



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

DANILLO DO NASCIMENTO SANTOS

**APLICAÇÃO DE ENXAME DE PARTÍCULAS PARA OTIMIZAÇÃO DO
CONTROLE DA TENSÃO GERADA POR CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL A
HIDROGÊNIO DO TIPO PEM**

Recife
2025

DANILLO DO NASCIMENTO SANTOS

**APLICAÇÃO DE ENXAME DE PARTÍCULAS PARA OTIMIZAÇÃO DO
CONTROLE DA TENSÃO GERADA POR CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL A
HIDROGÊNIO DO TIPO PEM**

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

Orientador(a): Prof. Dr. Douglas Contente Pimentel Barbosa
Coorientador: Prof. Dr. Pablo Luiz Tabosa da Silva

Recife
2025

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

Santos, Danillo do Nascimento.

Aplicação de enxame de partículas para otimização do controle da tensão gerada por células de combustível a hidrogênio do Tipo PEM / Danillo do Nascimento Santos. - Recife, 2025.

58 p. : il., tab.

Orientador(a): Douglas Contente Pimentel Barbosa

Coorientador(a): Pablo Luiz Tabosa da Silva

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. Hidrogênio verde. 2. Célula a combustível. 3. Controle PID. 4. Otimização por Enxame de Partículas. 5. Modelagem de sistemas de potência. I. Barbosa, Douglas Contente Pimentel. (Orientação). II. Silva, Pablo Luiz Tabosa da. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

DANILLO DO NASCIMENTO SANTOS

**APLICAÇÃO DE ENXAME DE PARTÍCULAS PARA OTIMIZAÇÃO DO
CONTROLE DA TENSÃO GERADA POR CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL A
HIDROGÊNIO DO TIPO PEM**

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

Aprovado em: 14/08/2025

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Jeydson Lopes da Silva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. M.Sc. Néstor Iván Medina Giraldo (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Este trabalho é dedicado aos meus amigos e familiares que sempre acreditaram em mim e me ajudaram ao longo dessa jornada. Em especial, à minha mãe, que constantemente me apoiou, e à minha avó, que esteve ao meu lado durante todo esse período, mas que infelizmente não está mais presente para testemunhar este resultado.

AGRADECIMENTOS

Pelo dom da fortaleza vindo do Espírito Santo, que, mesmo diante das tribulações, me fez manter a fé e confiança para chegar ao término da graduação, concluir este projeto e me levar onde estou hoje, então, primeiramente e principalmente, agradeço a Deus, por me permitir chegar aqui.

Dedico agradecimentos à minha família, que sempre me apoiou imensamente, em especial minha mãe Judite, meu pai Divaldo e minha avó Nadir. Agradeço por todo cuidado, amor e carinho infinito que foi me dado desde que eu me entendo por gente.

Aos meus grandes amigos de Maceió, que mesmo distantes continuam me acompanhando. Em especial, agradeço a participação neste trabalho dos membros do grupo DdC, que me apoiaram, me animaram a continuar, me impuseram limites de quando era o suficiente e por até sentiram frustração em meu lugar.

Agradeço a Recife e aos amigos que fiz nesses anos de faculdade, aos colegas da graduação que compartilharam as dificuldades do curso. Ao projeto Maracatronics e seus membros. Em especial, agradeço a Vinícius Alves, aos professores Guilherme e João Paulo, e ao restante da equipe de futebol de robôs.

Pela instituição da Igreja Católica e ao movimento dos Focolares e seus membros, por esse grande ideal de vida que me motiva. Particularmente, agradeço a Vitor Monte, meu padrinho de crisma, por me apresentar esse ideal, a Chiara Lubich por tornar tudo isso possível e os meus irmãos das unidades em que participei.

Trago em lembrança todas as experiências e vitórias obtidas pelo meio acadêmico e profissional, juntamente dos que participaram comigo. Desde pesquisas científicas, publicação de artigo, iniciação científica e estágio até o primeiro emprego.

Em consonância, sempre romantizei o final da graduação como mais uma vitória, mas este desfecho foi difícil e tortuoso, que não será lembrando em tom positivo como os outros. Porém, isso é passageiro – “A caridade jamais acabará. As profecias desaparecerão, o dom das línguas cessará, o dom da ciência findará” (Coríntios 13:8). O encerramento desse período extenso me possibilitará focar no que realmente importa e buscar novas vitórias para o meu futuro.

Por último, eu agradeço a Danillo, por nunca deixar de olhar para frente.

“Aproveite os desvios no caminho, ao máximo.
Ainda mais do que as coisas que você deseja, as
coisas que são valiosas para você, acabarão sendo
encontradas ao longo da jornada.”
(TOGASHI; YOSHIHIRO, 2012)

RESUMO

A atualidade é marcada por uma crescente demanda por tecnologias voltadas ao fornecimento de energia elétrica, impulsionada pelos avanços em veículos eletrificados, no surgimento de data centers voltados para inteligência artificial e na expansão da infraestrutura digital. Em paralelo, cresce a preocupação com os impactos ambientais decorrentes do aumento do consumo energético proveniente das matrizes convencionais, que ainda dependem de fontes poluentes. Dessa forma, a necessidade de diversificação do sistema energético torna-se evidente, com o objetivo de mitigar esses impactos enquanto se busca atender à crescente demanda. Nesse contexto, o hidrogênio verde, produzido a partir de fontes de energia renovável, surge como uma alternativa promissora para suprir as novas necessidades do setor energético. Para a conversão de hidrogênio em energia elétrica, utilizam-se as células a combustível, dispositivos que geram corrente elétrica a partir de reações eletroquímicas. No entanto, para viabilizar o fornecimento energético adequado, é comum integrar esses sistemas a dispositivos suplementares, como conversores de corrente contínua (CC) que elevam a tensão fornecida e inversores de frequência, responsáveis pela conversão para corrente alternada (CA). Toda essa gama de sistemas, também somados a natural complexidade da dinâmica de funcionamento de uma célula a combustível, exige a adoção metodologias bem estruturadas de projeto e de controle. Esses desafios são, em grande parte, ocasionados pela necessidade de integração eficaz e pela demanda por alto desempenho dos sistemas envolvidos. Este trabalho, portanto, propõe uma solução de alimentação de carga trifásica, utilizando uma célula a combustível de membrana de troca de prótons (PEM), integrada a um conversor *Boost* em cascata e a um inversor de frequência trifásico. O sistema completo foi modelado e simulado no software MATLAB/Simulink, com a implementação de controle PID aplicado ao ciclo de trabalho do sinal PWM do comutador do conversor *Boost*. Além disso, para otimizar o desempenho do sistema, os ganhos do controlador PID foram ajustados por meio do método de Otimização por Enxame de Partículas (PSO). Os resultados obtidos demonstraram a eficácia do PSO, destacando-se a aceleração da resposta da célula, além da mitigação de sobressinais que poderiam prejudicar tanto a carga quanto o sistema.

Palavras-chave: Hidrogênio verde; Célula a combustível; Controle PID; Otimização por Enxame de Partículas; Modelagem de sistemas de potência

ABSTRACT

The present times are marked by the rapid development of technologies in the electrical supply sector. This is due to many factors, the advance of electrical vehicles, artificial intelligence data centers and the general growth of digital infrastructure. Alongside this, grows the concern regarding the environmental crisis and the impact that the old established energetic sources will increase the overall pollution problem. All of this results in the demand of research that seeks to diversify the energetic supply systems that also mitigate the environmental impact, while accommodating the rising electricity supply demanded. Hydrogen produced from renewable energy sources, so called green hydrogen, comes as an alternative energy source that is compatible with the limitations imposed by our current critical scenario. This element utility is constrained by the Fuel Cells technology development; these are devices capable of generating electrical current by the consumption of hydrogen. Along with fuel cells, step-up DC-DC converters and DC-AC converters are also needed for the proper supply of electrical devices and utilities. The complexity of these systems, combined with the inherent dynamics of fuel cell operation, requires well-structured design and control methodologies. Therefore, this work proposes a solution for feeding a three-phase load using a proton exchange membrane (PEM) fuel cell, integrated with a cascade boost converter and a three-phase frequency inverter. The complete system was modeled and simulated in MATLAB/Simulink, with PID control applied to manipulate the PWM duty cycle of the boost converter. Additionally, to optimize the system's performance, the PID controller gains were adjusted using the Particle Swarm Optimization (PSO) method. The results demonstrated the effectiveness of PSO, highlighting the acceleration of the cell's response and mitigating overshoots that could harm both the load and the system.

Keywords: Green Hydrogen; Fuel Cell; PID control; Particle Swarm Optimization; Power Systems Modelling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de funcionamento de Célula a combustível do tipo PEM.	21
Figura 2 – Gráfico de curvas de densidade de potência (linha tracejada) e de polarização (linha contínua).	24
Figura 3 – Conversor CC-CC <i>boost</i> em cascata com um único dispositivo comutador.	26
Figura 4 – Esquemático do sistema do Inversor de frequência trifásico.	29
Figura 5 – Formatos de ondas utilizados no comparador.	30
Figura 6 – Esquema de um sistema de controle PID.	33
Figura 7 – Movimento das partículas no espaço de soluções.	36
Figura 8 – Curvas do empilhamento de células.	38
Figura 9 – Modelo do sistema da Célula a Combustível no <i>Simulink</i>	39
Figura 10 - Modelo do sistema do conversor <i>Boost</i> no <i>Simulink</i>	41
Figura 11 – Sistema do inversor de frequência no <i>Simulink</i>	42
Figura 12 – Sinais do comparador do inversor de frequência.	43
Figura 13 – Sistema completo no Simulink.	43
Figura 14 – Tensões do conversor <i>boost</i> , em laranja, e da célula, em azul, no período de ativação.	44
Figura 15 – Fluxograma do método PSO.	47
Figura 16 – Evolução do custo de todas as partículas.	48
Figura 17 – Progressão do melhor custo ao longo das iterações.	49
Figura 18 – Resposta de tensão do conversor <i>boost</i>	50
Figura 19 – Gráficos de resposta das 3 fases de tensão na carga.	51
Figura 20 – Análise FFT do sinal na carga.	52
Figura 21 – Montagem filtro LC no <i>simulink</i>	53
Figura 22 – Análise de FFT após a implementação do filtro LC.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação das características de diferentes tipos de célula a combustível	19
Tabela 2 – Parâmetros da célula a combustível.....	39
Tabela 3 – Parâmetros do conversor <i>Boost</i>	41
Tabela 4 – Parâmetros referentes a função custo.....	45
Tabela 5 – Parâmetros do método PSO.	46
Tabela 6 – Comparação do melhor resultado da parametrização PSO.	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFC	<i>Alkaline Fuel Cell</i> (Célula a Combustível Alcalina)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	<i>Alternating Current</i> (Corrente Alternada)
CC	<i>Direct Current</i> (Corrente Contínua)
FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i> (<i>Veículo Elétrico a Célula de Combustível</i>)
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> (Transformada Rápida de Fourier)
GEE	Gases de Efeito Estufa
H2V	Hidrogênio Verde
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> (Transistor Bipolar de Porta Isolada)
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
MCFC	<i>Molten Carbonate Fuel Cell</i> (Célula a Combustível de Carbonato Fundido)
MOSFET	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i> (Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor)
MPPT	<i>Maximun Power Point Tracking</i> (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência)
PAFC	<i>Phosphoric Acid Fuel Cell</i> (Célula a Combustível de Ácido Fosfórico)
PEMFC	<i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i> (Célula a Combustível de Membrana de Troca de Prótons)
PID	<i>Proportional-Integral-Derivative</i> (Controlador Proporcional-Integral-Derivativo)
PMSM	<i>Permanent Magnet Synchronous Motor</i> (Motor Síncrono de Ímã Permanente)
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i> (Otimização por Enxame de Partículas)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
SISO	<i>Single Input Single Output</i> (Entrada Única, Saída Única)
SOFC	<i>Solid Oxide Fuel Cell</i> (Célula a Combustível de Óxido Sólido)
SPWM	<i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso Senoidal)
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> (Distorção Harmônica Total)

LISTA DE SÍMBOLOS

V_s	Tensão do empilhamento de células [V]
N_{cel}	Número de células conectadas em série
V_{cel}	Tensão individual de cada célula [V]
E_{Nst}	Potencial de Nernst [V]
V_{at}	Perda por ativação [V]
V_{ohm}	Perda ôhmica [V]
T	Temperatura de Operação da célula [K]
P_{H_2}	Pressão parcial de hidrogênio [atm]
P_{O_2}	Pressão parcial de oxigênio [atm]
A	Inclinação de Tafel [V]
i_0	Corrente de troca [A]
i	Corrente fornecida pela célula [A]
T_d	Tempo de resposta do sistema
R	Constante universal dos gases
F	Constante de Faraday
α	Coeficiente de transferência de carga
z	Número de elétrons em movimento
ΔG	Variação de energia livre, de ativação (J/mol)
k	Constante de Boltzman (J/K)
h	Constante de Planck (J s)
R_{ohm}	Resistência interna da célula (Ω)
$V_{s,boost}$	Tensão na saída do conversor <i>Boost</i> [V]
$V_{ent,boost}$	Tensão de entrada do conversor <i>Boost</i> [V]
d	Ciclo de trabalho da chave comutadora
L_{min}	Valor de indutância mínima para o estágio [H]
R_c	Resistência da carga [Ω]
f_b	Frequência de chaveamento do comutador no conversor <i>Boost</i> [Hz]
C_{min}	Valor de capacidade mínima para o estágio [H]
ΔV	Variação de tensão no estágio [V]
f_c	Frequência dos sinais senoidais [Hz]
f_t	Frequência do sinal triangular [Hz]
N	Número inteiro qualquer que define a relação entre as frequências

$G_c(s)$	Somatório dos ganhos
K_p	Ganho proporcional
K_i	Ganho integral
K_d	Ganho derivativo
$u(t)$	Sinal de entrada de controle
$e(t)$	Erro da saída em relação a referência
x_i^k	Posição no espaço de soluções da partícula i na k -ésima iteração
V_i^k	Velocidade da partícula i na k -ésima iteração
w	Peso arbitrário de inércia
c_1	Parâmetro constante cognitivo da partícula i
c_2	Parâmetro constante social da partícula i
r_1^k, r_2^k	Valores randômicos entre 0 e 1
p^k	Posição no espaço de soluções de melhor resultado individual
g^k	Posição no espaço de soluções de melhor resultado global
J	Função custo
t_r	Tempo de subida
t_s	Tempo de acomodação
M_s	Sobressinal máximo
e_{ss}	Erro em regime permanente
j_1, j_2, j_3, j_4	Constantes de peso entre os parâmetros, entre [0,1]
N_p	Número de partículas
f_{corte}	Frequência de corte [Hz]
L_f	Indutância utilizada no filtro LC [H]
C_f	Capacitância utilizada no filtro LC [F]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO GERAL.....	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	CÉLULA A COMBUSTÍVEL.....	18
2.1.1	Tipos de células a combustível e suas diferenças.....	18
2.1.2	Dinâmica e modelo de uma Célula a combustível PEMFC	20
2.2	CONVERSOR CC-CC BOOST.....	25
2.3	INVERSOR DE FREQUÊNCIA	28
2.4	METODOLOGIA DE CONTROLE	30
2.4.1	Variável de controle	31
2.4.2	Variável de referência/setpoint e medição.....	31
2.4.3	Controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID)	32
2.5	OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS POR ENXAME DE PARTÍCULAS	34
3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	38
3.1	CÉLULA A COMBUSTÍVEL.....	38
3.2	CONVERSOR BOOST	40
3.3	INVERSOR TRIFÁSICO	41
3.4	IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR PID COM PSO.....	44
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	48
4.1	PERFORMANCE DO MÉTODO PSO	48
4.2	RESPOSTA DO INVERSOR NA CARGA	51
5	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	54
5.1	PROPOSTAS DE CONTINUIDADE E TRABALHOS FUTUROS	54
	REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

Em escala global, o cenário atual do setor energético é marcado pela necessidade de expansão da capacidade de fornecimento elétrico, acompanhada da crescente demanda por redução da poluição ambiental. O aumento do consumo de energia reflete as tendências contemporâneas, como o surgimento de data centers para inteligência artificial, os grandes investimentos no setor de veículos elétricos e a necessidade de aumento na capacidade de refrigeração devido ao aquecimento global (IEA, 2024).

