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

IGOR VELOSO DE LIMA

APLICAÇÃO DE ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO PARA CONTROLE DA OPERAÇÃO DE CÉLULA A COMBUSTÍVEL EM MICRORREDE

Recife
2025

IGOR VELOSO DE LIMA

APLICAÇÃO DE ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO PARA CONTROLE DA OPERAÇÃO DE CÉLULA A COMBUSTÍVEL EM MICRORREDE

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

Orientador(a): Prof. Dr. Douglas Contente Pimentel Barbosa

Coorientador: Prof. M.Sc. Antônio Gustavo Evangelista Muniz Santos

Recife
2025

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

Lima, Igor Veloso de .
Aplicação de algoritmo de otimização para controle da operação de célula a combustível em microrrede / Igor Veloso de Lima. - Recife, 2025.
52 p. : il., tab.

Orientador(a): Douglas Contente Pimentel Barbosa
Cooorientador(a): Antônio Gustavo Evangelista Muniz Santos
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Controle e Automação - Bacharelado, 2025.
Inclui referências.

1. microrrede. 2. célula a combustível. 3. lógica fuzzy. 4. otimização. I. Barbosa, Douglas Contente Pimentel . (Orientação). II. Santos, Antônio Gustavo Evangelista Muniz. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

IGOR VELOSO DE LIMA

APLICAÇÃO DE ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO PARA CONTROLE DA OPERAÇÃO DE CÉLULA A COMBUSTÍVEL EM MICRORREDE

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

Aprovado em: 10/04/2025

BANCA EXAMINADORA

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

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

_____
Prof. M.Sc. Valdemar Moreira Cavalcante Junior (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por me dar forças de conseguir concluir esta etapa. Aos meus pais, Francisco e Lídia, que sempre me apoiaram e fizeram de tudo por mim, para conseguir me formar, principalmente por estar em outro estado. A minha irmã, Lívia, por todo o apoio e conversas durante essa jornada. E a minha noiva, Yngrid, por sempre me apoiar e me visitar sempre que possível. Gostaria de agradecer também ao meu professor e orientador Douglas, por toda a confiança desde o P&D e neste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre o gerenciamento de microrredes utilizando lógica *fuzzy* e *Particle Swarm Optimization* (PSO) para otimizar o funcionamento de uma célula a combustível integrada a um sistema de geração distribuída. O crescimento das cidades e a crescente demanda por energia exigem soluções eficientes para gerenciamento de microrredes, garantindo estabilidade e confiabilidade no fornecimento de energia. A pesquisa explora os principais componentes da microrrede, incluindo células a combustível, geradores a diesel, sistemas fotovoltaicos e baterias (BESS), além das estratégias de controle utilizadas. O estudo implementa um modelo de microrrede no *MATLAB/Simulink*, onde abordagens de controle são analisadas para minimizar o consumo de hidrogênio e oxigênio, garantindo a eficiência energética e a estabilidade do sistema. Para isso, um controlador fuzzy foi projetado para gerenciar a célula a combustível, ajustando dinamicamente sua operação de acordo com a demanda da microrrede. O algoritmo PSO foi utilizado para otimizar os parâmetros das funções de pertinência da lógica fuzzy, referente a variável de saída do controle, melhorando a resposta do sistema às variações de carga e geração. A abordagem permitiu reduzir cerca de 4% do consumo de combustível da célula, em comparação com trabalhos anteriores.

Palavras-chave: microrrede; célula a combustível; lógica *fuzzy*; otimização.

ABSTRACT

This work presents a study on the management of microgrids using fuzzy logic and Particle Swarm Optimization (PSO) to optimize the operation of a fuel cell integrated into a distributed generation system. The growth of cities and the increasing demand for energy require efficient solutions for microgrid management, ensuring stability and reliability in energy supply. The research explores the main components of the microgrid, including fuel cells, diesel generators, photovoltaic systems, and battery energy storage systems (BESS), as well as the control strategies used. The study implements a microgrid model in MATLAB/Simulink, where different control approaches are analyzed to minimize hydrogen and oxygen consumption, ensuring energy efficiency and system stability. For this purpose, a fuzzy logic controller was designed to manage the fuel cell, dynamically adjusting its operation according to the microgrid's demand. The PSO algorithm was employed to optimize the parameters of the fuzzy logic membership functions, specifically the output variable of the control system, improving the system's response to variations in load and generation. The approach enabled a reduction of approximately 4% in the fuel consumption of the cell, compared to previous studies.

Keywords: microgrid; fuel cell; fuzzy logic; optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Previsão de crescimento de energia. 14
Figura 2 – Exemplo de topologia da microrrede. 15
Figura 3 – Microrrede CA. 16
Figura 4 – Microrrede CC. 17
Figura 5 – Microrrede Híbrida CA/CC. 17
Figura 6 – Estrutura básica de uma célula a combustível. 19
Figura 7 – Circuito da célula a combustível no *MATLAB/Simulink*. 20
Figura 8 – Curva V x I do modelo no *MATLAB/Simulink*. 21
Figura 9 – Integração da Célula a Combustível com o barramento CA. 22
Figura 10 – Gerador presente no *MATLAB/Simulink*. 23
Figura 11 – Capacidade global de geração de energia eólica e fotovoltaica. 23
Figura 12 – Circuito da *PV Array*. 24
Figura 13 – Integração da FV com o barramento CA. 25
Figura 14 – Equivalente da bateria no *MATLAB/Simulink*. 26
Figura 15 – Integração do BESS com o barramento CA. 26
Figura 16 – Exemplo de funções de pertinência. 27
Figura 17 – Diagrama do *fuzzy*. 28
Figura 18 – Fluxograma do PSO. 29
Figura 19 – Ilustração do movimento de partículas. 31
Figura 20 – Estrutura simulada. 32
Figura 21 – Exemplo de gráfico da função de pertinência do SoC, indicando os níveis. 34
Figura 22 – Exemplo de gráfico da função de pertinência para ΔP, indicando os níveis. 35
Figura 23 – Exemplo de gráfico da função de pertinência para P_{FC}, indicando os níveis. 36
Figura 24 – Cargas. 38
Figura 25 – Funções de pertinência para o SoC. 39
Figura 26 – Funções de pertinência para o ΔP. 39
Figura 27 – *Best fitness*. 40
Figura 28 – Funções de pertinências ajustadas com PSO. 42
Figura 29 – Potências da microrrede. 43
Figura 30 – Eficiência de célula a combustível. 44
Figura 31 – Consumo de oxigênio e hidrogênio da célula a combustível. 45
Figura 32 – Tensão do barramento CC da célula a combustível. 45
Figura 33 – Utilização do SoC. 46
Figura 34 – Comparação de consumos de combustível da FC. 47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros dos recursos energéticos distribuídos da microrrede na simulação. 33
Tabela 2 – Exemplo de regras para o bloco *fuzzy* referente a FC_{ref}. 35
Tabela 3 – Regras do controle *Fuzzy*. 38
Tabela 4 – Resultados dos testes para diferentes quantidades de partículas. 40
Tabela 5 – Tabela de limites aplicados ao PSO. 41
Tabela 6 – Tabela com os valores encontrados por meio do PSO. 41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BESS	*Battery Energy Storage System*
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
FC	Célula a combustível
FV	Fotovoltaica
MR	Microrrede
RED	Recursos Energéticos Distribuídos
SoC	*State of Charger*
PAC	Ponto de acoplamento comum
VSC	*Voltage-Source Converter*

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ	Variação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
1.1 OBJETIVOS 12
1.1.1 Geral 12
1.1.2 Específicos 13
1.2 ORGANIZAÇÃO TEXTUAL 13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 14
2.1 MICRORREDES 14
2.1.1 Conceito de microrrede 15
2.1.2 Classificação de microrredes 15
2.1.3 Modo de operação 18
2.2 RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS 18
2.2.1 Célula a Combustível 18
2.2.2 Gerador a diesel 22
2.2.3 Fotovoltaica 22
2.2.4 *Battery Energy Storage System* 25
2.3 ESTRATÉGIAS DE GERENCIAMENTO 26
2.3.1 Lógica *Fuzzy* 27
2.3.2 *Particle Swarm Optimization* (PSO) 28
3 METODOLOGIA 32
3.1 ARRANJO DA MICRORREDE 32
3.2 CONTROLE BASEADO EM *FUZZY* 34
3.3 *FUZZY* AJUSTADO COM PSO 35
4 SIMULAÇÕES 37
4.1 OPERAÇÃO DA MICRORREDE 37
4.2 GERENCIAMENTO COM LÓGICA *FUZZY* 38
4.2.1 Gerenciamento com lógica *fuzzy* ajustada com PSO 40
5 ANÁLISES E RESULTADOS 43
5.1 COMPARAÇÃO DE CONSUMOS. 46
6 CONCLUSÕES 48
6.1 TRABALHOS FUTUROS 49

REFERÊNCIAS 50

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento demasiado das cidades, a demanda por energia cresce constantemente, e a utilização de combustíveis fósseis para atender a essa questão não é suficiente, além de causar diversos danos ambientais. Assim sendo, a utilização de recursos energéticos renováveis torna-se uma opção para suprir essa necessidade, e para a integrar no sistema de rede existente, surge a microrrede como melhor alternativa para garantir estabilidade ao sistema (SAEED et al., 2021; MUHTADI et al., 2021).

As microrredes garantem maior confiabilidade e fornecimento contínuo de energia para as cargas. No entando, para seu funcionamento eficiente, deve haver sistemas de gerenciamento de energia, responsáveis pela administração dos Recursos Energéticos Distribuídos (RED) presentes. Esses recursos podem incluir módulos fotovoltaicos, células a combustível, entre outros (AHMAD et al., 2023).

As células a combustível (FC) destacam-se como uma tecnologia promissora no setor energético devido à sua elevada eficiência e ao fato de serem uma fonte de energia limpa e sustentável. Além disso, a ampla disponibilidade do hidrogênio reforça o potencial dessas tecnologias na geração de energia.

No entanto, para que as células a combustível operem de forma eficiente dentro da microrrede e garantam confiabilidade, um gerenciamento adequado de potência é necessário. E um controle otimizado assegura que a célula funcione dentro dos limites operacionais ideais, aumentando sua vida útil e melhorando a estabilidade da rede (AKINYELE; OLABODE; AMOLE, 2020).

Com isso, este estudo propõe a aplicação de técnicas de algoritmos de otimização para melhorar o controle da operação de célula a combustível, inserida na microrrede. Dessa forma, por meio do *MATLAB/Simulink*, uma microrrede é simulada, com elementos como gerador a diesel, célula a combustível, cargas, entre outros, a fim de realizar o gerenciamento da célula citada. Dessa forma, será possível avaliar a eficiência da célula, referente ao consumo de combustível, e analisar a influência do método de controle ajustado no comportamento das curvas de potência.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma melhoria no controle para a célula a combustível, através de técnicas de algoritmo de otimização.

1.1.1 Geral

Propor uma estratégia de gerenciamento baseada em *Particle Swarm Optimization* (PSO), que visa otimizar o consumo de hidrogênio e oxigênio da célula a combustível

inserida na microrrede.

1.1.2 Específicos

- Simular uma microrrede dentro do ambiente *MATLAB/Simulink*;
- Criar um *script* no *MATLAB* para o funcionamento do PSO;
- Avaliar o melhor resultado obtido pelo PSO para o *fuzzy*;
- Analisar e comparar o controle *fuzzy* ajustado;

1.2 ORGANIZAÇÃO TEXTUAL

Este trabalho de conclusão de curso é organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 2:** Apresenta os fundamentos teóricos e pesquisas relacionadas ao contexto de microrrede, modelos presentes nela e aprendizado de máquina.
- **Capítulo 3:** Mostra a metodologia utilizada para este estudo, abordando como foi executada a simulação e a forma empregada do algoritmo.
- **Capítulo 4:** Apresenta as alterações realizadas na microrrede, incluindo variações nas fontes de geração e nos perfis de carga.
- **Capítulo 5:** As análises e resultados obtidos são apresentados e discutidos.
- **Capítulo 6:** Apresenta as principais conclusões do trabalho, com sugestões para desenvolvimentos futuros.

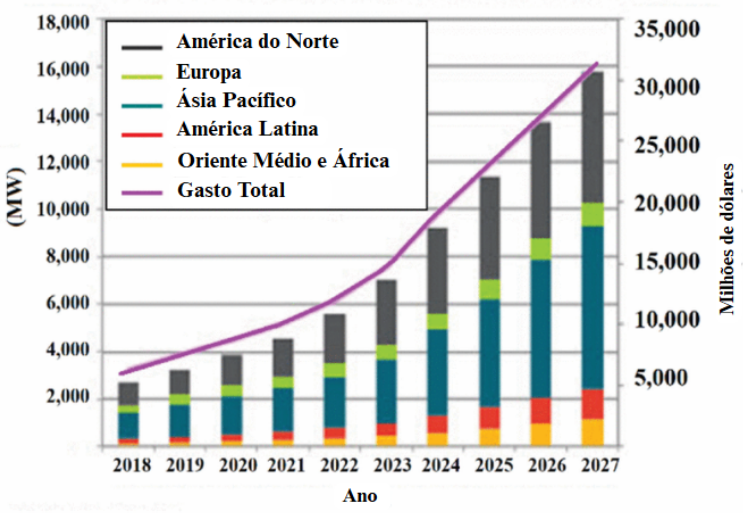
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O capítulo aborda os fundamentos teóricos necessários para o desenvolvimento do estudo, dividindo-se em três seções principais. Primeiramente, são discutidos os conceitos e classificações das microrredes, incluindo seus modos de operação. Em seguida, são explorados os principais recursos energéticos distribuídos, como células a combustível, geradores a diesel e sistemas fotovoltaicos, além do armazenamento de energia em baterias. Por fim, são apresentadas conceitos para estratégias de gerenciamento dessas microrredes, com enfoque em técnicas de *Machine Learning*, Lógica *Fuzzy* e *Particle Swarm Optimization* (PSO).

2.1 MICRORREDES

Com o rápido desenvolvimento das cidades a demanda energética tem aumentado de forma significativamente, e com isso, vem a popularização de utilizar sistemas de energia renovável para ajudar a suprir essa necessidade, evitando assim mais danos ambientais prejudiciais. Dessa forma, tecnologias estão sendo cada vez mais desenvolvidas para utilização desses recursos renováveis, e assim, o sistema de energia convencional tem enfrentado uma certa complexidade, em relação a confiabilidade e estabilidade, por conta da inserção de usinas baseadas nesses recursos. Assim sendo, novas soluções surgiram para o auxílio dessas questões, como a microrrede, que prevê uma produção de energia conforme ilustrada na Figura 1 (SAEED et al., 2021).

Figura 1 – Previsão de crescimento de energia.

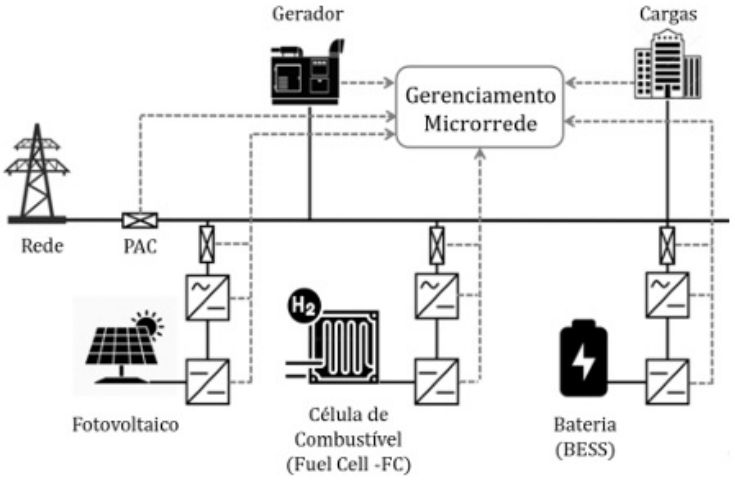


Fonte: Adaptado de (SAEED et al., 2021).

