERAKIS, 2020), esse sistema é composto por placas eletrônicas de múltiplas entradas e saídas digitais e analógicas e módulos de comunicação para fazer a ponte entre os sistemas de controle e de supervisão. Outra função importante do BMS é estimar o estado de carga (SoC – *State of Charger*) em uma célula de bateria.

O PCS (*Power Conversion System*) caracteriza o sistema de conversão de energia, ou seja, os conversores de potência, exercendo a função de realizar a interface do BESS com a rede elétrica.

Existem diversas tecnologias de BESS no mercado, como: sódio enxofre, chumbo-ácido, bateria de fluxo, níquel cádmio, íon de lítio, íon de lítio a base de fosfato etc. Particularmente, os sistemas de armazenamento baseado em baterias de íon de lítio tiveram um crescimento significativo, com um potencial de atender diversas aplicações (gerenciamento do congestionamento do sistema de transmissão/distribuição, integração com fontes renováveis, microrredes etc). A Figura 21 apresenta a capacidade instalada de armazenamento de baterias de íon de lítio ao longo dos anos, constatando a maior parcela de capacidade instalada quando

comparada a outras tecnologias (HESSE et al., 2017; KILLER; FARROKHSERESHT; PATERAKIS, 2020).

Figura 21 - Capacidade instalada de BESS íon de lítio.



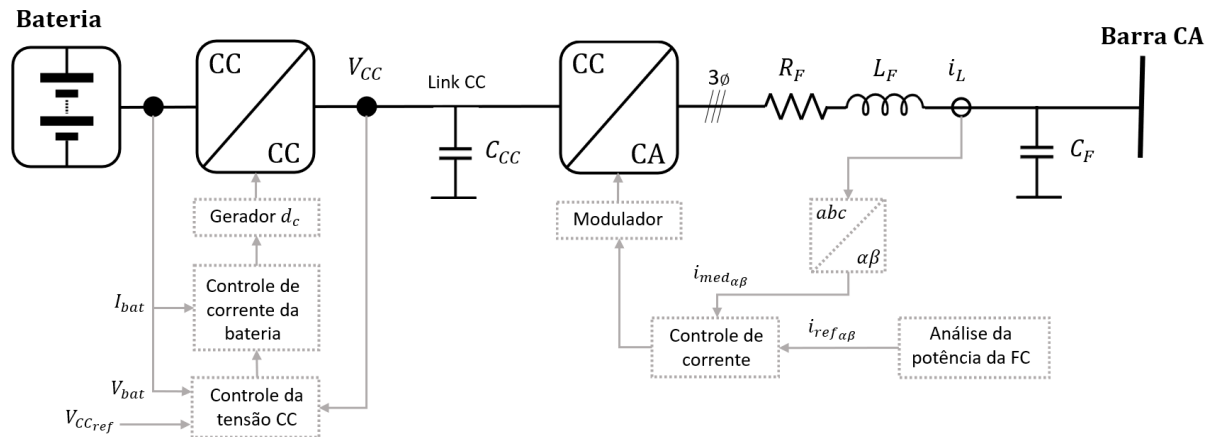
Fonte: (IEA, 2021b).

A maior capacidade de mercado do BESS de íon de lítio em relação a outras tecnologias está atrelada a alta densidade energética, boa eficiência nos processos de carga/descarga e constante diminuição nos custos de armazenamento. Um ponto a destacar das células de Li-íon está relacionado ao potencial baixo para os processos de reciclagem, porém em (JOSHUA S HILL, 2021) descreve a produção da primeira célula de bateria Li-íon totalmente reciclado, sendo um avanço para tornar ainda mais viável sua integração com o sistema elétrico (KILLER; FARROKHSERESHT; PATERAKIS, 2020).

Com diversas aplicações, nesse trabalho será utilizado um modelo de bateria que representa o comportamento do BESS inserido em um cenário de MR. O modelo de bateria é o modelo elétrico denominado Battery do *Matlab®/Simulink®*, desenvolvido por (TREMBLAY; DESSAINT, 2009b). A Figura 22 apresenta o circuito equivalente da bateria, correspondendo a modelagem dinâmica de alguns tipos de tecnologias de baterias recarregáveis (íons de lítio, níquel cádmio, chumbo ácido e níquel metal hidreto) (MATHWORKS, 2024b).

O BESS é um sistema composto por baterias – que gera energia de forma CC – e o sistema de condicionamento de energia representado por meio dos conversores. Na Figura 23 está ilustrado o diagrama e os componentes do BESS conectado ao barramento CA.

Figura 23 - Sistema do BESS conectado ao barramento CA.



Fonte: Adaptado de (DAVIDSON MARQUES, 2023).

Conforme o diagrama da Figura 23, percebe-se que o sistema de energia CC é formado pela fonte primária (bateria), conversor de potência CC/CC conectado ao link CC que possui um capacitor C_{cc} e a malha de controle de potência da bateria. Além disso, há um conversor CC/CA - representado pelo VSC – que conecta o BESS à rede elétrica.

A malha de controle tem o objetivo de controlar o conversor CC/CC de forma que seja possível permitir o fluxo bidirecional, ou seja, fornecer capacidade para a bateria carregar e descarregar de acordo com uma determinada solicitação de potência. Diante disso, será selecionado um conversor CC/CC bidirecional do tipo *buck/boost*, utilizado com o propósito de elevar ou diminuir o nível da tensão das baterias e regular a tensão do link CC, carregando e descarregando as baterias do BESS (DAVIDSON MARQUES, 2023).

O sistema de controle é composto por duas malhas de controle: (1) malha de controle da tensão V_{cc} , representado na Equação (8) e (2) malha de controle da corrente da bateria (I_{bat}), conforme Equação (9). As grandezas são controladas por dois controladores PI concatenados, sendo um para a malha de tensão e outro para malha de corrente. A estratégia de controle de tensão e de corrente são definidas com base nas equações:

$$I_{bat_{ref}} = k_{vb} \left(1 + \frac{1}{T_{vb} \cdot s} \right) \cdot (V_{cc_{ref}} - V_{cc}) \quad (8)$$

$$V_{bat_{ref}} = k_{ib} \left(1 + \frac{1}{T_{ib} \cdot s} \right) \cdot (I_{bat_{ref}} - I_{bat}) \quad (9)$$

onde o ganho k_{vb} e a constante de tempo T_{vb} são parâmetros do controlador PI controle de tensão V_{cc} , já o ganho k_{ib} e a constante de tempo T_{ib} são os parâmetros do controlador PI do controle de corrente I_{bat} . Os ajustes desses parâmetros são abordados em (DAVIDSON MARQUES, 2023).

A malha de controle do conversor CC/CC bidirecional tem a função de assegurar a dinâmica do barramento CC quando o BESS injeta ou absorve potência. Na condição que o VSC consome energia da rede, a potência flui do VSC para a bateria, de forma que o conversor CC/CC opera no modo *buck*, permitindo o carregamento da bateria. Quando o VSC está fornecendo energia para rede, a potência flui da bateria para a rede, condição na qual o conversor CC/CC opera no modo *boost*, descarregando a bateria (DARLAN IORIS, 2021; DAVIDSON MARQUES, 2023).

As condições de operações do VSC causam variações na tensão do barramento CC. Quando o VSC fornece energia para rede e a potência do VSC é maior do que a potência da bateria, a tensão V_{cc} se torna menor do que a tensão de referência predefinida. Consequentemente, o controle atua para aumentar a potência de bateria e ajustar a tensão do barramento CC. De maneira oposta, quando a potência do VSC é menor do que a potência da bateria, a tensão V_{cc} aumenta e se torna maior do que o valor de referência. Nesta condição, o controle atua e reduz a potência da bateria (DARLAN IORIS, 2021; DAVIDSON MARQUES, 2023).

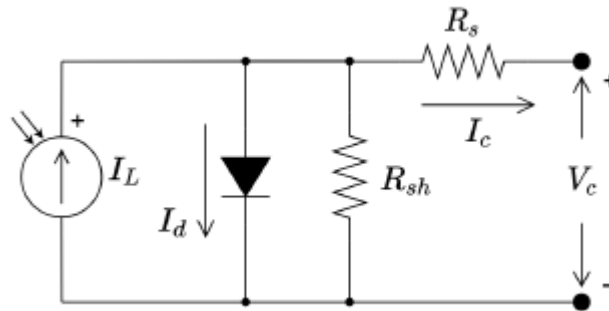
2.3.3 Modelo FV

O sistema fotovoltaico (FV) é um tipo de tecnologia de geração que pode ser implementada na MR. A geração solar representa um recurso energético renovável, característica responsável por impulsionar seu uso em aplicações com MR. Sob outra perspectiva, a geração solar possui um comportamento variável, sendo uma fonte de energia não-despachável presente na MR (PARHIZI et al., 2015).

Para configurar a operação do sistema FV na MR, foi utilizado o bloco *PV Array* presente na biblioteca do *Matlab®/Simulink®*. O bloco possibilita utilizar modelos

predefinidos de módulos FV da *National Renewable Energy Laboratory (NREL) System Advisor Model* (2018), os quais já possuem parametrizados seus valores nominais e curvas características que representam seu funcionamento. A Figura 24 ilustra o circuito elétrico do bloco *PV Array* no *Matlab®/Simulink®*.

Figura 24 - Circuito equivalente da *PV Array* no Matlab/Simulink.



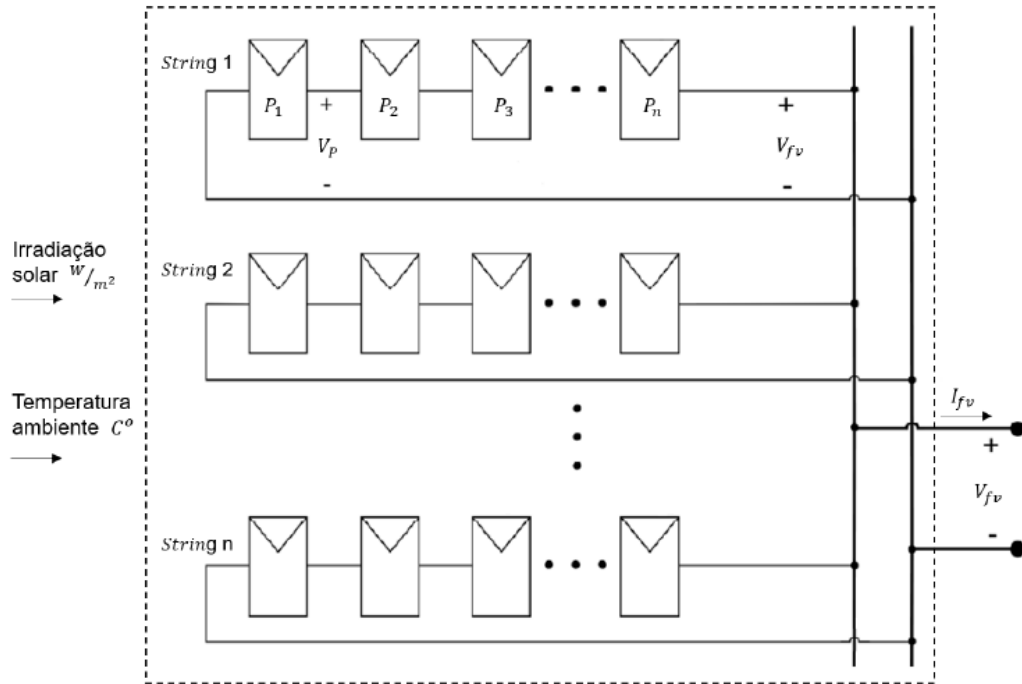
Fonte: (MA; YANG; LU, 2014; VILLALVA; GAZOLI; RUPPERT FILHO, 2009).

O diagrama é constituído por uma fonte de corrente (I_L) dependente da irradiação solar, conectada em paralelo a um diodo e a duas resistências, denominadas de resistência paralela (R_{sh}) e resistência série (R_s), para representar as perdas do módulo FV. Nos terminais do módulo é gerada uma tensão (V_c) e uma corrente de saída (I_c), permitindo definir a curva característica $V \times I$ que depende da irradiância e temperatura (DARLAN IORIS, 2021).

A performance do módulo FV depende das condições de irradiação solar e temperatura ambiente ao qual está submetido. Na condição padrão, definida de acordo com a STC (*Standard Test Conditions*), a temperatura ambiente e irradiação são, respectivamente, 25°C e 1.000 W/m². Nestas condições, a potência fornecida pelo módulo é igual à potência de máxima (P_{pmax}), correspondente a valores nominais de tensão (V_p) e corrente (I_p) do módulo no ponto de máxima potência (DAVIDSON MARQUES, 2023).

O bloco *PV Array* permite definir uma matriz FV, formada por um conjunto de módulos FV. A configuração da matriz FV é realizada a partir da escolha do modelo do módulo FV, da quantidade de módulos conectados em série (N_{ps}) que formam uma *string* e a quantidade de *strings* em paralelo (N_s), conforme apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Configuração do Sistema FV.



Fonte: (DAVIDSON MARQUES, 2023).

A potência injetada (P_{fv}), a tensão (V_{fv}) e a corrente (I_{fv}) do arranjo FV são calculadas com bases nas Equações (10), (11) e (12).

$$P_{fv} = N_{ps} \cdot N_s \cdot P_{pv} \quad (10)$$

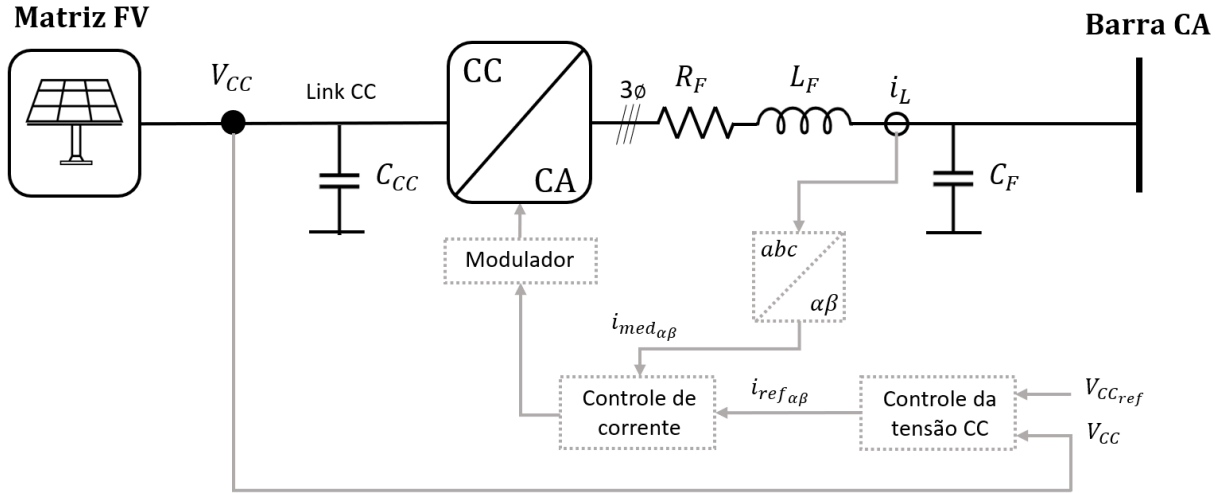
$$V_{fv} = N_{ps} \cdot V_p \quad (11)$$

$$I_{fv} = N_s \cdot I_p \quad (12)$$

Os parâmetros de irradiância solar e temperatura ambiente alteram a potência que o arranjo FV consegue entregar no ponto de conexão. Neste trabalho, a temperatura ambiente será fixada de acordo com a STC, enquanto a irradiância solar poderá ser alterada com a finalidade de reproduzir a variabilidade de potência do arranjo FV.

Para a integração do arranjo FV com a rede elétrica, é necessário um sistema de condicionamento semelhante ao apresentado para a FC e o BESS. A Figura 26 ilustra a topologia de interface entre o sistema FV e a rede elétrica. Percebe-se que na topologia presente na Figura 26 foi utilizado apenas um estágio de conversão de energia (representada pelo conversor CC/CA).

Figura 26 - Sistema FV conectado ao barramento CA



Fonte: (DAVIDSON MARQUES, 2023).

A malha de controle que gera o sinal de modulação do conversor CC/CA tem como objetivo representar a dinâmica do barramento CC. O controle utiliza a estimativa de energia no capacitor (C_{cc}) de acordo com a Equação (13), onde a P_{fv} é a potência gerada do sistema FV e P_{VSC} é a potência fornecida à rede elétrica pelo conversor CC/CA.

$$\frac{d[V_{cc}(t)]}{d(t)} = \frac{P_{fv} - P_{VSC}}{C \cdot V_{cc}(t)} \quad (13)$$

A tensão V_{cc} varia quando $P_{fv} \neq P_{VSC}$, consequentemente haverá um erro entre a tensão V_{cc} e a tensão de referência V_{ref} . Dessa forma, o controle de tensão V_{cc} atua na corrente de referência I_{ref} da malha de controle de corrente do conversor CC/CA. A modificação de I_{ref} ocasiona uma variação de potência ativa que o VSC fornece à rede, logo, a potência P_{VSC} solicitada ao lado CC também varia. Com a atuação do controle, o sistema obtém um novo ponto de equilíbrio no barramento CC, em que $P_{fv} = P_{VSC}$ e $V_{cc} = V_{ref}$.

Como a Equação (13) é não linear com relação a tensão V_{cc} , o controle de tensão do barramento CC pode ser implementado manipulando indiretamente a tensão CC medida ao quadrado e comparando com o valor de referência ao quadrado, conforme a Equação (14). O sinal do erro gerado pelas grandezas de entrada V_{cc} e V_{ref} é processado pelo controlador PI, que posteriormente define uma potência de

referência (P_{ref}), a qual determinará a corrente de referência para o controle de corrente.

$$P_{ref} = k_{p_{fv}} \left(1 + \frac{1}{T_{p_{fc}} \cdot s} \right) \cdot (V_{cc_{ref}}^2 - V_{cc}^2) \quad (14)$$

Como a topologia da interface do sistema FV com a rede elétrica possui um único estágio de conversão, não será possível realizar o controle de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) para geração FV. A opção de não realizar o controle por MPPT está associada ao esforço computacional em adicionar mais um conversor CC/CC – controlado com base em alguma técnica de MPPT – na MR.

2.4 Sistema de gerenciamento de energia

O EMS tem a função de permitir o funcionamento autônomo da MR, ou seja, no modo de operação isolada da rede principal. A estratégia do EMS deve ser realizada para possibilitar a distribuição de energia entre as fontes de geração, o ESS e as cargas, satisfazendo as restrições de cada RED. Além disto, o EMS pode atender restrições relacionadas às técnicas de otimização, como por exemplo, a minimização dos custos operacionais da MR e o aumento da vida útil dos equipamentos que integram os RED (HAFSI et al., 2022).

Na literatura, diversos algoritmos de EMS são propostos com objetivo de atender requisitos operacionais da MR. O desenvolvimento da estratégia de EMS é definida com base nas tecnologias que integram a MR e quais requisitos operacionais serão obtidos. O estudo desenvolvido em (HU et al., 2018), apresentou um EMS para uma MR formada por um arranjo PV-BESS, com a finalidade de obter um perfil de potência suave no PCC/PAC controlando o SOC da bateria e utilizando a previsão de geração e carga.

Para analisar o compartilhamento de energia, (SINGH; LATHER, 2021) desenvolveu um EMS que permite realizar o balanço energético entre geração e carga da MR formada por baterias híbridas e supercapacitor (SC). Outras funções do EMS proposto estão associadas à regulação do barramento CC e a utilização do SC para compensar picos de potência, prologando a vida útil da bateria.

Com o incentivo da economia de hidrogênio, as microrredes baseadas em tecnologias de hidrogênio passaram a ter mais relevância na perspectiva energética. (HAN et al., 2019a) desenvolveu um EMS hierárquico para melhorar a economia e a robustez de uma MR CC operando no modo ilhado com PV, FC, BESS e veículos elétricos. O EMS foi definido a partir de duas estratégias de controles: (1) controle local que desempenha a função de controlar os RED de acordo com suas características operacionais e (2) controle do sistema, utilizando uma estratégia de minimização de consumo equivalente (ECMS) para minimizar o consumo de combustível com base no fluxo de energia entre o BESS e a FC.

(HAN; CHEN; LI, 2017) desenvolveu um método de EMS com base em múltiplos estados operacionais para uma MR CC (PEMFC-FV-BESS). Os estados operacionais foram definidos a partir das restrições de SoC da bateria, permitindo o compartilhamento de energia na MR sem ocasionar profundidade de descarga da bateria, consequentemente, otimiza a vida útil da bateria.