No entanto, a expansão da infraestrutura energética não pode ser feita sem a devida consideração sobre seu impacto ambiental, especialmente em relação às matrizes energéticas convencionais baseadas em combustíveis fósseis. Diversas ações para mitigar o aquecimento global estão sendo implementadas globalmente, com a meta de limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C em relação aos níveis da era pré-industrial, conforme estabelecido no Acordo de Paris (UNFCC, 2018). Essas medidas visam alcançar a neutralidade de emissões de gases de efeito estufa (GEE) até 2050, uma iniciativa conhecida como Net Zero, seguindo as projeções do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (IPCC, 2022).

Dentro do contexto de transição energética para uma matriz menos poluente, o hidrogênio surge como uma alternativa promissora, devido à sua versatilidade como matéria-prima (na indústria química e metalúrgica) e combustível (em aviação e veículos com célula de combustível). No entanto, é importante destacar que nem todo hidrogênio é associado à energia limpa; isso depende de sua forma de produção. Por essa razão, o estudo do hidrogênio verde (H2V) é altamente relevante, pois ele é obtido a partir de fontes de energia renovável (TRUBY, PHILIP e LORENTZ, 2023).

Para a conversão energética do hidrogênio, utiliza-se uma célula a combustível, dispositivo que tem por funcionamento reações eletroquímicas, com produtos principais água e calor. Notavelmente, seu funcionamento não se limita a eficiência do ciclo de Carnot, que é o caso de motores convencionais. Dessa forma, células a combustível podem, em diferentes cenários, apresentar maior eficiência que as alternativas. Além disso, por não possuírem partes móveis, o que elimina a atuação mecânica, as células a combustível oferecem maior longevidade e menor necessidade de manutenção (ALI, NEMAH, et al., 2024).

Atualmente, as células a combustível estão sendo implementadas em diversas áreas, incluindo o uso residencial, onde muitos domicílios já as adotaram como fonte energética. No setor automobilístico, há uma crescente utilização de células de combustível do tipo membrana trocadora de prótons (PEMFC) em sistemas de propulsão. Os veículos movidos a célula a combustível (Fuel Cell Vehicles – FCEV) se destacam devido ao sistema de propulsão silencioso, à facilidade de partida a frio, ao baixo tempo de recarga e à maior autonomia, especialmente quando comparados aos veículos elétricos convencionais, que são seus principais concorrentes na categoria de veículos sustentáveis (STAFFELL, SCAMMAN, *et al.*, 2019).

Contudo, apesar das vantagens, a implementação de células a combustível envolve uma série de complexidades técnicas. Comumente, a tensão gerada é baixa e pode apresentar variação durante as condições de ativação e operação, o que exige o uso de conversores CC-CC para aumentar a tensão. Na resolução desse problema, o uso de conversores *Boost* é uma solução comum (SARMA e GANGULY, 2019; JARIN, AKKARA, *et al.*, 2022). Além disso, algumas implementações, como a alimentação de dispositivos domiciliares, exigem corrente alternada, o que implica na necessidade de um inversor no sistema (ELNAGI, ISMAIEL, *et al.*, 2024; DAUD, ROSLI, *et al.*, 2017).

A complexidade do sistema como um todo exige um controle cuidadoso, levando em consideração não apenas a natureza volátil das reações químicas na célula, mas também dos dispositivos associados. Perturbações decorrentes de perdas resistivas, comutação, variações na carga ou até flutuações no fornecimento de hidrogênio devem ser previstas (DAUD, ROSLI, *et al.*, 2017; ALASWAD, OMRAN, *et al.*, 2020). Para garantir a concepção de um projeto seguro e confiável, são utilizadas técnicas de simulação e modelagem, além de métodos de controle variados, os quais contribuem diretamente para a robustez do projeto final.

No que tange ao controle de sistemas como o de células a combustível, o método de Otimização por Enxame de Partículas (PSO) tem se mostrado uma ferramenta poderosa. Esse algoritmo de otimização, inspirado no comportamento coletivo de partículas, é eficaz na resolução de problemas não lineares complexos, como a definição de parâmetros em sistemas de controle (BENTESEN YAKUT, 2024; KART, DEMIR, *et al.*, 2024). No contexto de células a combustível, o PSO é utilizado para

ajustar os ganhos de controladores, como o PID, permitindo uma resposta mais eficiente e mitigando problemas como sobressinais e instabilidades no sistema.

Dada a crescente relevância do hidrogênio verde no setor energético, este trabalho tem como objetivo estudar um sistema robusto de fornecimento de energia elétrica, utilizando uma célula a combustível com controle PID, cuja sintonia de parâmetros é realizada por meio do algoritmo PSO. Para isso, são apresentadas as topologias dos dispositivos, a metodologia de controle adotada e a simulação do sistema, acompanhadas de métricas que validam o correto funcionamento do sistema.

1.1 Objetivo Geral

Projetar um sistema de geração energética por hidrogênio, realizando a simulação de todas os componentes no manuseio de uma célula a combustível e dispositivos de potência associados para alimentar uma carga trifásica.

1.2 Objetivos Específicos

- Comparar e definir topologias dos conversores CC-CC e CC-CA para o uso de sistemas de fornecimento energético diversos utilizando células a combustível.
- Definição e implementação de metodologia de controle que garanta o funcionamento do sistema, conferindo devida alimentação da carga, com funcionamento seguro e eficiente da célula.
- Simulação completa do sistema e parâmetros analisados, como fim validar funcionamento dos dispositivos dimensionados e a metodologia de controle.

1.3 Organização do Trabalho

Em prol da melhor organização das informações expostas, o documento é dividido em cinco capítulos.

O atual capítulo 1 apresenta a introdução e definição de objetivos, oferecendo um resumo e revisão geral do projeto para um entendimento inicial sobre o contexto das células a combustível, dos subsistemas de potência envolvidos e da teoria de controle.

No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica, em que é realizado o levantamento bibliográfico das pesquisas e estudos que sustentam o estudo do projeto. Assim são informados os conceitos teóricos necessários e suas respectivas fontes.

O capítulo 3 consta o desenvolvimento do trabalho, a parte prática que aplica os conceitos vistos na fundamentação teórica. Estão presentes aplicações de equações, valores utilizados e considerações a serem feitas em base de teoria. A escrita deste capítulo segue ordem cronológica de como devem ser executados os passos de reprodução do projeto.

No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos com a simulação do sistema. O desempenho do sistema é analisado por meio de gráficos, tabelas e outras métricas, discutindo a eficácia da metodologia de controle aplicada e apontando possíveis melhorias e ajustes necessários para otimizar o funcionamento do sistema.

Por fim, o capítulo 5 traz as conclusões do trabalho, com um resumo dos principais resultados alcançados e as contribuições da pesquisa. Também são discutidas as limitações encontradas durante o desenvolvimento do estudo e sugestões para trabalhos futuros, que possam expandir ou melhorar o sistema estudado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os conceitos técnicos aplicados nesta pesquisa, abordando estudos que fundamentam os temas trabalhados. Inicialmente, são contextualizadas as células a combustível, detalhando seus diferentes tipos e funcionamento. Em seguida, são apresentadas as topologias de conversores CC-CC e CC-CA utilizadas, que são compatíveis com sistemas de fornecimento de energia baseados no consumo de hidrogênio. Por fim, são discutidas as metodologias de controle empregadas, explicando as razões pelas quais essas escolhas foram feitas para o desenvolvimento do projeto.

2.1 Célula a combustível

As células a combustível têm como função principal a conversão de energia elétrica através de reações eletroquímicas, sendo o hidrogênio o elemento preferível a ser utilizado como combustível nesse dispositivo (ALI, NEMAH, *et al.*, 2024). A estrutura básica das células é comum entre seus diferentes tipos, destacando-se as seguintes partes: os eletrodos (ânodo e cátodo) e o eletrólito (ALASWAD, OMRAN, *et al.*, 2020).

2.1.1 Tipos de células a combustível e suas diferenças

Os diferentes tipos de células apresentam maiores peculiaridades no seu quesito construtivo, o que confere variação em suas propriedades físicas, e assim, diferentes vantagens e desvantagens de usabilidade. Diversos fatores impactam na escolha do tipo de dispositivo mais apropriado. Assim, é importante considerar os fatores de disponibilidade e o custo dos materiais de construção, além dos limites físicos do sistema local, como temperatura, umidade e restrições mecânicas (ALI, NEMAH, *et al.*, 2024).

Os tipos de células a combustível mais relevantes são: alcalina (AFC – *Alkaline Fuel Cell*), de ácido fosfórico (PAFC – *Phosphoric Acid Fuel Cell*), de carbonato fundido (MCFC – *Molten Carbonate Fuel Cell*), de membrana trocadora de prótons

(PEMFC) e de óxido sólido (SOFC – *Solid Oxide Fuel Cell*). A Tabela 1 apresenta as características quantitativas e qualitativas de cada tipo de célula mencionada anteriormente (QASEM e ABDULRAHMAN, 2024).

Tabela 1 – Comparação das características de diferentes tipos de célula a combustível.

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Temperatura de operação(º C)	60-110	60-250	150-210	500-700	500-1000
Eficiência Elétrica (%)	40-80	50-75	50	50	55-60
Potência de operação	1-100 kW	1-100 kW	100-400 kW	300 kW-3 MW	0,5-2.000 kW
Vida útil (h)	2000-3000	8000	>50000	7000-8000	1000
Período de inicialização	<1 min	<1 min	-	10 min	60 min
Tensão por célula (V)	1,1	1	1,1	0,7 - 1,0	0,8 - 1,0
Aplicação	Indústria automotiva, <i>backup</i> de energia, aplicações portáteis	Indústria automotiva, <i>backup</i> de energia, aplicações portáteis	Edifícios, geração distribuída	Geração distribuída	Veículos aéreos não tripulados (VANT), transporte, <i>backup</i> de energia
Vantagens	1 – Alta escalabilidade 2 – Baixa temperatura 3 – Início rápido	1 – Rápida inicialização 2 – Menor preço de montagem 3 – Baixa temperatura	1 – Tolerância a impurezas 2 – Integração com sistemas aquecimento	1 – Variação de combustível 2 - Eficiência alta	1 – Variação de combustível 2 - Eficiência alta
Desvantagens	1 – Necessita de pureza alta do combustível 2 – Excesso de água como produto	1 – Necessita de alta pureza no cátodo 2 – Sensível a presença de CO_2	1 – Alto período de inicialização 2 – Materiais de construção da célula limitados 3 – Baixa densidade de potência	1 – Tendência a sofrer corrosão 2 – Inicialização e resposta lenta 3 – Baixa disponibilidade de materiais	1 – Calor gerado excessivo 2 – Inicialização lenta 3 – Limitação de shutdowns

Fonte: Informações de (ALASWAD, OMRAN, et al., 2020; QASEM e ABDULRAHMAN, 2024).

No quesito de operações em menores temperaturas, destacam-se as células AFCs e PEMFCs, que são preferidas devido à sua alta eficiência, grande densidade energética e rápida resposta de inicialização. As PEMFCs operam nas menores faixas de temperatura, entre 60-110 °C. Suas vantagens incluem versatilidade e portabilidade, sendo aplicadas em sistemas eletrônicos portáteis, veículos automotivos e, adicionalmente, possuindo grande potencial para uso na aviação. Já as AFCs operam em temperaturas mais altas, entre 60-250 °C, apresentando maior durabilidade, eficiência e menores custos. Estas são comumente usadas em aplicações espaciais e sistemas de backup de energia (QASEM e ABDULRAHMAN, 2024).

Para aplicações de altas temperaturas, as MCFCs e SOFCs se destacam. As MCFCs oferecem alta eficiência e geralmente maior capacidade de fornecimento de potência, sendo utilizadas em sistemas de geração distribuída e em indústrias. As SOFCs, por sua vez, apresentam alta robustez e eficiência, sendo frequentemente usadas em aplicações militares e grandes sistemas estacionários de geração energética (QASEM e ABDULRAHMAN, 2024).