As microrredes propõem segurança e disponibilidade para o sistema de distribuição de energia, por se tratar de sistemas elétricos que podem operar separados ou de forma

independente do sistema principal de eletricidade. A rede de distribuição convencional realiza um fluxo de energia unidirecional da fonte para a carga, enquanto a microrrede o transforma em bidirecional. Para permitir uma operação flexível, sistemas fotovoltaicos, células de combustível, sistemas de armazenamento de energia, tecnologias essas que compõem a microrrede, necessitam de inversores e controladores adequados, pois caso não bem projetada, podem acarretar em implicações negativas, na proteção, controle, qualidade e confiabilidade do fornecimento dentro do sistema elétrico. Um exemplo disso pode ser visto a seguir na Figura 2 (ZUBIETA, 2015; SAEED et al., 2021).

Figura 2 – Exemplo de topologia da microrrede.



Fonte: (SANTOS, 2024).

2.1.1 Conceito de microrrede

O conceito de microrrede refere-se à integração coordenada de cargas e fontes, que atuam de forma conjunta em um sistema controlável para fornecer energia para a área local. Como visto na Figura 2, diversos elementos a compõem, a fim de responder às necessidades do sistema de transmissão, sendo, assim, uma forma de organização eficiente para integrar os vários tipos de geração e cargas presentes (LASSETER, 2002).

Considerando a microrrede como um único sistema composto por recursos energéticos distribuídos, faz-se necessária a utilização de interfaces de eletrônica de potência, como os conversores, devido à natureza da corrente fornecida pelos geradores e da carga que irá receber, sendo essa corrente alternada (CA) ou contínua (CC). Dessa forma, as microrredes podem ser classificadas como CA, CC ou híbridas (JUSTO et al., 2013; GAO et al., 2020).

2.1.2 Classificação de microrredes

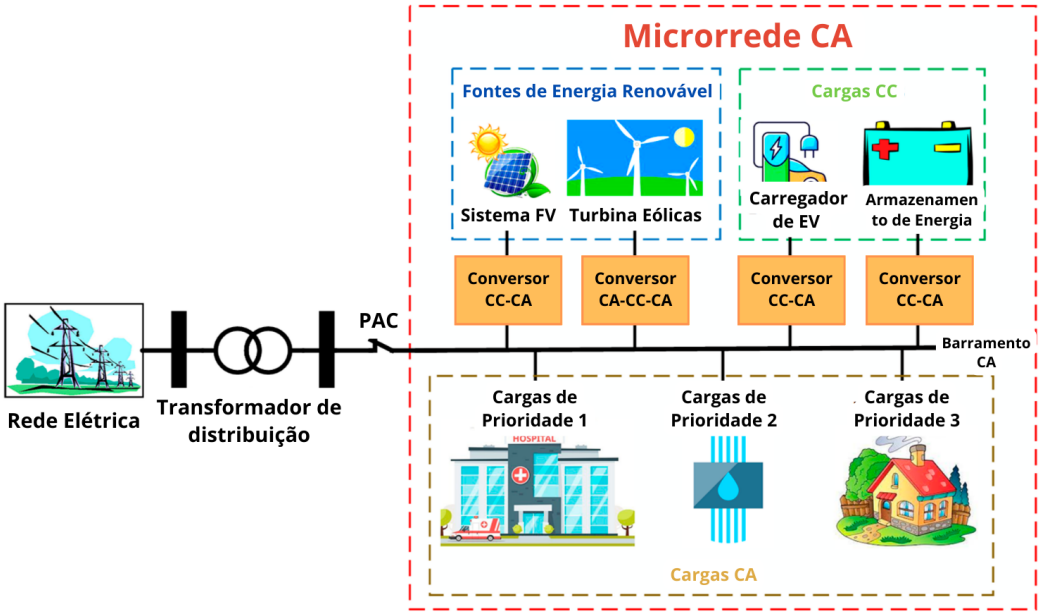
As unidades de geração com saída de energia CA, como turbinas eólicas e hidrelétricas, são conectadas diretamente em barramentos CA. Para integração à rede principal,

utilizam-se conversores de energia CA/CC/CA para que ocorra estabilidade no sistema. A estrutura de uma rede CA é apresentada na Figura 3, nota-se que a energia da geração deve ser controlada conforme a necessidade das cargas, com um esquema de controle para regular o fluxo de energia (JUSTO et al., 2013; RAJESH et al., 2017).

Nas microrredes CC, demonstrada na Figura 4, os princípios de operação são semelhantes com a CA, existe um barramento CC comum, que conecta os diversos componentes existentes. E para se conectar a rede principal, um conversor CC/CA é utilizado, proporcionando menores perdas de conversão de energia, por serem necessários menos estágios, e com isso uma maior eficiência com um menor custo. Além disso, por não existir potência reativa, apresenta uma melhor estabilidade se comparada com a microrrede CA, tornando-se uma melhor opção para integração com outros sistemas.

Com a crescente demanda por energia CC, juntamente com a unidade geradora desta energia, leva as microrredes CC a se tornarem uma solução promissora para futuras aplicações de energia. Além disso, as microrredes híbridas CA/CC combinam os benefícios de ambos os sistemas para aplicações onde cargas dos dois tipos coexistem (ABBASI et al., 2023; JUSTO et al., 2013).

Figura 3 – Microrrede CA.

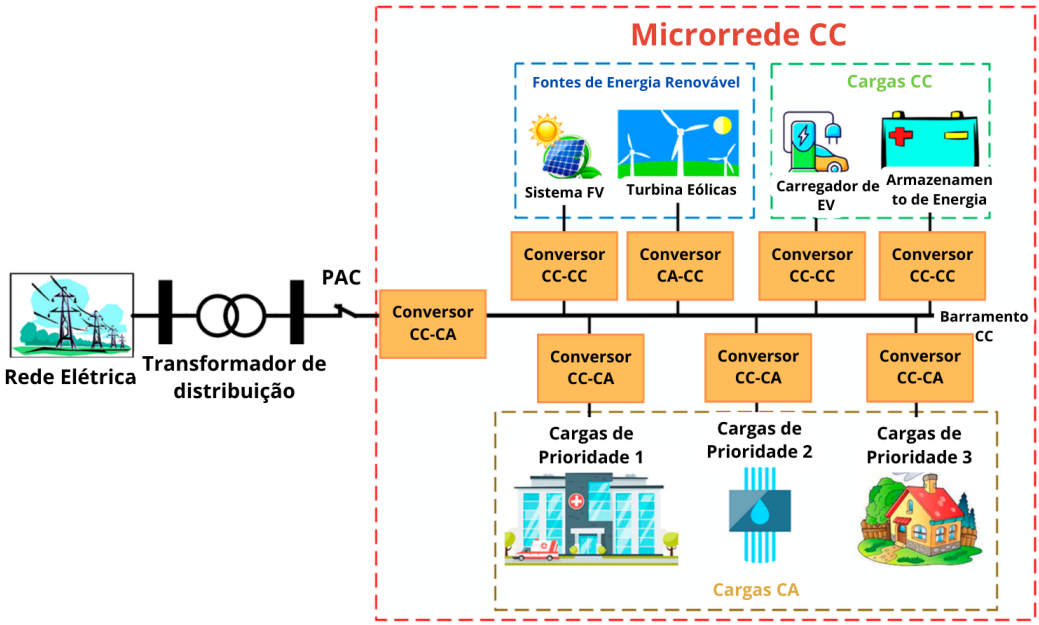


Fonte: Adaptado de (ABBASI et al., 2023).

As microrredes híbridas representam um avanço, se comparada com as citadas anteriormente, pois combina ambas as vantagens de cada uma delas em uma única estrutura. Essa abordagem visa otimizar a integração dos recursos energéticos distribuídos e cargas de ambas as naturezas, promovendo maior eficiência e flexibilidade na operação da rede.

Além disso, a combinação de fontes CA e CC permite um melhor aproveitamento dos recursos energéticos disponíveis, aperfeiçoando a geração e o consumo de energia. No entanto, apesar dos benefícios, elas apresentam uma maior complexidade e custo, devido

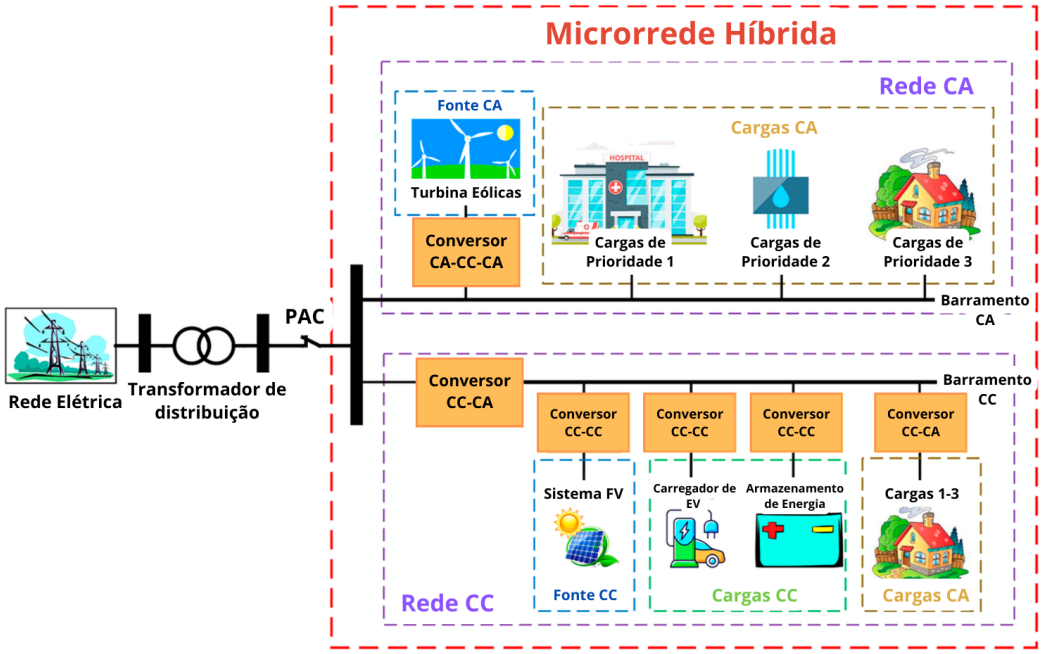
Figura 4 – Microrrede CC.



Fonte: Adaptado de (ABBASI et al., 2023).

ao fato de que o controle e a proteção são mais complexos do que em sistemas tradicionais, sendo necessários mecanismos avançados para garantir a estabilidade do sistema (LIU; WANG; LOH, 2011).

Figura 5 – Microrrede Híbrida CA/CC.



Fonte: Adaptado de (ABBASI et al., 2023).

2.1.3 Modo de operação

Quanto ao modo de operação, há dois modos principais, conectado à rede e ilhado. A microrrede conectada está ligada diretamente a rede elétrica principal, podendo importar ou exportar energia, onde o conversor principal atua controlando o fluxo de energia e garantindo a sincronização com a frequência e a tensão da rede. E no modo ilhado, a microrrede é desconectada da rede principal, com o funcionamento ocorrendo de forma autônoma, fornecendo energia às cargas locais, em que o conversor realiza a gestão de energia, para garantir o equilíbrio entre a geração e a demanda (LIU; WANG; LOH, 2011).

2.2 RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS

Os recursos energéticos distribuídos (RED) compreendem diversas tecnologias, como célula a combustível, gerador a diesel, fotovoltaica, BESS, entre outros. Nesta seção serão abordados esses modelos de RED que compõem a microrrede implementada no trabalho.

2.2.1 Célula a Combustível

As células de combustível são equipamentos eletroquímicos capazes de converter energia química em energia elétrica de corrente contínua, como no caso do hidrogênio e metanol, por meio de reações eletroquímicas com o oxigênio no ar. Por não realizar combustão, essa tecnologia torna-se um meio eficiente e silencioso em comparação com um gerador térmico de potência. Além disso, trata-se de uma tecnologia limpa, pois os subprodutos utilizados são constituídos de água e calor, quando o hidrogênio puro é usado como combustível. A Figura 6 ilustra a estrutura básica de uma célula a combustível PEM (DAUD et al., 2017).

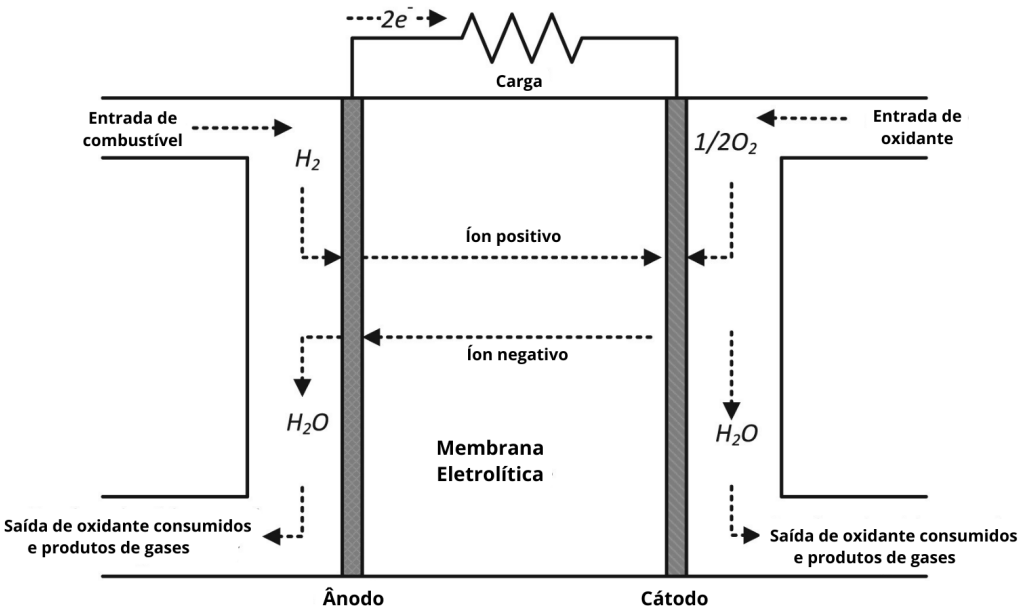
O processo demonstrado ocorre em três principais componentes: ânodo, membrana eletrolítica e cátodo. O hidrogênio entra pelo ânodo, onde se divide em íons positivos de hidrogênio (H^+) e elétrons (e^-). Os elétrons não conseguem atravessar a membrana eletrolítica e, por isso, são forçados a percorrer um circuito externo, gerando corrente elétrica para alimentar uma carga.

Enquanto isso, os íons H^+ atravessam a membrana até o cátodo, onde reagem com o oxigênio que entra pelo outro lado da célula. Essa reação, combinando os íons de hidrogênio, elétrons retornados pelo circuito e o oxigênio, gera água (H_2O) como subproduto. Ao final do processo, a célula a combustível libera apenas água e calor como resíduos, tornando-a uma tecnologia limpa e eficiente para geração de eletricidade em veículos, sistemas estacionários e outras aplicações energéticas. (DAS; TAN; YATIM, 2017)

A operação de uma célula a combustível pode ser descrita pela seguinte reação química:

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{Energia} \tag{2.1}$$

Figura 6 – Estrutura básica de uma célula a combustível.



Fonte: Adaptado de (DAS; TAN; YATIM, 2017).