Outra estratégia de EMS foi apresentada por (MAGHAMI et al., 2020), que aplicou um controlador lógico *fuzzy* (FLC – *Fuzzy Logic Control*) em um sistema composto por geração solar, eólica e armazenamento de hidrogênio. A finalidade da técnica FLC é reduzir a potência de pico e minimizar o custo do sistema.

(VIVAS; SEGURA; ANDÚJAR, 2022) propõe um EMS baseado em lógica *fuzzy* para microrredes CC residenciais conectadas à rede elétrica e um sistema de armazenamento híbrido formado por baterias e FC. A estratégia FLC adotada no estudo visa aumentar o desempenho da MR em função da eficiência, custos operacionais e vida útil do armazenamento. Já em (SHAFIEE ROUDBARI; BEHESHTI; RAKHTALA, 2020), a estratégia *fuzzy* é utilizada para controlar a tensão e frequência de uma MR ilhada, composta por uma PEMFC conectada a uma carga por inversores CC/CA.

2.4.1 Máquina de Estado (*State Machine* – SM)

O controle baseado em máquina de estado (SM) é uma estratégia clássica para o gerenciamento de energia, principalmente em topologias de microrredes com diversos RED. A técnica SM consiste em definir estados operacionais do sistema em estudo a partir de restrições intrínsecas de cada recurso energético. Além disso, a

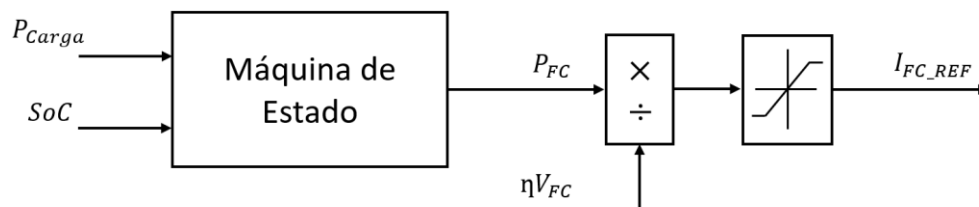
estratégia pode englobar aspectos de otimização, visando minimizar custos ou maximizar a eficiência da MR.

A estratégia SM é desenvolvida com base em um fluxograma ou árvore de decisões, de forma que cada decisão está associada a um estado operacional da MR. Para definir a árvore de decisões é fundamental identificar as características funcionais de cada recurso energético do sistema.

(PU et al., 2019) propõe uma técnica de gerenciamento baseada no controle de máquina de estado (SM) para uma MR DC ilhada com sistema de armazenamento, sistema FV, FC e eletrolisador. O controle SM proposto tem como função fornecer a potência de referência para as micros fontes de acordo com o estado de operação pré-definido e as solicitações de cargas.

(MOTAPON; DESSAINT; AL-HADDAD, 2013) estruturou a estratégia de SM considerando oito estados/regras operacionais para um sistema formado por baterias, PEMFC, SC e cargas CA. A definição dos estados foi proposta com base nos limites máximo e mínimo do SoC da bateria e, da potência da carga. A Figura 27 ilustra o funcionamento da estratégia SM, que determina o estado operacional da FC considerando SoC e P_{load} como sinais de entrada.

Figura 27 - Exemplo de funcionamento da estratégia máquina de estado.



Fonte: Adaptado de (MOTAPON; DESSAINT; AL-HADDAD, 2013)

Em (HAN et al., 2019b), a técnica de gerenciamento SM foi aplicada na topologia de uma MR CC constituída por FC, BESS e geração FV. A tomada de decisões que definiram a estratégia SM considerou três faixas de trabalho do SoC da bateria (SoC baixo, SoC médio e SoC alto) e a potência equivalente demandada pela MR. Para cada decisão da técnica SM, determinou-se um ponto de operação da FC.

A Tabela 4 apresenta um exemplo da técnica SM baseada no SOC da bateria, que define o momento de carga e descarga da bateria. Observa-se três faixas de referência para o SoC e os estados de funcionamento da bateria para cada faixa.

Tabela 4 - Exemplo da estratégia SM com base no SoC.

Nível do SoC	Estado	Funcionamento da Bateria
SoC baixo	1	Não permite o modo de operação da descarga da bateria
SoC médio	2	Permite o modo de carga/descarga da bateria
SoC alto	3	Permite o modo de descarga e o modo de carregamento lento da bateria

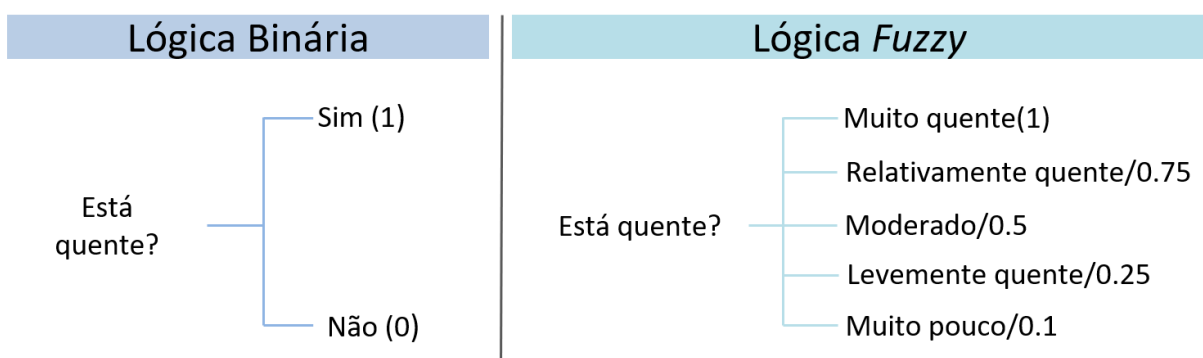
Fonte: Próprio autor.

Como a estratégia SM depende de cada componente da MR, definir os RED que formam o sistema é crucial para o bom desempenho do gerenciamento de energia. Neste trabalho, as variáveis de entrada para a técnica SM serão determinadas de acordo com as restrições de SoC da bateria e a potência solicitada para manter o equilíbrio entre geração e consumo da MR.

2.4.2 Lógica Fuzzy

A lógica *fuzzy* (FL) ou lógica nebulosa, trata-se de outra técnica comumente aplicada para gerenciamento de energia. Diferentemente da lógica binária, que assume o conceito binário de absolutamente falso (0) ou absolutamente verdadeiro (1), a FL fornece uma flexibilidade de variar os parâmetros do sistema estudado entre 0 e 1 (AISSAOUI; TAHOUR, 2012; JONATA CAMPELO, 2015).

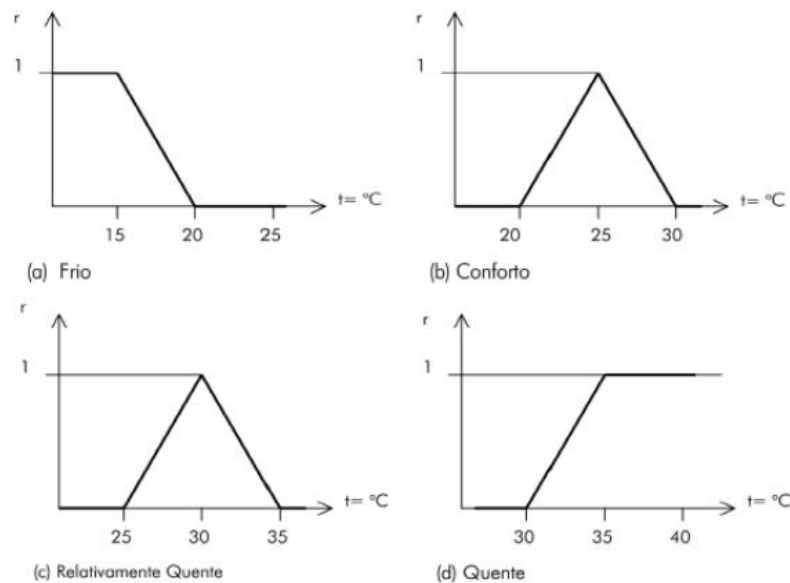
A Figura 28 ilustra a diferença entre o controle tradicional (binário) e o controle baseado em *fuzzy*. Observa-se que a variável *fuzzy* (calor) é definida por valores – que variam entre 0 e 1 – a partir de variáveis linguísticas, como: muito pouco, levemente quente, moderado, relativamente quente e muito quente.

Figura 28 - Comparativo entre os controles tradicional e *fuzzy*.

Fonte:(WESLEY CHAI, 2021).

Cada variável linguística da FL é representada por meio de uma função de pertinência que demonstra o comportamento da grandeza controlada. A Figura 29 apresenta um exemplo de funções de pertinência associada ao comportamento da variável térmica com seus respectivos intervalos: (a) frio, (b) conforto, (c) relativamente quente e (d) quente.

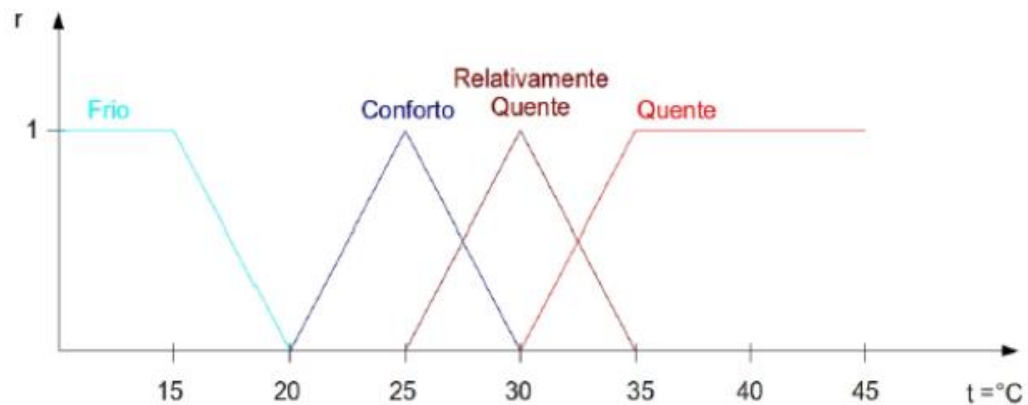
Figura 29 - Exemplo de funções de pertinência.



Fonte: (JONATA CAMPELO, 2015).

A Figura 30 demonstra o comportamento do conjunto de todas as funções de pertinência que representam a variável térmica, denominado de conjuntos *fuzzy*, que cobrem todo o universo do discurso. O universo de discurso é representado por todos os valores possíveis que uma variável pode assumir. A forma geométrica dos conjuntos *fuzzy* pode ser triangular, trapezoidal etc. (AISSAOUI; TAHOUR, 2012; SIVANANDAM; SUMATHI; DEEPA, 2007).

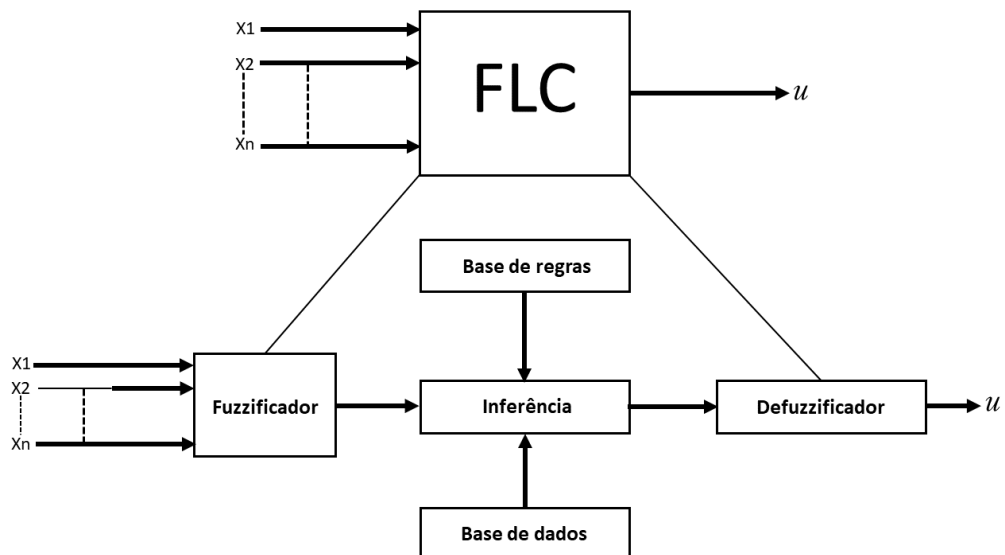
Figura 30 - Conjunto das funções de pertinências.



Fonte: (JONATA CAMPELO, 2015).

Na Figura 31 está ilustrado o fluxograma que representa a estrutura completa do controle baseado em *fuzzy*, formada pelo sistema de fuzzificação, base de conhecimento (base de dados em conjunto com a base de regras), sistema de inferência e sistema de defuzzificação. Cada elemento da estrutura *fuzzy* será detalhado a seguir:

Figura 31 - Fluxograma completo da lógica *fuzzy*.



Fonte: Adaptado de (AISSAOUI; TAHOUR, 2012)

Fuzzificador: sistema que tem a função de aplicar ao valor de entrada (valor real) a função de pertinência, resultando um valor de saída entre 0 e 1. A função de pertinência para uma determinada variável de entrada é denominada como variável linguística.

Base de regras: é a estrutura essencial para definir a estratégia de controle do sistema estudado. A base de regras é incorporada por meio de um conhecimento especializado ou heurístico, incluindo condições difusas expressas como um conjunto de regras *if-else*.

Inferência: o sistema de inferência é a base de conhecimento do sistema, formada a partir da base de dados e do conjunto de regras. Os modelos de inferência mais comum na literatura são: Modelo Mamdani e Modelo Takagi.

Defuzzificador: estrutura na qual os valores fuzzy exibidos na saída do sistema de inferência são convertidos em valores reais, permitindo a execução do controle.

A estratégia FLC pode ser resumida com base na Equação (15). O vetor $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ representa as variáveis de entrada; n é o número de variáveis *fuzzy*; Y é a variável de controle; o vetor $(F_1, F_2, \dots, F_n)$ está associado as funções de pertinência e M é número de regras adotadas na estratégia *fuzzy*.

$$R^{(i)}: \text{if } x_1 \text{ é } F_1, x_2 \text{ é } F_2, \dots x_n \text{ é } F_n \text{ then } Y \text{ é } G^{(i)}, i = 1, \dots, M \quad (15)$$

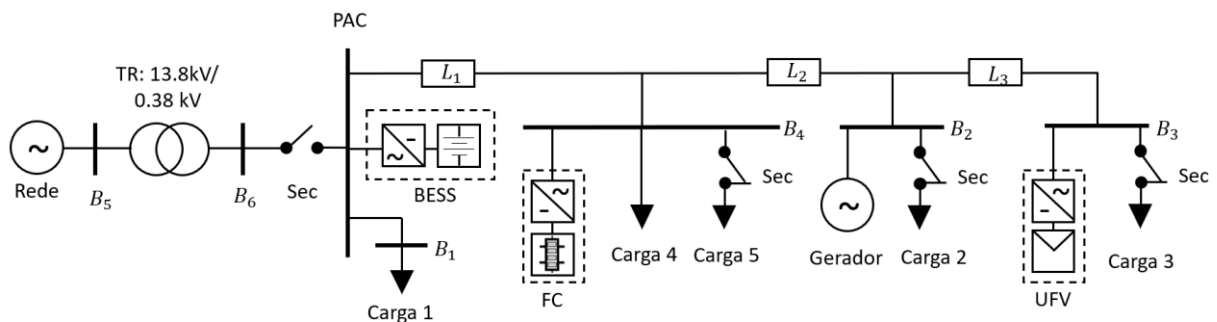
3 METODOLOGIA E SIMULAÇÃO

Neste capítulo será apresentada a estrutura e os parâmetros nominais dos RED da MR, que serão a base para realizações das simulações. A MR será analisada no modo de operação ilhado, formada por recursos energéticos como: gerador a diesel, FC, BESS, FV e cargas. Outro ponto abordado no capítulo está relacionado com a implementação das estratégias de gerenciamento de energia consideradas neste trabalho: máquina de estado e lógica *fuzzy*.

3.1 Estrutura da Microrrede

Para avaliar o desempenho do EMS aplicado ao cenário de microrredes, foi implementada através do software *Matlab®/Simulink®* a estrutura da MR deste trabalho, exibida na Figura 32. A MR CA está conectada à rede principal – configurada como sendo uma fonte de tensão trifásica equilibrada – no PAC por meio de uma chave seccionadora e posteriormente a um transformador elevador (0,38/13,8kV).

Figura 32 - Estrutura elétrica da MR utilizada nas simulações.



Fonte: Adaptado de (DAVIDSON MARQUES, 2023).

Cada RED presente na MR estudada possui valores nominais de operação. A Tabela 5 apresenta os parâmetros de cada recurso energético, do transformador, das linhas de distribuição e da MR no modo de operação ilhado.

Tabela 5 - Parâmetros dos RED da MR utilizada na simulação.

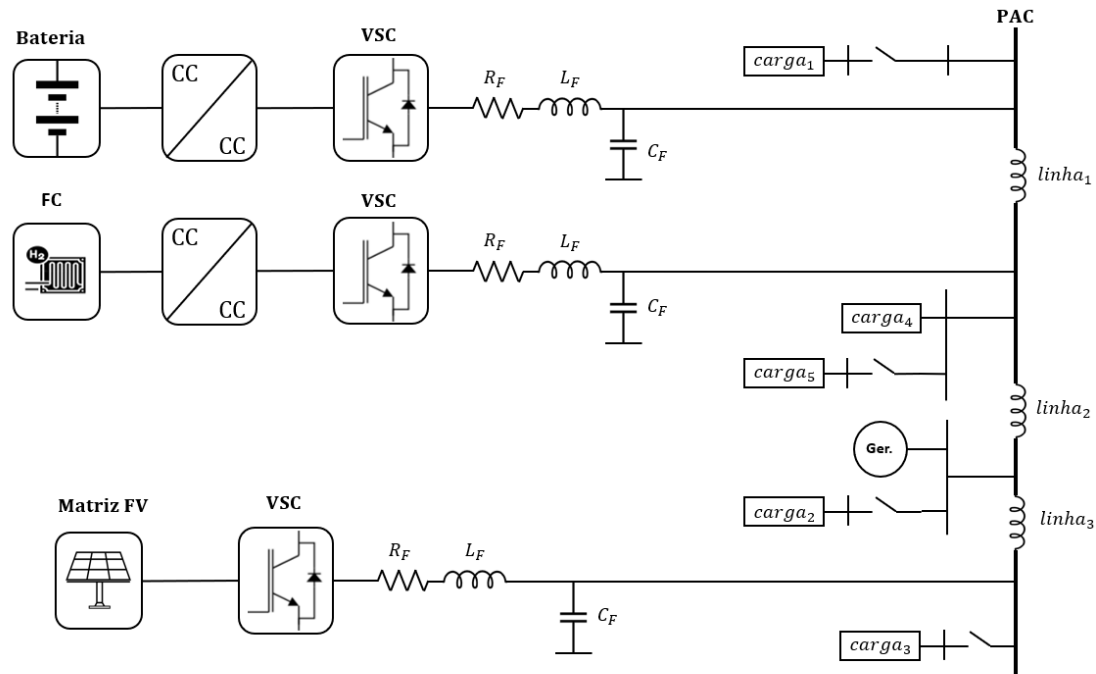
Elementos	Descrição	Valores (unidade)
Parâmetros da MR	Tensão nominal	380V
	Frequência nominal	60 Hz
RED	Gerador a diesel	50kVA
	FC (modelo PEM)	50kW (nominal)/120.4kW(máxima)
	Sistema FV	35.6 kWp (800W/m ²)
	BESS	50 kW

Elementos	Descrição	Valores (unidade)
Cargas	Carga 1	50 kW + j 10 kVar
	Carga 2	7.5 kW + j 0 kVar
	Carga 3	26.5 kW + j 5 kVar
	Carga 4	45 kW + j 2 kVar
	Carga 5	22.5 kW + j 3 kVar
Linha	L1 – 300 metros	R = 0.198 Ω/km X = 0.1089 Ω/km
	L2 – 200 metros	
	L3 – 100 metros	
Transformador	Nível de tensão	0,38/13,8kV
	Potência nominal	50kVA
	Reatância	6%

Fonte: Próprio autor.

Na estrutura da MR, conforme a Figura 32, observa-se RED que geram energia de forma CC, como o sistema FV, FC e BESS. Os RED CC necessitam de um sistema de condicionamento de energia para realizar a interface com os barramentos CA da MR, tema abordado na seção (2.3). A Figura 33 apresenta de forma mais detalhada a estrutura da MR com o sistema de condicionamento de energia, representado a partir dos conversores de potência.

Figura 33 - Unidades de condicionamento de energia da MR.