2.1.2 Dinâmica e modelo de uma Célula a combustível PEMFC

Entre os diferentes tipos de células a combustível, este trabalho concentra-se na análise de sistemas que utilizam a célula de membrana de troca de prótons (PEMFC), devido à sua elevada versatilidade, simplicidade construtiva e escalabilidade. Essas características a tornam especialmente adequada para aplicações em sistemas de hidrogênio verde de baixa potência, que exigem soluções eficientes e compactas. A seguir, é descrito o funcionamento químico da célula PEM:

- I. Átomos de hidrogênio (H_2) são injetados no ânodo da célula, onde perdem elétrons e tornam-se íons de hidrogênio (H^+), que podem assim atravessar o eletrólito em direção ao cátodo. Os elétrons liberados no ânodo são conduzidos por um circuito externo até o cátodo. A passagem desses elétrons pelo circuito externo é o que gera a corrente elétrica produzida pela célula. A equação (2.1) representa a reação parcial no ânodo de uma célula do tipo PEM:



- II. No cátodo, há a entrada de átomos de oxigênio (O_2), os quais recebem os elétrons provenientes do ânodo por meio do circuito externo, sofrendo assim o processo de redução e formando íons de oxigênio (O^{2-}) pelo processo de redução. Os íons de O^{2-} e H^+ presentes no cátodo se juntam formando água (H_2O) como subproduto. A equação (2.2) representa a reação parcial no cátodo de uma célula do tipo PEM:

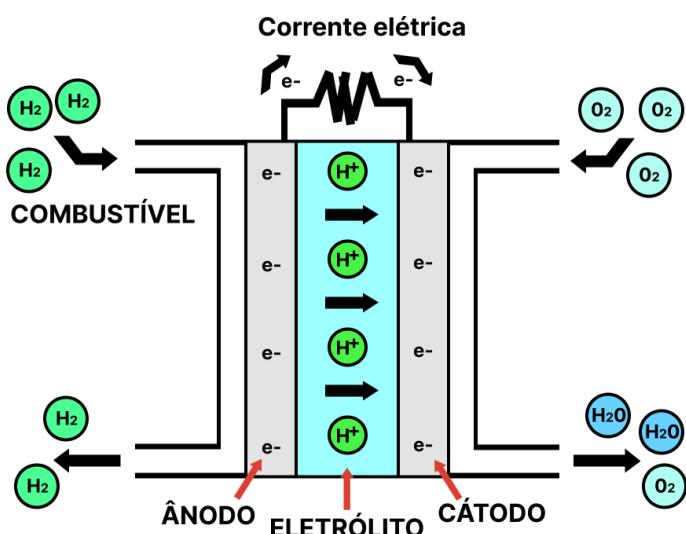


- III. Essa reação é exotérmica, gerando água e calor como produtos. A equação química global é representada na fórmula (2.3):



Parte dos reagentes (H_2 e O_2) podem não reagir por completo, sendo direcionados para drenagem e eventual reutilização. Vale destacar que diferentes tipos de células a combustível podem apresentar variações em seu processo químico, utilizando reagentes alternativos ao hidrogênio, como dióxido de carbono (CO_2) e metanol (CH_3OH). No entanto, a operação com esses reagentes também resulta na emissão de gases poluentes (QASEM e ABDULRAHMAN, 2024).

Figura 1 – Esquema de funcionamento de Célula a combustível do tipo PEM.



Fonte: Adaptado de (QASEM e ABDULRAHMAN, 2024; HUSSAIN BASHA, MARIPRASH, et al., 2021).

Uma única célula do tipo PEM geralmente fornece uma tensão que varia entre 0,9 V e 1,23 V ao longo do seu processo de ativação, variando também de acordo com o fluxo de combustível alimentado. As condições de operação mais eficientes ocorrem em temperaturas que variam na faixa de 70 °C a 80 °C, com pressões parciais entre de 3 a 5 atm e umidade de aproximadamente 100% nas membranas da célula (BENTESEN YAKUT, 2024).

Para compreender a aplicação de estratégias de controle no sistema, é necessário, primeiramente, entender a dinâmica de operação da célula a combustível do tipo PEM. Como uma célula individual gera uma tensão relativamente baixa, é comum a utilização de um empilhamento de múltiplas células conectadas em série para aumentar tanto a tensão quanto a potência gerada pelo conjunto. A equação (2.4) demonstra a tensão resultante desse empilhamento (HUSSAIN BASHA, MARIPRASH, *et al.*, 2021).

$$V_s = N_{cel} \cdot V_{cel} \quad (2.4)$$

Em que:

- V_s – Tensão do empilhamento de células [V];
- N_{cel} – Número de células conectadas em série;
- V_{cel} – Tensão individual de cada célula [V]

A geração teórica máxima do empilhamento de células corresponde à tensão reversa entre o ânodo e o cátodo de cada célula, ditada pelo potencial de Nernst (E_{Nst}) (BENTESEN YAKUT, 2024). Este potencial representa o limite termodinâmico de geração de tensão, que depende das pressões parciais dos reagentes, da pressão do sistema e da temperatura da célula (BENTESEN YAKUT, 2024; ZHANG, LIU, *et al.*, 2018). No entanto, diversas perdas atuam para reduzir essa tensão ideal, resultando na tensão final real fornecida pela célula, denotada como V_{cel} . As principais perdas consideradas são a de ativação, a ôhmica e a de concentração (ZHANG, XU, *et al.*, 2024). A equação (2.5) demonstra a relação entre as perdas envolvidas para diminuição da tensão total suprida por uma única célula PEM e o potencial de Nernst, que esse último está expresso na equação (2.6).

$$V_{cel} = E_{Nst} - V_{at} - V_{ohm} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} E_{Nst} = & 1,229 - 8,5 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 298,15) \\ & + 4,3085 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot \left[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right] \end{aligned} \quad (2.6)$$

Em que:

- E_{Nst} – Potencial de Nernst [V];
- V_{at} – Perda por ativação [V];
- V_{ohm} – Perda ôhmica [V];
- T – Temperatura de Operação da célula [K];
- P_{H_2} – Pressão parcial de hidrogênio [atm];
- P_{O_2} – Pressão parcial de oxigênio [atm].

A perda por ativação (V_{at}) corresponde a um acentuado decaimento de tensão observado no início da reação eletroquímica. Essa perda está relacionada à cinética dos eletrodos, ou seja, à dificuldade inicial de iniciar a transferência de carga entre os reagentes e os eletrodos (MAZZEO, NAPOLI e CARELLO, 2024). Fatores que promovem uma maior transferência de elétrons, como um aumento na concentração dos reagentes e o uso de materiais com maior coeficiente de transferência nos eletrodos, contribuem para a mitigação dessa perda (BENMOUIZA e CHEKNANE, 2018). A perda por ativação é representada na equação (2.7), a qual é derivada da equação proposta por Larminie e Dicks. Esta equação depende da inclinação de Tafel, expressa na equação (2.8), e da corrente de troca, apresentada na equação (2.9) (MOTAPON, TREMBLAY e DESSAINT, 2012).

$$V_{at} = A \cdot \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \cdot \frac{1}{\frac{sT_a}{3} + 1} \quad (2.7)$$

$$A = \frac{RT}{z\alpha F} \quad (2.8)$$

$$i_0 = \frac{zFk(P_{H_2} + P_{O_2})}{Rh} e^{\frac{-\Delta G}{RT}} \quad (2.9)$$

Em que:

- A – Inclinação de Tafel [V];
- i_0 – Corrente de troca [A];
- i – Corrente fornecida pela célula [A];
- T_d – Tempo de resposta do sistema, para 95% do valor final [s];
- R – Constante universal dos gases = 8,3145 [J/(mol K)];
- F – Constante de Faraday = 96,485 [A s/mol];
- α - Coeficiente de transferência de carga;
- z – Número de elétrons em movimento = 2;
- ΔG – Variação de energia livre, de ativação (J/mol);
- k - Constante de Boltzman (J/K);
- h – Constante de Planck (J s).

A perda ôhmica está associada ao transporte de carga nos diversos sistemas da célula e à resistência criada pelo fluxo de íons no eletrodo. Esta perda pode ser quantificada pela lei de ohm, como expressa na equação (2.10) (MOTAPON, TREMBLAY e DESSAINT, 2012).

$$V_{ohm} = R_{ohm} \cdot i \quad (2.10)$$

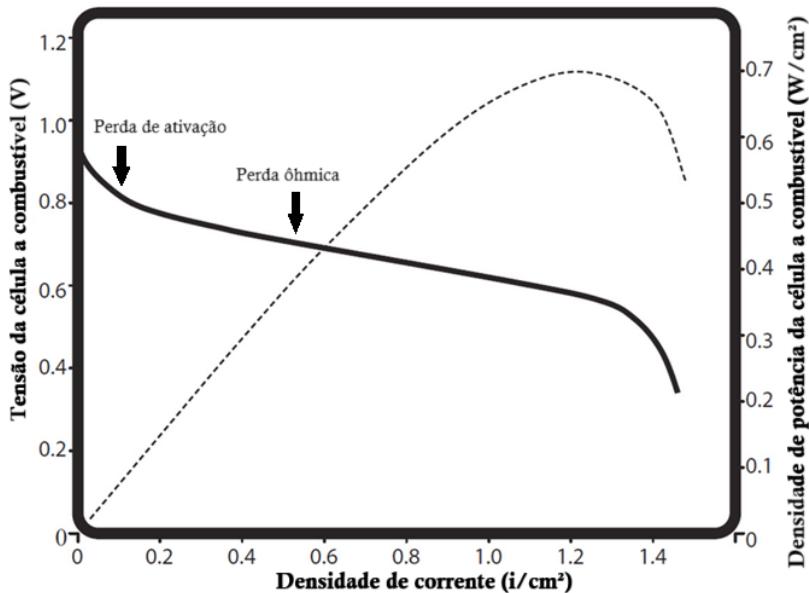
Em que:

- R_{ohm} – Resistência interna da célula (Ω).

A influência das perdas por ativação e ôhmica no desempenho da célula é observada graficamente por meio da curva de polarização, também conhecida como curva I-V. Essa curva representa a performance da célula ao analisar o desenvolvimento da tensão da célula em função da densidade de corrente. A

Figura 2 apresenta uma curva de polarização de uma célula a combustível, destacando também a influência da densidade de potência em relação à densidade de corrente.

Figura 2 – Gráfico de curvas de densidade de potência (linha tracejada) e de polarização (linha contínua).



Fonte: Adaptado de (O'HAYRE, 2017) e (BIZON, 2010).

O gráfico demonstra que é esperado o decaimento da tensão em função do aumento da corrente elétrica, além de um ponto de pico de potência que pode decair com o aumento excessivo de corrente.

2.2 Conversor CC-CC *Boost*

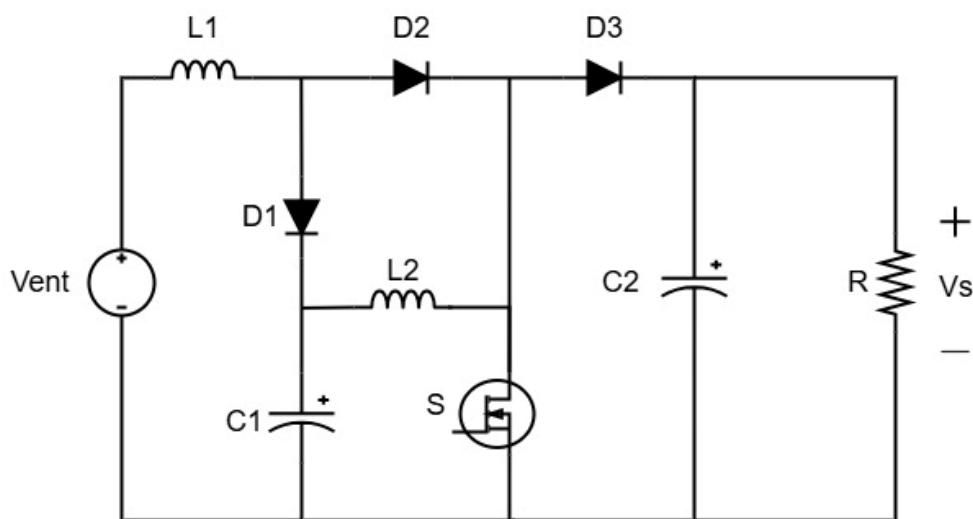
O conversor *boost* é um conversor CC-CC utilizado para elevar a tensão de um sistema, possuindo também a capacidade de controlar e modular o ganho fornecido. Ele é amplamente empregado em diversas áreas, especialmente em aplicações veiculares, como no carregamento de alta tensão em veículos eletrificados e em veículos movidos a célula a combustível (FCEV), nos quais é necessário um conversor *boost* em conjunto com um inversor para o acionamento do motor elétrico (LIU, DU e YU, 2020). Além disso, o conversor *boost* é amplamente utilizado em sistemas de geração de energia renovável, que frequentemente operam em baixas tensões e requerem uma elevação da tensão para compatibilidade com a rede elétrica ou com dispositivos específicos, a exemplo de sistemas de painéis fotovoltaicos, células a combustível e aerogeradores (MUMTAZ, YAHAIA, et al., 2021).

Existem diversos tipos de conversores *boost* que, embora compartilhem a mesma função de elevação de tensão, diferenciam-se entre si pela configuração dos seus componentes, definido pelas diferentes topologias. As topologias variam quanto ao número de componentes, custo e o arranjo geral da montagem do circuito, podendo oferecer vantagens específicas, como maior proteção dos dispositivos, diferentes equações de ganho e maior estabilidade do sinal de saída (MUMTAZ, YAHAIA, *et al.*, 2021). Para uma célula a combustível, o conversor CC utilizado deve conferir um alto ganho e o mínimo de perdas possíveis, resultando em uma maior eficiência no sistema (KART, DEMIR, *et al.*, 2024; PRASHANTH, RAFIKIRAN, *et al.*, 2024).

O conversor *boost* em cascata de dois estágios é especialmente adequado para sistemas baseados em células PEM, pois permite a elevação da tensão em dois estágios consecutivos. Essa configuração possibilita a obtenção de tensões mais altas com um menor ciclo de trabalho (DC – *Duty Cycle*), o que diminui o estresse sobre os dispositivos comutação e aumenta a vida útil do circuito (ELNAGI, ISMAIEL, *et al.*, 2024; LIU, DU e YU, 2020; MUMTAZ, YAHAIA, *et al.*, 2021).