Essa conversão ocorre por meio de reações eletroquímicas nos eletrodos da célula, como citado acima. No ânodo, o hidrogênio gasoso é oxidado, liberando prótons (H^+) e elétrons (e^-), como:

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \tag{2.2}$$

Os elétrons seguem um caminho externo, fornecendo corrente elétrica para uma carga, enquanto os prótons atravessam a membrana eletrolítica até o cátodo. No cátodo, ocorre a reação com o oxigênio fornecido, juntamente com os elétrons retornando pelo circuito externo, formando água como subproduto, descrito em:

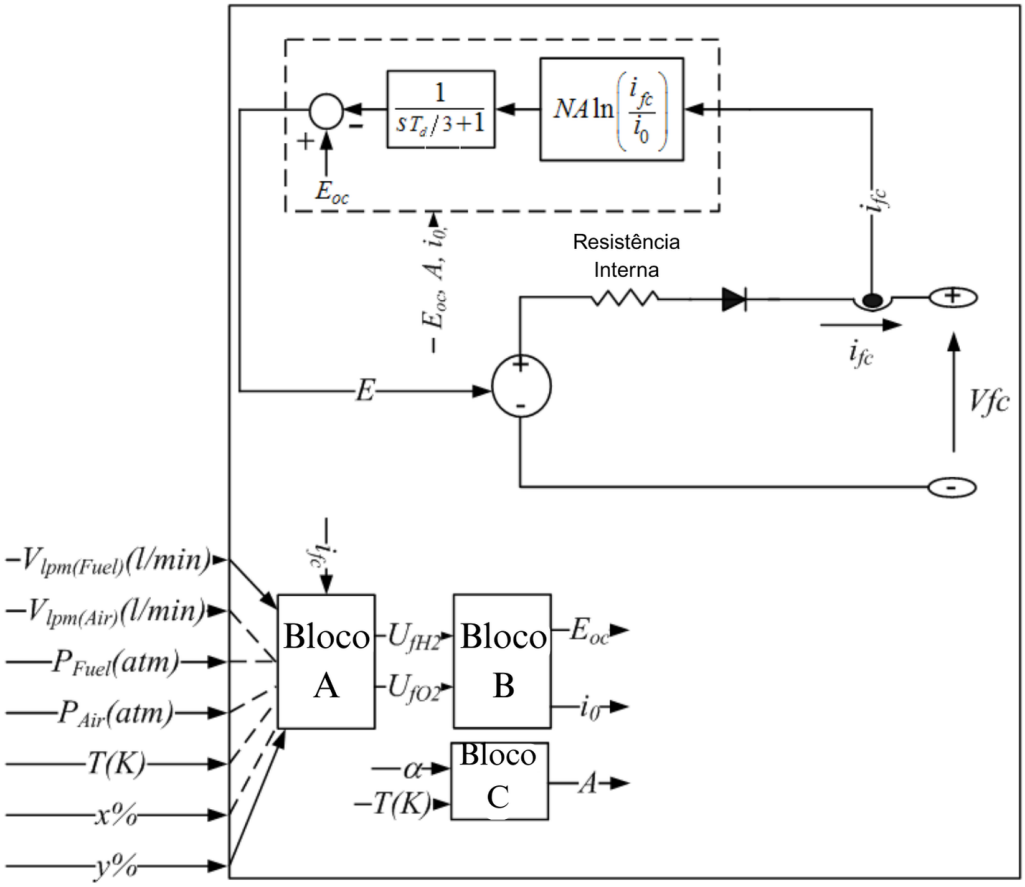
$$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O \tag{2.3}$$

Em condições ideais, a tensão teórica gerada pela reação entre hidrogênio e oxigênio é de 1,23V. No entanto, devido a limitações práticas, como perdas ôhmicas, perdas por ativação e resistência ao transporte de massa, a tensão real da célula normalmente varia entre 0,6V e 0,7V. Esse comportamento influencia diretamente a eficiência da célula, reduzindo seu desempenho conforme a corrente elétrica aumenta (DAS; TAN; YATIM, 2017).

Há diferentes tipos de células, com projetos básicos quase idênticos, variando o eletrólito e o combustível. As principais são: células de combustível de membrana de troca de prótons (PEMFCs), células de combustível de metanol direto (DMFCs), células de combustível de óxido sólido (SOFCs), células de combustível de carbonato fundido (MCFCs), células de combustível de ácido fosfórico (PAFCs) e células de combustível alcalinas (AFCs) (DAUD et al., 2017).

Para a aplicação da célula na microrrede, o modelo presente no *MATLAB/Simulink*, representado pela Figura 7, é utilizado com o intuito de observar todos os parâmetros de operação da mesma e também para suprir a demanda energética presente na microrrede. No modelo descrito, a tensão medida no terminal e a corrente de saída da célula a combustível são representadas por V_{fc} e i_{fc}, respectivamente. Esses valores são determinados pela tensão de circuito aberto (E_{oc}) e pela corrente de troca (i_0), que se alteram conforme os sinais de entrada do sistema.

Figura 7 – Circuito da célula a combustível no *MATLAB/Simulink*.



Fonte: Adaptado de (MathWorks, R2024b).

Os principais parâmetros de operação da célula a combustível são:

- $V_{lpm(Fuel)}$ - Taxa de fluxo do combustível, expressa em litros por minuto (l/min);
- $V_{lpm(Air)}$ - Taxa de fluxo do ar, também medida em l/min;
- P_{Fuel} - Pressão absoluta da alimentação do combustível, em atmosferas (atm);
- P_{Air} - Pressão absoluta do ar fornecido ao sistema, também em atm;
- T - Temperatura operacional, expressa em Kelvin (K);
- $x_{\%}$ - Fração percentual de H_2 presente no combustível;

- $y_{\%}$ - Concentração percentual de O_2 no oxidante.

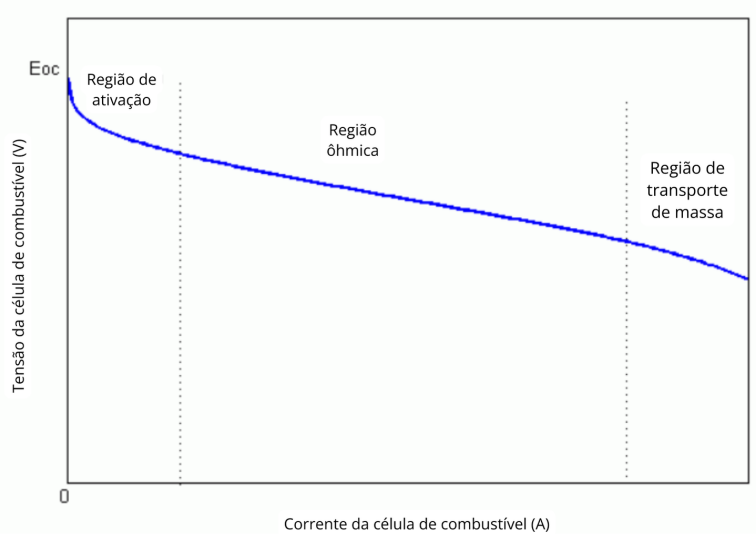
A célula a combustível opera conforme a variação da demanda energética da microrrede, em que neste caso, não serão considerado as variações dos sinais de entrada. O *software* nos permite escolher entre três modelos distintos, sendo eles PEMFC, AFC e SOFC. Para o fim proposto, o modelo PEMFC é selecionado, apresentando a curva V x I, conforme Figura 8, ilustrando as três regiões operacionais correspondentes (MathWorks, R2024b).

A primeira região está relacionada às perdas por ativação, que ocorrem devido à lentidão das reações eletroquímicas nos eletrodos. Essas perdas são influenciadas por fatores como temperatura e pressão de operação, além do tipo de eletrodo e catalisador empregados. Dependendo dessas variáveis, a magnitude dessa queda de tensão pode variar.

A segunda região corresponde às perdas ôhmicas, associadas à resistência interna da célula. Essa resistência é resultado da condução de íons através do eletrólito e do transporte de elétrons pelos materiais condutores, sendo diretamente influenciada pela composição e estrutura dos componentes internos.

Por fim, a terceira região representa as perdas por concentração, também conhecidas como perdas de transporte de massa. Essas perdas ocorrem devido à diminuição da concentração dos reagentes próximos às superfícies catalíticas, à medida que o combustível é consumido, limitando a taxa de reação e reduzindo a eficiência do sistema. (MathWorks, R2024b).

Figura 8 – Curva V x I do modelo no *MATLAB/Simulink*.



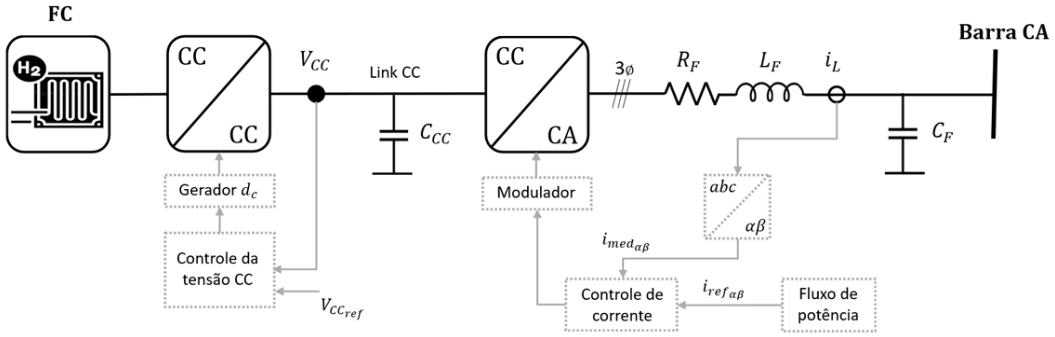
Fonte: Adaptado de (MathWorks, R2024b).

A Figura 9 ilustra a conexão da célula a combustível ao barramento de corrente alternada. O sistema também inclui um conversor CC/CC, que estabelece ligação com o barramento de corrente contínua. Além disso, há também um conversor CC/CA, para

essa integração. O controle aplicado à tensão do barramento CC regula sua operação, permitindo o fornecimento de energia ao sistema de CA.

A regulação da tensão é realizada por um controlador PID, que compara a tensão V_{CC} com o valor de referência V_{CC-Ref}. O conversor CC/CC tem a função de elevar as tensões reduzidas nos terminais da célula, ajustando-as para um nível fixo no barramento CC. A dinâmica deste, por sua vez, está diretamente associada à demanda de potência da microrrede (SANTOS, 2024).

Figura 9 – Integração da Célula a Combustível com o barramento CA.



Fonte: (SANTOS, 2024).

2.2.2 Gerador a diesel

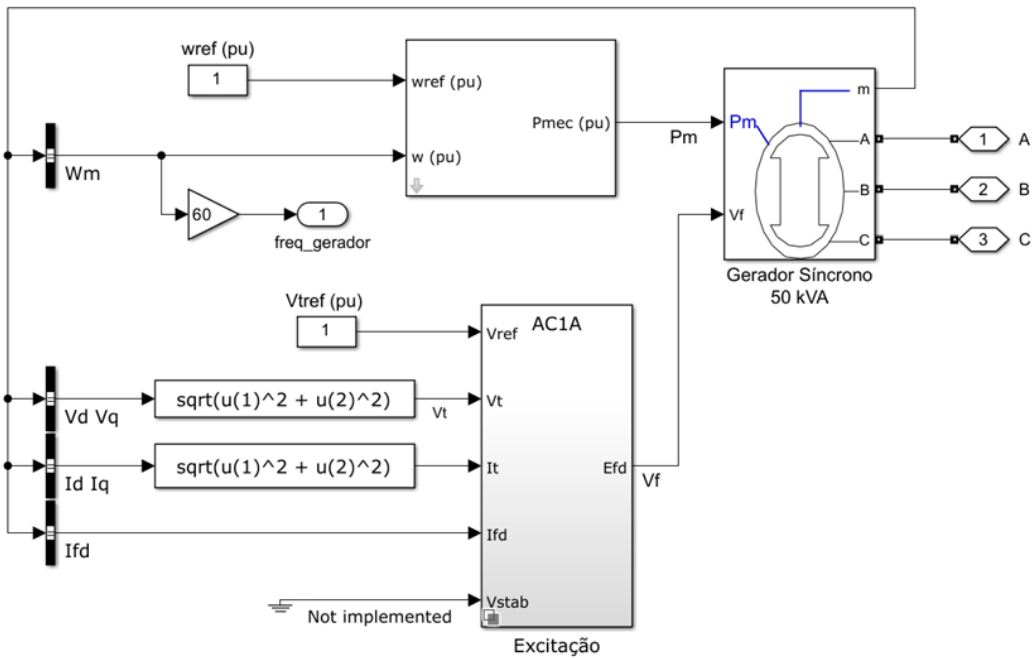
O gerador a diesel é o elemento da parte CA da microrrede responsável por regular a tensão e a frequência da microrrede. O bloco da Figura 10 é responsável pela dinâmica da máquina síncrona, pode operar tanto como gerador quanto como motor, dependendo do valor da potência mecânica (P_m) aplicada ao seu terminal. Além disso, a tensão V_f gerada pelo sistema de excitação também modela o comportamento da máquina (SANTOS, 2024).

2.2.3 Fotovoltaica

A geração fotovoltaica (FV) é de forma geografica, o meio mais distribuído de produção de eletricidade, e de certa forma, a integração da energia solar nas microrredes é inevitável. Como pode-se visualizar na Figura 11, a energia fotovoltaica aumentou consideravelmente até 2020, em comparação com a capacidade em 2011, ultrapassando a tecnologia eólica (BACHA et al., 2015; SHAFIULLAH; AHMED; AL-SULAIMAN, 2022).

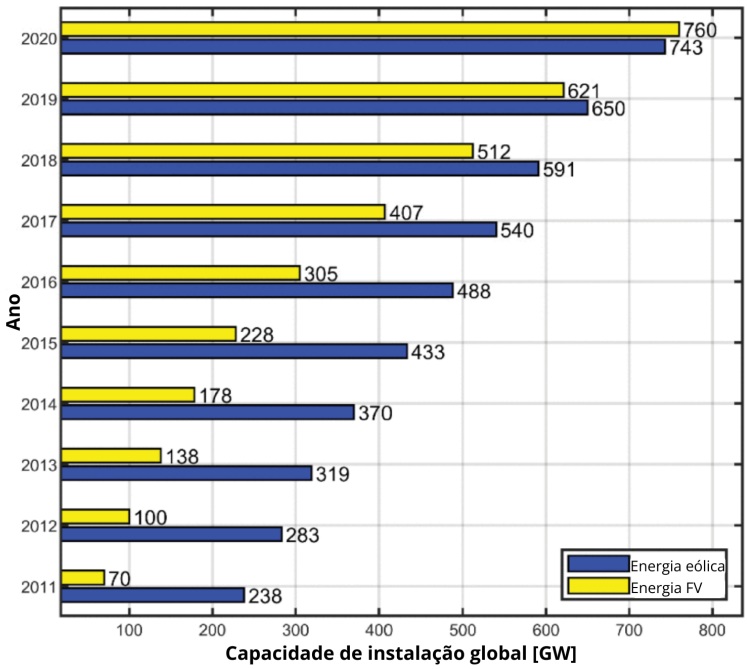
A configuração da FV na microrrede, para fins de simulação, é utilizando o bloco *PV Array* da biblioteca do *MATLAB/Simulink*. Este bloco simula o comportamento de módulos FV, em que é formado por múltiplas strings conectadas em paralelo, e cada string constituindo de módulos conectados em série. Além disso, permite utilizar modelos predefinidos do *National Renewable Energy Laboratory (NREL) System Advisor Model (2018)*, com os parâmetros bem definidos (MathWorks, 2024b).

Figura 10 – Gerador presente no *MATLAB/Simulink*.