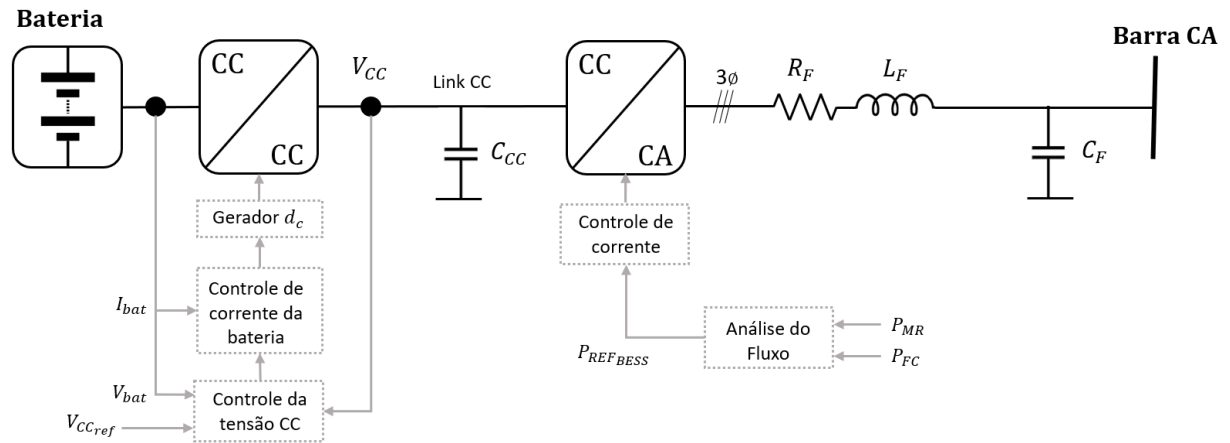
Fonte: Adaptado de (DAVIDSON MARQUES, 2023).

O sistema FV que compõe a MR é controlado por meio da energia presente no barramento CC, analisado particularmente na subseção (2.3.3). A geração FV na MR é representada como sendo uma fonte de energia não despachável, ou seja, não há

controle da potência injetada. A partir deste conceito, a potência que o sistema FV é capaz de fornecer para a MR depende do comportamento da irradiância solar (ROCABERT et al., 2012).

No BESS, conforme Figura 34, o controle do conversor CC/CC é realizado por uma malha de controle de tensão em cascata com a malha de controle de corrente, permitindo o controle da tensão do barramento CC e a carga/descarga da bateria. Já o controle do VSC do BESS é realizado através de uma malha de controle de corrente, de forma que a corrente de referência está relacionada à potência de referência do BESS. Neste trabalho, o BESS desempenhará a função de fornecer suporte ao funcionamento da FC na região de melhor eficiência. Partindo desta premissa, a potência de referência ($P_{REF_{BESS}}$) do BESS depende dos limites máximo e mínimo de potência da FC (P_{FC}) e da potência solicitada pela MR (P_{MR}).

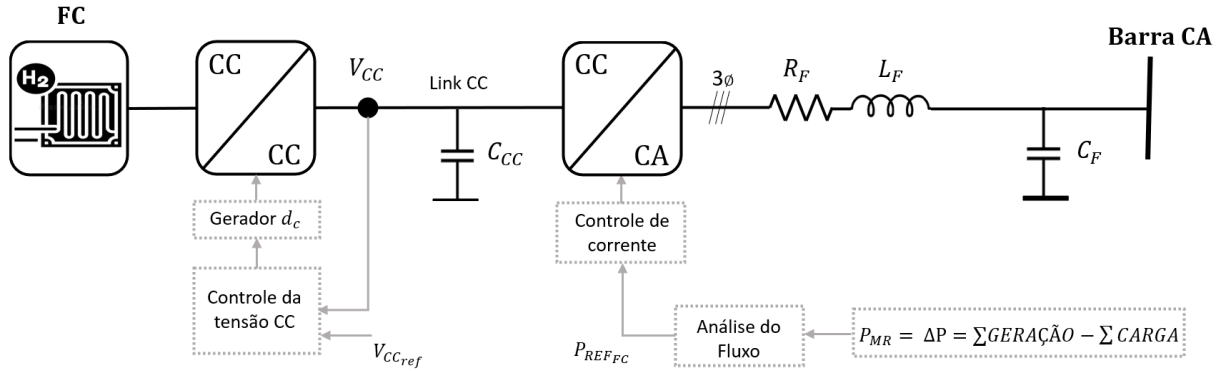
Figura 34 - Controle do BESS conectado à MR.



Fonte: Adaptado de (DAVIDSON MARQUES, 2023).

A Figura 35 apresenta a estrutura do controle para realizar a interface da FC com o barramento CA da MR. O controle está associado ao controle do conversor CC/CC, o qual é controlado através de uma malha de controle de tensão CC e, ao controle do VSC, controlado por uma malha de corrente. A corrente de referência para o controle do VSC baseia-se na potência de referência que a MR solicita para FC.

Figura 35 - Controle da FC conectado à MR.



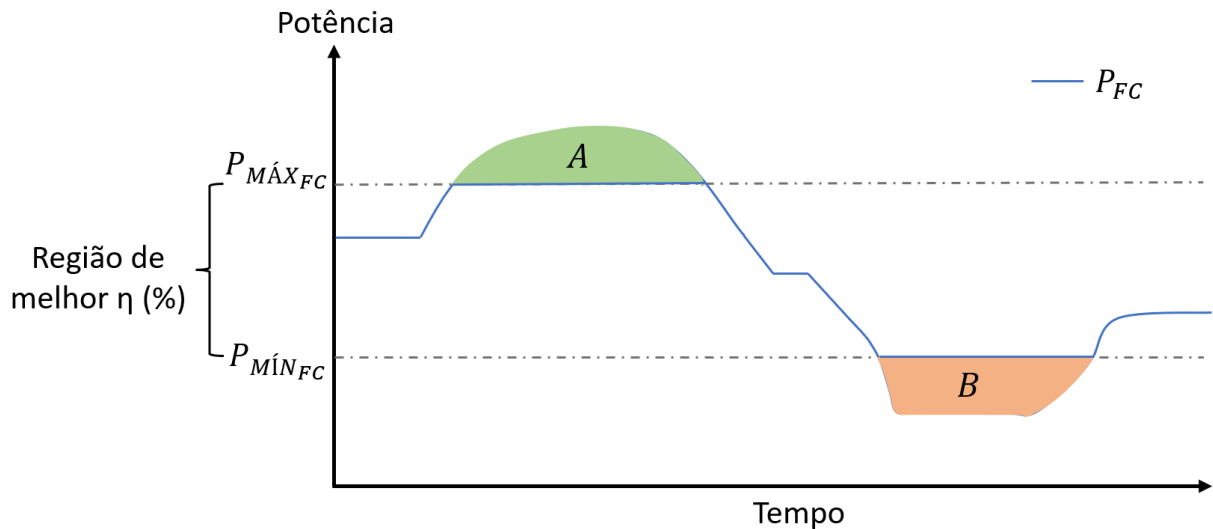
Fonte: Adaptado de (DAVIDSON MARQUES, 2023).

A potência de referência da FC (P_{REFFC}) depende do fluxo de potência da MR, ou seja, do somatório da geração de cada RED menos o somatório das cargas, conforme Equação (16). A contribuição da potência do BESS não será considerada na Equação (16), devido a sua função na MR, que está relacionada a proporcionar suporte ao funcionamento da FC. Dessa forma, o $\sum GERAÇÃO$ representa a soma das potências do gerador a diesel e do sistema FV.

$$P_{REFFC} = \sum GERAÇÃO - \sum CARGA \quad (16)$$

Como citado, a $P_{REFBESS}$ depende da potência da FC fornecida à MR. Para assegurar que a FC trabalhe na região de melhor eficiência (Figura 17) é necessário definir um ponto de potência máxima e mínima. O BESS irá atuar quando a potência solicitada para FC ultrapassar os limites máximo e mínimo estabelecidos. De acordo com a Figura 36, caso a potência da FC ultrapasse o valor máximo, o BESS será acionado para injetar na MR a diferença entre a potência solicitada a FC e a potência máxima permitida (região A da Figura 36). No outro modo, quando a potência solicitada pela MR for menor do que o valor mínimo permitido na FC, o BESS irá absorver essa diferença com objetivo de manter o equilíbrio da MR (região B da Figura 36).

Figura 36 - Modo de operação do BESS.

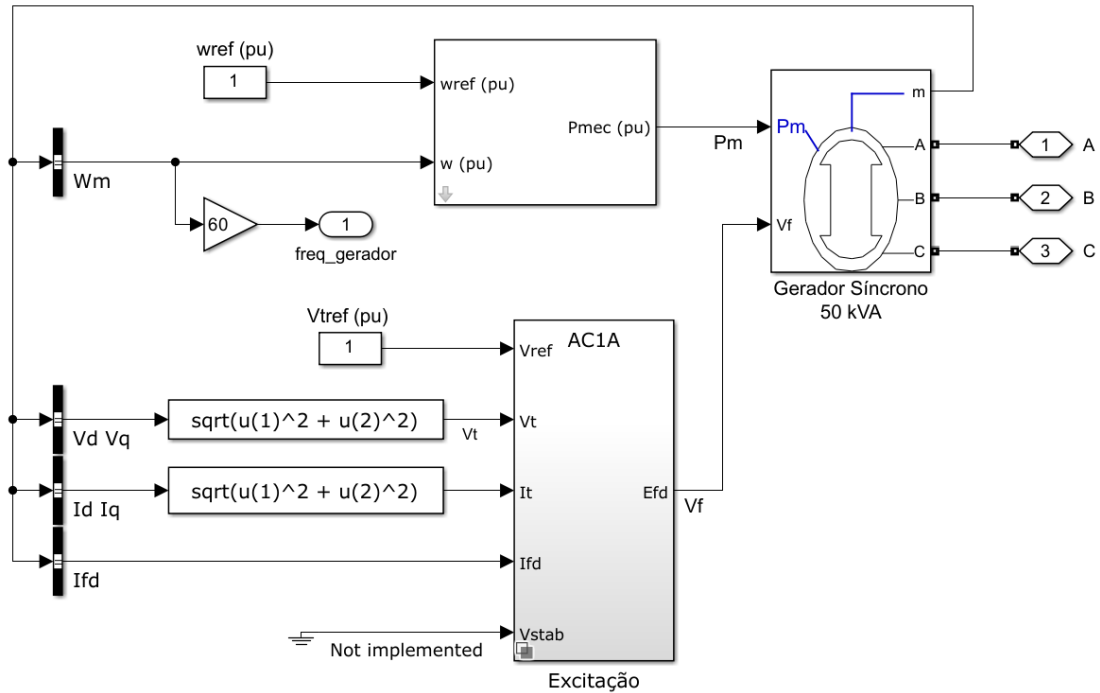


Fonte: Próprio Autor.

O sistema de controle dos RED CC permite o funcionamento adequado de cada fonte considerando suas particularidades. O sistema de controle para a geração FV e BESS foi implementado através de controladores PI com o ajuste dos parâmetros realizado em (DAVIDSON MARQUES, 2023). Para o controle da FC, foi utilizado um controlador PID e o ajuste dos parâmetros foi feito por meio da ferramenta *PID Tuned App* existente no *Matlab®/Simulink®*.

Definida a metodologia de operação dos RED em CC, a estrutura da MR também é formada com recurso energético em CA, representado pelo gerador a diesel, que exerce a função de estabelecer a tensão e a frequência da MR. O comportamento do gerador a diesel foi implementado a partir do bloco “*Synchronous Machine pu Standard*” presente na ferramenta computacional *Matlab®/Simulink®*. A Figura 37 apresenta o bloco que configura a dinâmica da máquina síncrona, sendo capaz de funcionar como gerador ou motor com base no valor de potência mecânica (P_m) aplicada ao terminal. Outra grandeza que modela o comportamento da máquina é a tensão (V_f), resultante do sistema de excitação da máquina.

Figura 37 - Modelo da Gerador Síncrono do Matlab/Simulink.



Fonte: Adaptado de (MATHWORKS, 2024c).

3.2 Estratégia de controle baseada máquina de estado (SM)

A estratégia de gerenciamento SM foi implementada analisando dois parâmetros, SoC da bateria e a potência da MR. O SoC da bateria é o parâmetro adotado como referência para permitir a descarga ou o carregamento da bateria. A potência da MR (ΔP) está associada à potência que a MR solicita da FC para manter o equilíbrio energético entre geração e carga.

Definido os parâmetros de entrada para técnica de gerenciamento SM, é fundamental determinar a região de operação de cada parâmetro. A restrição do SoC foi estabelecida em três faixas de operação: SoC_{baixo} , $SoC_{médio}$ e SoC_{alto} . O SoC_{baixo} é o valor mínimo de SoC que permite a descarga da bateria, evitando a profundidade de descarga. O $SoC_{médio}$ é a faixa de operação na qual a bateria pode atuar no modo de descarga e carregamento. Por fim, valores que ultrapassam o $SoC_{elevado}$, é a região em que a bateria não pode trabalhar no modo de carregamento.

A restrição de ΔP está associada aos valores máximo e mínimo de potência – baseado na curva de eficiência – que a FC é capaz de injetar na MR. Na condição a qual ΔP excede o limite máximo ou mínimo, a FC injeta, respectivamente, a potência

máxima e mínima preestabelecida. Caso o valor da potência ΔP mantenha-se entre o máximo e mínimo, a potência da FC será igual à potência solicitada pela MR.

Com base nas restrições de SoC e ΔP , foram implementadas as regras que indicam o estado de funcionamento da FC e BESS. A Tabela 6 apresenta nove estados e a descrição das regras para a estratégia SM.

Tabela 6 - Estados operacionais da estratégia SM para simulação.

Estado	Descrição da Regra
1	Se $SoC_{MÍN} < SoC < SoC_{MÁX}$ e $P_{MÍN_{FC}} < \Delta P < P_{MÁX_{FC}}$, $P_{FC} = \Delta P$
2	Se $SoC_{MÍN} < SoC < SoC_{MÁX}$ e $\Delta P \geq P_{MÁX_{FC}}$, $P_{FC} = P_{MÁX_{FC}}$ e $P_{BESS} = \Delta P - P_{MÁX_{FC}}$
3	Se $SoC_{MÍN} < SoC < SoC_{MÁX}$ e $\Delta P \leq P_{MÍN_{FC}}$, $P_{FC} = P_{MÍN_{FC}}$ e $P_{BESS} = -(P_{MÍN_{FC}} - \Delta P)$
4	Se $SoC \leq SoC_{MÍN}$ e $P_{MÍN_{FC}} < \Delta P < P_{MÁX_{FC}}$, $P_{FC} = \Delta P$
5	Se $SoC \leq SoC_{MÍN}$ e $\Delta P \geq P_{MÁX_{FC}}$, $P_{FC} = \Delta P$
6	Se $SoC \leq SoC_{MÍN}$ e $\Delta P \leq P_{MÍN_{FC}}$, $P_{FC} = P_{MÍN_{FC}}$ e $P_{BESS} = -(P_{MÍN_{FC}} - \Delta P)$
7	Se $SoC \geq SoC_{MÁX}$ e $P_{MÍN_{FC}} < \Delta P < P_{MÁX_{FC}}$, $P_{FC} = \Delta P$
8	Se $SoC \geq SoC_{MÁX}$ e $\Delta P \geq P_{MÁX_{FC}}$, $P_{FC} = P_{MÁX_{FC}}$ e $P_{BESS} = \Delta P - P_{MÁX_{FC}}$
9	Se $SoC \geq SoC_{MÁX}$ e $\Delta P \leq P_{MÍN_{FC}}$, $P_{FC} = \Delta P$

Fonte: Próprio autor.

Os estados operacionais 1, 2, e 3 resultam no funcionamento da FC na região de melhor eficiência, ou seja, os limites máximo e mínimo de potência da FC não são ultrapassados. Para complementar, também é necessário atender a restrição $SoC_{MÍN} < SoC < SoC_{MÁX}$, condição que permite o BESS trabalhar nos dois modos de operação, carga e descarga. Esta restrição assegura que o BESS compensará o excesso ou déficit de energia quando a potência solicitada ultrapassar os limites de potência da FC.

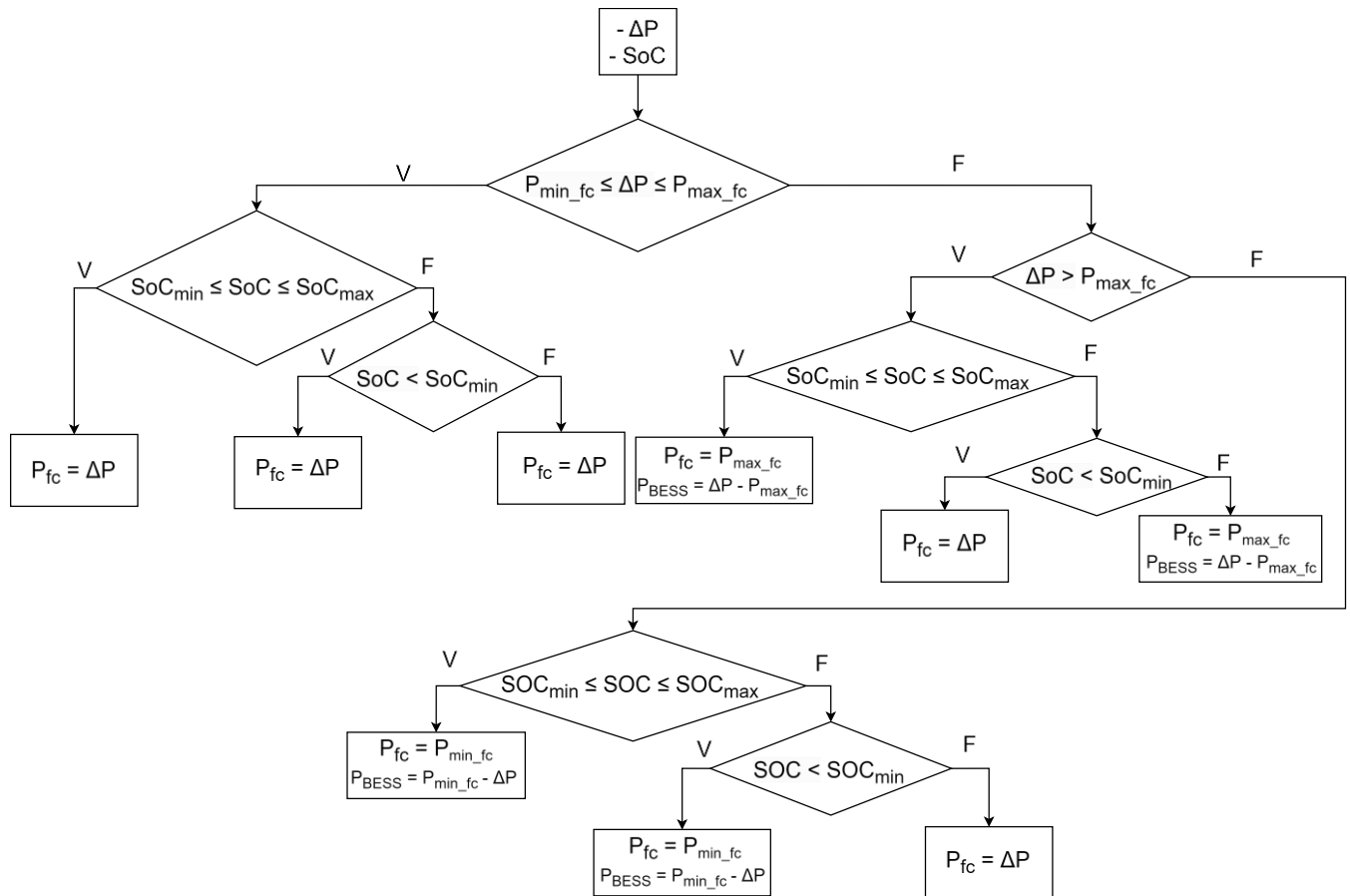
Nos estados operacionais do 4 ao 6, são definidas as restrições da condição de $SoC_{MÍN}$. A restrição de $SoC_{MÍN}$ não permite que o BESS entre no modo de descarga a partir do valor definido de $SoC_{MÍN}$, impedindo a profundidade de descarga na bateria. Dessa forma, o BESS não poderá injetar potência quando a potência solicitada pela MR exceder a potência máxima da FC ($\Delta P \geq P_{MÁX_{FC}}$).

Como o BESS não será capaz de fornecer energia, a FC irá injetar um valor de potência superior ao limite máximo, trabalhando em ponto de operação fora da região de melhor eficiência. A decisão de permitir a FC injetar potência acima do limite máximo está associada ao atendimento da carga presente na MR, independentemente do ponto de operação da FC.