Kart (KART, DEMIR, *et al.*, 2024) propõe um conversor em cascata com o uso de um único dispositivo de comutação, visando diminuir as perdas do sistema e a simplificação do controle. O conversor proposto por Kart pode ser visualizado na Figura 3.

Figura 3 – Conversor CC-CC *boost* em cascata com um único dispositivo comutador.



Fonte: Adaptado de (KART, DEMIR, *et al.*, 2024).

O ganho de tensão desse conversor *Boost* em cascata equacionado por Kart (KART, DEMIR, et al., 2024) é apresentado pela equação (2.11).

$$V_{s,boost} = \left(\frac{V_{ent,boost}}{(1 - d)^2} \right) \quad (2.11)$$

Em que:

- $V_{s,boost}$ – Tensão na saída do conversor *Boost* [V];
- $V_{ent,boost}$ – Tensão de entrada do conversor *Boost* [V];
- d – Ciclo de trabalho da chave comutadora.

Pela equação (2.11), observa-se que o ganho do conversor é controlado pelo ciclo de trabalho do comutador, ou seja, pela razão entre o tempo em que a chave semicondutora permanece acionada e o período total do ciclo. Para controlar a ativação das chaves nos circuitos de potência, é comumente utilizado o método de modulação por largura de pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*) é comumente utilizado para o controle da ativação das chaves nos circuitos de potência. O sinal PWM é caracterizado por uma onda quadrada cujo ciclo de trabalho define a proporção do tempo em que o sinal se mantém em nível alto ou baixo durante cada ciclo de operação. Dessa forma, a chave comutadora conduzirá ou não, de acordo com o estado do sinal. O sinal PWM é aplicado no terminal *gate* do comutador, que geralmente é um Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor (MOSFET - *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*) ou um transistor bipolar de porta isolada (IGBT – *Insulated Gate Bipolar Transistor*) (ELNAGI, ISMAIEL, et al., 2024; LIU, DU e YU, 2020).

Para o dimensionamento dos indutores L_1 e L_2 do circuito, Elnagi propõe a análise do balanço de potência (ELNAGI, ISMAIEL, et al., 2024), a qual estabelece que a potência na entrada deve ser igual à potência na saída do conversor. A partir dessa análise, é possível calcular a indutância mínima necessária em cada estágio (ELNAGI, ISMAIEL, et al., 2024), resultado presente na equação (2.12).

$$L_{min} = \frac{d(1 - d)^2 R_c}{2f_b} \quad (2.12)$$

Em que:

- L_{min} – Valor de indutância mínima para o estágio [H];
- R_c – Resistência da carga [Ω];
- f_b – Frequência de chaveamento do comutador no conversor *boost* [Hz].

O capacitor no circuito *boost* possui a função de filtro, reduzindo a corrente de *ripple* e oscilações na tensão aplicada à carga (BIZON, 2010). No conversor *boost* em cascata o capacitor mínimo a ser utilizado pode ser dimensionado pela equação 2.13 (ELNAGI, ISMAIEL, et al., 2024).

$$C_{min} = \frac{V_{ent,boost} \cdot d}{R_c \cdot \Delta V \cdot f_b} \quad (2.13)$$

Em que:

- C_{min} – Valor de capacidade mínima para o estágio [H];
- ΔV – Variação de tensão no estágio [V].

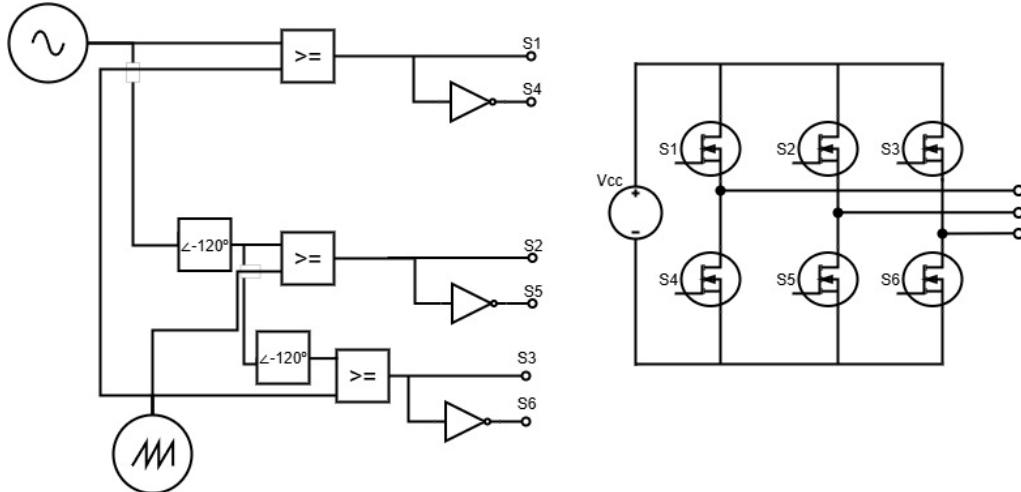
2.3 Inversor de frequência

O inversor de frequência é um conversor CC-CA, que possui a utilidade de transformar corrente contínua em corrente alternada. Esse tipo de conversor é essencial em sistemas de geração de energia renovável, permitindo a alimentação de cargas\dispositivos que operam com corrente alternada, como dispositivos domésticos isolados, microrredes (DURANAY e GÜLDEMİR, 2020; RAJU, ISLAM e UDDIN, 2013) e motores trifásicos de veículos FCEV (YALAVARTHY e GADI, 2022). Comumente, o inversor é utilizado para converter o sinal contínuo elevado pelo conversor *boost* em um sistema monofásico, bifásico ou trifásico, a depender da necessidade do projeto.

A geração trifásica é predominante nos sistemas que utilizam células a combustível, sendo, portanto, a abordagem mais adequada para o estudo proposto neste trabalho (ELNAGI, ISMAIEL, et al., 2024; RAJU, ISLAM e UDDIN, 2013). O funcionamento do inversor trifásico baseia-se na atuação de seis chaves de comutação, que operam na mesma frequência, porém com períodos de ativação

defasados. O esquemático do inversor trifásico e do seu sistema de acionamento das chaves é demonstrado na Figura 4.

Figura 4 – Esquemático do sistema do Inversor de frequência trifásico.



Fonte: Adaptado de (RAJU, ISLAM e UDDIN, 2013).

Para o controle do acionamento das chaves comutadoras, é utilizado o método de modulação de largura de pulso senoidal (SPWM - *Sinusoidal Pulse Width Modulation*). Nesse método três sinais senoidais de mesma frequência f_c , porém defasados 120° entre si, são comparados com uma onda triangular que opera em uma frequência maior f_t . A frequência da onda triangular deve ser um múltiplo inteiro da frequência das ondas senoidais de referência, de forma a garantir uma modulação equilibrada e simétrica (RAJU, ISLAM e UDDIN, 2013). Assim, a operação de comutação das chaves deve respeitar as relações apresentadas pela inequação 2.14 e pela equação 2.15.

$$f_t > f_c \quad (2.14)$$

$$\frac{f_t}{f_c} = 2N \quad (2.15)$$

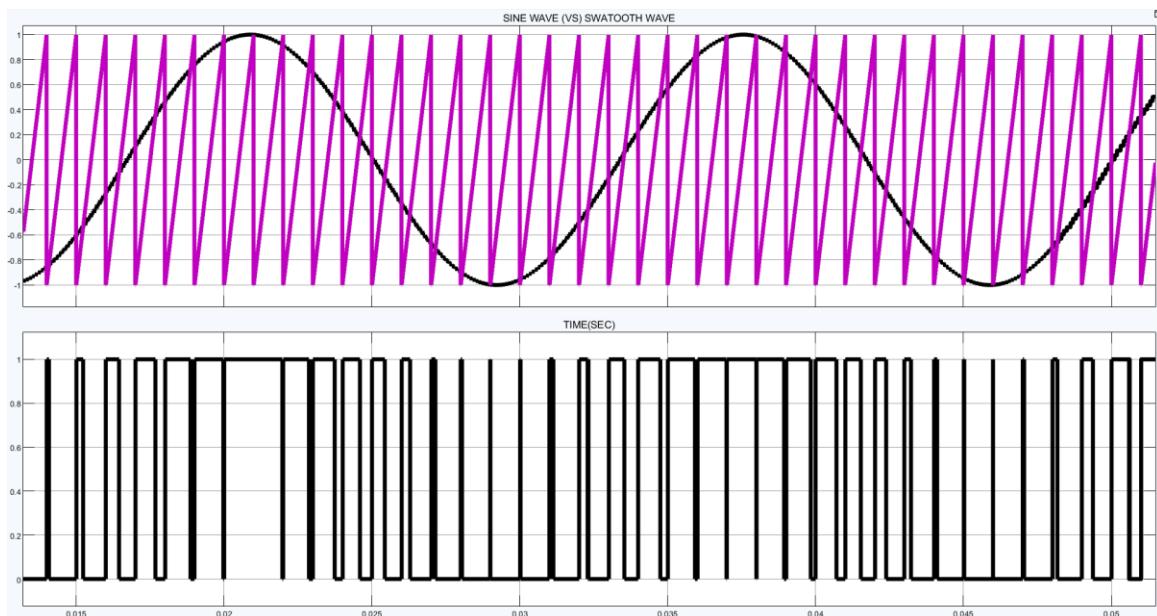
Em que:

- f_c – Frequência dos sinais senoidais [Hz];
- f_t – Frequência do sinal triangular [Hz];
- N – Número inteiro positivo qualquer (1, 2, 3, 4, ...).

A frequência f_c define também a frequência do sinal AC trifásico que será fornecido à carga; para aplicações residenciais, por exemplo, esse valor geralmente é 60 Hz. No funcionamento do sistema, o comparador gera pulsos que alternam a ativação entre as seis chaves comutadoras, resultando em um sinal PWM de ciclo de trabalho variável (RAJU, ISLAM e UDDIN, 2013).

Ao analisar a Figura 4, observa-se que, quando o sinal senoidal 1 é maior que a onda triangular, a chave S1 estará ativada, enquanto a chave S4 permanecerá desativada. Quando ocorre o contrário, a chave S1 será desativada e a chave S4 será ativada. Os formatos das ondas senoidais (bloco superior traço preto), da onda triangular (bloco superior em traço rosa) e da saída do comparador (bloco inferior) estão demonstradas na Figura 5.

Figura 5 – Formatos de ondas utilizados no comparador.



Fonte: O autor.

2.4 Metodologia de controle

A célula a combustível pode ser dividida em diversos subsistemas quando analisada no âmbito de controle. Os subsistemas de regulagem de temperatura, de humidificação, de alimentação de combustível e de potência são os mais comumente manipulados para otimizar o desempenho da célula (ALASWAD, OMRAN, et al.,

2020). No presente trabalho, o foco está no dimensionamento do subsistema de potência. Assim, a solução de controle proposta é analisada especificamente no contexto de parâmetros que envolvam o conversor *boost* e do inversor de frequência.

2.4.1 Variável de controle

No âmbito do subsistema de potência, é comum que o controle seja realizado pela manipulação do ciclo de trabalho d do sinal PWM da chave comutadora do conversor *boost* (KART, DEMIR, *et al.*, 2024; ZHANG, LIU, *et al.*, 2018; MOHAMMED, 2024), tornando esse o método o mais indicado para o projeto.

Em uma abordagem distinta, entretanto, Rahman (RAHMAN, SHAWON, *et al.*, 2013) propôs o controle do sistema pela manipulação do sinal PWM no inversor, utilizando o método de controle proporcional-integral-derivativo (PID). Essa solução foi implementada devido à ausência de um conversor *boost* no circuito.

De modo geral, não há uma ampla variedade de alternativas além da atuação sobre o sinal PWM via ajuste do ciclo de trabalho d . As principais variações ocorrem na escolha da variável de referência, nos métodos de medição e, sobretudo, na metodologia de controle empregada.

2.4.2 Variável de referência/*setpoint* e medição

A maioria das aplicações utilizam a tensão e potência como referência de controle. A tensão é bastante utilizada como *setpoint*, pois um valor de tensão fixa é um pré-requisito comum de funcionamento de dispositivos elétricos (BENTESEN YAKUT, 2024; ZHANG, LIU, *et al.*, 2018), por exemplo numa aplicação residencial a tensão fase-neutro deve ser 127 ou 220 V a depender da localidade, para os padrões brasileiros.

A potência fornecida também é frequentemente utilizada como referência, sendo notável, no contexto da célula a combustível, uma maior variação durante seu período de ativação. Algumas estratégias de controle focam na extração da máxima potência

do sistema, como o método de rastreamento de ponto de máxima potência (MPPT – *Maximun Power Point Tracking*) (PRASHANTH, RAFIKIRAN, et al., 2024).

Além disso, no âmbito de aplicações onde a célula a combustível alimenta um motor trifásico, Yalavarthy (YALAVARTHY e GADI, 2022) propõe o uso da velocidade como referência, utilizando método *fuzzy* para definir os ganhos do controlador PID. Por outro lado, Silva (SILVA, 2016) modelou seu sistema para utilizar a corrente como referência, enquanto aplica um controlador PI.

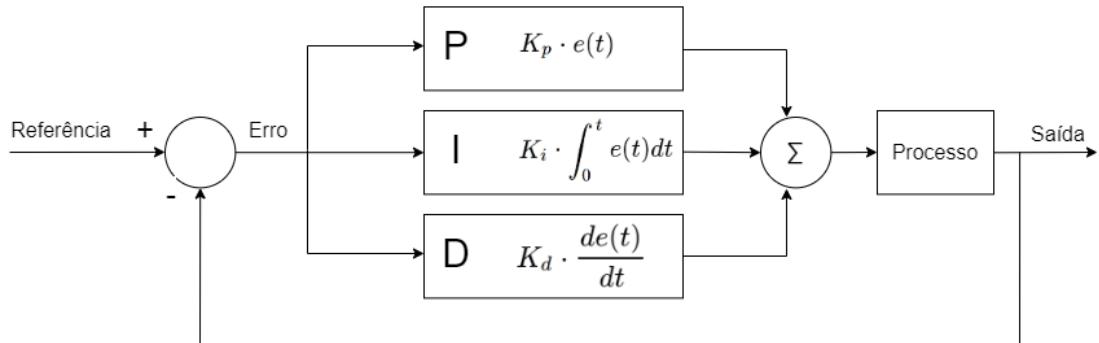
2.4.3 Controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

O controlador proporcional-integral-derivativo, ou PID, é considerado a metodologia de controle clássica, sendo amplamente preferido em aplicações industriais. Sua implementação é tão consolidada que é indicado que mais de 90% dos algoritmos de controle utilizados são variantes de PID, além de usualmente serem sistemas de entrada única e saída única (SISO - single input single output) (KART, DEMIR, et al., 2024). Da mesma forma, o controlador PID é amplamente empregado no controle da tensão de saída do conversor *boost* em sistemas de geração baseados em células a combustível (ZHANG, LIU, et al., 2018; LIU, DU e YU, 2020).