Fonte: (SANTOS, 2024).

Figura 11 – Capacidade global de geração de energia eólica e fotovoltaica.

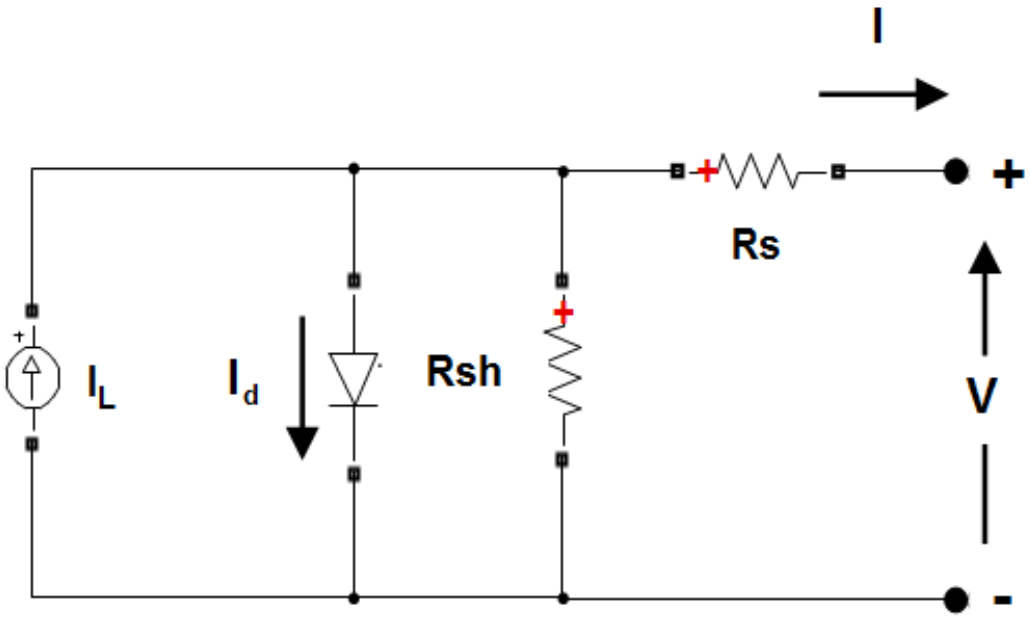


Fonte: Adaptado de (SHAFIULLAH; AHMED; AL-SULAIMAN, 2022).

A Figura 12 seguinte demonstra o circuito equivalente, nele é constituído por uma fonte de corrente (I_L), conectada em paralelo a um diodo e duas resistências, sendo uma em paralela (R_{sh}) e outra em série (R_s), representando as perdas. A curva característica I-V de um módulo fotovoltaico é determinada pela relação entre a tensão e a corrente de saída em seus terminais. Esses valores são influenciados diretamente pelas condições de

irradiância solar e temperatura do ambiente (IORIS, 2021).

Figura 12 – Circuito da *PV Array*.



Fonte: (MathWorks, 2024b).

As condições de temperatura e irradiação solar são definidas, na condição padrão, de acordo com a *Standard Test Conditions* (STC), em 25°C e $1.000W/m^2$. Nestas condições, o módulo opera em sua potência máxima $Ppmax$, disponibilizando a tensão V_p e a corrente I_p correspondentes ao ponto de máxima potência (MARQUES, 2023).

A integração do módulo FV com a rede elétrica, necessita de uma conversão CC/CA, como segue na Figura 13, a malha de controle que gera o sinal que modula o conversor, tem o intuito de representar a dinâmica do barramento CC. O controle considera a estimativa de energia armazenada no capacitor (C_{cc}), conforme a Equação (2.4). Nesta equação, P_{fv} representa a potência gerada pelo sistema FV, enquanto P_{VSC} é a potência fornecida à rede elétrica pelo conversor.

Quando há uma diferença entre P_{fv} e P_{VSC}, a tensão V_{cc} sofre variações, resultando em um erro em relação ao valor de referência V_{ref}. Para corrigir essa diferença, o controle de tensão atua na corrente de referência I_{ref}, ajustando a malha de controle de corrente do conversor. Esse controle em I_{ref} modifica a potência ativa que o VSC (*Voltage-Source Converter*) fornece a rede, ocasionando na variação da potência em P_{VSC}. Dessa forma, o sistema obtém um novo ponto de equilíbro, em que igualam-se as potências e a tensão V_{CC} com a referência.

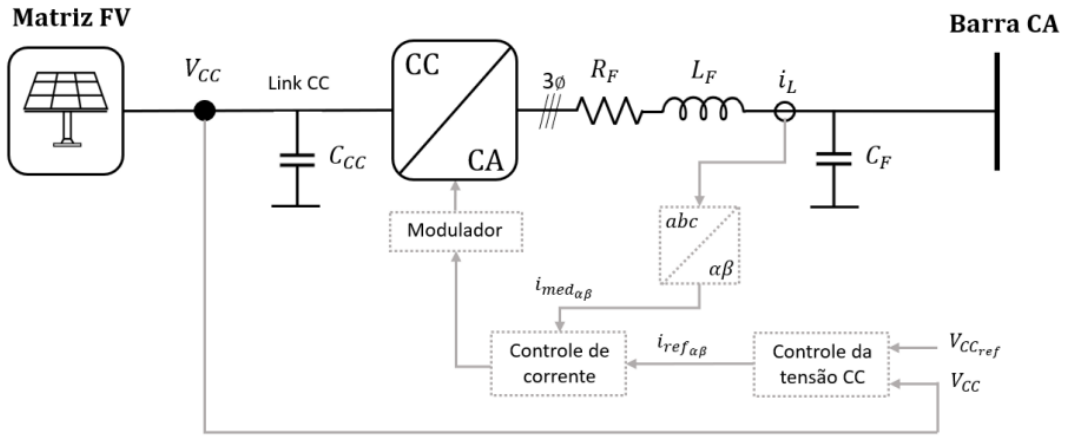
$$\frac{d[V_{cc}(t)]}{d(t)} = \frac{P_{fv} - P_{VSC}}{C \cdot V_{cc}(t)} \tag{2.4}$$

O controle da tensão no barramento CC é realizado indiretamente, comparando a tensão CC medida ao quadrado com o valor de referência ao quadrado. O erro gerado é

processado por um controlador PI, que define a potência de referência P_{ref}, determinando assim a corrente de referência para o controle de corrente do sistema, conforme: (SANTOS, 2024).

$$P_{ref} = k_{pfv}\left(1 + \frac{1}{T_{pfc} \cdot s}\right) \cdot \left(V_{cc_ref}^2 - V_{cc}^2\right) \tag{2.5}$$

Figura 13 – Integração da FV com o barramento CA.



Fonte: (MARQUES, 2023).

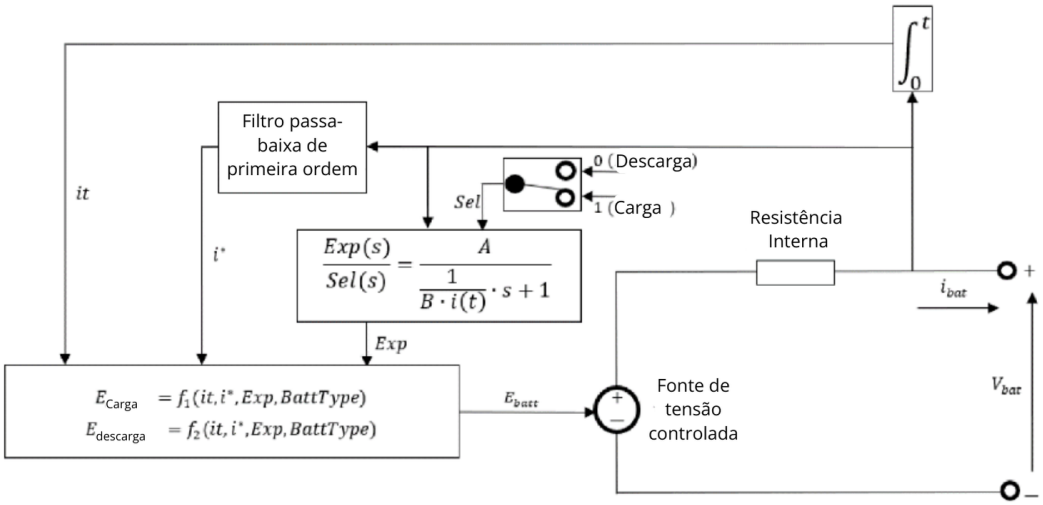
2.2.4 *Battery Energy Storage System*

O sistema de armazenamento de energia em bateria (BESS), consiste em outro elemento presente nas microrredes, que permite melhorar a estabilidade e confiabilidade do sistema de energia. Com a capacidade de fornecer energia para evitar interrupções e também ajudando nas variações na demanda energética. A integração deste, permite que a energia seja armazenada e liberada, a depender da necessidade do sistema (CORTéS-CAICEDO et al., 2024).

Na Figura 14, é apresentado o circuito da bateria do *MATLAB/Simulink*, nota-se as equações de carga e descarga, a depender do tipo de bateria utilizada, representando o comportamento de fornecimento e de carga energética. Para estimar o quanto há de energia armazenada em uma bateria, a grandeza SoC, que representa o estado de carga, exerce essa função, em que analisando o comportamento dela, é possível determinar o momento de carregamento e descarregamento do BESS e seu limite operacional (MARQUES, 2023).

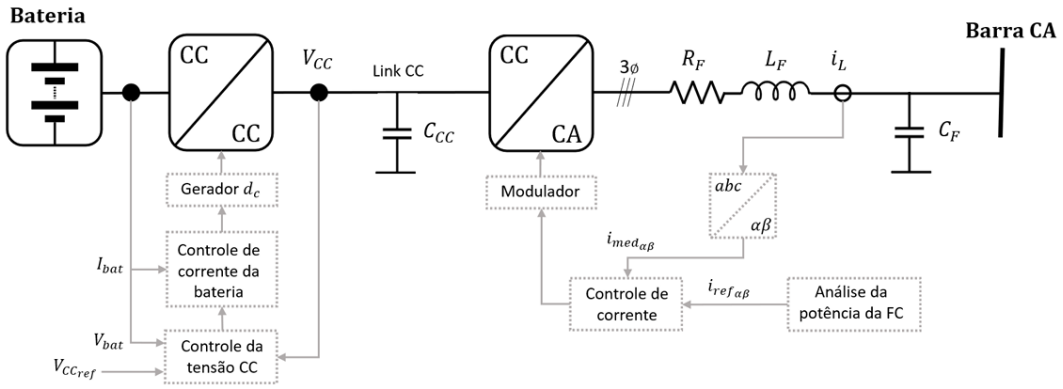
A seguir, na Figura 15, está ilustrada a estrutura completa do BESS conectado ao barramento CA. O sistema CC é composto pela bateria, pelo conversor CC/CC conectado ao barramento CC com um capacitor C_{cc} e uma malha de controle de potência. Além disso, há um conversor CC/CA, responsável por conectar o BESS à rede elétrica. A função da malha de controle no conversor CC/CC é permitir o fluxo bidirecional de energia, possibilitando o carregamento e descarregamento do sistema conforme necessário (MARQUES, 2023; SANTOS, 2024).

Figura 14 – Equivalente da bateria no *MATLAB/Simulink*.



Fonte: Adaptado de (MathWorks, R2024b).

Figura 15 – Integração do BESS com o barramento CA.



Fonte: (SANTOS, 2024).

O controle é composto por duas malhas, uma para controlar a tensão V_{cc} e outra para o controle da corrente I_{bat}, por meio de dois controladores PI, conforme:

$$I_{batref} = k_{vb}\left(1 + \frac{1}{T_{vb} \cdot s}\right) \cdot (V_{ccref} - V_{cc}) \tag{2.6}$$

$$V_{batref} = k_{ib}\left(1 + \frac{1}{T_{ib} \cdot s}\right) \cdot (I_{batref} - I_{bat}) \tag{2.7}$$

2.3 ESTRATÉGIAS DE GERENCIAMENTO

Nesta seção, são apresentados os principais conceitos que envolvem Lógica *Fuzzy* e PSO, que podem ser aplicados no gerenciamento de elementos dentro da microrrede.

2.3.1 Lógica *Fuzzy*

A lógica *fuzzy*, também conhecida como lógica nebulosa, opera com valores aproximados em vez de exatos. Diferente das lógicas tradicionais, nas quais uma afirmação pode ser apenas verdadeira (1) ou falsa (0), na lógica fuzzy o valor verdade pode pertencer a um subconjunto fuzzy dentro de um conjunto parcialmente ordenado. Isso permite representar conceitos de forma mais flexível, utilizando termos linguísticos como "verdade", "muito verdade", "falso"e "muito falso", ao invés de apenas valores binários rígidos.

Os termos linguísticos ao qual a lógica *fuzzy* sugere, estão relacionadas as funções de pertinência. Baseada em conversão de variáveis numéricas em conjuntos fuzzy, nos quais cada valor recebe um grau de pertinência dentro de determinadas categorias. Por meio de regras linguísticas do tipo "se-então", é possível definir ações específicas para cada situação. Como por exemplo, "se a temperatura está alta, então aumentar a velocidade do ventilador", em que após a inferência *fuzzy*, os resultados são convertidos novamente em valores numéricos para o controle do sistema (GOMIDE; GUDWIN, 1994).

A Figura 16 ilustra exemplos de funções de pertinência de temperatura, com as variáveis frio, conforto, relativamente quente e quente, assim como o limite *fuzzy*, representado pela intersecção dos intervalos das funções. E na Figura 17, apresenta o diagrama da formação do fuzzy.

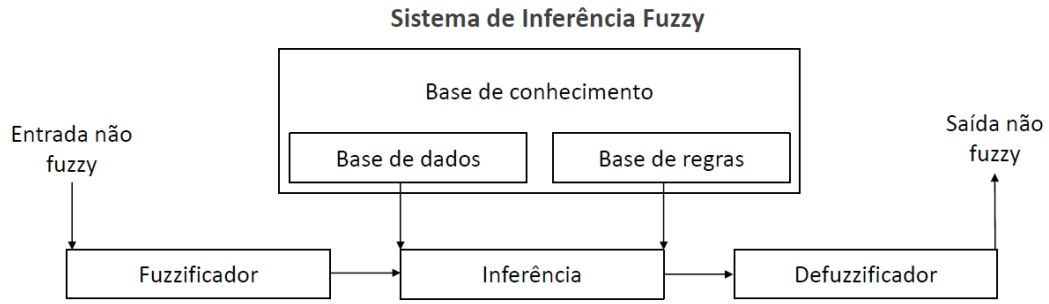
Figura 16 – Exemplo de funções de pertinência.

Fonte: (ALBUQUERQUE, 2015).

Conforme ilustrado na Figura 17, o sistema *fuzzy* é composto por etapas, que podem ser descritas como:

- **Fuzzificador**: O processo de fuzzificação consiste na aplicação de funções de pertinência a cada entrada do sistema, convertendo valores numéricos em representações fuzzy. O resultado desse processo é um grau de pertinência dentro do intervalo [0,1], permitindo a associação de uma variável numérica a um conjunto fuzzy específico. Cada uma dessas associações é denominada variável linguística, pois traduz a entrada para uma forma interpretável pelo sistema.

Figura 17 – Diagrama do *fuzzy*.



Fonte: Adaptado de (ALBUQUERQUE, 2015).

- **Base de regras**: A base de regras é composta por um conjunto de afirmações do tipo "se-então", estruturadas a partir do conhecimento de especialistas ou extraídas de bases de dados. Essas regras definem a relação entre as variáveis fuzzy, permitindo que o sistema tome decisões com base em inferências linguísticas.