Por fim, os estados 7, 8 e 9, que estão relacionados com a restrição de $SoC_{MÁX}$, condição na qual o BESS não será capaz de armazenar energia quando o valor do SoC for maior do que o $SoC_{MÁX}$. Nesta condição, a FC irá injetar uma potência menor do que $P_{MÍNFC}$, evitando o excesso de energia e mantendo o equilíbrio entre geração e consumo da MR.

As regras apresentadas na Tabela 6 estão ilustradas em forma de árvore de decisões na Figura 38. Cada modo de operação da FC é definido com base nas restrições de SoC e da potência solicitada pela MR.

Figura 38 - Árvore de decisões da estratégia SM.



Fonte: Próprio autor.

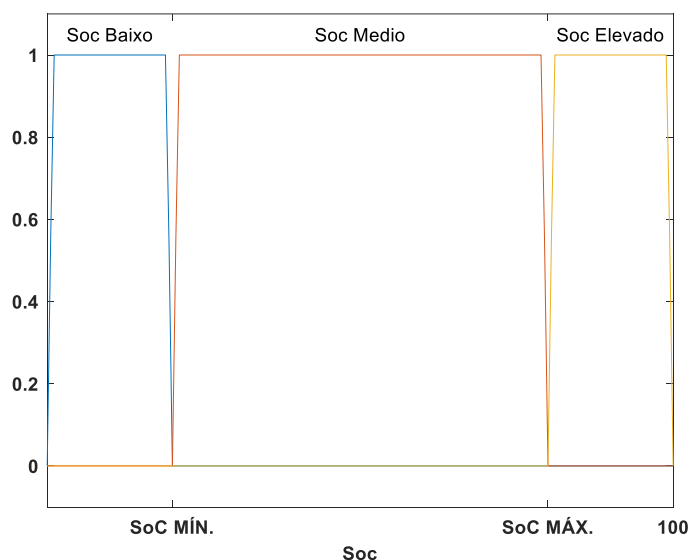
3.3 Estratégia de controle baseada em lógica fuzzy (LF)

A implementação da estratégia de gerenciamento baseada em *fuzzy* foi realizada por meio de duas variáveis de entrada, SoC e o fluxo de potência ΔP , assim como na técnica SM. Para realizar o gerenciamento de energia através da LF é fundamental definir a variável linguística e as funções de pertinência de cada variável de entrada.

Na Figura 39 está ilustrado as variáveis linguísticas da variável SoC – SoC_{baixo} , $SoC_{médio}$ e $SoC_{elevado}$ – e suas respectivas funções de pertinência com formato trapezoidal. A variável SoC possui um universo de discurso de 0 a 100% e os valores de $SoC_{MÍN}$ e $SoC_{MÁX}$ são referências para delimitar a região de trabalho de cada função de pertinência.

As funções de pertinência de cada variável linguística são representadas por um intervalo da faixa de operação do SoC : (1) SoC_{baixo} – situado entre 0 e $SoC_{MÍN}$, (2) $SoC_{médio}$ – situado entre $SoC_{MÍN}$ e $SoC_{MÁX}$ (3) $SoC_{elevado}$ – situado entre o $SoC_{MÁX}$ e 100%.

Figura 39 - Exemplo de funções de pertinência para SoC .



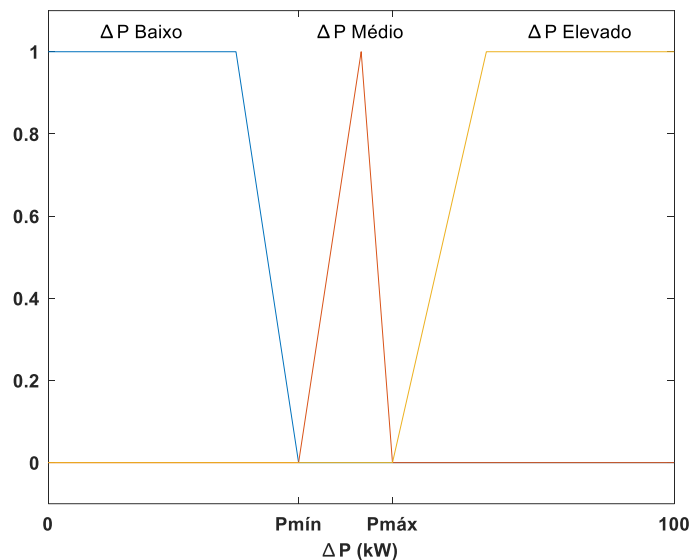
Fonte: Próprio autor.

De forma semelhante ao SoC , é necessário determinar as variáveis linguísticas e as funções de pertinência para variável ΔP . No entanto, o universo de discurso para ΔP está associada a faixa de potência solicitada pela MR, limitada a partir do balanço

entre geração e carga. A Figura 40 ilustra o comportamento da variável de entrada ΔP .

Conforme Figura 40, as variáveis linguísticas de ΔP são nomeadas de ΔP Baixo, ΔP Médio e ΔP Elevado, relacionadas respectivamente aos seus intervalos de potência, 0 a $P_{mín}$, $P_{mín}$ a $P_{máx}$ e $P_{máx}$ a 100kW. O limite de 100kW foi determinado considerando um cenário crítico de geração na MR, de forma que as contribuições do gerador a diesel e a FC seriam suficientes para atender todas as cargas.

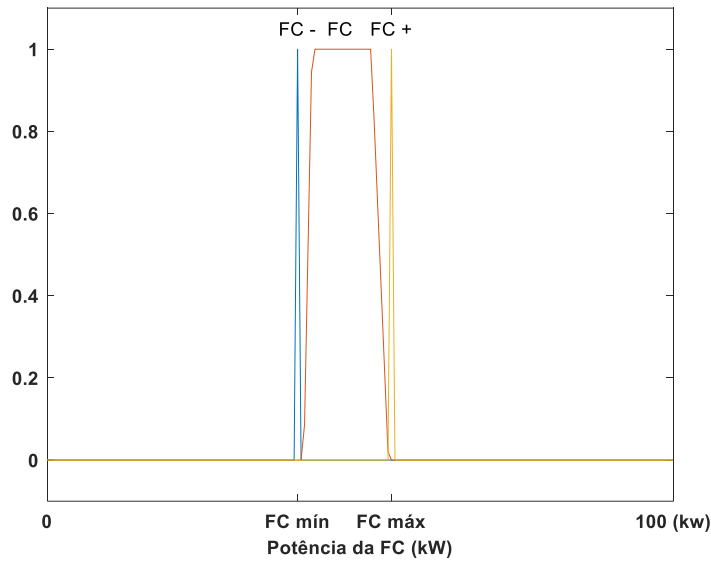
Figura 40 - Exemplo de funções de pertinência para ΔP .



Fonte: Próprio autor.

Após definir as variáveis de entrada da estratégia *fuzzy*, deve-se avaliar o comportamento da variável de controle do sistema. Como o gerenciamento de energia busca a melhor região de eficiência da FC, a variável de controle do sistema será a potência da FC, denominada P_{FC} . A Figura 41 apresenta as variáveis linguísticas e três funções de pertinência para ilustrar o comportamento potência P_{FC} .

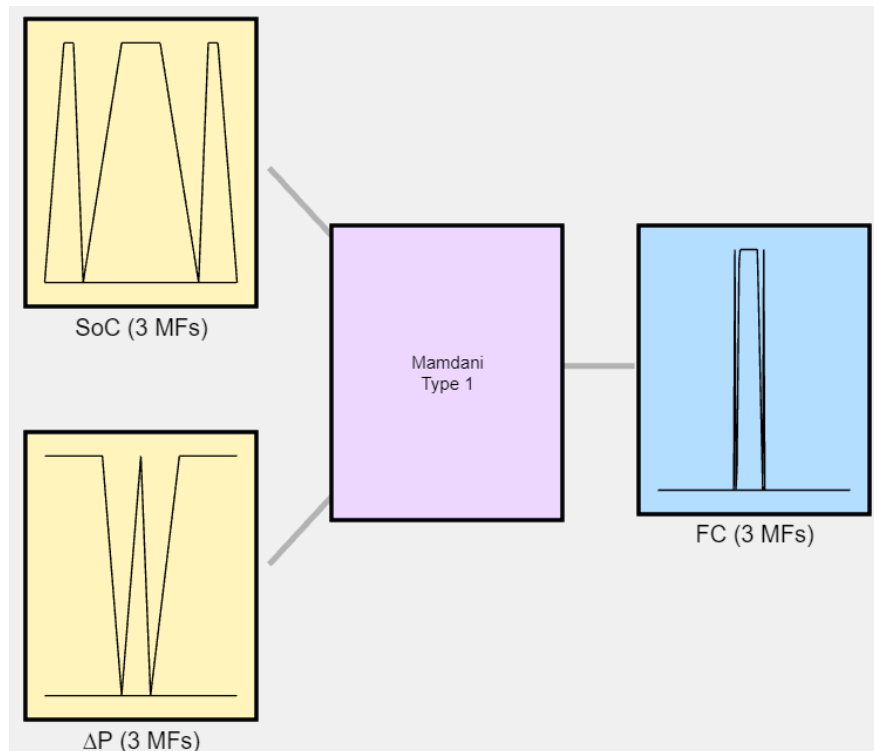
Figura 41 - Exemplo de funções de pertinência para P_{FC}



Fonte: Próprio autor.

Cada função de pertinência da P_{FC} está vinculada a um determinado intervalo do universo de discurso. As funções $FC_{mín}$ e $FC_{máx}$ são definidas, respectivamente, como sendo a potência mínima e máxima que a FC é capaz de fornecer à MR. Já a FC é definida como sendo a faixa de potência permitida para FC trabalhar na região de melhor eficiência.

Para analisar o comportamento da estratégia de gerenciamento *fuzzy* é importante determinar as regras que serão a base do sistema de inferência para LF. O sistema de inferência – representado pelo modelo Mamdani – permite avaliar qual o valor de saída (P_{FC}) obtido a partir das duas variáveis de entrada (SoC e ΔP). A Figura 42 apresenta a estrutura do sistema *fuzzy* implementado no *Matlab*® através da função ‘*fuzzyLogicDesigner*’.

Figura 42 - Estrutura do sistema *fuzzy*.

Fonte: (MATHWORKS, 2024d).

A função ‘*fuzzyLogicDesigner*’ apresenta em sua estrutura um sistema denominado *rule inference*, conforme a Figura 42. O sistema *rule inference* – sistema de inferência de regras – fornece ao projetista a capacidade de visualizar o valor de saída (P_{CF}) resultante da combinação dos valores de entrada (SoC e ΔP). A análise realizada pelo sistema de inferência de regras é determinada a partir da base de regras do sistema de gerenciamento *fuzzy*.

Para ilustrar o modo de funcionamento do sistema de inferência de regras, a Tabela 7 apresenta a base de regras da estratégia *fuzzy* – determinada através das restrições da MR – enquanto a Figura 43 exibe a interface do *rule inference*. A Tabela 7 é formada a partir de três regras, que caracterizam o comportamento do SoC e ΔP , consequentemente, definem a saída do sistema *fuzzy*. A Tabela 7 exemplifica o funcionamento da LF considerando três regras de funcionamento apenas para o $SoC_{médio}$.

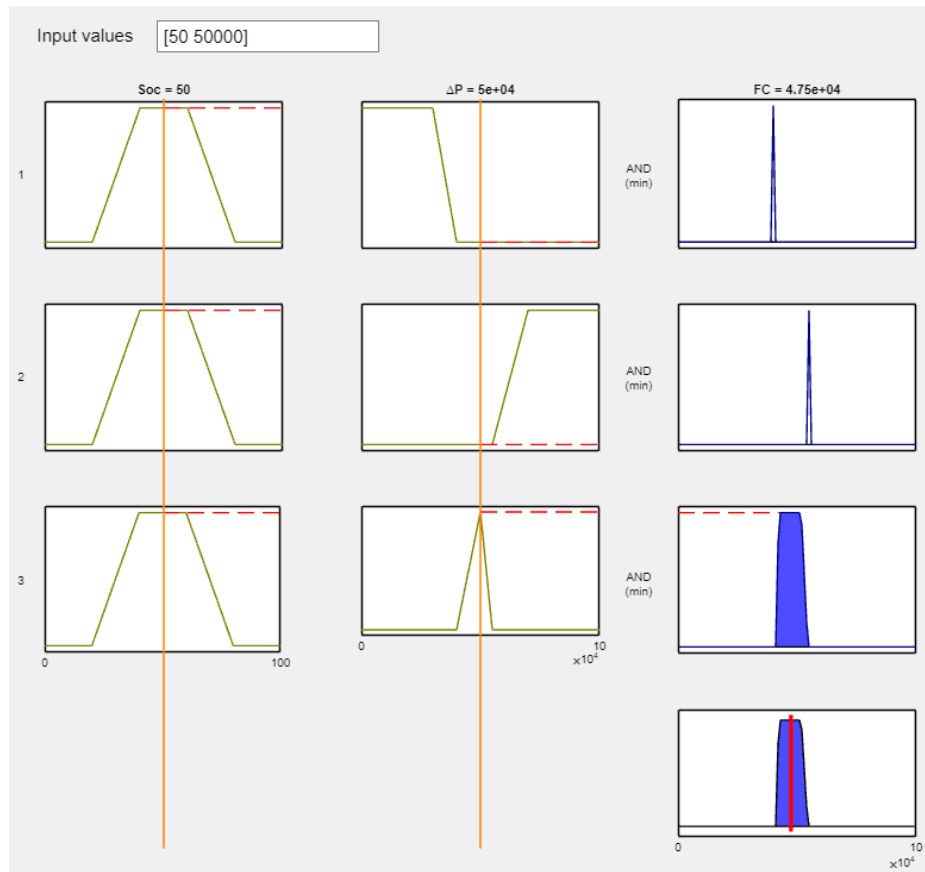
Tabela 7 - Exemplos de regras para o sistema de inferência.

Nº	Regra
1	Se SoC é SoC _{Médio} e ΔP é $\Delta P_{Médio}$, então $P_{FC} = FC$
2	Se SoC é SoC _{Médio} e ΔP é ΔP_{Baixo} , então $P_{FC} = FC-$
3	Se SoC é SoC _{Médio} e ΔP é $\Delta P_{Elevado}$, então $P_{FC} = FC+$

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 43, o sistema *rule inference* avalia o comportamento da saída a partir das entradas. Observa-se que a definição do valor da saída é realizada a partir da ponderação de cada entrada no intervalo de análise. Para exemplificar, o valor das entradas SoC e ΔP são, respectivamente, 50% e 50kW. Nesta condição de SoC, a bateria pode carregar ou descarregar, enquanto a potência solicitada ΔP (50kW) está situada dentro da faixa de operação da FC. Com estes valores de entrada, a ponderação do sistema *fuzzy* define uma potência injetada pela FC de 47,5kW. Desta forma, a FC pode injetar a potência ΔP operando na região de melhor eficiência.

Figura 43 - Sistema de inferência do sistema fuzzy.



Fonte: (MATHWORKS, 2024d).

A forma das funções de pertinência (trapezoidal, triangular, sinusoidal etc.) e a base de regras para o gerenciamento de energia baseado em *fuzzy* são determinadas de forma empírica. No trabalho, foi realizada uma análise sobre a variação das funções de pertinência e seus respectivos intervalos, permitindo avaliar o melhor cenário de operação. Além disso, a base de regras que gerou o melhor resultado para o gerenciamento baseado em *fuzzy* será apresentada no capítulo 4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será apresentado o comportamento dos RED inseridos na MR operando no modo ilhado. Para avaliar o desempenho da FC, considerou-se um cenário de operação com a presença de perturbações na MR como a variação de carga e a variação de geração fotovoltaica. A partir destas perturbações, foi avaliado a eficiência e o consumo de oxigênio e hidrogênio da FC, o estado operacional – carga e descarga – do BESS e grandezas elétricas (tensão e corrente).

No cenário de operação da MR em estudo, foi avaliado a performance de cada estratégia de gerenciamento de energia: máquina estado e *fuzzy*. Tratando-se da estratégia baseada em *fuzzy*, foi feita uma análise relacionada à variação do sistema *fuzzy* (geometria da função de pertinência e intervalo da variável). Para cada estratégia de gerenciamento de energia, foi avaliado o fluxo de potência entre os recursos da MR, o comportamento dos controles para realizar a interface dos RED e os parâmetros elétricos. Por fim, realizou-se uma análise comparativa da eficiência e consumo de oxigênio e hidrogênio da FC para cada estratégia.

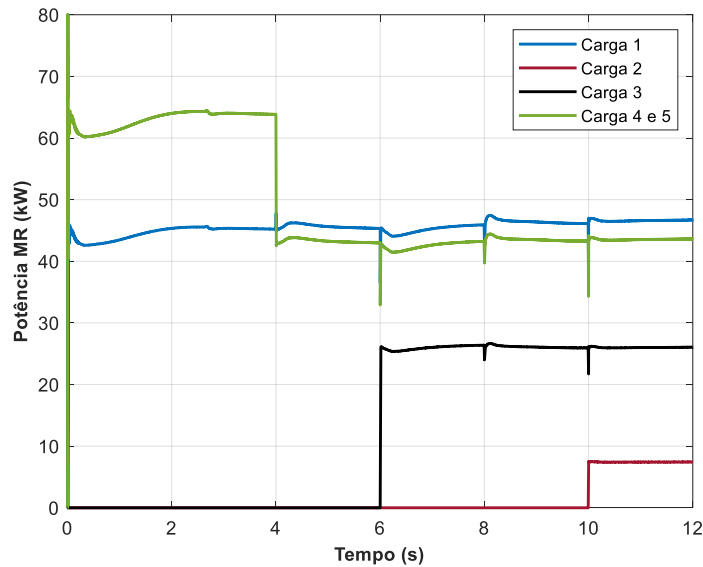
4.1 Cenário de operação da Microrrede

Como citado, o cenário de operação considera variações de carga e geração FV na MR (Figura 32), a qual trabalha no modo ilhado. O cenário de operação avaliou 12 segundos de simulação no *Matlab®/Simulink®* e as perturbações na MR foram definidas da seguinte forma:

- Em $t = 2,65$ segundos de simulação, a potência do sistema FV aumenta de 31kWp para 35,6kWp;
- Em $t = 4$ segundos, a demanda da MR sofre uma redução decorrente da desconexão da carga 5, ou seja, reduz a carga da MR em 22,5kW;
- Em $t = 6$ segundos, a potência solicitada pela MR aumenta em 26,5kW com a entrada da carga 3;
- Em $t = 8$ segundos, a potência do sistema FV reduz de 35,6kWp para 16,3kWp;
- Em $t = 10$ segundos, a potência solicitada pela MR aumenta mais uma vez com entrada da carga 2, acrescentando 7,5kW na carga total da MR.

Com base na definição dos instantes de variação da carga, a Figura 44 representa o perfil da carga por barra durante todo o período de simulação ($t = 12$ segundos). As cargas 4 e 5 estão conectadas no mesmo barramento CA, sendo representada pelo somatório.

Figura 44 - Perfil de carga da MR.



Fonte: Próprio autor.

Além dos instantes que definem o momento das perturbações, algumas premissas foram consideradas para o cenário de operação da MR. A primeira premissa está relacionada ao gerador a diesel, de forma que a potência máxima e mínima injetada devem respeitar, respectivamente, 100% e 40% da potência nominal do gerador.

Para atender essa premissa, foi necessário definir qual a contribuição da FC na MR. Sendo assim, analisando a restrição do gerador a diesel, a geração do sistema solar e a solicitação de carga, o fluxo de potência solicitada a FC foi ajustado com base na Equação (17). O valor de k foi escolhido para respeitar a dinâmica do gerador a diesel, que pode operar entre 40% e 100% da potência nominal. Desta forma, a potência solicitada para a FC corresponde a 60% do fluxo de potência da MR durante o cenário de operação.