O funcionamento do controlador PID se baseia na regulação do sinal de saída, que é medido e comparado com um valor de referência. A diferença entre esses dois valores é definida como o valor de erro $e(t)$, que é processado por três termos distintos, multiplicados por seus respectivos ganhos: proporcional (K_p), o integral (K_i) e derivativo (K_d). A soma desses termos gera o sinal de controle $u(t)$, que é direcionado para o atuador, o qual ajusta a dinâmica da saída com o objetivo de minimizar o erro.

A configuração do controlador PID é exibida na Figura 6, enquanto o somatório dos ganhos e a equação do sinal de controle são apresentadas respectivamente nas equações (2.16) e (2.17) (KART, DEMIR, et al., 2024; NISE, 2020).

Figura 6 – Esquema de um sistema de controle PID.



Fonte: Informações de (NISE, 2020).

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.16)$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.17)$$

Em que:

- $G_c(s)$ – Somatório dos ganhos;
 - K_p – Ganho proporcional;
 - K_i – Ganho integral;
 - K_d – Ganho derivativo;
 - $u(t)$ – Sinal de entrada de controle;
 - $e(t)$ – Erro da saída em relação a referência.

Cada ganho possui um impacto significativo na resposta do sistema, e os valores ideais dependem das prioridades do projeto. O aumento do ganho proporcional K_p pode reduzir o erro e tornar o sistema mais rápido, no entanto, se aplicado em excesso, pode causar instabilidade e aumentar o erro do sinal controlado. O ganho K_i é responsável por melhorar a resposta em regime permanente do sistema, reduzindo o erro para zero em regime permanente, contudo, em excesso pode também

aumentar a oscilação do sistema e ocasionar *overshoot*. Por fim, o ganho derivativo K_d melhora a resposta transitória do sistema, diminuindo o sobressinal, porém também pode tornar o sistema mais instável e aumentar o ruído presente nos instrumentos de medição, culminando em um maior erro (KUMAR, SINGLA e CHOPRA, 2015).

Pela grande variação de tensão durante ativação da célula é importante considerar a atenuação do sobressinal para que não haja um aumento excessivo de tensão a ponto de danificar a carga ou dispositivo alimentado. Além disso é preferível a manutenção de um erro reduzido em relação ao valor de referência de tensão, o que contribui para o aumento da eficiência do sistema de geração.

Dada a relevância da escolha adequada dos ganhos, balancear os impactos positivos e negativos e definir valores apropriados representa uma grande dificuldade na etapa de otimização do projeto. Esse processo de busca e decisão dos parâmetros é denominado sintonia (KUMAR, SINGLA e CHOPRA, 2015), sendo uma etapa fundamental para o funcionamento adequado do sistema. Pela grande importância do processo de sintonia, existem diversos métodos que facilitam a definição dos melhores parâmetros, um método já difundido para sistemas com células a combustível é o método de otimização por enxame de partículas (PSO – *Particle Swarm Optimization*) (EBERHAHRT e KENNEDY, 1995). Este método meta-heurístico é adequado para sistemas de controle não-lineares, como o estudado neste trabalho, pela sua robustez e versatilidade conferida por uma fácil implementação mesmo em projetos complexos.

2.5 Otimização de parâmetros por enxame de partículas

O PSO é um algoritmo de otimização bioinspirado proposto por Eberhart e Kennedy em 1995 (EBERHAHRT e KENNEDY, 1995), com o objetivo de aprimorar soluções para aplicações de funções não lineares. Sua operação se baseia em replicar o comportamento de aprendizagem de grupos sociais de animais, como cardumes de peixes e bandos de pássaros, analisando a movimentação em enxame durante ações coordenadas, como a busca por alimento em conjunto. Nessa análise, cada membro do grupo é representado por uma partícula e aquelas que

apresentarem melhor desempenho podem “auxiliar” suas vizinhas a se direcionarem para regiões mais promissoras de busca por soluções (BENTESSEN YAKUT, 2024; EBERHAHRT e KENNEDY, 1995).

O algoritmo de PSO consiste na análise cinética das partículas da população, cujas suas posições x_i^k representam o estado a ser otimizado, que no caso estudado, são os ganhos do controlador PID: K_p , K_i e K_d . As posições de cada partícula são atualizadas em iterações, de acordo com suas velocidades V_i^k , como descrito na equação (2.18). A velocidade de cada partícula depende da posição que confere o melhor resultado individual (p^k) e da que confere o melhor resultado global (g^k) entre todas as partículas do grupo. Também é apresentado outros parâmetros que controlam a variabilidade e definem o peso relativo entre os outros fatores. A atualização para a velocidade de uma partícula i na iteração k é definida pela equação (2.19) (MOHAMMED, 2024).

$$x_i^{k+1} = x_i^k + V_i^{k+1} \quad (2.18)$$

$$V_i^{k+1} = w \cdot V_i^k + c_1 \cdot r_1^k (p^k - x_i^k) + c_2 \cdot r_2^k (g^k - x_i^k) \quad (2.19)$$

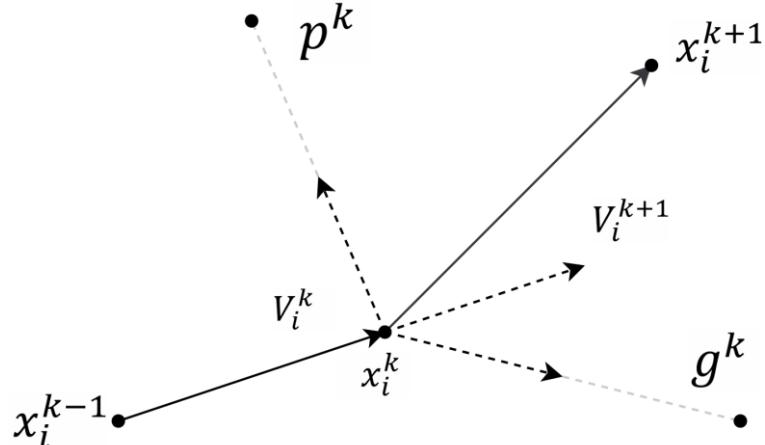
Em que:

- x_i^k – Posição no espaço de soluções da partícula i na k -ésima iteração;
- V_i^k – Velocidade da partícula i na k -ésima iteração;
- w – Peso arbitrário de inércia;
- c_1 – Parâmetro constante cognitivo da partícula i ;
- c_2 – Parâmetro constante social da partícula i ;
- r_1^k, r_2^k – Valores randômicos entre 0 e 1;
- p^k – Posição no espaço de soluções de melhor resultado individual;
- g^k – Posição no espaço de soluções de melhor resultado global.

A representação do processo iterativo em que a posição e velocidade das partículas são atualizadas por iteração, seguindo as equações (2.18) e (2.19), está

representada espacialmente na Figura 7. As linhas tracejadas indicam os vetores de velocidade, que apontam para as posições correspondentes ao melhor resultado individual da partícula p^k e ao melhor resultado global do enxame g^k . As linhas contínuas indicam a atualização de posição da partícula no espaço de soluções.

Figura 7 – Movimento das partículas no espaço de soluções.



Fonte: Adaptado de (MOHAMMED, 2024).

Para definir os melhores parâmetros do PID, é necessário que cada iteração quantifique a aptidão dos resultados obtidos, de modo a orientar a busca por soluções cada vez melhores. Para isso, é implementado uma função de pontuação, definida como função custo, que considera os parâmetros de desempenho típicos de uma resposta de sistema de controle PID. Assim, com base na função proposta por Mohammed (MOHAMMED, 2024), obtém-se a função custo apresenta pela equação (2.20).

$$J = j_1 \cdot t_r + j_2 \cdot t_s + j_3 \cdot M_s + j_4 \cdot e_{ss} \quad (2.20)$$

Em que:

- J – Função custo;
- t_r – Tempo de subida;
- t_s – Tempo de acomodação;
- M_s – Sobressinal máximo;

- e_{ss} – Erro em regime permanente;
- j_1, j_2, j_3, j_4 – Constantes de peso entre os parâmetros, valores entre [0,1].

O parâmetro do tempo de subida (t_r) é o intervalo necessário para que o sinal atinja, pela primeira vez, valores próximos ao valor de referência, sendo um parâmetro que caracteriza a velocidade da resposta. O tempo de acomodação (t_s) é o período que leva para a resposta se estabilizar entre limites mínimos e máximos. O sobressinal máximo (M_s) representa o maior valor atingido pela resposta em relação ao valor de referência, indicando o grau de ultrapassagem durante o regime transitório. Por fim, o erro em regime permanente (e_{ss}) mede a diferença entre o valor de referência e a resposta do sistema após a estabilização (NISE, 2020).

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A fase de desenvolvimento técnico do projeto se subdivide nas seguintes etapas: especificação do escopo do projeto, modelagem e simulação dos subsistemas, desenvolvimento do *script* que opera o algoritmo de PSO para o controle do sistema completo e testes para verificação do funcionamento do projeto. O modelo foi desenvolvido no software *Simulink* enquanto o *script* de controle no Matlab. Os valores para os componentes e parâmetros do projeto usados na seção de desenvolvimento foram definidos pelos estudos pesquisados na seção de Fundamentação Teórica.

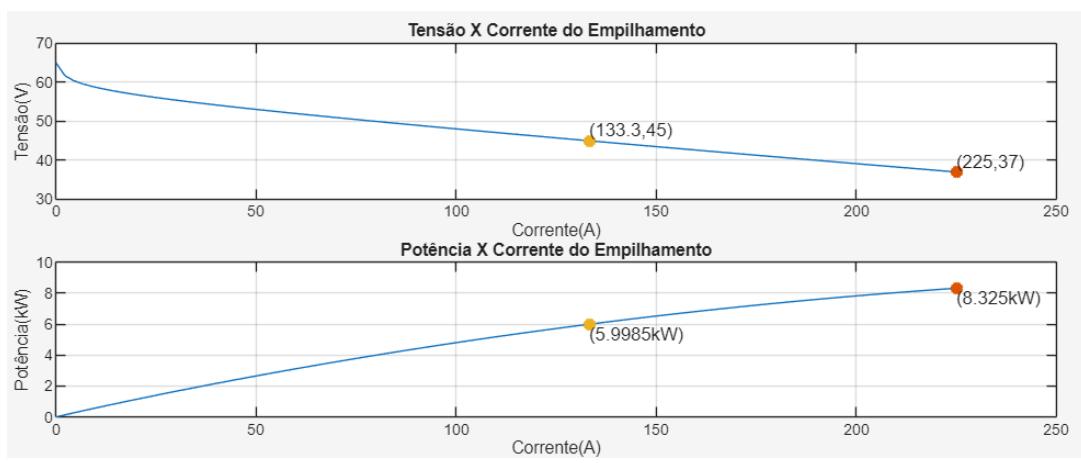
3.1 Célula a combustível

Para o dimensionamento do sistema de potência é necessário definir restrições iniciais de projeto. Dessa forma, inicialmente são definidas a célula a combustível e a carga trifásica a ser alimentada. Todo o processo é desenvolvido com o objetivo de alimentar uma carga trifásica de 800 W de potência.

A célula a combustível utilizada nesse projeto é na realidade um empilhamento de 65 células com tensão de circuito aberto 65 V, tensão nominal igual a 45 V e potência de 6kW. Outros parâmetros relevantes da célula simulada estão dispostos na Tabela 2. Sua curva de polarização é apresentada na

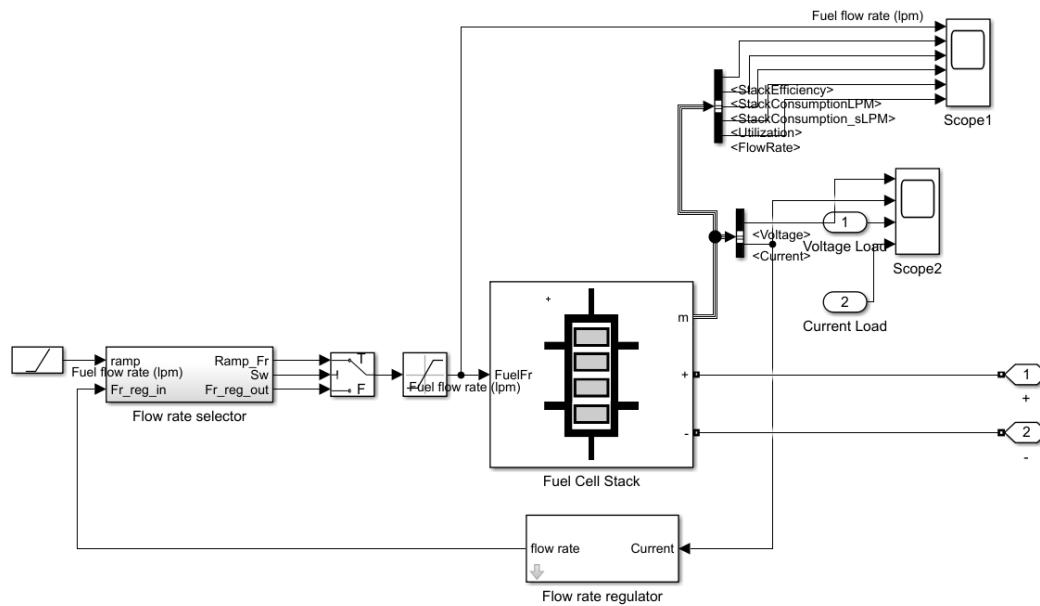
Figura 8 e a montagem do sistema no *Simulink* é expresso na Figura 9.

Figura 8 – Curvas do empilhamento de células.



Fonte: O autor.