- **Inferência**: O mecanismo de inferência atua como um processador que relaciona os conjuntos fuzzy de entrada com os conjuntos fuzzy de saída. Esse mecanismo determina a ativação e a combinação das regras fuzzy, formando a base do processo decisório. Entre os principais modelos de inferência estão o modelo de Mamdani e o modelo de Takagi-Sugeno.

- **Defuzificador**: Essa etapa consiste na conversão dos valores fuzzy em valores reais, permitindo obter uma saída matematicamente bem definida. O processo de defuzzificação é essencial para interpretar os resultados do sistema fuzzy e aplicá-los a um contexto prático, garantindo que a decisão final seja representada por um valor numérico.

2.3.2 *Particle Swarm Optimization* (PSO)

A otimização por enxame de partículas apresentam raízes em suas ligações com vida artifical em geral, e no comportamento de bandos, como pássaros, peixes, teoria do enxame. Vale ressaltar que, está relacionada também à computação evolutiva, como por exemplo, os algoritmos genéticos (AG). O conceito é simples, computacionalmente econômico, e eficaz em diversos tipos de problemas (KENNEDY; EBERHART, 1995).

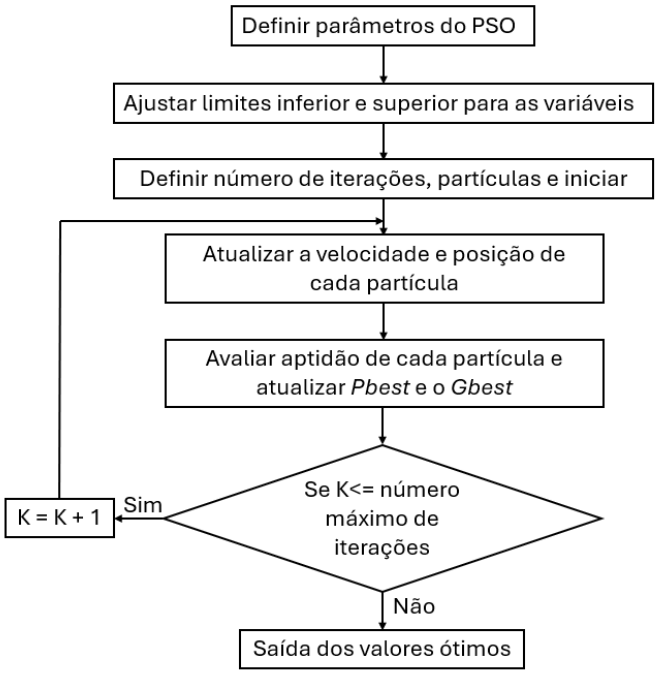
O PSO é semelhante ao AG, no quesito de ser iniciado com uma população de soluções aleatórias. E diferente, em que cada solução recebe uma velocidade aleatória, e essas soluções que são denomidadas de partículas buscam explorar todo o espaço do problema.

As partículas controlam suas coordenadas através da melhor solução encontrada até o momento para ela, de acordo com a função objetivo (*fitness*), valor este chamado de *pbest*. Por outro lado, há também o *gbest*, que consiste no melhor valor encontrado pela

versão geral, ou seja, o melhor valor encontrado por qualquer partícula na população (EBERHART; SHI, 2001).

Por ser um algoritmo com uma estrutura simples, não há tamanha complexidade, principalmente ao utilizar o *MATLAB/Simulink* que apresenta um biblioteca própria para a aplicação. A seguir na Figura 18 é demonstrada uma breve descrição de como é estruturado no *software*. A biblioteca *particleswarm* também nos possibilita adicionar outros critérios de parada no algoritmo, caso seja interessante para o problema, além de definir os parâmetros.

Figura 18 – Fluxograma do PSO.



Fonte: Adaptado de (MARQUES, 2018).

De acordo com a Figura 18, os passos presentes são descritos como:

1. **Definição de Parâmetros:** Configuração dos valores iniciais de w, c_1 e c_2, que consistem no peso inercial e as influências de *pbest* e *gbest*, respectivamente.

2. **Inicialização:** As partículas são posicionadas aleatoriamente dentro dos limites estabelecidos.

3. **Iteração Inicial:** Definição de k inicializando na iteração 0.

4. **Avaliação da Aptidão:** Cálculo da função objetivo para cada partícula e identificação da melhor partícula.

5. **Atualização de Melhorias:** Definição de $pbest_i$ e *gbest* para cada partícula.

6. **Atualização da Velocidade:**

$$v_{i,j}^{k+1} = wv_{i,j}^{k} + c_1 \cdot \text{rand}()(pbest_{i,j}^{k} - X_{i,j}^{k}) + c_2 \cdot \text{rand}()(gbest_{j}^{k} - X_{i,j}^{k}) \tag{2.8}$$

7. **Atualização da Posição:**

$$X_{i,j}^{k+1} = X_{i,j}^{k} + v_{i,j}^{k+1} \tag{2.9}$$

8. **Condição de Parada:** Se k for menor que o número máximo de iterações, incrementa-se k e o processo continua. Caso contrário, a melhor solução encontrada é retornada. Com a utilização do *MATLAB/Simulink*, outros critérios podem ser considerados de forma direta, como o *MaxStallIterations*, que para o processo e retorna a melhor solução, quando após um valor definido de iterações não alterar *gbest*.

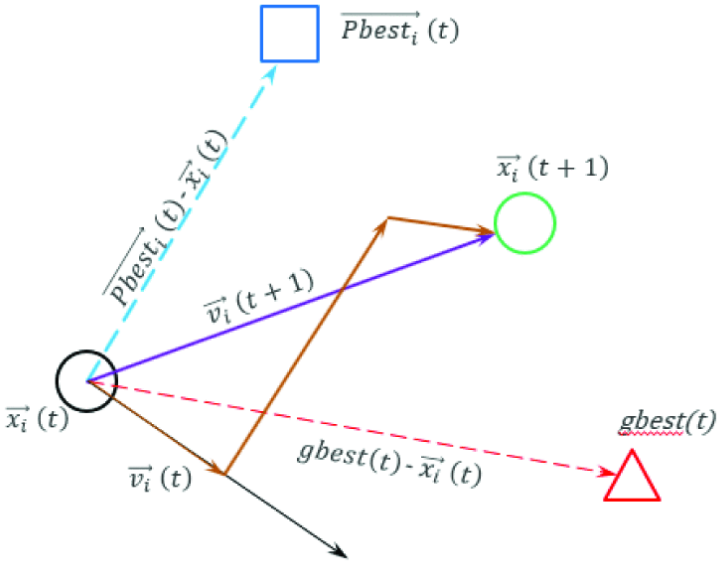
O algoritmo inicialmente gera uma população inicial, em que a velocidade da partícula é o principal parâmetro para a otimização. Essa velocidade é ajustada de acordo com a posição relativa de *pbest* e *gbest*, por meio de 2.8, onde resulta em uma nova velocidade, sendo responsável por impulsionar o processo. Os parâmetros c_1 e c_2 referem-se aos valores de influencia do melhor *pbest* da partícula e *gbest*, respectivamente. Ao aumentar o valor de c_1 a exploração de soluções passa a se mover em direção ao seu *pbest* e ao aumentar o valor de c_2 ao global (MARQUES, 2018).

O peso inercial, por sua vez, reflete diretamente na velocidade das partículas, representado por w, e equilibra a capacidade de exploração, controlando de certa forma, quanto a partícula mantém sua direção e velocidade. Um peso inercial maior, faz com que as partículas explorem mais o espaço de busca, já um menor, elas se concentram em regiões mais restritas. E assim, as novas posições das partículas são definidas pela equação 2.9 (EBERHART; SHI, 2001).

A Figura 19 ilustra a atualização de velocidade e posição do PSO, em que o $x_i(t)$ indica a posição atual da partícula, com uma velocidade $v_i(t)$ indicada pela seta preta. Durante a próxima iteração, a partícula irá atualizar sua velocidade, levando em consideração a velocidade anterior, juntamente com as influências do melhor ponto já encontrado pela partícula e do melhor ponto global. Dessa forma, a nova posição da partícula é definida.

A função *fitness* trata-se da função objetivo, que guia o processo de otimização. Ela define o que o algoritmo tenta maximizar ou minimizar, e é com base nela, que as partículas avaliam a qualidade das suas posições no espaço de busca. No caso de definição de parametros de controlador PID, por exemplo, índices como ISE (*Integral of Squared Error*), IAE (*Integral of Absolute Error*), IATE (*Integral of Absolute Time-wighted Error*) e MSE (*Mean Squared Error*), são avaliados como função que corresponderá ao objetivo do problema, para minimizar um desses índices (SONI; BHATT, 2013).

Figura 19 – Ilustração do movimento de partículas.



Fonte: (TÜRKLER; AKKAN; AKKAN, 2020).

3 METODOLOGIA

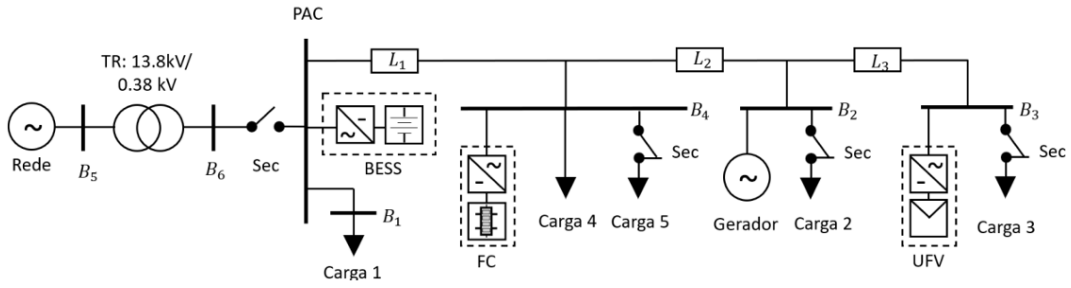
Neste capítulo será abordado a metodologia aplicada no desenvolvimento deste trabalho. Em que o software *MATLAB/Simulink* foi utilizado em um computador com a configuração Intel Core i9-13900K de 3.00 GHz e 32 GB de RAM, para ajustar o bloco *Fuzzy* com o PSO, na simulação dentro do *Simulink*, buscando reduzir os consumos da célula a combustível.

3.1 ARRANJO DA MICRORREDE

Com base no que foi discutido, a simulação da microrrede foi realizada no *MATLAB/-Simulink* para avaliar os resultados da aplicação do algoritmo PSO na otimização dos parâmetros da função de pertinência do sistema fuzzy. A estrutura da microrrede foi modelada seguindo a abordagem proposta por (SANTOS, 2024), conforme ilustrado na Figura 20.

A microrrede é composta por uma rede CA interligada à rede elétrica principal, representada por uma fonte trifásica. A conexão ocorre no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) por meio de uma chave seccionadora e um transformador elevador (0,38/13,8 kV), garantindo a adequação dos níveis de tensão. Os valores nominais de operação dos componentes da microrrede estão apresentados na Tabela 1.

Figura 20 – Estrutura simulada.



Fonte: (SANTOS, 2024).

Como a microrrede simulada há elementos que geram energia de corrente contínua, como BESS, FC e FV, um condicionamento de energia é necessário para realizar integração com o barramento CA. E dessa forma, entra o VSC, para auxiliar nessa transição, controlada por uma malha de controle de corrente, relacionada a potência de referência. E como o BESS nessa MR entrará para manter a FC na região de melhor eficiência, a potência de referência do BESS dependerá de forma direta dos limites da potência de FC.

No caso da célula a combustível, a corrente de referência para o controle de VSC leva em consideração a potência de referência que o sistema está solicitando. Em outras palavras, a potência de referência da P_{FC} dependerá do fluxo de potência da microrrede,

Tabela 1 – Parâmetros dos recursos energéticos distribuídos da microrrede na simulação.

Elementos	**Descrição**	**Valores (unidade)**
Parâmetros da MR	Tensão nominal	380V
	Frequência nominal	60 Hz
RED	Gerador a diesel	50 kVA
	FC (modelo PEM)	50 kVW (nominal)/120.4 kVW (máxima)
	Sistema FV	35.6 kWp
	BESS	50 kW
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	$R = 0.198\,\Omega$/km
	L2 – 200 metros	$X = 0.1089\,\Omega$/km
	L3 – 100 metros	
Transformador	Nível de tensão	0.38/13.8 kV
	Potência nominal	50 kVA
	Reatância	6%

Fonte: Adaptado de (SANTOS, 2024).

conforme em 3.1, ressaltando que, o BESS não é considerada na "Geração", por auxiliar no funcionamento da FC, atuando quando os limites de operação da FC forem superados. Exemplo disso, quando o requerido para a célula for superior ao limite máximo, o BESS irá injetar potência na MR, e quando for inferior ao limite mínimo, ele irá absorver essa diferença.

Com relação a fotovoltaica, nessa estrutura é controlado por meio da energia do barramento CC, representada por uma fonte de energia não despachável, em que não há controle sobre sua potência injetada, dependendo unicamente da irradiância solar.

Para a FV e o BESS, os controles foram implementados por PI, com ajuste de parâmetros representados por (MARQUES, 2023). E para o controle da FC, o *PID Tuner* presente no *MATLAB/Simulink* foi utilizado.

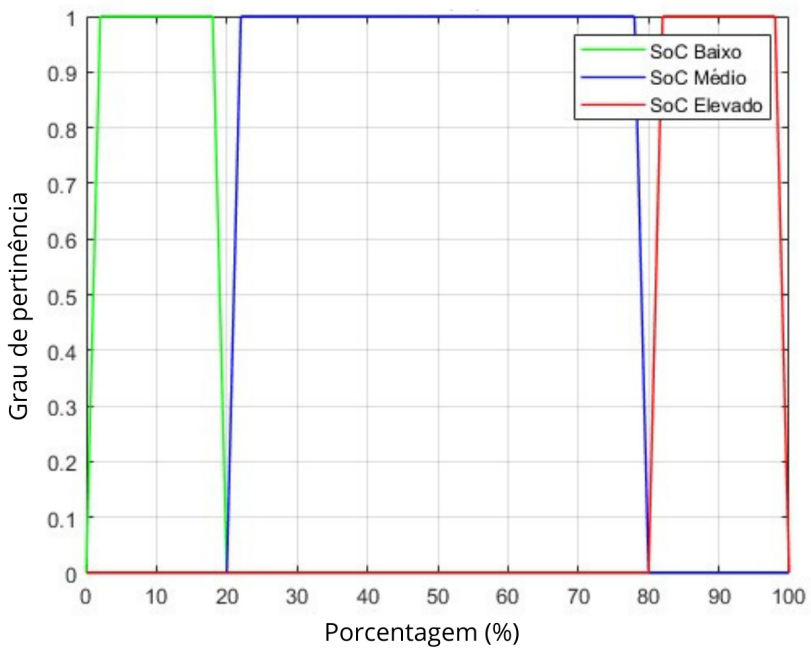
$$P_{\mathrm{REF}_{FC}} = \sum \mathrm{GERAÇÃO} - \sum \mathrm{CARGA} \tag{3.1}$$

3.2 CONTROLE BASEADO EM *FUZZY*

Para a aplicação do controle *fuzzy* os parâmetros de entradas definidos foram o SoC da bateria e a potência da microrrede, denominada por ΔP, que está associada a potência que é solicitada para a célula a combustível. Dessa forma, é necessário definir a variável linguística e as funções de pertinência de cada uma das variáveis.

O SoC varia de 0 a 100% seus valores, e de acordo com a Figura 21, nota-se que o SoC_{baixo} compreende a região de 0 a 20%, o $SoC_{médio}$ de 20 à 80% e $SoC_{elevado}$ entre 80 e 100%.