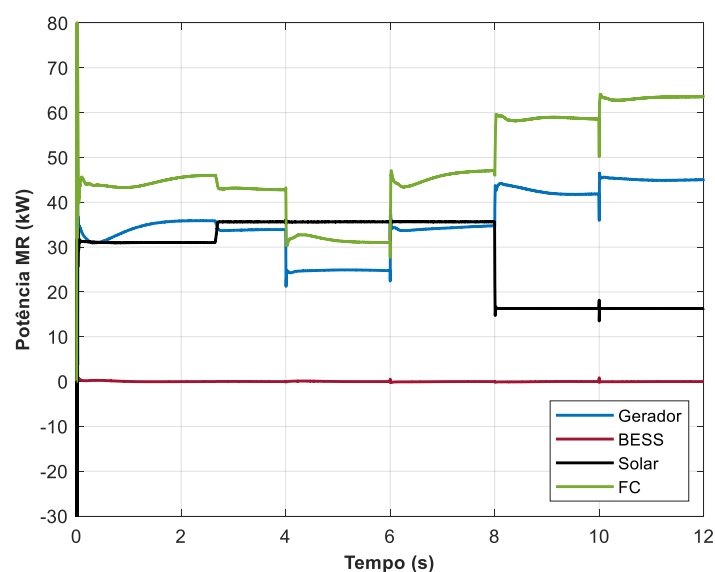
$$P_{ref_{FC}} = k \left(P_{FV} - \sum Carga \right) \quad (17)$$

4.1.1 Operação da MR sem gerenciamento de energia

Definido o cenário de operação para MR em estudo, primeiramente foi analisado o comportamento dos RED sem nenhuma técnica de gerenciamento de energia implementada. A Figura 45 apresenta a contribuição de cada recurso para atender a carga da MR. Observa-se que a potência do gerador a diesel está na faixa de operação permitida, enquanto a contribuição de geração do sistema FV está de acordo com a potência do arranjo escolhido e as perturbações aconteceram nos instantes $t = 2,65s$ (aumento de geração FV) e $t = 8s$ (diminuição de geração).

Como no cenário de operação não foi implementado nenhuma estratégia de gerenciamento de energia para FC, a contribuição de potência que a FC pode injetar na MR está limitada a potência máxima da FC. Em relação ao BESS, a potência injetada ou absorvida para este cenário é zero, pois a FC pode trabalhar em uma faixa de potência maior, sendo capaz de atender o consumo da MR sem utilizar o BESS. Como a geração solar é uma fonte não despachável, o valor de potência injetada na Figura 45 está associado ao comportamento da irradiância e a configuração do sistema. Já o gerador a diesel, respeitou os limites operacionais de 40 a 100% de sua potência nominal, contribuindo para o equilíbrio de potência na MR.

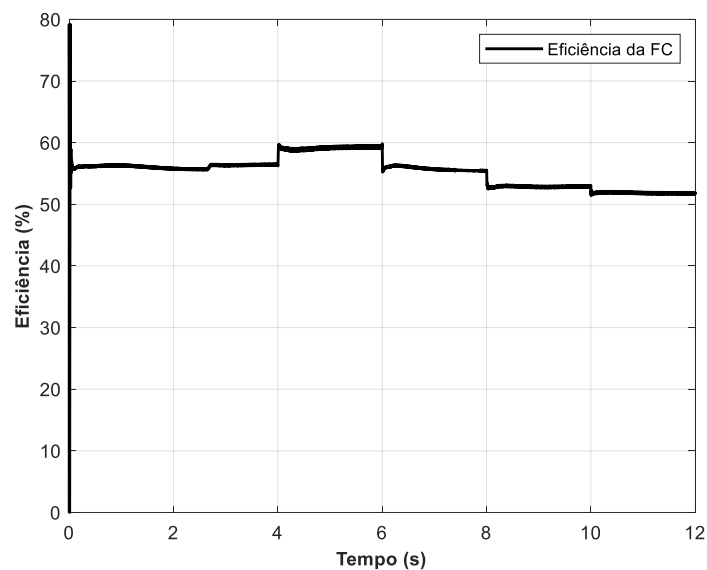
Figura 45 - Fluxo de potência da MR sem gerenciamento.



Fonte: Próprio autor.

Apresentado a contribuição de potência de cada recurso da MR, será avaliado o comportamento dos parâmetros da FC durante o cenário de operação. Do ponto de vista da FC, a Figura 46 apresenta o comportamento da eficiência da célula durante o período de simulação. Foi observado, na Figura 46, que a eficiência da FC possui um valor inicial de 56%, aumenta para aproximadamente 60% e posteriormente reduz para o valor de 52%. Ao analisar a potência (Figura 45) e a eficiência da FC, nota-se que a eficiência da célula reduz a partir do momento em que a potência aumenta.

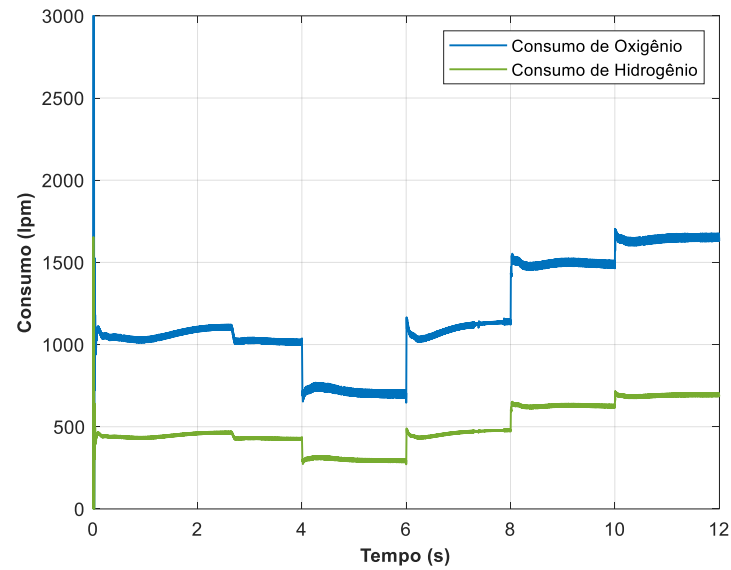
Figura 46 - Eficiência da FC sem gerenciamento.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 47 está apresentado o comportamento do consumo de oxigênio e hidrogênio da FC. Estas grandezas podem ser relacionadas com a eficiência e a potência injetada pela FC. Examinando a Figura 47, observa-se o aumento do consumo de oxigênio e hidrogênio da FC quando o a potência injetada aumenta. Com relação à eficiência (Figura 46), nota-se que a eficiência da célula reduz no momento de aumento de consumo do oxigênio e hidrogênio. Durante o período de simulação, o consumo de oxigênio e hidrogênio, respectivamente, foi 14.110 lpm e 5.929 lpm.

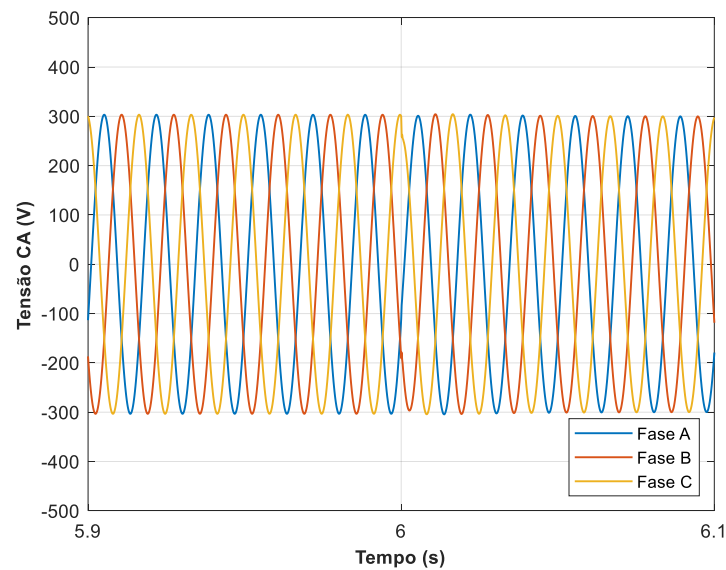
Figura 47 - Consumo de combustível da FC sem gerenciamento.



Fonte: Próprio autor.

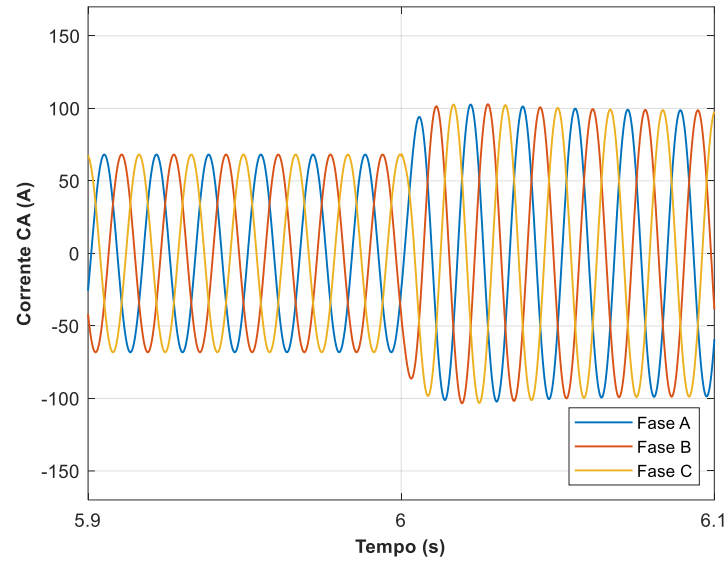
O comportamento da tensão e corrente trifásica da FC – na saída do VSC – estão apontadas nas Figura 48 e Figura 49, respectivamente. De acordo com a Figura 48 e Figura 49, foi reduzido o tempo de amostragem para melhor visualizar a forma de onda da tensão e corrente. O intervalo escolhido relaciona-se ao momento ($t = 6\text{s}$) de variação de potência da FC, mostrando uma pequena variação no perfil de onda da tensão nas fases *b* e *c*, enquanto a corrente aumenta para atender à solicitação de potência.

Figura 48 - Tensão na saída do VSC da FC sem gerenciamento.



Fonte: Próprio autor.

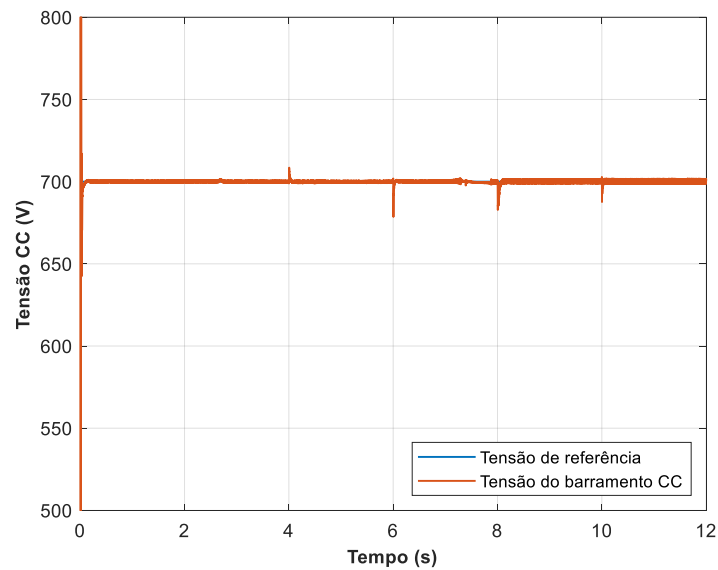
Figura 49 - Corrente na saída do VSC da FC sem gerenciamento.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 50 apresenta a dinâmica do barramento CC da FC. Com base na Figura 50, observa-se que a tensão CC está com o nível desejado para o sistema de condicionamento CC/CA. As variações na tensão CC – relacionadas com as variações de potência – foram controladas pela malha de controle de tensão do barramento CC da FC.

Figura 50 - Tensão do barramento CC da FC sem gerenciamento.



Fonte: Próprio autor.

4.1.2 Operação da MR com gerenciamento baseado em máquina de estado

Para avaliar o desempenho da técnica de gerenciamento baseada em SM, foi utilizado o mesmo cenário de operação. O funcionamento da estratégia SM considerou duas restrições:

(1) restrição de SoC: $SOC_{MÍN} = 20\%$; $SOC_{MÁX} = 80\%$ e $SOC_{INICIAL} = 45\%$ (valor utilizado no *Matlab/Simulink*);

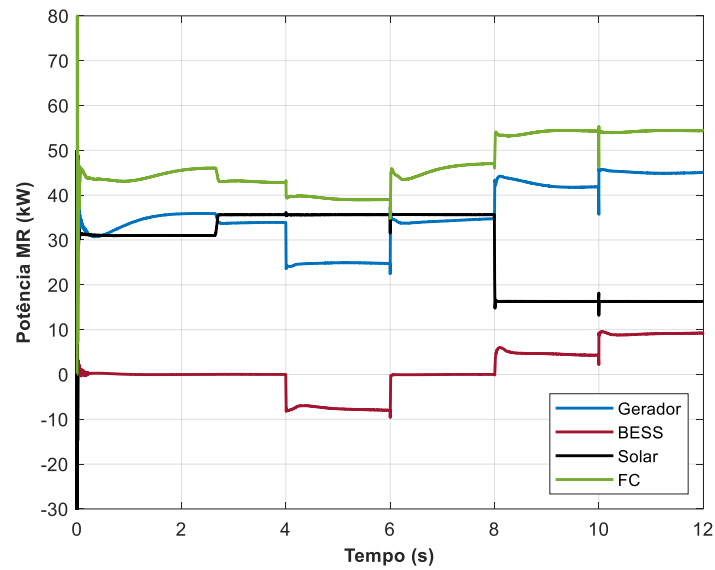
(2) restrição de potência (ΔP): $\Delta P_{MÍN} = 0.8 \cdot P_{nominal_{FC}}$ e $\Delta P_{MÁX} = 1.1 \cdot P_{nominal_{FC}}$ (restrição limitada pela potência máxima e mínima que a FC pode injetar operando na região de melhor eficiência).

Definida as restrições operacionais da estratégia SM, a Figura 51 apresenta a contribuição de cada RED. Observa-se que a potência da FC está limitada a restrição relacionada à região de melhor eficiência, permitindo a FC injetar valores de potência entre 40kW e 55kW. Como a faixa de potência da FC é limitada pela restrição, diferentemente da operação da seção (4.1.1), o funcionamento da MR requer outro recurso energético para contribuir no balanço de energia.

Com base nas premissas definidas na seção (3.1), o BESS será utilizado para fornecer suporte à FC na região de melhor eficiência. De acordo com a Figura 51, o BESS atuou nos instantes em que a restrição de potência da FC poderia ser violada, permitindo a operação da FC na faixa de 40 a 55 kW.

No instante $t = 4s$, a FC injetou um valor de potência associada à restrição de potência mínima (40kW), acarretando um excesso de energia na MR. Desta forma, o BESS foi acionado para absorver o excesso de energia, garantindo que a restrição de potência mínima seja respeitada e o equilíbrio de energia na MR seja mantido. Nos instantes $t = 8s$ e $t = 10s$, a FC injetou um valor de potência associada à restrição de potência máxima (55kW), ocasionando um déficit de energia na MR. Para garantir que todas as cargas sejam atendidas e a restrição de potência máxima da FC seja respeitada, o BESS injetou potência para suprir a energia solicitada pela MR.

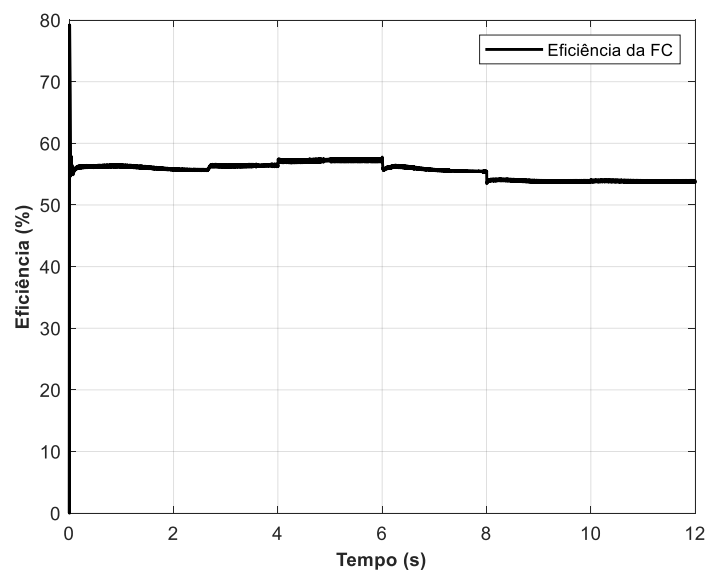
Figura 51 - Fluxo de potência da MR com EMS-SM.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 51, a potência injetada pelo sistema de geração solar é idêntica ao comportamento do sistema sem gerenciamento de energia, enquanto a potência do gerador a diesel respeitou os limites operacionais de 40 a 100% de sua potência nominal.

Figura 52 - Eficiência da FC com EMS-SM.

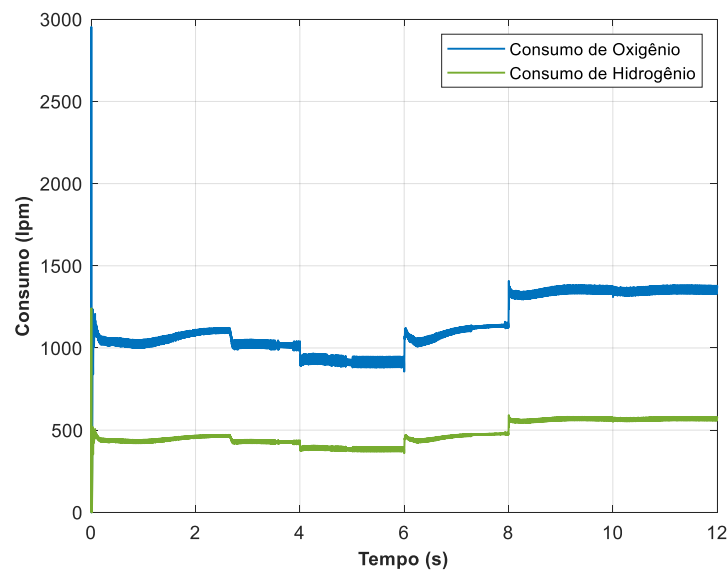


Fonte: Próprio autor.

A Figura 52 apresenta o comportamento da eficiência da FC com o EMS baseado na estratégia SM. Foi observado, na Figura 52, que eficiência da FC possui um valor inicial de 56%, aumenta para aproximadamente 57,5% e posteriormente reduz para o valor de 53,7%. O valor mínimo de eficiência obtido com a técnica de gerenciamento SM foi 1,7% melhor do que o cenário sem gerenciamento de energia.

Outra forma de visualizar a diferença na eficiência da FC operando com a estratégia SM e sem gerenciamento de energia é a partir do consumo de oxigênio e hidrogênio. A Figura 53 apresenta o comportamento do consumo de oxigênio e hidrogênio da FC operando com a estratégia SM. Durante o período de simulação, o uso do gerenciamento SM resultou um consumo de oxigênio 13.610 lpm, enquanto o hidrogênio consumido foi de 5.720 lpm.

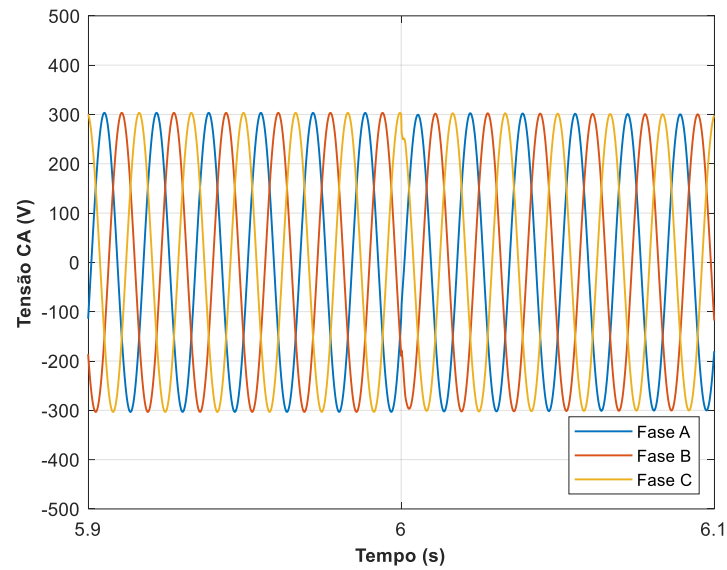
Figura 53 - Consumo da FC com EMS-SM.



Fonte: Próprio autor.