Figura 9 – Modelo do sistema da Célula a Combustível no *Simulink*.



Fonte: O autor.

Tabela 2 – Parâmetros da célula a combustível.

Símbolo	Variável	Valor
i_{nom}	Corrente nominal do empilhamento	133,3 A
V_{nom}	Tensão nominal do empilhamento	45 V
V_{ca}	Tensão de circuito Aberto	65 V
$P_{nom,emp}$	Potência nominal	6 kW
F_{nom}	Fluxo de entrada nominal	300 lpm
P_{H_2}	Pressão parcial do Hidrogênio	1,5 atm
P_{O_2}	Pressão parcial do Oxigênio	1 atm
n_{H_2}	Composição de Hidrogênio	99.95%
T	Temperatura de operação	65 °C
N_{cel}	Número de células	65

Fonte: O autor.

3.2 Conversor Boost

Para o dimensionamento do conversor boost, é inicialmente necessário definir a tensão desejada na saída do conversor CA. Este projeto foi desenvolvido para atender uma carga que opera em tensão alternada de 127 Vrms (valor eficaz), padrão em diversas localidades do Brasil. Assim, para suprir a carga, a tensão contínua do barramento CC deve ser no mínimo $V_{s,boost} = 127 * 2 * \sqrt{2} \cong 359,21$ V, considerando as perdas nos comutadores e na linha, adota-se uma tensão ligeiramente superior, de modo que $V_{s,boost} = 370$ V.

Após a definição de $V_{s,boost}$, é possível calcular o ciclo de trabalho necessário para a chave comutadora atuar, utilizando a equação (2.11). Devido a dinâmica da célula ser bastante intermitente, apresentando uma variação de tensão já esperada, assim também o ciclo de trabalho não pode ser um valor estático. Por conta disso, deve ser implementado um algoritmo de controle que escolha os melhores valores do ciclo de trabalho dinamicamente.

Podemos considerar um ponto no início da curva da

Figura 8 para o cálculo da resistência da carga R_c , permitindo estimar os valores das indutâncias e capacitâncias do conversor. O experimento base considera uma carga de potência trifásica de 800 W, e assume-se que, a corrente gerada por tensões mais elevadas da célula é $i \cong 1$ A. A partir disso, são feitas as seguintes considerações:

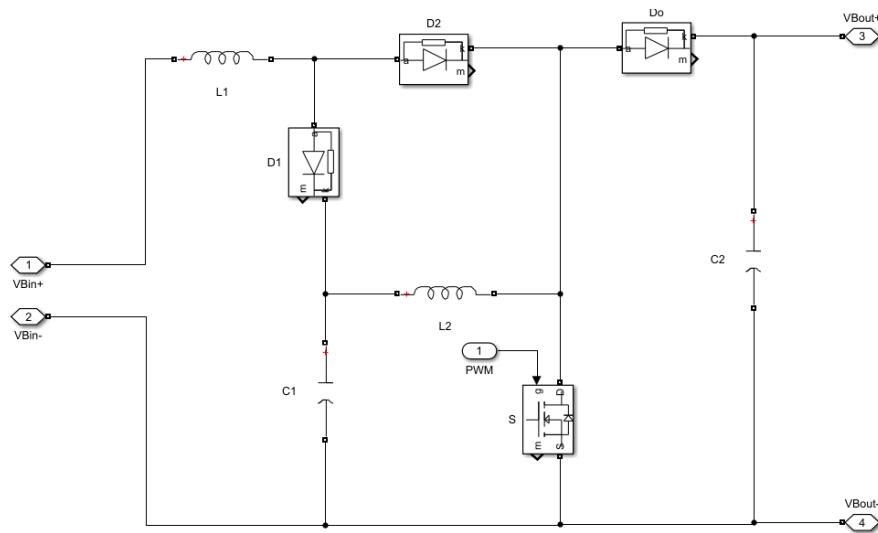
- $R_c = 800 \Omega$;
- Ciclo de trabalho máximo - $d = 0.7$.

O ciclo de trabalho é limitado para um máximo de $d = 0,7$, pois esse valor garante um ganho adequado para o projeto, além de evitar um aumento excessivo de tensão de saída, o que diminui o desgaste na chave comutadora. Os parâmetros da célula, ao utilizar as equações 2.12 e 2.13, resultam nos parâmetros na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros do conversor *Boost*.

Símbolo	Variável	Valor
f_b	Frequência de comutação da chave	30 kHz
L_1	Indutor - 1 ^a etapa	0,84 mH
C_1	Capacitor - 1 ^a etapa	0,42 mF
L_2	Indutor - 2 ^a etapa	0,84 mH
C_2	Capacitor - 2 ^a etapa	0,525 mF

Fonte: O autor.

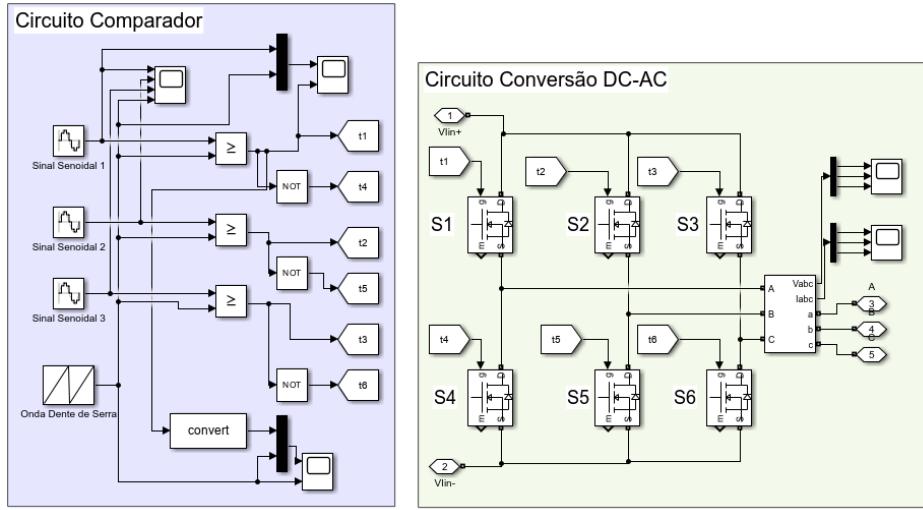
Figura 10 - Modelo do sistema do conversor *Boost* no *Simulink*.

Fonte: O autor.

3.3 Inversor trifásico

O sistema do inversor trifásico senoidal é dividido em dois circuitos. O primeiro é o comparador, responsável por gerar o sinal PWM variável que aciona as seis chaves comutadoras. O segundo circuito, composto pelas chaves comutadoras, é responsável pela conversão de corrente contínua em corrente alternada. O conjunto montado no *Simulink* é demonstrado na Figura 11.

Figura 11 – Sistema do inversor de frequência no *Simulink*.



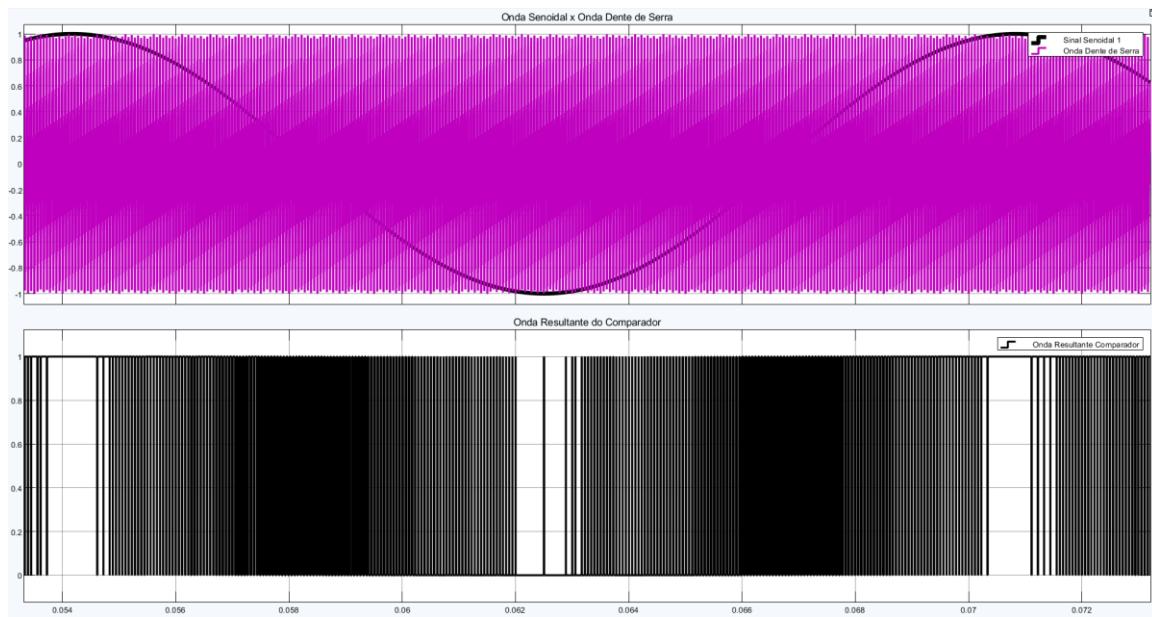
Fonte: O autor.

Após a montagem da topologia do inversor, torna-se necessário definir as frequências de operação do comparador, que correspondem à frequência dos sinais senoidais (f_c) e a frequência da onda triangular (f_t). A frequência f_c é definida de acordo com a frequência de operação da carga, para um projeto de uso em uma rede doméstica convencional, esse valor é estabelecido como 60Hz. Para definir f_t a regra a ser utilizada é de um múltiplo inteiro bem maior que a frequência f_c dos sinais senoidais, como definido pelas equações (2.14) e (2.15):

- $f_c = 60 \text{ Hz}$;
- $f_t = 2 \cdot N \cdot f_c = 18000 \text{ Hz}$.

Os gráficos que demonstram os sinais do circuito comparador são demonstrados na Figura 12.

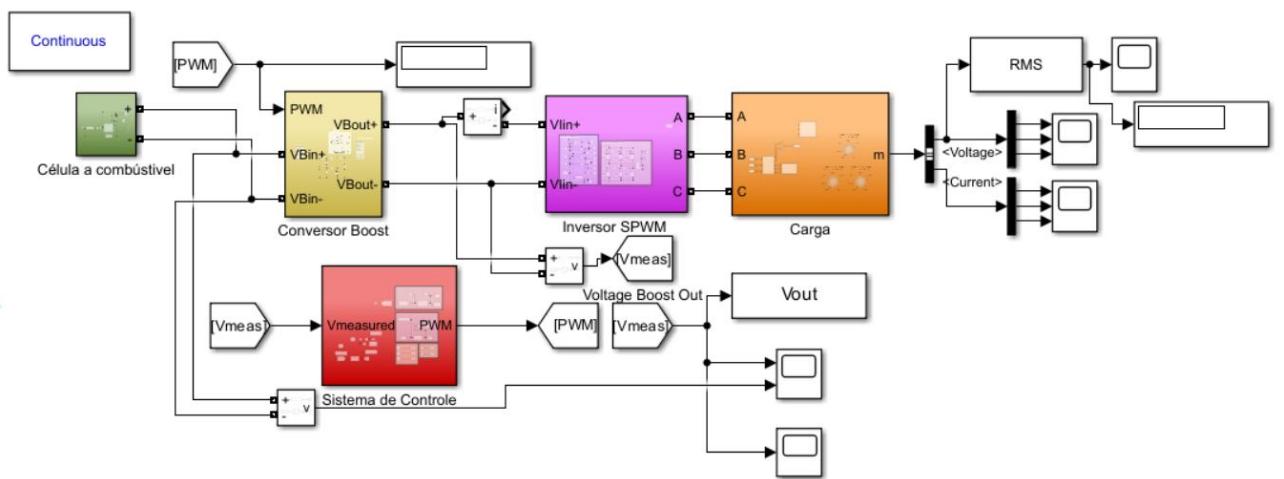
Figura 12 – Sinais do comparador do inversor de frequência.



Fonte: O autor.

Após a definição do inversor, resta somente a conexão da carga e organização do sistema de controle, assim, finalizando toda a construção do sistema de simulação no *Simulink*. A montagem da Figura 13 apresenta todos o conjunto de subsistemas simulados.

Figura 13 – Sistema completo no Simulink.



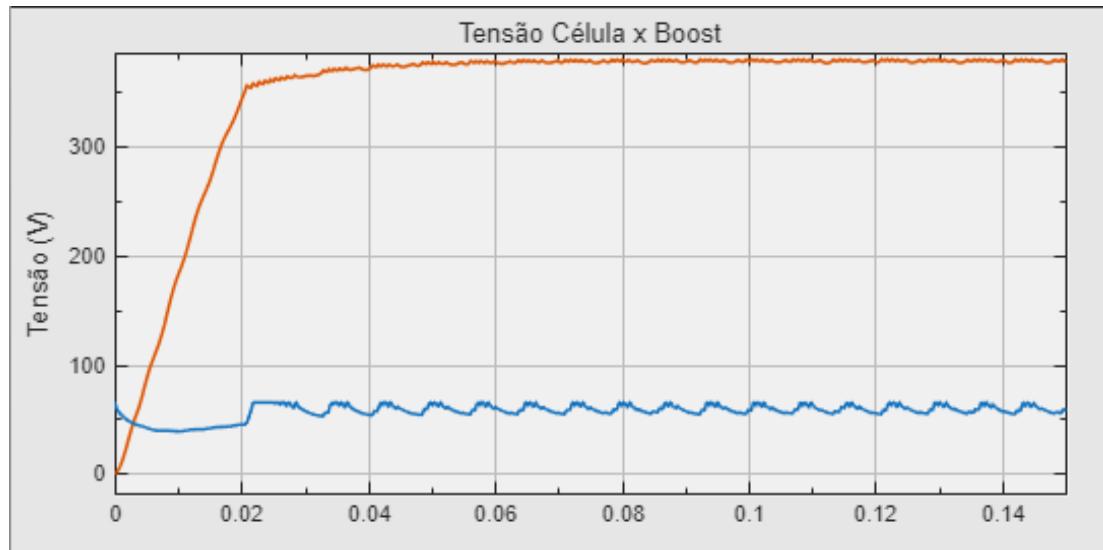
Fonte: O autor.