Figura 21 – Exemplo de gráfico da função de pertinência do SoC, indicando os níveis.



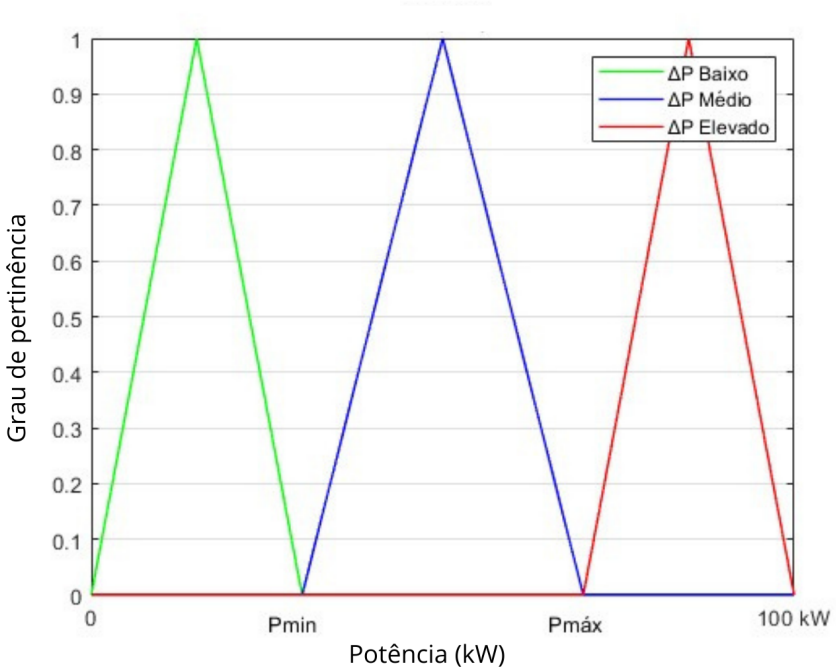
Fonte: Próprio autor (2025).

Para o ΔP, assim como o SoC, foram definidas seus parâmetros, em que seus valores variam de 0 a 100 kW. Variando apenas nos intervalos e suas funções de pertinência, em que ΔP_{Baixo} são considerados os valores entre 0 e a potência mínima, $\Delta P_{Médio}$, valores entre potência mínima e máxima e por fim, $\Delta P_{Elevado}$, considerando os valores entre potência máxima e 100 kW, como pode ser visualizado um exemplo na Figura 22.

As funções de pertinência da saída do controlador *fuzzy* buscam entregar valores na melhor região de eficiência da célula a combustível, variando entre 40 e 55kW. Dessa forma, funções foram delimitadas para trabalhar entre essa faixa, e no interior dessa faixa, foi definido o comportamento da função de pertinência da FC, ajustada com o PSO, discutido no próximo subtópico.

Além disso, as regras do sistema devem ser para garantir que a lógica opere conforme o esperado. Nesse sentido, conforme a Tabela 2, as regras foram estabelecidas, pois constituem a base do sistema de inferência. Ressaltando que, para cada uma das regras

Figura 22 – Exemplo de gráfico da função de pertinência para ΔP, indicando os níveis.



Fonte: Próprio autor (2025).

ilustradas, o peso mantido para cada uma delas foi de "1", para manter um certo equilíbrio no sinal de controle gerado.

Tabela 2 – Exemplo de regras para o bloco *fuzzy* referente a FC_{ref}.

Nº	**Regra**
1	Se SoC é Médio e ΔP é ΔP_{med} então FC_{ref} é FC_{med}
2	Se SoC é Médio e ΔP é ΔP_{baixo} então FC_{ref} é FC_{baixo}
3	Se SoC é Médio e ΔP é $\Delta P_{elevado}$ então FC_{ref} é FC_{alto}

Fonte: Próprio autor (2025).

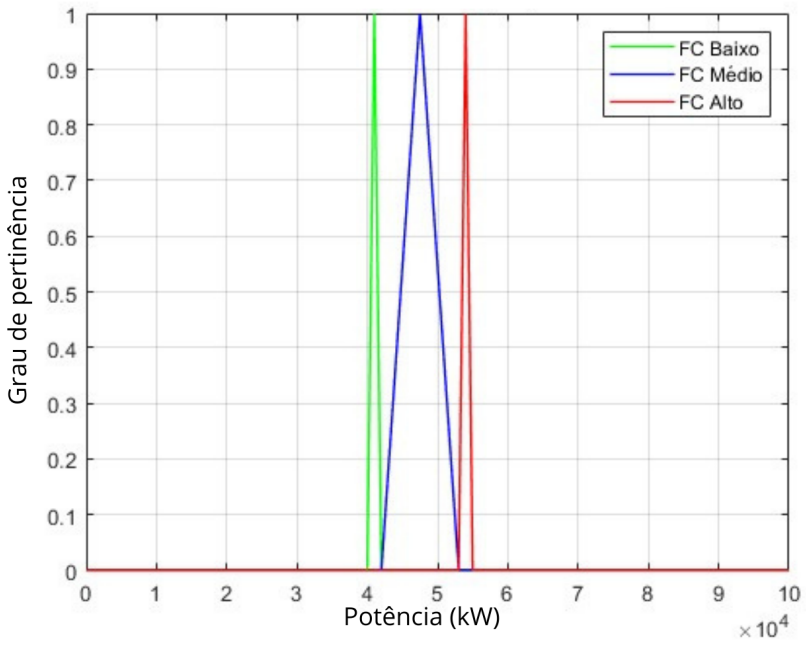
3.3 *FUZZY* AJUSTADO COM PSO

As funções de pertinência da saída, P_{FC}, tiveram seus parâmetros das triangulares definidos a partir do PSO, com o auxílio do *MATLAB/Simulink* para compilar o algoritmo. No *software* fez-se a utilização do "optimoptions" para criar funções de otimização via *script .m* do *MATLAB*. Dessa forma, tornou-se possível criar o enxame de partículas para otimizar a função objetivo, de minimizar o consumo da FC e manter a estabilidade em sua tensão de barramento CC.

Inicialmente, o número de partículas e de iterações são definidos, assim como os limites inferiores e superiores para as variáveis em questão. Como o intuito é definir os parâmetros

de funções de pertinência triangulares, na melhor região de eficiência da FC, os limites foram definidos entre 40 kW e 55kW, como ilustrado em um exemplo na Figura 23.

Figura 23 – Exemplo de gráfico da função de pertinência para P_{FC}, indicando os níveis.



Fonte: Próprio autor (2025).

Na sequência, de acordo com (EBERHART; SHI, 2001), os valores tanto de c_1 quanto de c_2 foram definidos para 2,0. Além disso, o *MATLAB/Simulink* nos permite definir diretamente outros critérios de parada, além do limite de iterações como o "*MaxStallIterations*"e o "*FunctionTolerance*".

Este primeiro determina o número máximo de iterações consecutivas em que o valor da função objetivo não apresenta melhoria. Por exemplo, ao aplicar 20 iterações, caso a função não apresente dados melhores após essa definição, o algoritmo para de forma automática. A *FunctionTolerance* funciona de uma forma semelhante, sendo determinado a parada do algoritmo se durante as iterações, a função objetivo for menor que a definida nesse critério, caso seja, o algoritmo assume que encontrou uma solução satisfatória e interrompe a execução.

A função objetivo proposta era de minimizar o consumo da FC, relacionada ao oxigênio e hidrogênio, mantendo a estabilidade da tensão do barramento CC da FC em 700 kV. Com esse intuito, a função *fitness* do PSO foi definida como:

$$\text{FO} = Consumo(O_2 + H_2) + \lambda \cdot (V_{dc_média} - 700)^2. \tag{3.2}$$

4 SIMULAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as alterações realizadas na microrrede simulada, incluindo variações nas fontes de geração e nos perfis de carga adotados, como mudanças na geração fotovoltaica e na demanda das cargas. Além disso, são discutidas as estratégias de controle aplicadas na atuação da célula a combustível para manter a estabilidade do sistema e a otimização do gerenciamento energético por meio da lógica *fuzzy* e do *fuzzy* ajustado com PSO.

4.1 OPERAÇÃO DA MICRORREDE

A simulação da microrrede baseada na Figura 20, considera variações de carga e geração no modo ilhado. Ao longo de 12 segundos de simulação no *MATLAB/Simulink*, as perturbações ocorreram da seguinte forma:

- T = 2,65s, potência da fotovoltaica aumenta de 31 kWp para 35,6kWp;
- T = 4s, a demanda da microrrede diminui em 22,5kW, por conta da desconexão da carga 5;
- T = 6s, a potência demandada aumenta em 26,5kW, com a entrada da carga 3;
- T = 8s, potência da fotovoltaica diminui de 35,6kWp para 16.3kWp;
- T = 10s, a potência solicitada aumenta em 7,5kW, com entrada da carga 2.

Com as definições apresentadas, a Figura 24 representa o perfil das cargas, durante a simulação. As cargas 4 e 5 no mesmo barramento CA, são representadas pelo somatório.

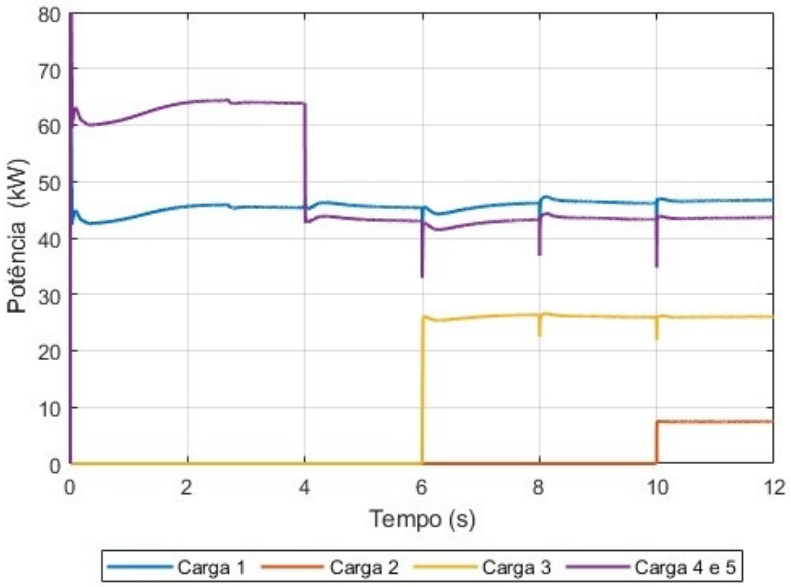
No cenário de operação da microrrede, algumas ações foram adotadas para definir os limites de funcionamento do gerador a diesel. Uma dessas estabelece que a potência injetada pelo gerador deve estar dentro do intervalo de 40% a 100% de sua potência nominal.

Para garantir que essa restrição seja respeitada, foi necessário determinar a contribuição da célula a combustível na microrrede. Considerando a operação do gerador a diesel, a geração fotovoltaica e a demanda da carga, a potência solicitada à FC foi ajustada conforme:

$$P_{ref_{FC}} = k\left(P_{FV} - \sum Carga\right). \tag{4.1}$$

O fator k foi definido de modo a manter a operação do gerador dentro da faixa estabelecida, permitindo que ele funcione entre 40% e 100% de sua capacidade nominal. Como resultado, a parcela de potência destinada à FC corresponde a 60% do fluxo de potência da microrrede durante as condições normais de operação.

Figura 24 – Cargas.



Fonte: Próprio autor (2025).

4.2 GERENCIAMENTO COM LÓGICA *FUZZY*

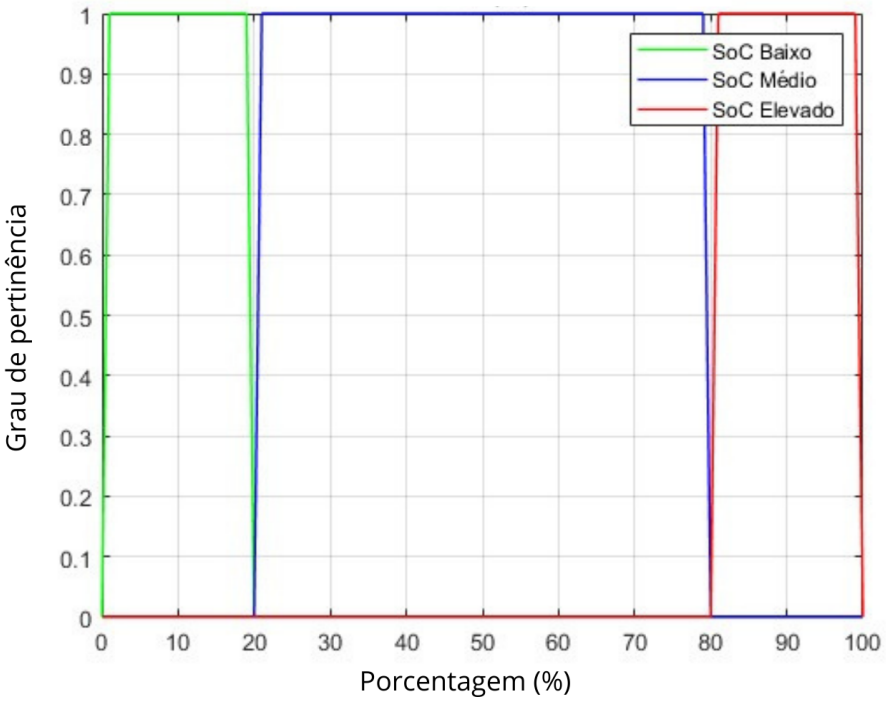
Para os ajustes do *fuzzy*, levando em consideração duas variáveis de entrada, sendo elas SoC e ΔP, foram geradas as Figuras 25 e 26, respectivamente. Em que, como citado na seção 3.2, o SoC varia entre 0 e 100% da capacidade, e os intervalos definidos como apresentam na figura, ressaltando que o SoC inicial para simulação foi definido como sendo 45%. O mesmo foi executado para ΔP, variando as potências em kW, definidos como melhor região de eficiência para a célula a combustível operar entre 0,8 da potência nominal e 1,1, que correspondem a 40kW e 55kW, respectivamente, a potência mínima e máxima definida. Assim como, as regras estabelecidas na Tabela 3.

Tabela 3 – Regras do controle *Fuzzy*.

Número	**Regra**	**Peso**
1	Se SoC é Médio e ΔP é ΔP_{baixo} então FC_{ref} é FC inf	1
2	Se SoC é Médio e ΔP é $\Delta P_{elevado}$ então FC_{ref} é FC sup	1
3	Se SoC é Médio e ΔP é $\Delta P_{médio}$ então FC_{ref} é FC médio	1
4	Se SoC é Médio e ΔP é $\Delta P-$ então FC_{ref} é FC baixo	1
5	Se SoC é Médio e ΔP é $\Delta P+$ então FC_{ref} é FC alto	1

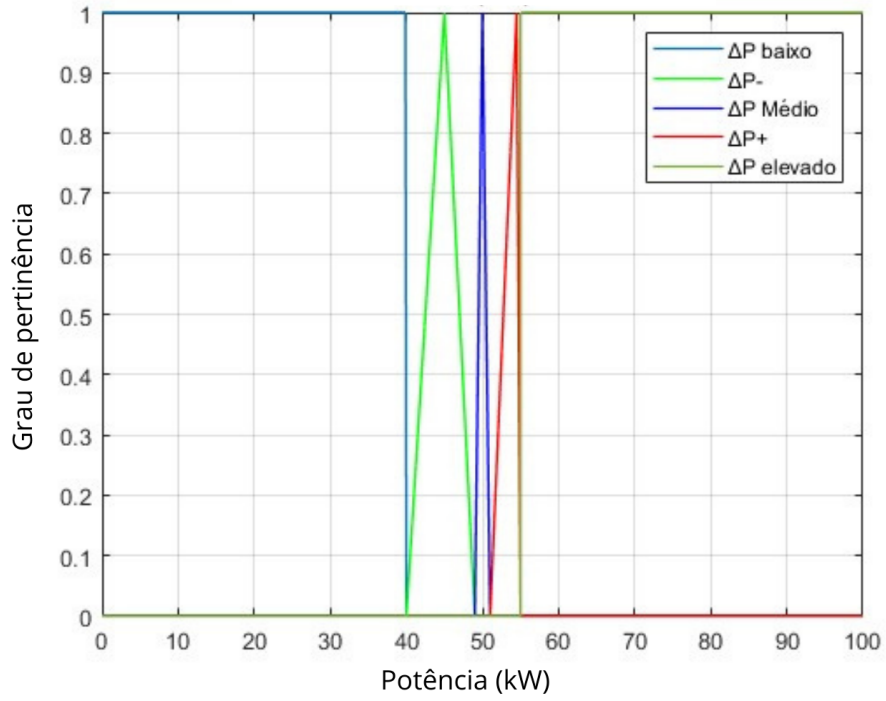
Fonte: Próprio autor (2025).