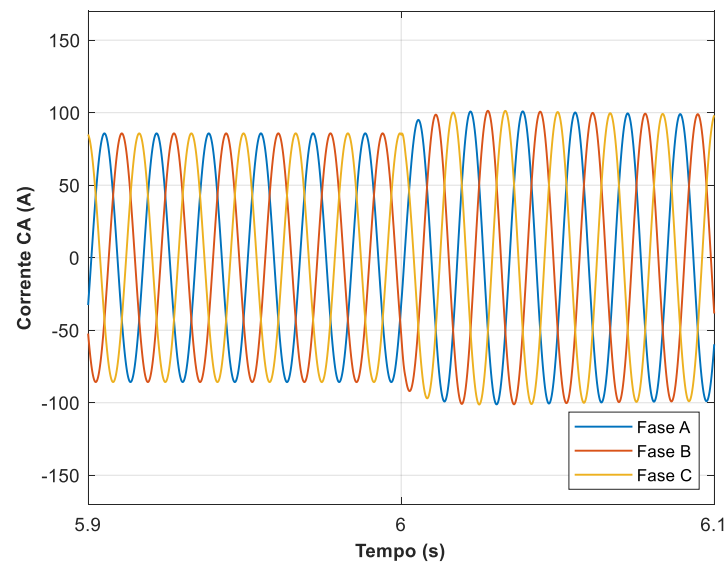
As Figura 54 e Figura 55 apresentam a tensão e corrente na saída do VSC da FC. A Figura 54 mostra o perfil de onda da tensão nas fases *a*, *b* e *c* durante um intervalo em que ocorre uma variação de potência, sendo possível observar uma pequena variação na amplitude da tensão fase *b*, mas não impacta na operação da FC. Na Figura 55, está ilustrado o perfil da corrente nas três fases, que varia de acordo com a solicitação de potência da FC. Ambos os perfis de onda não possuem ruídos significativos.

Figura 54 - Tensão na saída do VSC da FC com EMS-SM.



Fonte: Próprio autor.

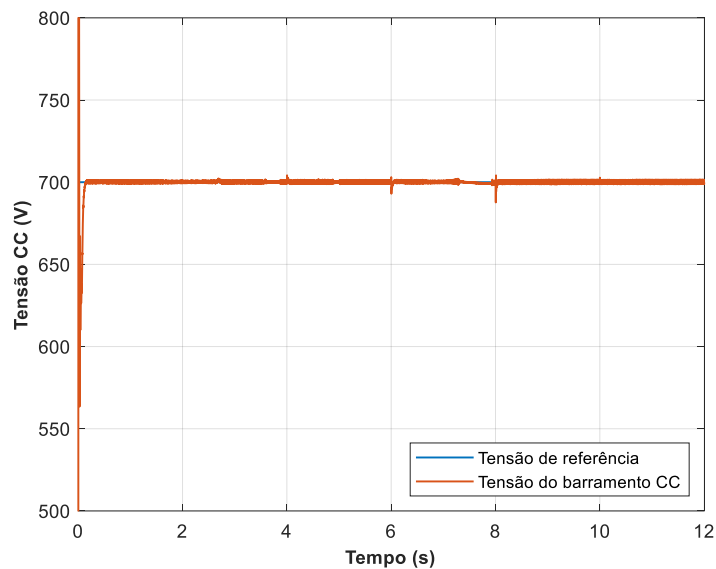
Figura 55 - Corrente na saída do VSC da FC com EMS-SM.



Fonte: Próprio autor.

Outra grandeza elétrica importante para o funcionamento da FC é a tensão do barramento CC, apresentada na Figura 56. Com base na Figura 56, observa-se que a tensão do barramento CC com o EMS baseado na estratégia SM foi controlada na ocorrência de variações na potência injetada pela FC.

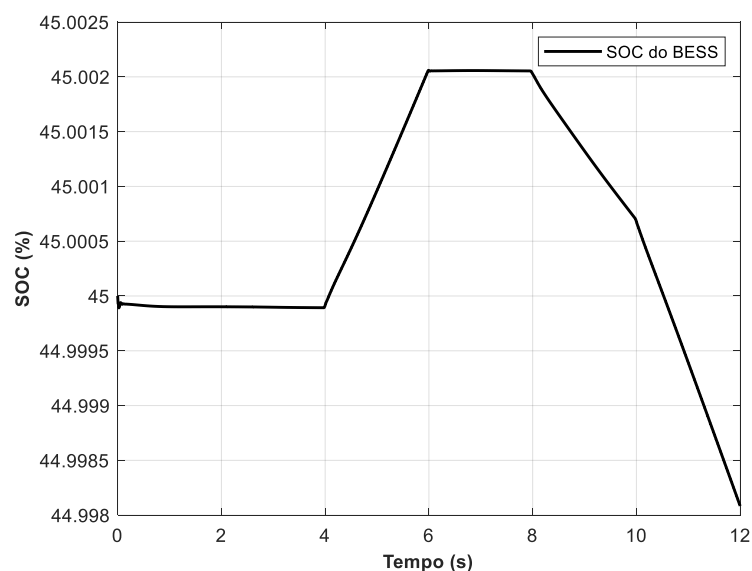
Figura 56 - Tensão do barramento CC da FC com EMS-SM.



Fonte: Próprio autor.

Como o BESS forneceu suporte na operação da FC, a Figura 57 apresenta o comportamento do SoC durante o cenário. No instante $t = 4s$, o SoC do BESS aumenta visto que está absorvendo energia da MR, enquanto a partir do instante $t = 8s$ o SoC do BESS diminui, pois está injetando potência na MR.

Figura 57 - SoC do BESS com EMS-SM.

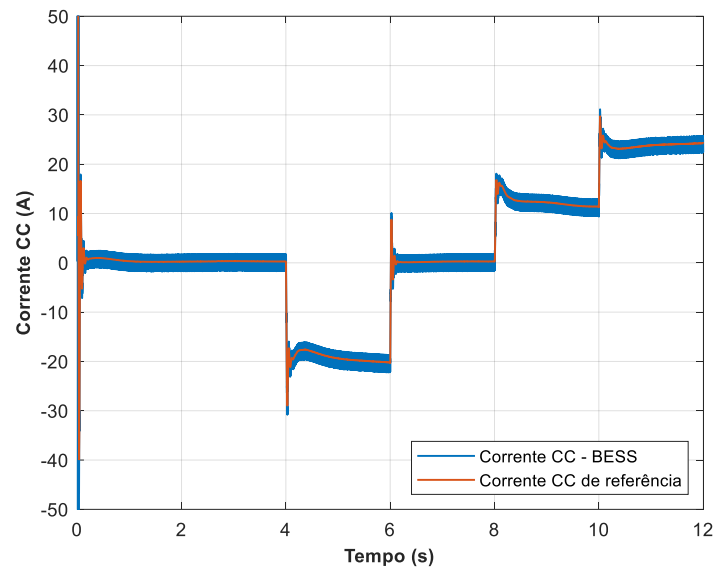


Fonte: Próprio autor.

A variação do SoC está relacionada com a corrente injetada pelo BESS. A Figura 58 apresenta o comportamento da corrente CC do BESS, validando que o aumento do SoC gera uma corrente de sinal negativo, ou seja, o BESS está sendo

carregado, caso contrário, a diminuição do SoC ocasiona em uma corrente de sinal positivo, associada ao instante que o BESS descarrega.

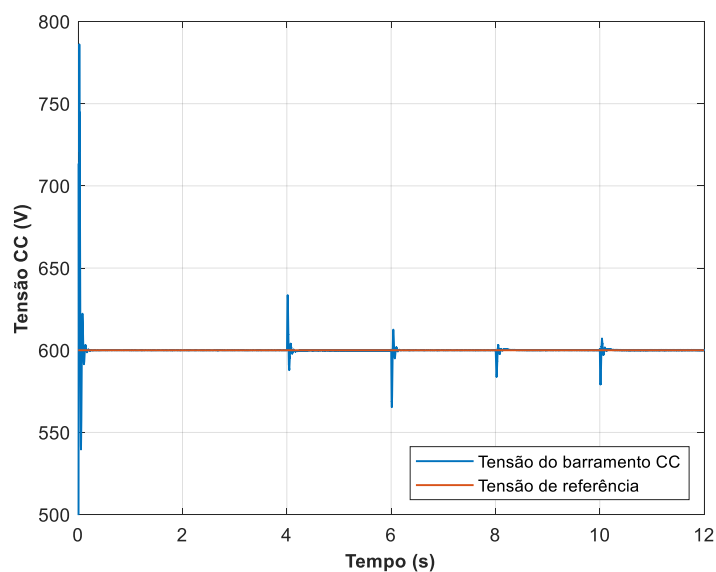
Figura 58 - Corrente CC do BESS com EMS-SM.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 59 apresenta o comportamento da tensão CC do barramento do BESS. Observa-se que o nível de tensão CC (600V) foi mantido durante o período de simulação, garantindo a tensão necessária para o sistema de condicionamento de energia do BESS.

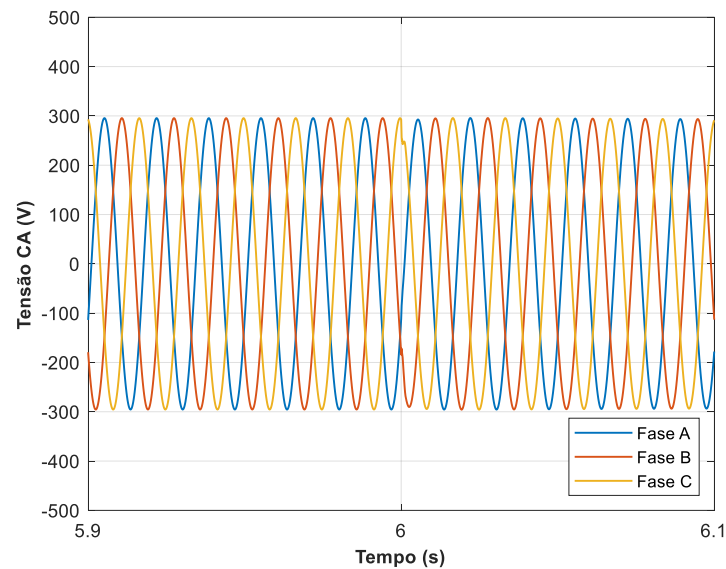
Figura 59 - Tensão do barramento CC do BESS com EMS-SM.



Fonte: Próprio autor.

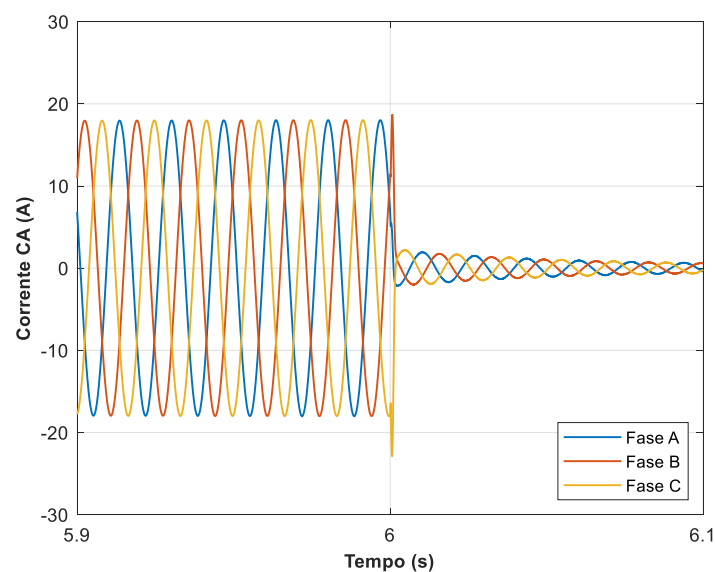
As Figura 60 e Figura 61 mostram o comportamento da tensão e corrente trifásicas na saída do VSC do BESS. A Figura 60 indica o perfil de onda da tensão durante um instante de variação de potência do BESS ($t = 6\text{s}$), a qual está estável mesmo com a perturbação. Na Figura 61 está presente o perfil de onda da corrente trifásica, onde no instante $t = 6\text{s}$ o BESS não contribui para o balanço de potência da MR, justificando corrente trifásica tender a zero.

Figura 60 - Tensão na saída do VSC do BESS com EMS-SM.



Fonte: Próprio autor.

Figura 61 - Corrente na saída do VSC do BESS com EMS-SM.



Fonte: Próprio autor.

4.1.3 Operação da MR com gerenciamento baseada na estratégia *fuzzy*

Outra estratégia de gerenciamento de energia utilizada para avaliar o desempenho da FC foi implementada com base na LF. As restrições para estratégia *fuzzy* foram definidas da mesma forma que está na seção (4.1.2). Para definir as restrições foi necessário avaliar os tipos das funções de pertinência (trapezoidal, triangular, gaussiana etc.), o número de funções (associada à variável linguística) e o intervalo de cada função.

A avaliação da melhor forma geométrica da função de pertinência para a estratégia *fuzzy* foi feita a partir da melhor resposta obtida em relação ao consumo de oxigênio e hidrogênio da FC. A Tabela 8 apresenta um resumo com as formas das funções de pertinência para variável de controle (potência da FC) e os resultados alcançados.

Tabela 8 - Testes para funções de pertinência para estratégia *fuzzy*.

Teste	Formas – Funções de Pertinência	Consumo de O ₂ (lpm)	Consumo de H ₂ (lpm)
1	Trapezoidal/Triangular	13520	5683
2	Trapezoidal/Triangular	13530	5684
3	Trapezoidal/Gaussiana	13470	5659
4	Trapezoidal/Triangular	13550	5692
5	Gaussiana	13440	5647
6	Gaussiana	13600	5713
7	Gaussiana	13560	5700
8	Trapezoidal	13540	5691
9	Trapezoidal	13430	5644
10	Trapezoidal	13440	5646
11	Triangular	13410	5636
12	Triangular	13540	5689

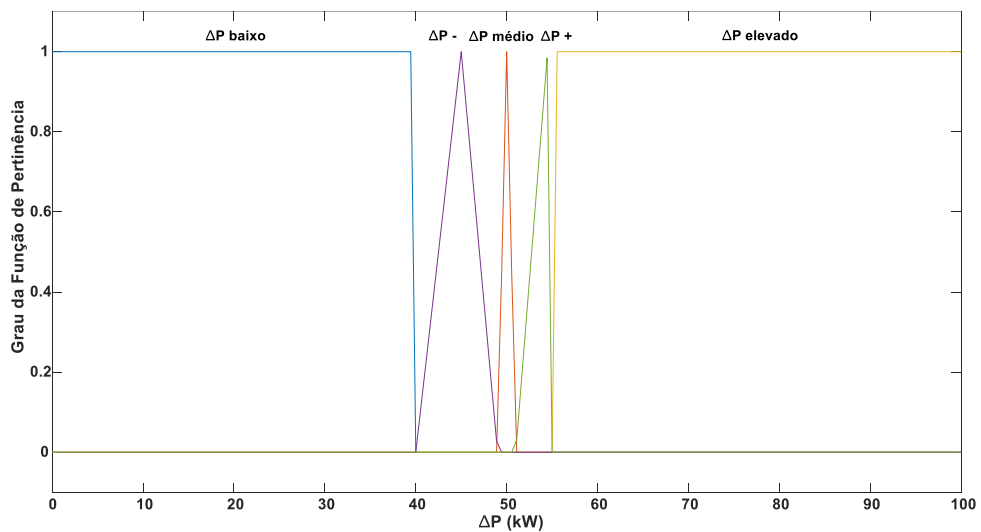
Fonte: Próprio autor.

Diante dos resultados apresentados na Tabela 8, o teste que gerou o melhor consumo de oxigênio e hidrogênio foi o 11. Para facilitar o entendimento, a Tabela 9 apresenta a base de regras do sistema *fuzzy* que gerou o menor consumo de combustível da FC. De acordo com a Tabela 9, as regras definem um valor de potência da FC com base nas variáveis de entradas *SoC* e ΔP .

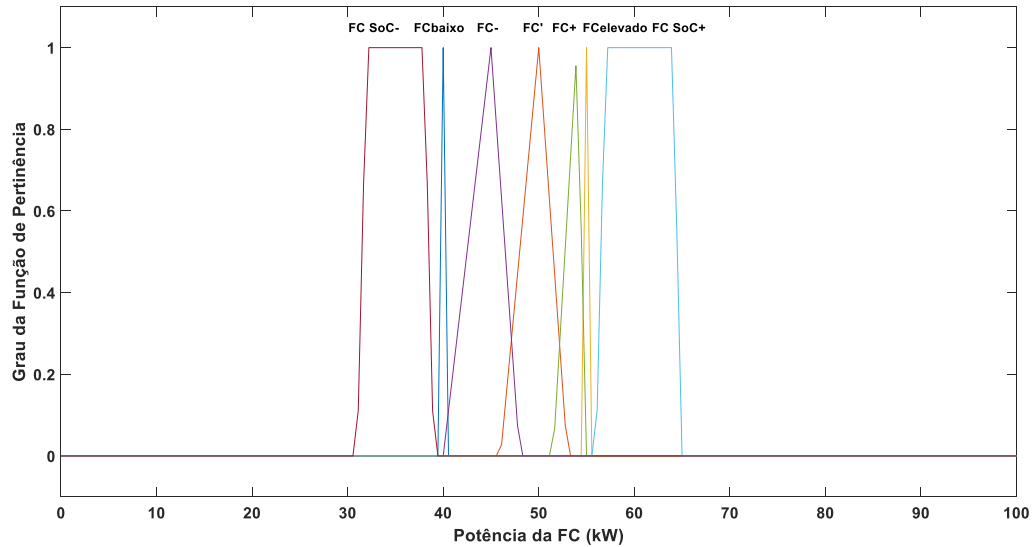
Figura 62 e Figura 63 ilustram, respectivamente, o número e as funções de pertinência selecionadas para entrada (ΔP) e a saída (P_{FC}) que resultaram no menor consumo de combustível da FC. Com relação a restrição do *SoC*, a entrada escolhida foi semelhante ao apresentado na seção (3.3).

Para facilitar o entendimento, a Tabela 9 apresenta a base de regras do sistema *fuzzy* que gerou o menor consumo de combustível da FC. De acordo com a Tabela 9, as regras definem um valor de potência da FC com base nas variáveis de entradas *SoC* e ΔP .

Figura 62 - Funções de pertinência ΔP para estratégia *fuzzy*.



Fonte: Próprio autor.

Figura 63 - Funções de pertinência da potência FC para estratégia *fuzzy*.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 9 - Regras do EMS com base na técnica *fuzzy*.

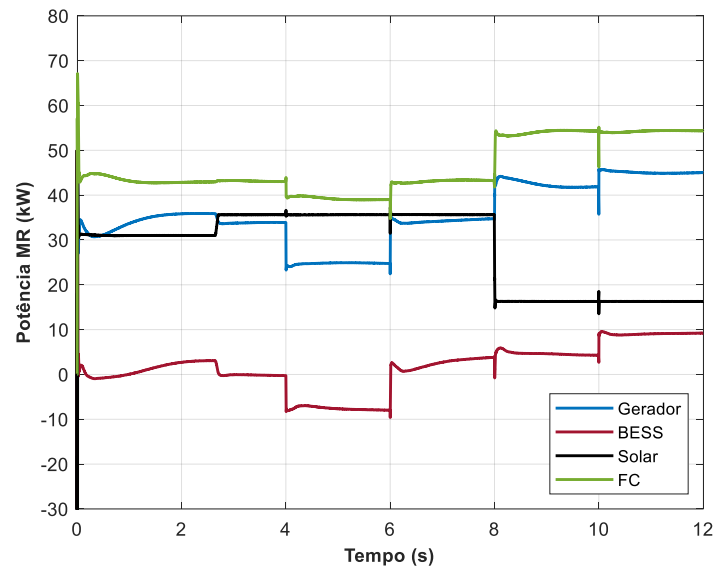
Regras	SoC _{Baixo}	SoC _{Médio}	SoC _{Elevado}
ΔP_{baixo}	FC baixo	FC baixo	FC SoC-
$\Delta P -$	FC-	FC-	FC-
$\Delta P_{médio}$	FC'	FC'	FC'
$\Delta P +$	FC+	FC+	FC+
$\Delta P_{elevado}$	FC SoC+	FC elevado	FC elevado

Fonte: Próprio autor.

A partir da forma geométrica escolhida das funções de pertinência, a Figura 64 apresenta o balanço de energia entre as fontes para o cenário com o gerenciamento de energia baseado em *fuzzy*. Com base da Figura 64, observa-se um comportamento semelhante ao da técnica SM, em que o BESS entrou em operação para garantir a restrição da FC ao trabalhar na região de melhor eficiência. Dessa forma, a FC injetou potência na faixa de 40 e 55kW, região de melhor eficiência.

Um ponto interessante que difere o gerenciamento baseado em *fuzzy* do gerenciamento baseado na técnica SM é a ponderação que a lógica *fuzzy* possui ao avaliar o comportamento de uma variável. Esta diferença foi observada no comportamento da potência do BESS, que nos intervalos entre $t = 0s$ a $t = 4s$ e $t = 6s$ a $t = 8s$, foi acionado para fornecer suporte à FC. Este comportamento está associado à ponderação que a lógica *fuzzy* realiza ao avaliar os valores de entrada do sistema de *rule inference*.