3.4 Implementação do controlador PID com PSO

O processo de obtenção dos parâmetros ideais por meio do método PSO envolve a constante atualização das posições das partículas, que representam os ganhos do controlador PID: K_P , K_I e K_D . A cada iteração é simulado o cenário de ativação da célula, e a partir disso, são retiradas as métricas utilizadas na função custo (2.20): t_r , t_s , M_s e e_{ss} , obtidas pela resposta de tensão do conversor *boost*.

A Figura 14 apresenta um exemplo das tensões da célula (em azul) e do conversor *boost* (em laranja) durante período de ativação.

Figura 14 – Tensões do conversor *boost*, em laranja, e da célula, em azul, no período de ativação.



Fonte: O autor.

Antes de começar o processo interativo de otimização é definido parâmetros iniciais do controlador PID, servindo como o ponto inicial a ser melhorado. Os seguintes valores são escolhidos:

- $K_P = 100$;
- $K_I = 100$;
- $K_D = 1$.

Dentre os ganhos, o ganho derivativo é propositalmente mantido menor que os demais, pois esse ganho introduz bastante instabilidade no sistema. Essa instabilidade se torna um risco pelo curto período em que se passa o processo de ativação.

Outro preparo a ser realizado antes de iniciar o PSO é simular o sistema com os valores iniciais de ganhos e calcular as métricas desse primeiro cenário, de forma a normalizar a pontuação da função custo. As métricas da primeira simulação e os valores de pesos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros referentes a função custo.

Símbolo	Variável	Valor
$t_{r,0}$	Tempo de subida - Inicial	$28,20 \cdot 10^{-3} s$
$t_{s,0}$	Tempo de acomodação - Inicial	$67,70 \cdot 10^{-3} s$
$M_{s,0}$	Sobressinal máximo - Inicial	$373,68 V$
$e_{ss,0}$	Erro em regime permanente - Inicial	$-2,40 V$
j_1	Constante de peso – tempo de subida	0,25
j_2	Constante de peso – tempo de acomodação	0,20
j_3	Constante de peso – sobressinal máximo	0,15
j_4	Constante de peso – Erro em regime permanente	0,40

Fonte: O autor.

As constantes de peso utilizadas para a função custo desse projeto são as sugeridas por Mohammed (MOHAMMED, 2024). Nota-se que é priorizado aquelas soluções com menor erro em regime permanente, devido a relação entre as constantes ser $j_4 > j_1, j_2, j_3$. Ao aplicar os valores na função 2.20 resulta na seguinte função custo:

$$\begin{aligned}
 J &= j_1 \cdot t_r + j_2 \cdot t_s + j_3 \cdot M_s + j_4 \cdot |e_{ss}| \\
 &= \frac{0,25}{28,20 \cdot 10^{-3}} \cdot t_r + \frac{0,20}{67,70 \cdot 10^{-3}} \cdot t_s + \frac{0,15}{373,68} \cdot M_s + \frac{0,40}{2,40} \cdot |e_{ss}|
 \end{aligned}$$

Os valores utilizados nas equações de posição (2.18) e velocidade (2.19) do algoritmo PSO, juntamente dos limites impostos para os ganhos encontrados estão presentes na Tabela 5.

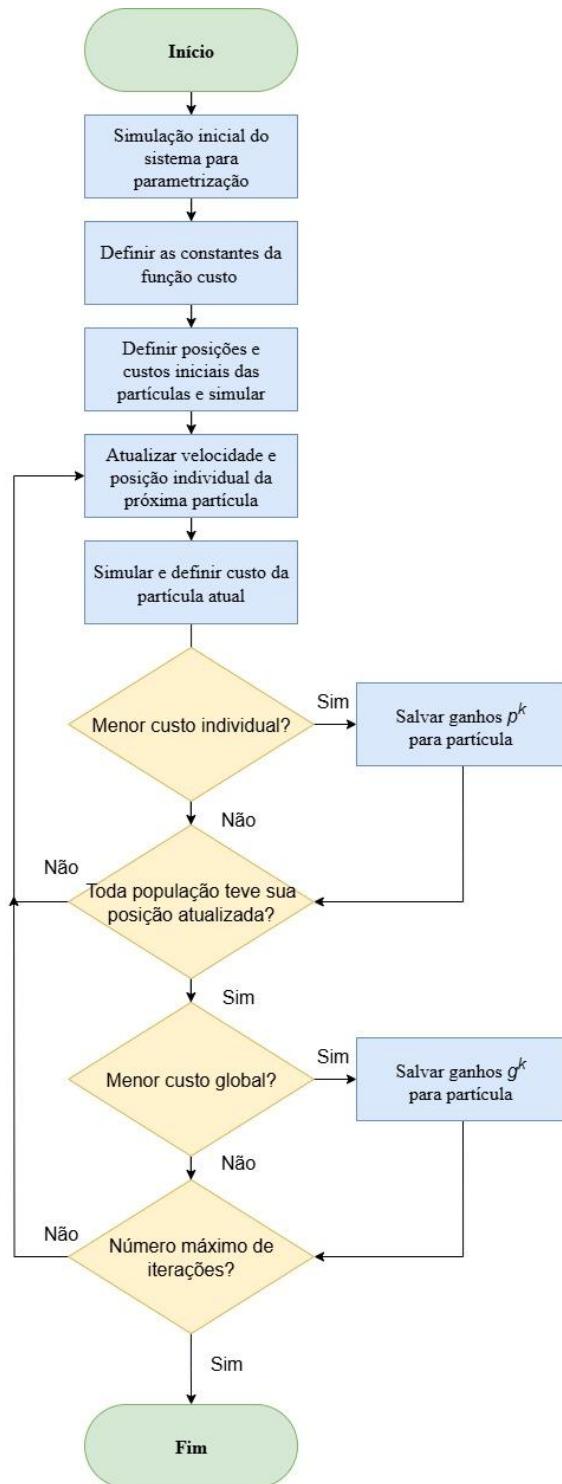
Tabela 5 – Parâmetros do método PSO.

Símbolo	Variável	Valor
N_p	Número de partículas	20
$i_{máx}$	Quantidade máxima de iterações	30
w	Peso Inercial	$1 \cdot 0,9^k$
c_1	Parâmetro constante cognitivo da partícula k	1,5
c_2	Parâmetro constante social da partícula k	2,0
$[K_{p,min}, K_{p,máx}]$	Faixa de valores para o ganho proporcional	[30; 300]
$[K_{i,min}, K_{i,máx}]$	Faixa de valores para o ganho integral	[30; 300]
$[K_{d,min}, K_{d,máx}]$	Faixa de valores para o ganho derivativo	[0,3; 3]

Fonte: O autor

São armazenados os melhores resultados por partícula p^k , além do melhor resultado global g^k , ao longo das iterações. São realizadas um total de 600 simulações e o g^k final definirá os melhores parâmetros PID. O processo completo da aplicação do método PSO está presente pelo fluxograma na Figura 15.

Figura 15 – Fluxograma do método PSO.



Fonte: O autor.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

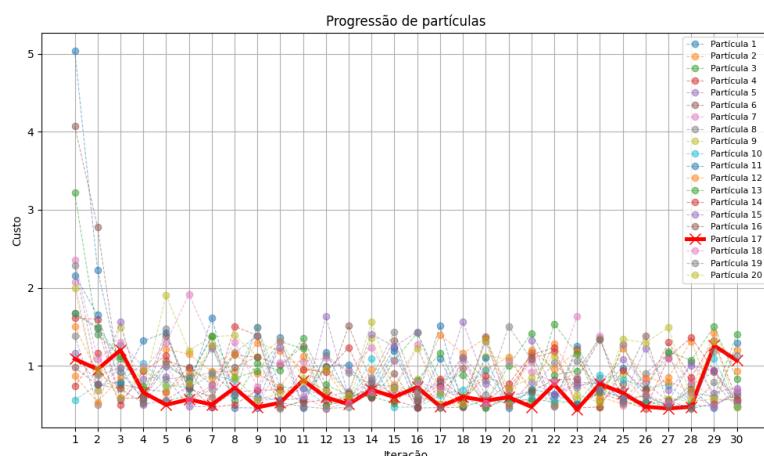
Neste capítulo, são analisados os resultados do sistema projetado. Através de informações gráficas e numéricas, são realizadas análises sobre o funcionamento do sistema de fornecimento elétrico desenvolvido, assim como sobre a performance do método PSO no controle do conjunto.

4.1 Performance do método PSO

A primeira análise do projeto é realizada por meio da avaliação das métricas do algoritmo PSO. Cada iteração avalia a curva inicial do conversor *boost*, com o objetivo de encontrar o melhor desempenho possível neste cenário. Busca-se o melhor desempenho realizando um total de 600 simulações entre 20 partículas, buscando identificar o melhor resultado global no fim do processo.

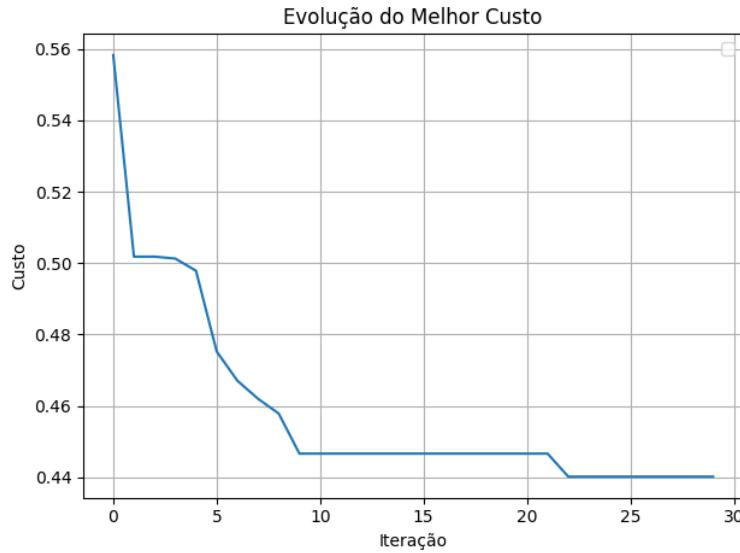
Para alcançar o melhor desempenho, foram realizadas 600 simulações com 20 partículas, buscando identificar o melhor resultado global ao fim do processo. Entre todas as iterações, o melhor desempenho foi obtido pela partícula 17 na 23^a iteração, como destacado pela linha vermelha no gráfico de progressão do melhor resultado por partícula, apresentado na Figura 16. De forma complementar, a Figura 17 mostra a evolução gradual da resposta do sistema, com base nos valores sucessivos de resultado global g^k ao longo das iterações.

Figura 16 – Evolução do custo de todas as partículas.



Fonte: O autor.

Figura 17 – Progressão do melhor custo ao longo das iterações.



Fonte: O autor.

O melhor resultado, obtido a partir dos parâmetros da partícula 17, definiu os ganhos K_p , K_i e K_d presentes na última coluna da Tabela 6. A comparação da resposta do conversor *boost* foi realizada entre os parâmetros da aplicação inicial do método e os mesmos valores sem o ganho derivativo, ou seja, utilizando um controlador apenas PI. O controlador PI é relevante pois o ganho derivativo pode ser associado a instabilidade no sistema, assim checa se o K_d é realmente necessário.

Tabela 6 – Comparaçāo do melhor resultado da parametrizaçāo PSO.

Variável	Parâmetros iniciais	Parâmetros iniciais sem K_d	Melhores parâmetros
K_p	100	100	244,21
K_i	100	100	86,83
K_d	1	0	0,88
t_r	$28,20 \cdot 10^{-3}$ s	$17,10 \cdot 10^{-3}$ s	$16,90 \cdot 10^{-3}$ s
t_s	$67,70 \cdot 10^{-3}$ s	$22,00 \cdot 10^{-3}$ s	$40,20 \cdot 10^{-3}$ s
M_s	373,68 V	375,64 V	371,76 V
e_{ss}	-2,40 V	-1,35 V	-12,87 $\cdot 10^{-2}$ V

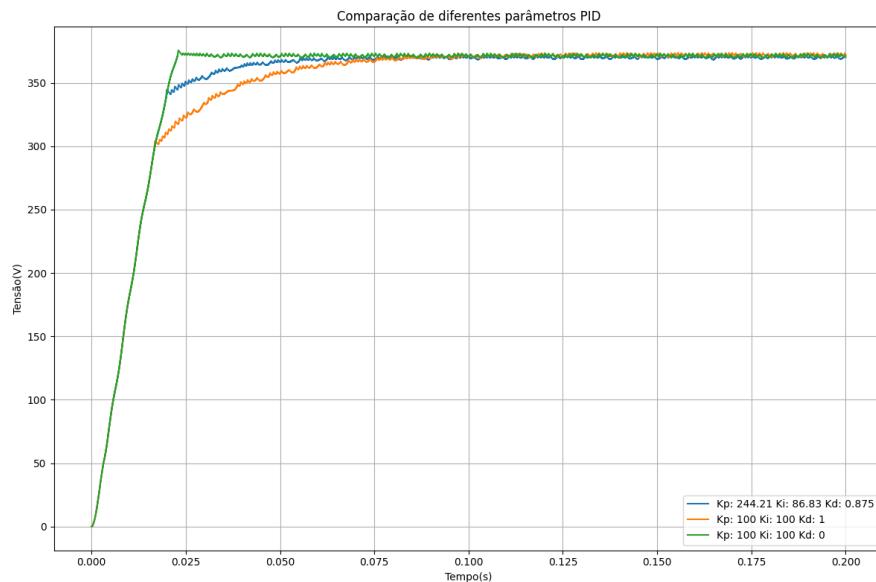
Fonte: O autor.

Os parâmetros encontrados ao final do processo PSO proporcionaram uma melhoria do desempenho do sistema em todos os aspectos avaliados, quando

comparados com o controlador PID original. A resposta do sistema melhorou com a diminuição do tempo de subida em 40,07% e diminuição do tempo de acomodação em 40,62%. A melhoria mais expressiva foi no erro em regime permanente que diminuiu em 94,74% de seu valor original, passando de um erro percentual de 0,64% originalmente para 0,03% quando comparado com a tensão de referência $V_{s,boost} = 370V$.