Figura 25 – Funções de pertinência para o SoC.



Fonte: Próprio autor (2025).

Figura 26 – Funções de pertinência para o ΔP.



Fonte: Próprio autor (2025).

4.2.1 Gerenciamento com lógica *fuzzy* ajustada com PSO

A avaliação dos melhores parâmetros encontrados para as funções de pertinência, por meio do PSO, foi baseado no melhor *fitness* encontrado, equação 3.2, com base nos testes apresentados na Tabela 4. Para cada um dos testes executados, todos os parâmetros do PSO se mantiveram iguais, variando as partículas e verificando a convergência.

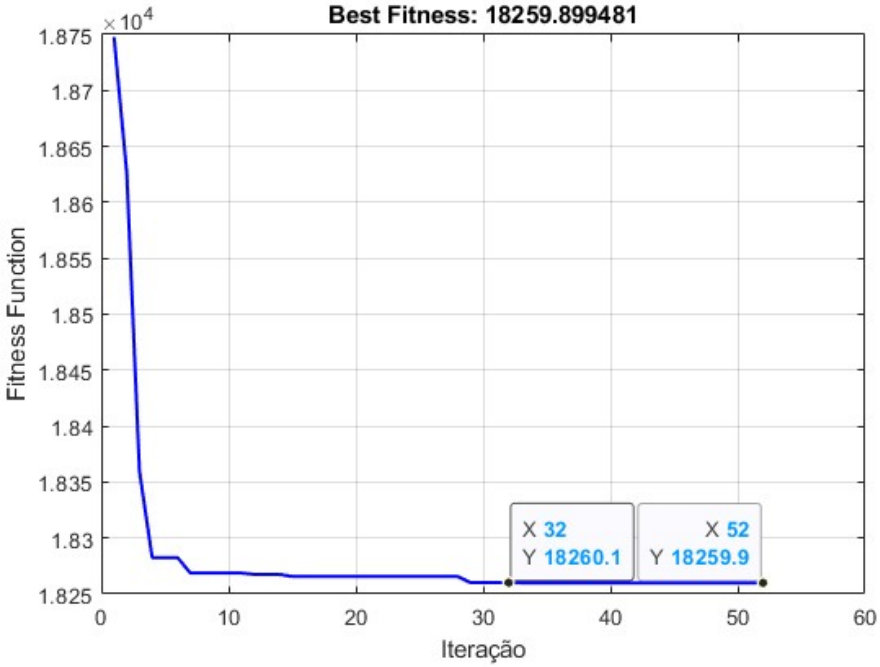
Tabela 4 – Resultados dos testes para diferentes quantidades de partículas.

Partículas	**Iterações**	**Critério de parada**	**Parada**	***Best fitness***
10	100	20	25	18275,02
20	100	20	38	18262,40
30	100	20	52	18259,90

Fonte: Próprio autor (2025).

Conforme visto na Tabela 4, o critério de parada definido servia para caso o valor da função *fitness* não alterasse após uma determinada quantidade de iterações. Dessa forma, constata-se que o melhor valor para função *fitness* foi de 30 partículas, pois o intuito principal da função era diminuir o consumo de combustível da célula. Como pode ser visualizado na Figura 27, o comportamento da função, e o critério de parada atribuido de 20 iterações.

Figura 27 – *Best fitness*.



Fonte: Próprio autor (2025).

Além disso, outras informações relevantes aplicadas ao PSO, são informadas na Tabela 5. Ressaltando que, tanto c_1 e c_2, foram definidos como 2,0 e com um range de peso inercial,

variando entre 0,1 - 1,1. O benefício para essa variação de peso inercial, está no controle da exploração do espaço de busca, pois trazem benefícios para o desempenho do algoritmo.

Quando o valor do peso inercial está próximo de 1,1, as partículas apresentam maior inércia, se movendo com velocidades mais elevadas, dessa forma, favorecendo a exploração do espaço de busca. Permitindo assim que o algoritmo investigue diferentes regiões e evite ficar preso em mínimos locais. E por outro lado, quando valores mais próximos de 0,1 são assumidos, as velocidades são reduzidas, com o propósito de refinar a busca em torno de soluções já identificadas, melhorando assim a precisão do resultado final.

Tabela 5 – Tabela de limites aplicados ao PSO.

Variáveis	A1	B1	C1	A2	B2	C2	A3	B3	C3
Limite inferior	40000	41000	42000	42000	43000	44000	45000	46000	47000
Limite superior	46000	47000	48000	48000	49000	50000	52000	53000	55000

Fonte: Próprio autor (2025).

Os valores de A1 até C3, correspondem as 9 variáveis que o PSO buscou ajustar, com base nos vértices dos triângulos que compõem as funções de pertinência, visando manter estabilidade da tensão do barramento CC e principalmente, reduzir o consumo de combustível. Em que de A1 - C1, referem-se ao FC_{baixo}, A2 - C2 ao $FC_{médio}$ e A3 - C3 ao FC_{alto}. A seguir na tabela 6, segue os melhores parâmetros obtidos através do PSO.

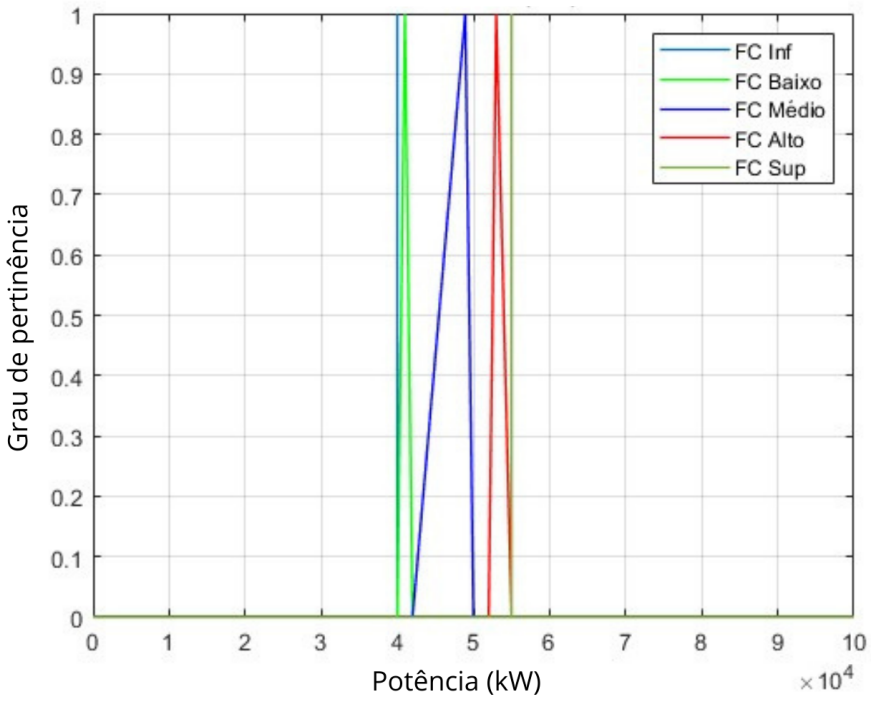
Tabela 6 – Tabela com os valores encontrados por meio do PSO.

FC_{baixo}			$FC_{médio}$			FC_{alto}		
A1	B1	C1	A2	B2	C2	A3	B3	C3
40000	41000	42000	42000	48931	50000	51999	53000	55000

Fonte: Próprio autor (2025).

Com os valores obtidos anteriormente, pode-se visualizar na Figura 28 como as funções de pertinência triangulares se ajustaram no *fuzzy*.

Figura 28 – Funções de pertinências ajustadas com PSO.

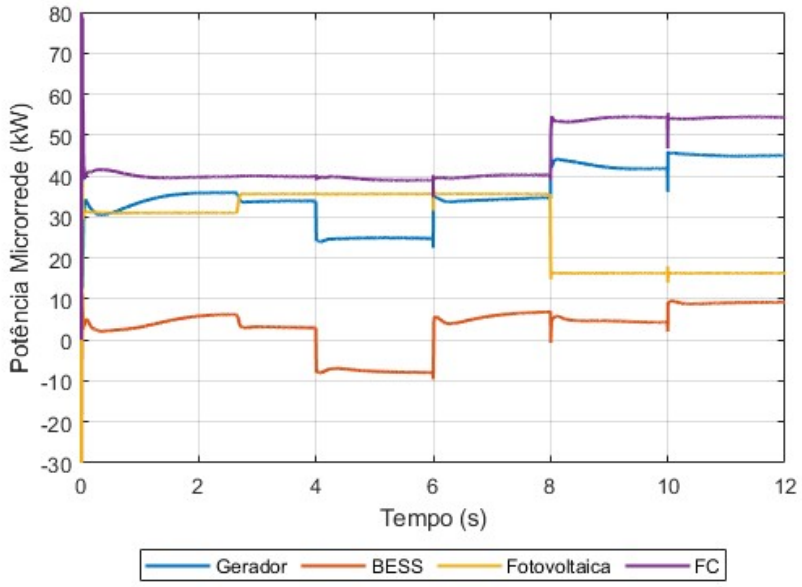


Fonte: Próprio autor (2025).

5 ANÁLISES E RESULTADOS

Por meio da Figura 29 referente ao fluxo de potência da microrrede, apresenta diferentes comportamentos para o BESS ao longo da simulação, para garantir o melhor funcionamento da célula a combustível, entre a melhor região de eficiência. É possível visualizar que isso ocorreu, ao notar que a FC injetou valores de potência entre 40 e 55 kW.

Figura 29 – Potências da microrrede.



Fonte: Próprio autor (2025).

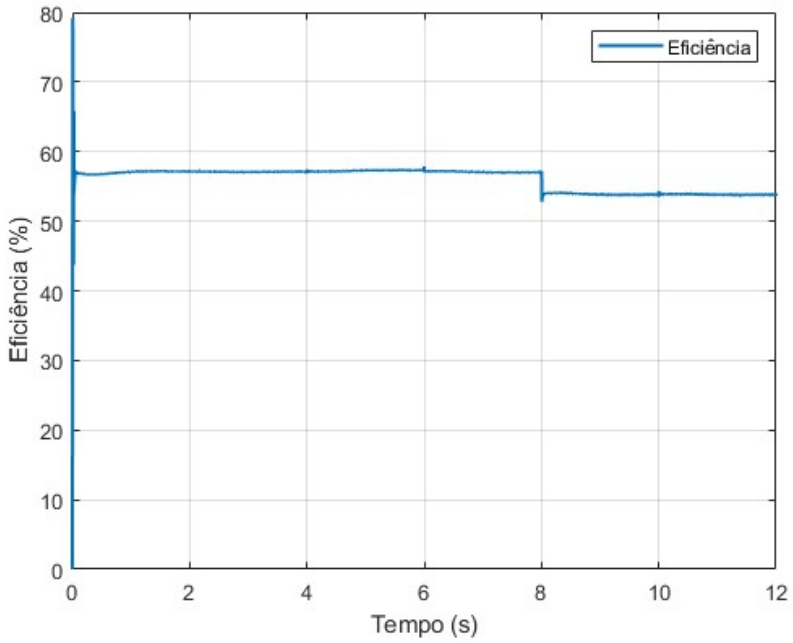
Nota-se também, que em meio as perturbações adicionadas na simulação, o BESS atuou no modo de descarga entre o período de 0 a 4s. Após os 4s, devido a redução da demanda de potência, o BESS atuou como carga, para que a FC injetasse a potência mínima possível para ela, dadas as condições implicitas. No instante de 6 segundos, devido ao aumento de potência solicitada, o BESS atua novamente como descarga, para auxiliar a FC no fornecimento de potência.

No instante de 8 segundos, a potência da fotovoltaica é reduzida, e nesse ponto a potência da FC aumenta para surprir a demanda. Por fim, em 10 segundos, a potência solicitada é aumentada novamente, fazendo a potência da FC acompanhar os 55 kW e aumentando mais a potência entregue pelo o BESS, para surprir a necessidade imposta.

A Figura 30 a seguir ilustra a eficiência da célula a combustível ao longo da simulação. Observa-se que, inicialmente, a eficiência é de 57% e permanece nesse patamar durante grande parte do período analisado. No entanto, por volta dos 8 segundos, ocorre uma

queda para 54%, resultado das perturbações introduzidas no sistema. Essa redução está diretamente relacionada a demanda na microrrede e a diminuição de potência gerada pela geração fotovoltaica, exigindo maior fornecimento de potência da célula a combustível para compensar as variações e manter a estabilidade operacional do sistema.

Figura 30 – Eficiência de célula a combustível.



Fonte: Próprio autor (2025).

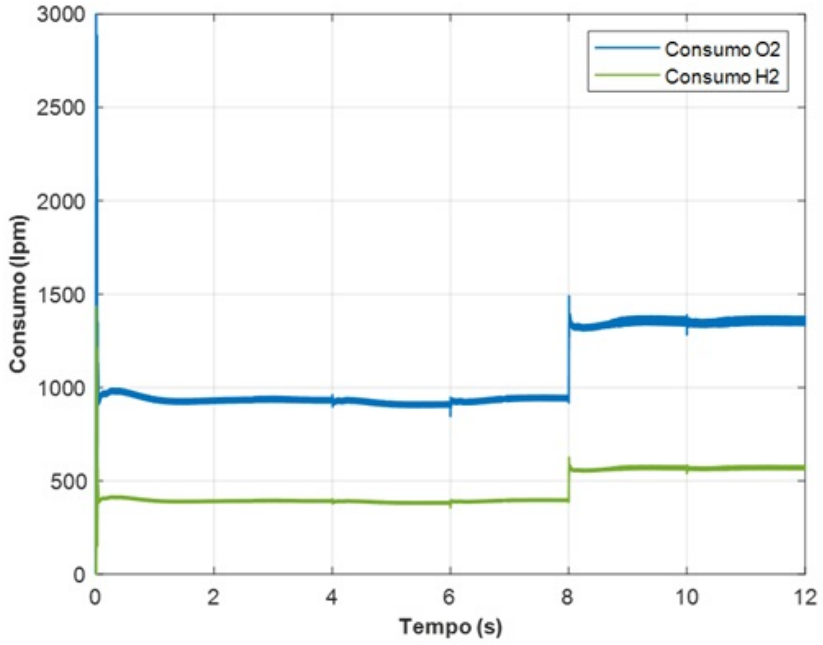
Com relação ao consumo de combustível da célula, a Figura 31 apresenta a evolução do consumo de oxigênio e hidrogênio ao longo da operação do sistema. Durante o período de simulação de 12 segundos, observa-se que a demanda de oxigênio foi de aproximadamente 12.879 litros por minuto (lpm), enquanto o consumo de hidrogênio atingiu cerca de 5.412 lpm.