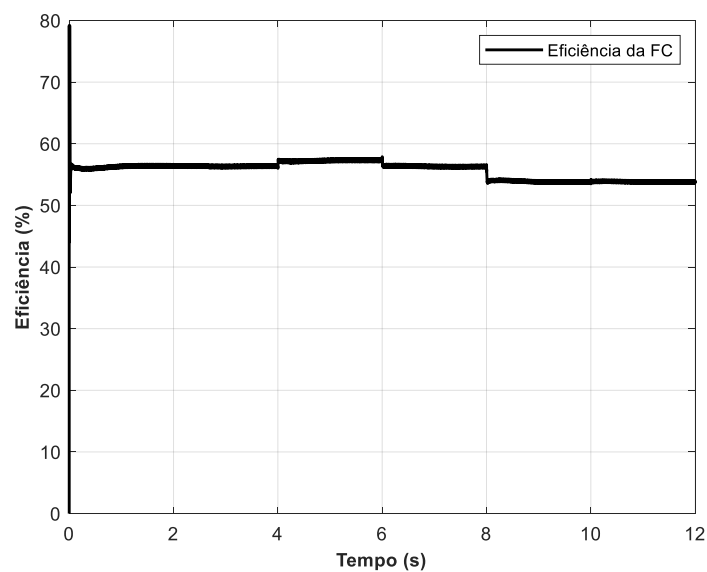
Figura 64 - Fluxo de potência da MR com EMS-fuzzy.



Fonte: Próprio autor.

Analisando o comportamento da FC, a Figura 65 mostra o a eficiência da FC com a estratégia de gerenciamento *fuzzy*. Foi observado, na Figura 65, que eficiência da FC possui um valor inicial de 56%, aumenta para aproximadamente 57% e posteriormente reduz para o valor de 53,9%. O valor mínimo de eficiência obtido com a técnica de gerenciamento *fuzzy* foi 1,9% melhor do que o cenário sem gerenciamento de energia.

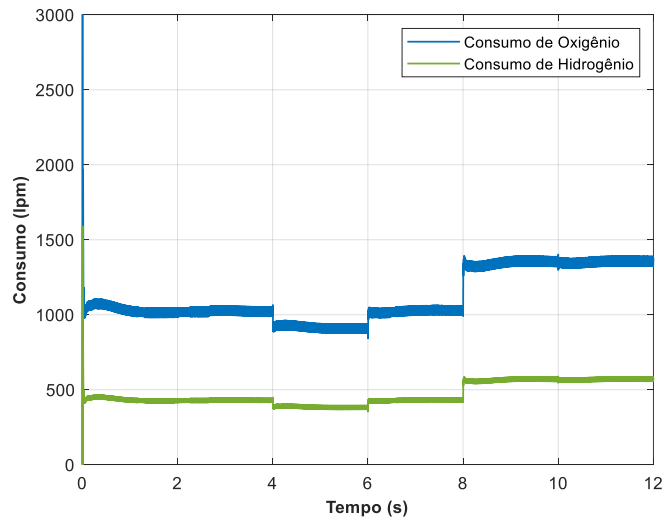
Figura 65 - Eficiência da FC com EMS-fuzzy.



Fonte: Próprio autor.

Com relação ao consumo de combustível, a Figura 66 apresenta o comportamento do consumo de oxigênio e hidrogênio da FC operando com a estratégia de gerenciamento *fuzzy*. Durante o período de simulação, o consumo de oxigênio foi de 13.410 lpm e o consumo de hidrogênio foi de 5.636 lpm.

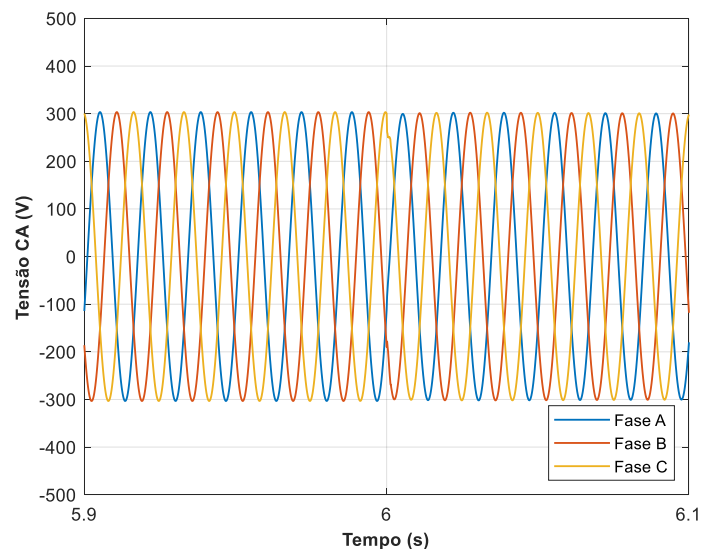
Figura 66 - Consumo de combustível da FC com EMS-*fuzzy*.



Fonte: Próprio autor.

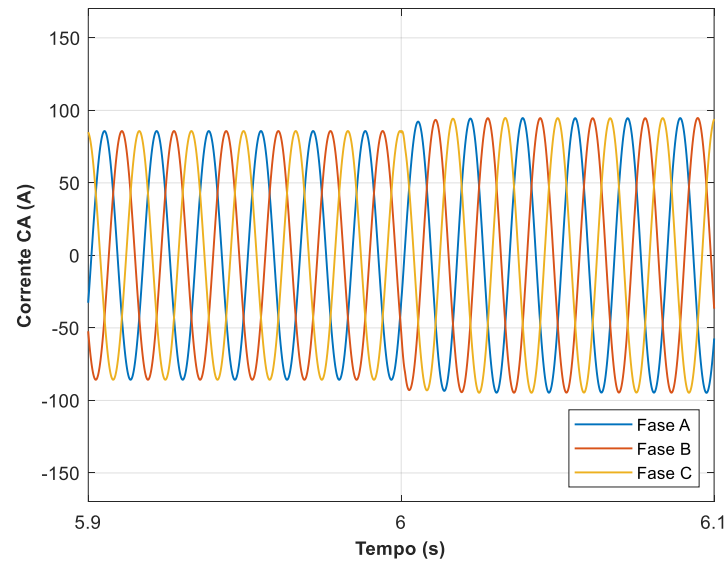
Na Figura 67 está presente o perfil de onda da tensão trifásica na saída do VSC da FC no instante $t = 6$ s, notando uma pequena variação no perfil da tensão que não afeta na operação da FC. Já a Figura 68, apresenta o perfil da corrente trifásica, variando conforme a potência injetada pela FC. Ambos os perfis de onda não possuem ruídos significativos.

Figura 67 - Tensão na saída do VSC da FC com EMS-*fuzzy*.



Fonte: Próprio autor.

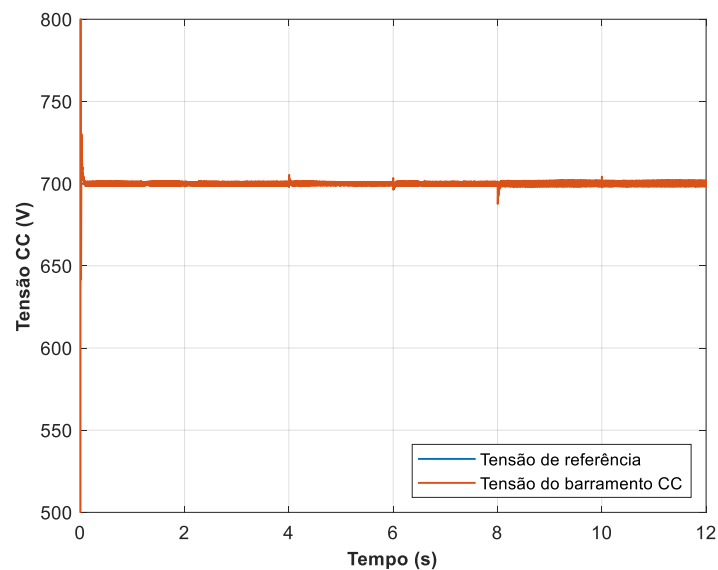
Figura 68 - Corrente na saída do VSC da FC com EMS-fuzzy



Fonte: Próprio autor.

Outra grandeza elétrica importante para o funcionamento da FC é a tensão do barramento CC, apresentada na Figura 69. Com base na Figura 69, observa-se que a tensão do barramento CC com o EMS baseado na estratégia *fuzzy* foi controlada na ocorrência de variações na potência injetada pela FC.

Figura 69: Tensão do barramento CC da FC com EMS-fuzzy.

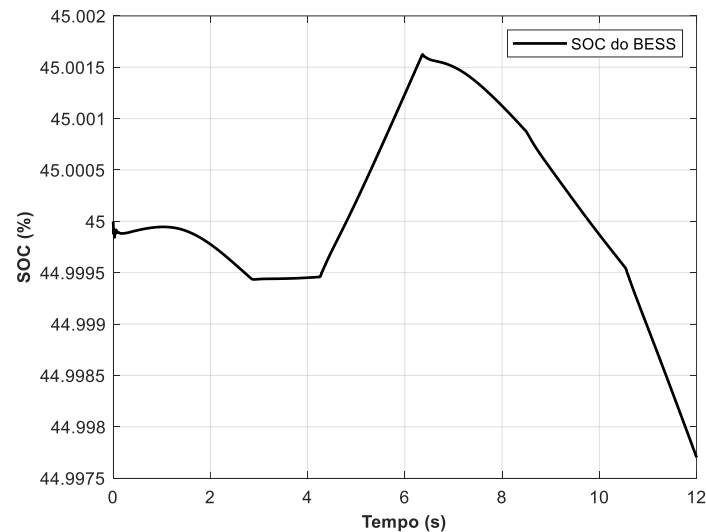


Fonte: Próprio autor.

Na estratégia de gerenciamento *fuzzy*, o BESS forneceu suporte para FC trabalhar na região de melhor eficiência. A Figura 70 representa o comportamento do

SoC do BESS durante o cenário. De acordo com o comportamento do SoC, na Figura 70, observa-se inicialmente que o BESS descarrega, no instante $t = 4$ s o SoC do BESS aumenta visto que está absorvendo energia da MR, enquanto a partir do instante $t = 6$ s o SoC do BESS diminui, pois está contribuindo com a injeção de potência na MR.

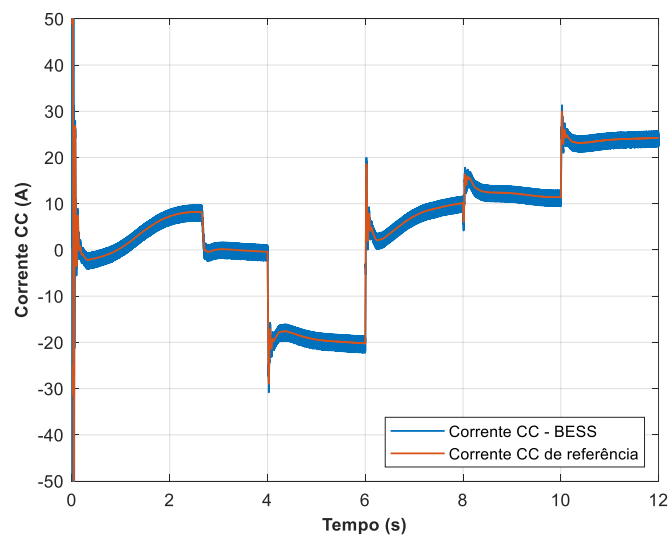
Figura 70 - SOC do BESS com EMS-fuzzy.



Fonte: Próprio autor.

Para relacionar o comportamento do SoC com os instantes de carga e descarga do BESS, a Figura 71 apresenta o comportamento da corrente CC do BESS.

Figura 71 - Corrente CC do BESS com EMS-fuzzy.

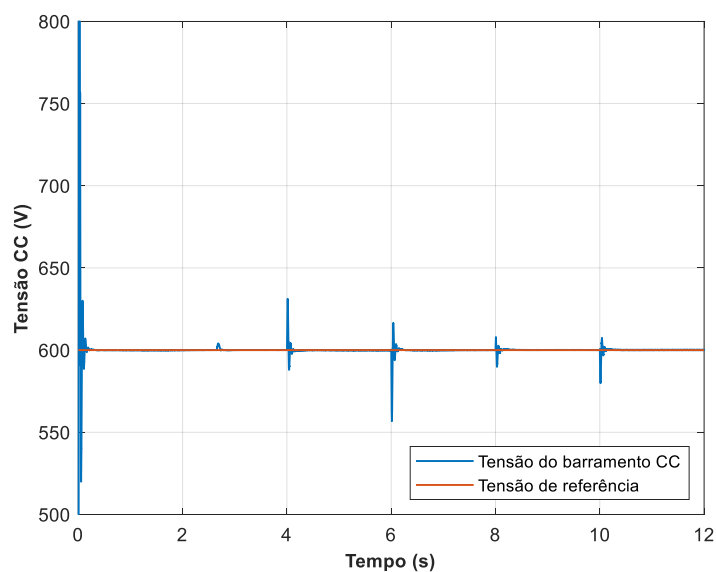


Fonte: Próprio autor.

Analisando a Figura 71, o instante que o BESS carrega está relacionado com a corrente de sinal negativo, enquanto o instante que o BESS descarrega está vinculado a corrente de sinal positivo.

A Figura 72 apresenta o comportamento da tensão CC do barramento do BESS com a estratégia *fuzzy*. Observa-se que o nível de tensão CC (600V) foi mantido durante o período de simulação, garantindo a tensão necessária para o sistema de condicionamento de energia do BESS.

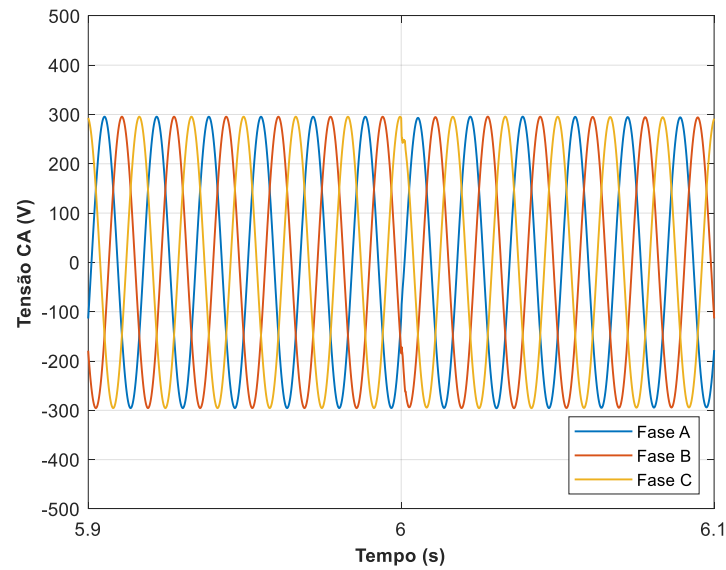
Figura 72 - Tensão do barramento CC do BESS com EMS-fuzzy.



Fonte: Próprio autor.

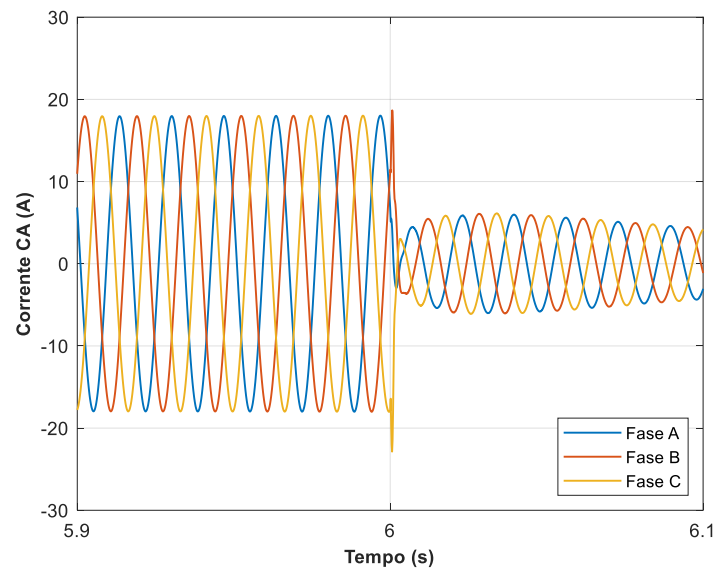
As Figura 73 e Figura 74 mostram o comportamento da tensão e corrente trifásicas na saída do VSC do BESS. A Figura 73 indica o perfil de onda da tensão durante um instante de variação de potência do BESS ($t = 6s$), a qual está estável mesmo apresentando uma pequena oscilação. Na Figura 74 está presente o perfil de onda da corrente trifásica, onde no instante $t = 6s$ o BESS foi acionado para contribuir com um valor de potência menor, justificando a diminuição da corrente.

Figura 73 - Tensão na saída do VSC do BESS com EMS-fuzzy.



Fonte: Próprio autor.

Figura 74 - Corrente na saída do VSC do BESS com EMS-fuzzy



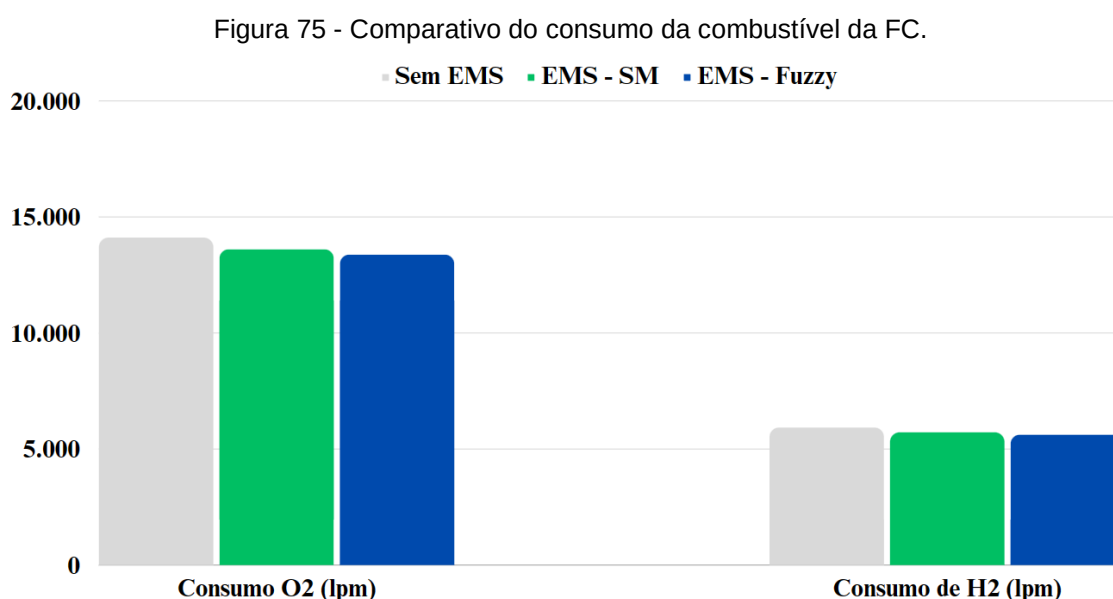
Fonte: Próprio autor.

4.2 Comparativo entres as técnicas de gerenciamento de energia

Apresentado os resultados para o cenário sem gerenciamento de energia e com o gerenciamento com base nas estratégias SM e *fuzzy*, foi feita uma análise comparativa com objetivo de avaliar o desempenho de cada estratégia. O objetivo de implementar as técnicas de gerenciamento está relacionada à operação da FC na

região de melhor eficiência, consequentemente, o menor consumo de combustível da FC.

A Figura 75 apresenta o consumo de combustível da FC, observando que ao implementar as técnicas de gerenciamento impactou na redução do consumo de combustível. Dentre as duas estratégias de gerenciamento implementadas, a que gerou o menor consumo de oxigênio e hidrogênio foi o EMS com base na lógica *fuzzy*.



Fonte: Próprio autor.