Vale ressaltar que, conforme demonstrado na Figura 32, o sistema manteve a estabilidade da tensão no barramento CC da célula a combustível, oscilando em torno de 700 V ao longo da simulação. Esse comportamento garante o funcionamento adequado dos dispositivos conectados à microrrede, evitando variações bruscas que possam comprometer o desempenho do sistema.

Além disso, essa estabilidade foi um dos critérios considerados na implementação do algoritmo PSO, que teve como objetivo otimizar os parâmetros das funções de pertinência da lógica *fuzzy*. Dessa forma, o PSO não apenas ajustou as funções de controle da célula a combustível para melhorar a eficiência energética, mas também assegurou que a tensão do barramento permanecesse dentro dos limites desejados, promovendo um gerenciamento mais confiável e seguro da microrrede.

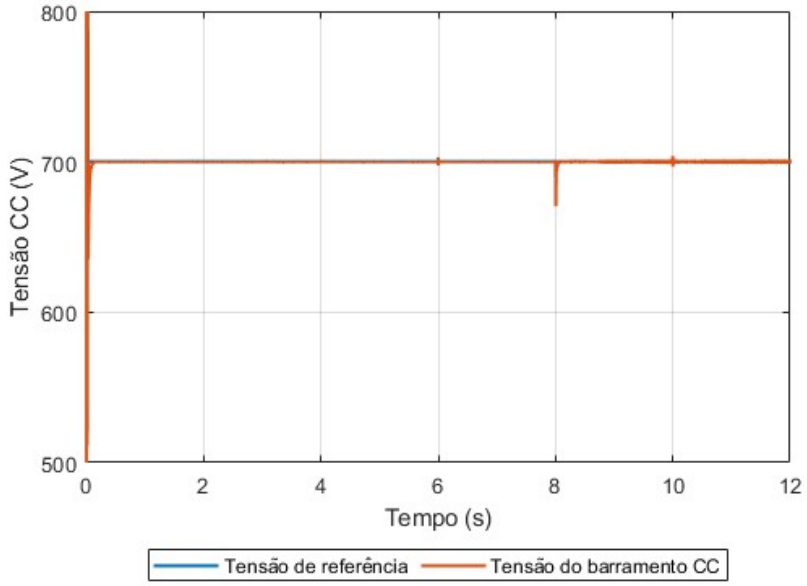
Além das informações já citadas, a Figura 33 apresenta o comportamento do SoC do

Figura 31 – Consumo de oxigênio e hidrogênio da célula a combustível.



Fonte: Próprio autor (2025).

Figura 32 – Tensão do barramento CC da célula a combustível.

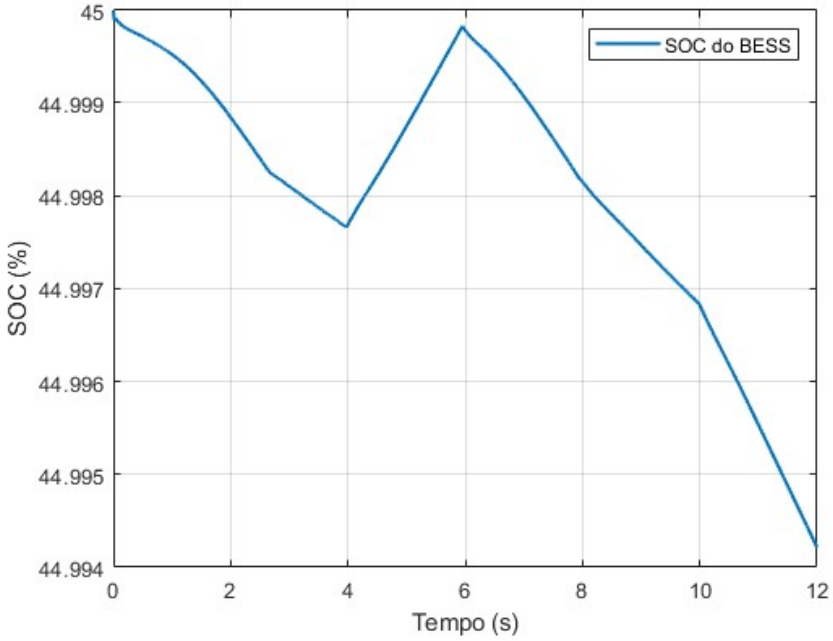


Fonte: Próprio autor (2025).

BESS ao longo do período de simulação. Inicialmente, observa-se um processo de descarregamento da bateria, que se estende até aproximadamente 4 segundos. A partir desse instante, o BESS entra em um ciclo de recarga, absorvendo o excedente de geração da microrrede. No entanto, ao atingir o tempo de 6 segundos, o comportamento se inverte, e

a bateria volta a descarregar, contribuindo ativamente com a injeção de potência no sistema. Esse comportamento reflete o papel do BESS no equilíbrio dinâmico da microrrede, atuando de forma adaptativa para compensar as variações de carga e geração, garantindo maior eficiência energética para a célula a combustível.

Figura 33 – Utilização do SoC.



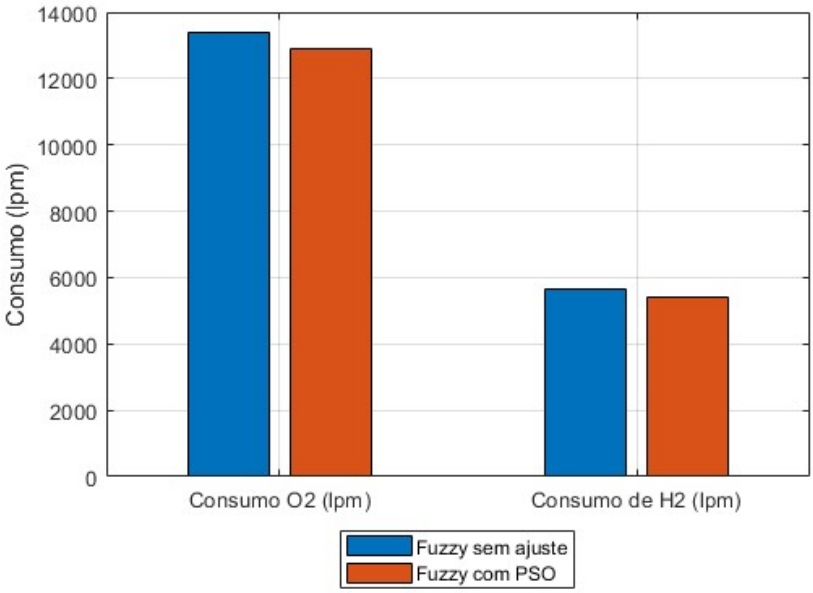
Fonte: Próprio autor (2025).

5.1 COMPARAÇÃO DE CONSUMOS.

Dado os resultados apresentados do gerenciamento baseado no *fuzzy* ajustado com PSO, foi realizada uma analise comparativa com o trabalho de (SANTOS, 2024). Em que o objetivo era avaliar qual se mostrou mais eficaz, reduzindo o consumo e suprindo a demanda necessária para operação. Como pode ser visualizado na Figura 34.

O fuzzy sem ajuste, retratado na imagem, apresentou dados de 13.410 lpm de oxigênio e 5.636 de hidrogênio. Enquanto que, o ajustado com PSO, fruto deste trabalho, apresentou 12.879 lpm de oxigênio e 5.412 lpm de hidrogênio, apresentando uma redução de 3,96% de redução no consumo de oxigênio e de 3,97% no consumo de hidrogênio.

Figura 34 – Comparação de consumos de combustível da FC.



Fonte: Próprio autor (2025).

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma revisão dos principais componentes e tecnologias presentes em uma microrrede, incluindo suas topologias, modos operacionais e gerenciamento. A pesquisa focou na integração de tecnologias como célula a combustível, sistema de armazenamento de energia em baterias (BESS) e geração fotovoltaica, analisando suas interações e contribuições para a eficiência do sistema. O principal objetivo foi a otimização de parâmetros do gerenciamento da microrrede por meio de um algoritmo de otimização, garantindo um controle mais eficiente e adaptativo.

Para alcançar esse objetivo, foi adotada a lógica *fuzzy* como estratégia central de gerenciamento, permitindo um controle flexível diante das variações na geração e consumo de energia. Restrições foram aplicadas ao BESS e aos limites de potência da célula a combustível, assegurando que o fornecimento energético fosse ajustado conforme a demanda da microrrede. Além disso, utilizou-se o algoritmo PSO (*Particle Swarm Optimization*) para otimizar os parâmetros das funções de pertinência da lógica *fuzzy*, refinando a resposta do sistema às condições operacionais variáveis.

Os resultados obtidos demonstraram que a implementação do PSO foi eficaz na calibração dos parâmetros da lógica *fuzzy*, resultando em uma redução no consumo de combustíveis como oxigênio e hidrogênio. Além disso, verificou-se que a estabilidade da tensão do barramento CC da célula a combustível, também se manteve. A capacidade do BESS de atuar como suporte ao fornecimento energético da FC foi fundamental para permitir o armazenamento de energia excedente nos momentos de menor demanda e o fornecimento de energia durante picos de consumo.

Outra observação relevante foi a alternância dinâmica do BESS entre os modos de carga e descarga, garantindo que o sistema operasse na região de melhor eficiência da célula a combustível. Essa alternância demonstrou ser uma estratégia eficiente para reduzir desgastes prematuros dos componentes e melhorar a durabilidade do sistema, além de proporcionar uma resposta mais ágil às flutuações na demanda energética.

Do ponto de vista prático, os achados deste estudo reforçam a importância da otimização baseada em inteligência computacional no contexto das microrredes, evidenciando que a combinação da lógica *fuzzy* com algoritmos meta-heurísticos podem proporcionar benefícios significativos em termos de eficiência energética, confiabilidade e redução de custos operacionais. Esses resultados indicam que a aplicação de estratégias semelhantes pode ser ampliada para outros contextos de gerenciamento de energia e integração com redes elétricas inteligentes.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho apresentou a importância do gerenciamento de energia da microrrede, assim como a integração de diversos recursos presentes nela. Alternativas para trabalhos futuros podem se seguir como:

- Aplicação de outro algoritmo de otimização, para encontrar parâmetros melhores para o controlador presente na simulação;
- Alternar o controlador para uma rede neural artificial, com o intuito de avaliar o desempenho e realizar comparações;
- Integrar outras tecnologias de recursos energéticos existentes.

REFERÊNCIAS

ABBASI, M.; ABBASI, E.; LI, L.; AGUILERA, R. P.; LU, D.; WANG, F. Review on the microgrid concept, structures, components, communication systems, and control methods. *Energies*, v. 16, n. 1, 2023. ISSN 1996-1073. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/1/484>.

AHMAD, S.; SHAFIULLAH, M.; AHMED, C. B.; ALOWAIFEER, M. A review of microgrid energy management and control strategies. *IEEE Access*, v. 11, p. 21729–21757, 2023.

AKINYELE, D.; OLABODE, E.; AMOLE, A. Review of fuel cell technologies and applications for sustainable microgrid systems. *Inventions*, v. 5, n. 3, 2020. ISSN 2411-5134. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2411-5134/5/3/42>.

ALBUQUERQUE, J. C. de. *Avaliação de Curvas de Potência em Modelos de Previsão de Geração Eólica em Curto Prazo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, Outubro 2015.

BACHA, S.; PICAULT, D.; BURGER, B.; ETXEBERRIA-OTADUI, I.; MARTINS, J. Photovoltaics in microgrids: An overview of grid integration and energy management aspects. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, v. 9, n. 1, p. 33–46, 2015.

CORTéS-CAICEDO, B.; GRISALES-NOREñA, L. F.; MONTOYA, O. D.; BOLAñOS, R. I. Minimizing the annual costs in ac distribution microgrids through optimal bess location, selection, and operation using a hybrid approach. *Journal of Energy Storage*, v. 84, p. 110894, 2024. ISSN 2352-152X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X2400478X>.

DAS, H. S.; TAN, C. W.; YATIM, A. Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 76, p. 268–291, 2017. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117303647>.

DAUD, W.; ROSLI, R.; MAJLAN, E.; HAMID, S.; MOHAMED, R.; HUSAINI, T. Pem fuel cell system control: A review. *Renewable Energy*, v. 113, p. 620–638, 2017. ISSN 0960-1481. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117305281>.

EBERHART; SHI, Y. Particle swarm optimization: developments, applications and resources. In: *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No.01TH8546)*. [S.l.: s.n.], 2001. v. 1, p. 81–86 vol. 1.

GAO, F.; WANG, X.; YANG, P.; KOU, S.; SUN, M. Research and simulation of hybrid ac/dc microgrid. In: *2020 4th International Conference on HVDC (HVDC)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1276–1280.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy. *SBA Controle Automação*, Sociedade Brasileira de Automação (SBA), v. 7, n. 3, p. 1–13, setembro-outubro 1994.

IORIS, D. *Estudo do Ilhamento Não Intencional em Microrredes Baseadas em Conversores Eletrônicos de Potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, Brasil, 2021.

JUSTO, J. J.; MWASILU, F.; LEE, J.; JUNG, J.-W. Ac-microgrids versus dc-microgrids with distributed energy resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 24, p. 387–405, 2013. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113002268>.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*. [S.l.: s.n.], 1995. v. 4, p. 1942–1948 vol.4.

LASSETER, R. Microgrids. In: *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 1, p. 305–308 vol.1.

LIU, X.; WANG, P.; LOH, P. C. A hybrid ac/dc microgrid and its coordination control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 2, n. 2, p. 278–286, 2011.

MARQUES, D. *Controle de Frequência em Microrredes Utilizando Baterias Baseado no Aprendizado Emocional do Cérebro*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Brasil, 2023.

MARQUES, D. da C. *Método de Controle Eficiente Utilizando Ferramentas de Inteligência Artificial em Sistemas de Bombeamento de Água*. Recife, Brasil: [s.n.], 2018.

MathWorks. *PV Array - Simscape Electrical*. 2024b. Accessed: 2025-02-11. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/pvarray.html>.

MathWorks. *Battery*. R2024b. Accessed: 2025-02-14. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/battery.html>.

MUHTADI, A.; PANDIT, D.; NGUYEN, N.; MITRA, J. Distributed energy resources based microgrid: Review of architecture, control, and reliability. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 57, n. 3, p. 2223–2235, 2021.

RAJESH, K.; DASH, S.; RAJAGOPAL, R.; SRIDHAR, R. A review on control of ac microgrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 71, p. 814–819, 2017. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116311613>.

SAEED, M. H.; FANGZONG, W.; KALWAR, B. A.; IQBAL, S. A review on microgrids' challenges perspectives. *IEEE Access*, v. 9, p. 166502–166517, 2021.

SANTOS, A. G. E. M. *Gerenciamento de Célula de Combustível em Microrrede Operando no Modo Ilhado*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Brasil, 2024.

SHAFIULLAH, M.; AHMED, S. D.; AL-SULAIMAN, F. A. Grid integration challenges and solution strategies for solar pv systems: A review. *IEEE Access*, v. 10, p. 52233–52257, 2022.

SONI, Y. K.; BHATT, R. Bf-pso optimized pid controller design using ise, iae, iate and mse error criteria. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*, p. 2333–2340, July 2013. Disponível em: <www.ijaret.org>.

TÜRKLER, L.; AKKAN, L. ; AKKAN, T. Particle swarm optimization in swarm robotics. In: *2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6.

ZUBIETA, L. E. Power management and optimization concept for dc microgrids. In: *2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 81–85.