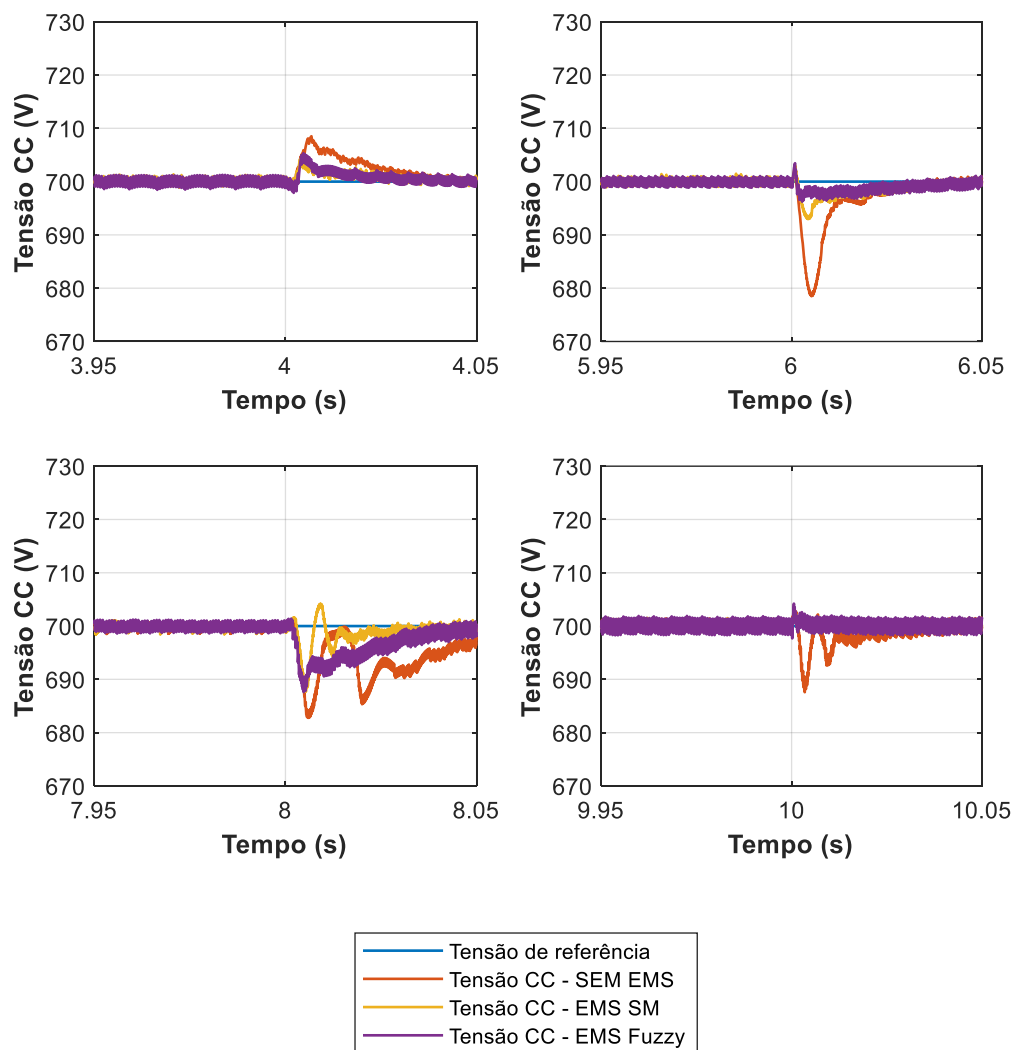
O consumo de oxigênio e hidrogênio para o cenário sem EMS, EMS – SM e EMS *fuzzy* foram, respectivamente, 14110 lpm e 5929 lpm, 13610 lpm e 5720 lpm e 13410 lpm e 5636 lpm. Com relação ao cenário sem EMS, a operação da FC com o EMS SM teve uma redução de 3,54% no consumo de O2 e 3,53% no consumo de H2. Já comparando o cenário sem EMS com a estratégia de *fuzzy*, a redução do consumo de oxigênio e hidrogênio foi de 5,17% e 5,18%, respectivamente.

Comparando as duas técnicas de gerenciamento implementadas no trabalho, a estratégia baseada em *fuzzy* apresentou uma redução 1,47% no consumo de oxigênio e hidrogênio, quando comparado com a estratégia SM. Dessa forma, a estratégia *fuzzy* foi capaz de reduzir o consumo de combustível da FC, ou seja, trabalhou na região de melhor eficiência por um intervalo de tempo maior.

Além do consumo de combustível, as estratégias de gerenciamento implementadas, SM e *fuzzy*, auxiliam na estabilidade da tensão do barramento CC da FC. A Figura 76 apresenta o comportamento da tensão do barramento CC da FC

durante todas as variações de potência. Com base nos resultados, a maior variação de tensão do barramento CC foi de 21,5V após instante $t = 6s$, considerando o cenário de operação da MR sem EMS. Analisando neste mesmo instante a operação da MR com as estratégias de gerenciamento SM e *fuzzy*, observa-se que a oscilação de tensão foi de 7V e 4V, respectivamente. Por fim, em todos os instantes de variação de potência, as estratégias implementadas resultaram em uma oscilação de tensão menor do que a operação da MR sem gerenciamento de energia.

Figura 76 - Comparativo da tensão do barramento CC da FC.



Fonte: Próprio autor.

5 CONCLUSÃO

O trabalho apresentou uma revisão dos principais conceitos de GD e MR utilizadas na literatura, assim como as topologias e os modos operacionais da MR. Com relação aos RED, foram apresentados tipos de tecnologias que podem formar uma estrutura de MR, focando nas tecnologias de FC, BESS e geração FV.

Para integrar os RED, o trabalho avaliou os sistemas de condicionamento de energia, que são responsáveis por realizar a interface dos RED com o barramento CA da MR. O sistema de condicionamento de energia é formado a partir dos conversores de potência (CC-CC ou CC-CA) e pelas malhas de controle. Em cada RED estudado no trabalho, foi detalhado o seu respectivo sistema de condicionamento de energia. De modo geral, o controle dos RED CC é composto a partir de um controle que está relacionada ao conversor do estágio CC-CC e outra malha de controle para o inversor CC-CA, cada um com objetivos diferentes.

A operação da MR é uma questão importante e deve ser avaliada com detalhamento, pois a integração de diversos RED pode ocasionar impactos no balanço energético, consequentemente, na estabilidade da MR. O trabalho abordou sobre a importância das estratégias de gerenciamento de energia em MR, apresentando as funcionalidades que podem ser obtidas a partir do sistema de gerenciamento, como: controle do balanço energético entre recursos energéticos e minimização de determinados parâmetros.

Com objetivo de avaliar o desempenho do gerenciamento de energia, a dissertação propôs estratégias de gerenciamento baseadas na técnica SM e *fuzzy*. Para implementação das técnicas, foram adotadas restrições operacionais associadas ao SoC do BESS e aos limites de potência máxima e mínima da FC. O objetivo das técnicas de gerenciamento foi atender a demanda energética da MR, visando reduzir o consumo de oxigênio e hidrogênio da FC.

Os resultados obtidos com as estratégias de gerenciamento implementadas – SM e *fuzzy* – foram comparados com a MR operando sem gerenciamento de energia. A partir dos resultados, as estratégias implementadas no trabalho foram capazes de reduzir o consumo de oxigênio e hidrogênio da FC, mantendo o equilíbrio entre as gerações e a carga. Analisando separadamente as estratégias, o gerenciamento

baseado em *fuzzy* apresentou uma melhor resposta em relação ao consumo de combustível da CF quando comparado com a estratégia SM.

Além de reduzir o consumo de combustível da FC, as estratégias de gerenciamento melhoraram a dinâmica do barramento CC da FC. Observou-se que as estratégias reduziram as perturbações de tensão no barramento CC quando houve variação da potência solicitada para a FC.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

O trabalho estudou a importância do gerenciamento de energia na MR formada por diferentes tecnologias de recursos energéticos, apresentando as restrições operacionais, o sistema de condicionamento de energia e o sistema de controle de cada recurso. Para integração dos recursos na MR foi desenvolvida duas estratégias de EMS, fundamentas no conceito de máquina de estado e LF. Ambas as estratégias reduziram o consumo de combustível da FC, além de melhorar o perfil da tensão do barramento CC.

Como a literatura apresenta diversas técnicas de gerenciamento de energia, a partir deste trabalho, poderão ser desenvolvidas outras estratégias de EMS, como: PI clássica, rede neural artificial (RNA) e estratégia de minimização de consumo equivalente. Elaborar outras estratégias permitirá realizar uma análise comparativa em relação ao que foi apresentado neste trabalho.

A implementação da topologia da MR no *Matlab/Simulink* permite outras possibilidades de trabalho devido à flexibilidade da ferramenta, por exemplo: alterar os parâmetros dos recursos energéticos ou os parâmetros da topologia da MR, inserir outras tecnologias (geração eólica, carregamento de veículos elétricos etc.), modificar o objetivo das estratégias de EMS (por exemplo: utilizar a FC para o contribuir no controle de tensão ou de frequência da MR).

Alternativas de trabalhos poderão ser desenvolvidas a partir deste trabalho, como:

- Implementar experimentalmente a topologia da MR desenvolvida no trabalho no equipamento Typhoon HIL (*Hardware In the Loop*), permitindo validar as estratégias implementadas;

- Adequar e aplicar as estratégias de EMS no Laboratório de Armazenamento e Mobilidade (LAM), para validar a simulação com o modelo real;
- Implementar estratégias de EMS que considerem aspectos econômicos dos recursos energéticos;
- Implementar um modelo de eletrolisador na topologia da MR deste trabalho, representando toda cadeia de hidrogênio. A partir disto, aplicar a FC no conceito *power-to-power*;
- Analisar a transição da MR do modo ilhado para o modo conectado e vice-versa, utilizando a FC para contribuir no momento de transições.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, M. et al. Review on the microgrid concept, structures, components, communication systems, and control methods. **Energies**, v. 16, n. 1, p. 484, 2023.
- ADEFARATI, T.; BANSAL, R. C. Integration of renewable distributed generators into the distribution system: a review. **IET Renewable Power Generation**, v. 10, n. 7, p. 873–884, 2016.
- AGRAWAL, S.; CHORSIYA, S.; PALWALIA, D. K. Hybrid energy management system design with renewable energy sources (fuel cells, PV cells and wind energy): a review. **IJSET**, v. 6, n. 3, p. 174–177, 2018.
- AISSAOUI, A. G.; TAHOUR, A. Application of fuzzy logic in control of electrical machines. **Fuzzy Logic-Controls, Concepts, Theories and Applications**, v. 28, p. 428, 2012.
- BASAK, P. et al. A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 8, p. 5545–5556, 2012.
- BASUALDO, M. S.; FEROLDI, D.; OUTBIB, R. **PEM fuel cells with bio-ethanol processor systems: A multidisciplinary study of modelling, simulation, fault diagnosis and advanced control**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2011.
- BAZARGAN, D. A study of battery energy storage dynamics in power systems. 2014.
- BAZARGAN, D.; BAHRANI, B.; FILIZADEH, S. Reduced capacitance battery storage DC-link voltage regulation and dynamic improvement using a feedforward control strategy. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 33, n. 4, p. 1659–1668, 2018.
- CIGOLOTTI, V.; GENOVESE, M.; FRAGIACOMO, P. Comprehensive review on fuel cell technology for stationary applications as sustainable and efficient poly-generation energy systems. **Energies**, v. 14, n. 16, p. 4963, 2021.
- DARLAN IORIS. **ESTUDO DO ILHAMENTO NÃO INTENCIONAL EM MICRORREDES BASEADAS EM CONVERSORES ELETRÔNICOS DE POTÊNCIA**. FOZ DO IGUAÇU: UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ, 2021.
- DAVIDSON MARQUES. **CONTROLE DE FREQUÊNCIA EM MICRORREDES UTILIZANDO BATERIAS BASEADO NO APRENDIZADO EMOCIONAL DO CÉREBRO**. Recife: UFPE, 2023.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota discute impactos dos Recursos Energéticos Distribuídos no planejamento energético**.
- FAN, L.; TU, Z.; CHAN, S. H. Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review. **Energy Reports**, v. 7, p. 8421–8446, 2021.

FARROKHABADI, M. et al. Microgrid stability definitions, analysis, and examples. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 35, n. 1, p. 13–29, 2019.

GOU, B.; NA, W.; DIONG, B. **Fuel cells: dynamic modeling and control with power electronics applications**. [s.l.] CRC press, 2016.

GUO, R.; LI, Q.; ZHAO, N. An overview of grid-connected fuel cell system for grid support. **Energy Reports**, v. 8, p. 884–892, 2022.

HAFSI, O. et al. Integration of hydrogen technology and energy management comparison for DC-Microgrid including renewable energies and energy storage system. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 52, p. 102121, 2022.

HAN, Y. et al. Hierarchical energy management for PV/hydrogen/battery island DC microgrid. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 11, p. 5507–5516, 2019a.

HAN, Y. et al. Two-level energy management strategy for PV-Fuel cell-battery-based DC microgrid. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 35, p. 19395–19404, 2019b.

HAN, Y.; CHEN, W.; LI, Q. Energy management strategy based on multiple operating states for a photovoltaic/fuel cell/energy storage DC microgrid. **Energies**, v. 10, n. 1, p. 136, 2017.

HESSE, H. C. et al. Lithium-ion battery storage for the grid—A review of stationary battery storage system design tailored for applications in modern power grids. **Energies**, v. 10, n. 12, p. 2107, 2017.

HU, J. et al. A model predictive control strategy of PV-Battery microgrid under variable power generations and load conditions. **Applied Energy**, v. 221, p. 195–203, 2018.

IEA. **The growth of renewable capacity is forecast to accelerate in the next five years, accounting for almost 95% of the increase in global power capacity through 2026**.

IEA. **Energy storage technology mix, 2015-2020**.

IEA. **Unlocking the Potential of Distributed Energy Resources: Power system opportunities and best practices**.

IEA. **Hydrogen patents for a clean energy future: A global trend analysis of innovation along hydrogen value chains**.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2022 - Analysis and forecast to 2027**.

INCI, M.; TÜRKSOY, Ö. Review of fuel cells to grid interface: Configurations, technical challenges and trends. **journal of cleaner Production**, v. 213, p. 1353–1370, 2019.

IRENA. **DECARBONISING END-USE SECTORS: PRACTICAL INSIGHTS ON GREEN HYDROGEN**.

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **RENEWABLE POWER-TO-HYDROGEN: INNOVATION LANDSCAPE BRIEF**.

JONATA CAMPELO. **AVALIAÇÃO DE CURVAS DE POTÊNCIA EM MODELOS DE PREVISÃO DE GERAÇÃO EÓLICA EM CURTO PRAZO**. Recife: UFPE, 2015.

JOSHUA S HILL. **Northvolt produces first fully recycled lithium-ion battery cell**.

KAMAL, T. et al. **Energy management and control of grid-connected wind/fuel cell/battery Hybrid Renewable Energy System**. 2016 International Conference on Intelligent Systems Engineering (ICISE). **Anais...IEEE**, 2016.

KAMEL, A. A.; REZK, H.; ABDELKAREEM, M. A. Enhancing the operation of fuel cell-photovoltaic-battery-supercapacitor renewable system through a hybrid energy management strategy. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 8, p. 6061–6075, 2021.

KHALID, A.; STEVENSON, A.; SARWAT, A. I. Overview of technical specifications for grid-connected microgrid battery energy storage systems. **IEEE Access**, v. 9, p. 163554–163593, 2021.

KILLER, M.; FARROKHSERESHT, M.; PATERAKIS, N. G. Implementation of large-scale Li-ion battery energy storage systems within the EMEA region. **Applied energy**, v. 260, p. 114166, 2020.

KIRUBAKARAN, A.; JAIN, S.; NEMA, R. K. A review on fuel cell technologies and power electronic interface. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 13, n. 9, p. 2430–2440, 2009.

KOLLI, A. et al. A review on DC/DC converter architectures for power fuel cell applications. **Energy Conversion and Management**, v. 105, p. 716–730, 2015.

KUMAR, S. et al. Reliability enhancement of electrical power system including impacts of renewable energy sources: a comprehensive review. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 14, n. 10, p. 1799–1815, 2020.

LASSETER, B. **Microgrids [distributed power generation]**. 2001 IEEE power engineering society winter meeting. Conference proceedings (Cat. No. 01CH37194). **Anais...IEEE**, 2001.

LASSETER, R.; ERICKSON, M. Integration of battery-based energy storage element in the CERTS microgrid. **University of Wisconsin-Madison, Oct**, 2009.

LASSETER, R. H. **Microgrids**. 2002 IEEE power engineering society winter meeting. Conference proceedings (Cat. No. 02CH37309). **Anais...IEEE**, 2002.

LOTFI, H.; KHODAEI, A. AC versus DC microgrid planning. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 8, n. 1, p. 296–304, 2015.

MA, T.; YANG, H.; LU, L. Solar photovoltaic system modeling and performance prediction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 304–315, 2014.

MAGHAMI, M. R. et al. Hybrid energy management with respect to a hydrogen energy system and demand response. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 3, p. 1499–1509, 2020.

MATHWORKS. **Fuel Cell Stack**.

MATHWORKS. **Generic Battery Model**.

MATHWORKS. **Synchronous Machine pu Standard**.

MATHWORKS. **Fuzzy Logic Designer**.

MAUGER, R. Defining microgrids: from technology to law. **Journal of Energy & Natural Resources Law**, v. 41, n. 3, p. 287–304, 2023.

MOTAPON, S. N.; DESSAINT, L.-A.; AL-HADDAD, K. A comparative study of energy management schemes for a fuel-cell hybrid emergency power system of more-electric aircraft. **IEEE transactions on industrial electronics**, v. 61, n. 3, p. 1320–1334, 2013.

OYEKALE, J. et al. Impacts of renewable energy resources on effectiveness of grid-integrated systems: Succinct review of current challenges and potential solution strategies. **Energies**, v. 13, n. 18, p. 4856, 2020.

PARHIZI, S. et al. State of the art in research on microgrids: A review. **IEEE access**, v. 3, p. 890–925, 2015.

PLANAS, E. et al. AC and DC technology in microgrids: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 726–749, 2015.

PU, Y. et al. Hierarchical energy management control for islanding DC microgrid with electric-hydrogen hybrid storage system. **International journal of hydrogen energy**, v. 44, n. 11, p. 5153–5161, 2019.

PUKRUSHPAN, J. T.; STEFANOPOULOU, A. G.; PENG, H. **Control of fuel cell power systems: principles, modeling, analysis and feedback design**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2004a.

PUKRUSHPAN, J. T.; STEFANOPOULOU, A. G.; PENG, H. **Control of fuel cell power systems: principles, modeling, analysis and feedback design**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2004b.

ROCABERT, J. et al. Control of power converters in AC microgrids. **IEEE transactions on power electronics**, v. 27, n. 11, p. 4734–4749, 2012.

SAEED, M. H. et al. A review on microgrids' challenges & perspectives. **IEEE Access**, v. 9, p. 166502–166517, 2021.

SHAFIEE ROUDBARI, E.; BEHESHTI, M. T. H.; RAKHTALA, S. M. Voltage and frequency regulation in an islanded microgrid with PEM fuel cell based on a fuzzy logic voltage control and adaptive droop control. **IET Power Electronics**, v. 13, n. 1, p. 78–85, 2020.

SHAHGHOLIAN, G. A brief review on microgrids: Operation, applications, modeling, and control. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, v. 31, n. 6, p. e12885, 2021.

SINGH, P.; LATHER, J. S. Power management and control of a grid-independent DC microgrid with hybrid energy storage system. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 43, p. 100924, 2021.

SINGLA, M. K.; NIJHAWAN, P.; OBEROI, A. S. Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 15607–15626, 2021.

SINSEL, S. R.; RIEMKE, R. L.; HOFFMANN, V. H. Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources—a review. **renewable energy**, v. 145, p. 2271–2285, 2020.

SIVANANDAM, S. N.; SUMATHI, S.; DEEPA, S. N. **Introduction to fuzzy logic using MATLAB**. [s.l.] Springer, 2007.

SUN, X. et al. **A Hybrid renewable DC microgrid voltage control**. 2009 IEEE 6th international power electronics and motion control conference. **Anais...IEEE**, 2009.

TREMBLAY, O.; DESSAINT, L.-A. **A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell vehicles**. 2009 IEEE vehicle power and propulsion conference. **Anais...IEEE**, 2009a.

TREMBLAY, O.; DESSAINT, L.-A. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. **World electric vehicle journal**, v. 3, n. 2, p. 289–298, 2009b.

UFA, R. A. et al. A review on distributed generation impacts on electric power system. **International journal of hydrogen energy**, v. 47, n. 47, p. 20347–20361, 2022.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; RUPPERT FILHO, E. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. **IEEE Transactions on power electronics**, v. 24, n. 5, p. 1198–1208, 2009.

VIVAS, F. J.; SEGURA, F.; ANDÚJAR, J. M. Fuzzy logic-based energy management system for grid-connected residential DC microgrids with multi-stack fuel cell

systems: A multi-objective approach. **Sustainable Energy, Grids and Networks**, v. 32, p. 100909, 2022.

WESLEY CHAI. **DEFINITION: Fuzzy Logic**.

WILBERFORCE, T. et al. Advances in stationary and portable fuel cell applications. **International journal of hydrogen energy**, v. 41, n. 37, p. 16509–16522, 2016.

YAZDANI, A.; IRAVANI, R. **Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2010.

ZHANG, C. et al. Real-time optimization of energy management strategy for fuel cell vehicles using inflated 3D inception long short-term memory network-based speed prediction. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 70, n. 2, p. 1190–1199, 2021.