Ao comparar os resultados do PSO com os do controlador PI, os tempos de resposta foram bastante semelhantes, sem uma melhoria significativa nesse aspecto, observado uma dinâmica mais lenta do tempo de subida no PID, o que é esperado pela natureza do ganho derivativo. No entanto, o erro em regime estacionário do sistema foi menor com o controlador PID otimizado pelo PSO, e o sobressinal foi reduzido. A Figura 18 ilustra a resposta do sistema com os três controladores comparados.

Figura 18 – Resposta de tensão do conversor *boost*.

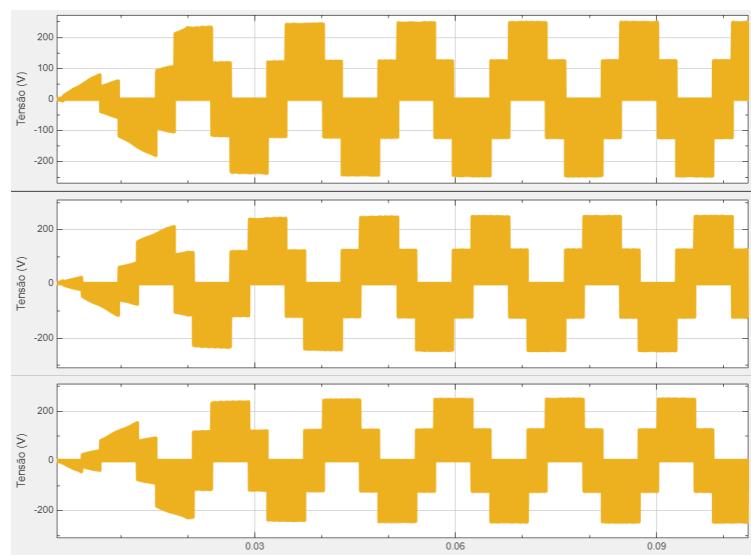


Fonte: O autor.

4.2 Resposta do inversor na carga

Após a parametrização pelo método PSO, foi estabelecido seu uso no controle do conversor *boost*, e a resposta do sistema completo, incluindo o inversor, foi analisada. A resposta de tensão na carga resistiva trifásica é mostrada na Figura 19.

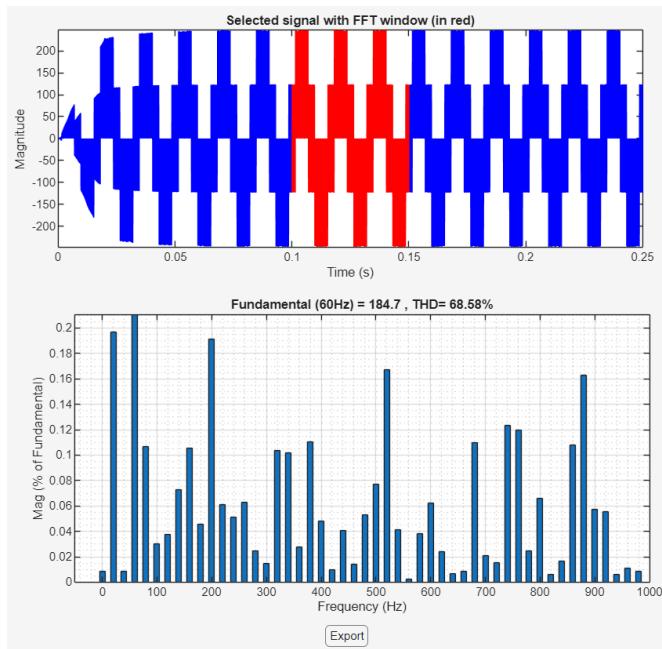
Figura 19 – Gráficos de resposta das 3 fases de tensão na carga.



Fonte: O autor.

O sinal resultante apresenta uma alta distorção em relação a um sinal senoidal, esse efeito pode ser quantificado por meio da análise de distorção harmônica total (THD – *Total Harmonic Distortion*). Para garantir a qualidade no fornecimento energético, são estabelecidos padrões e limites de THD permitidos por agências reguladoras. No Brasil, esse fator é regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Para tensões baixas, ou seja, aquelas inferiores a 1 kV, o sinal fornecido deve possuir um THD inferior a 10% (ANEEL, 2000). A análise de Transformada Rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*) realizada pelo *Simulink*, quantifica o THD do sistema simulado, permitindo verificar se o trabalho está em conformidade com as normas estabelecidas. A Figura 20 mostra análise de THD feita pelo *Simulink*.

Figura 20 – Análise FFT do sinal na carga.



Fonte: O autor.

O THD inicialmente quantificado foi de 68,58%, valor significativamente acima do limite ideal de 10%. Para adequação do sistema, é possível implementar um filtro LC que tem por propósito atenuar os efeitos de distorção harmônica (FJELLSTEDT, FORSLUND e THOMAS, 2023).

Inicialmente, é necessário definir uma frequência de corte f_{corte} para atenuar os efeitos de $f_t = 18\text{kHz}$, enquanto permite a passagem da onda fundamental $f_c = 60\text{Hz}$. Assim, é uma escolha oportuna $f_{corte} = 1\text{kHz}$, além disso, equação da frequência de corte do filtro se apresenta a seguir:

$$f_{corte} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \quad (2.21)$$

Em que:

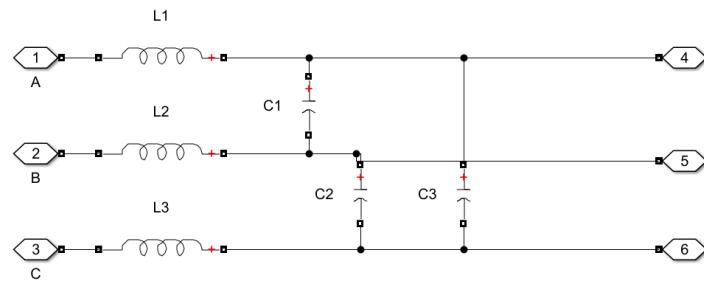
- f_{corte} – Frequência de corte [Hz];
- L_f – Indutância utilizada no filtro LC [H];
- C_f – Capacitância utilizada no filtro LC [F].

Ao fixar $L_f = 1\text{mH}$, um valor comercial comum de indutância, pode-se definir a capacitância pela equação acima:

$$f_{corte} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.001 \cdot C_f}} = 1000 \therefore C_f = 25.3 \mu F$$

Com todos os valores do filtro, monta-se o circuito no *simulink*, expresso na Figura 21.

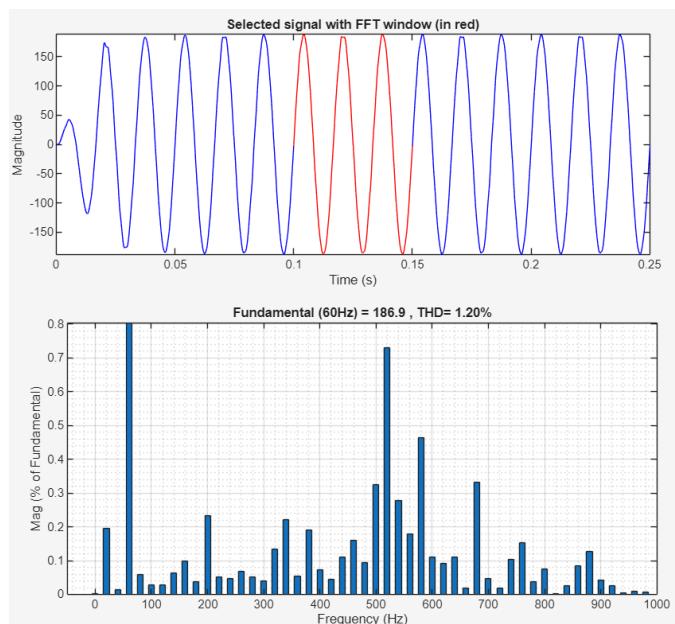
Figura 21 – Montagem filtro LC no *simulink*.



Fonte: O autor.

A nova análise FFT, realizada após a inclusão do filtro, é apresentada na Figura 22. Com a aplicação do filtro, o resultado melhora drasticamente, reduzindo o THD para 1,20% que está de acordo com os limites estabelecidos pela ANEEL.

Figura 22 – Análise de FFT após a implementação do filtro LC.



Fonte: O autor.

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Este trabalho apresentou toda a metodologia de desenvolvimento de um sistema de fornecimento elétrico para suprir uma carga, de operação por corrente alternada, utilizando uma célula a combustível PEM.

O Simulink se provou uma ótima ferramenta de estudo da dinâmica da célula a combustível, que mesmo com sua complexidade, já dispõe de modelos implementados nativamente na ferramenta. A escolha também foi favorável na implementação do sistema de potência com os componentes eletrônicos já implementados. Por fim, a integração com o *Matlab* possibilitou a fácil integração do algoritmo de controle com o ambiente de simulação, além da validação gráfica e estatística do sistema.

A implementação do PSO apresentou resultados positivos no controle de saída do sistema, a função custo proposta para o algoritmo priorizou uma sintonia do controle PID com maior ênfase na correção do erro em regime permanente. O erro percentual foi reduzido de 0,64% para 0,03% conforme os valores da Tabela 6. Vale ressaltar que a manipulação dos ganhos é válida ao considerar outros projetos que priorizem de forma mais criteriosa os outros parâmetros citados: sobressinal, tempo de acomodação ou tempo de subida.

Por fim, ressalta-se a importância do ambiente de simulação e da metodologia adotada para verificar o funcionamento da planta da célula a combustível. As implementações das topologias nesse ambiente permitem avaliar se o empilhamento proposto atende aos requisitos finais do projeto, neste caso, o fornecimento de tensão fixa. Ademais, a sintonia por PSO pode ser reaplicada diante de alterações na planta, sejam elas previstas ou resultantes do próprio processo de operação, possibilitando a escolha dos ganhos mais adequados à dinâmica atual do sistema.

5.1 Propostas de continuidade e trabalhos futuros

Diversas áreas podem ser aprofundadas com o objetivo de expandir este projeto. A primeira proposta de continuidade consiste na montagem física do sistema dimensionado, visando validar os resultados obtidos por simulação. Ainda no âmbito

da modelagem e análise computacional, é possível investigar outras metodologias de controle e comparar com o método PID com sintonia por PSO apresentado neste trabalho. Alguns estudos sugerem, por exemplo, o uso de lógica Fuzzy ou a implementação de Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC), permitindo assim uma comparação entre diferentes estratégias de controle com o intuito de avaliar qual apresenta melhor desempenho.

Por fim, o sistema estudado é altamente modular, o que possibilita a substituição e análise de diferentes topologias de conversores CC-CC e CC-CA com facilidade. No entanto, é válido destacar a prioridade de aplicação na área automotiva, especialmente voltada para veículos do tipo FCEV. Dessa forma, uma possível extensão deste trabalho é a análise do sistema proposto para alimentação de um motor síncrono de ímã permanente (PMSM – *Permanent Magnet Synchronous Motor*).

REFERÊNCIAS

- ALASWAD, ABED et al. Technical and Commercial Challenges of Proton-Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells. **Energies**, v. 14, p. 144, 2020.
- ALI, ALI B.M. et al. Principles and performance and types, advantages and disadvantages of fuel cells: A Review. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 10, 2024.
- ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, 07 dez. 2000. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/>>. Acesso em: 2025 Maio 02.
- BENMOUIZA, K.; CHEKNANE, A. Analysis of proton exchange membrane fuel cells voltage drops for different operating parameters. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, p. 3512–3519, 2018.
- BENTESEN YAKUT, YURDAGÜL. A new control algorithm for increasing efficiency of PEM fuel cells – Based boost converter using PI controller with PSO method. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2024. 1-11.
- BIZON, N. On tracking robustness in adaptive extremum seeking control of the fuel cell power plants. **Applied Energy**, v. 87, n. 10, p. 3115–3130, 2010.
- DAUD, W.R.W. et al. PEM fuel cell system control: A review. **Renewable Energy**, v. 113, p. 620–638, 2017.
- DURANAY, ZEYNEP B.; GÜLDEMİR, HANIFI. Voltage Controlled Boost Converter-Inverter System for Photovoltaic Applications. **Turkish Journal of Science and Technology**, v. 15, p. 85–92, 2020.
- EBERHAHRT, RUSSELL C.; KENNEDY, JAMES. A new optimizer using particle swarm theory. In: **Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science**. Nagoya, Japão: [s.n.], 1995. p. 39-43.
- ELNAGI, BASEM E. et al. Fuel cell stack design and modelling with a double-stage boost converter coupled to a single-phase inverter. **Clean Energy**, v. 8, p. 188–196, 2024.
- FJELLSTEDT, CHRISTOFFER; FORSLUND, JOHAN; THOMAS, KARIN. Experimental Investigation of the Frequency Response of an LC-Filter and Power Transformer for Grid Connection. **Energies**, 2023. 15.
- HUSSAIN BASHA, C. H. et al. Simulative design and performance analysis of hybrid optimization technique for PEM fuel cell stack based EV application. **Materials Today: Proceedings**, v. 52, p. 290–295, 2021.
- IEA. World Energy Outlook, 2024. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024?language=pt>>. Acesso em: 25 Janeiro 2025.
- IPCC. Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. **Summary for Policymakers**, p. 1-24, 2022.
- JARIN, T. et al. Fuel vehicle improvement using high voltage gain in DC-DC boost converter, v. 43, p. 228-238, 2022.
- KART, SUDE et al. Increasing PEM fuel cell performance via fuzzy-logic controlled cascaded DC-DC boost converter. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2024. 1-11.

- KUMAR, R.; SINGLA, S. K.; CHOPRA, V. Comparison among some well known control schemes with different tuning methods. **Applied Research and Technology**, v. 13, p. 409–415, 2015.
- LIU, Z.; DU, J.; YU, B. Design Method of Double-Boost DC/DC Converter with High Voltage Gain for Electric Vehicles. **World Electric Vehicle Journal**, v. 11, p. 64, 2020.
- MAZZEO, F.; NAPOLI, L. D.; CARELLO, M. Assessing Open Circuit Voltage Losses in PEMFCs: A New Methodological Approach. **Energies**, v. 17, n. 11, p. 2785, 2024.
- MOHAMMED, I. K. Design and Simulation of Voltage Control System for Simscape Boost Converter Model With Disturbances. **International Journal of Control Automation and Systems**, p. 1707–1716, 2024.
- MOTAPON, S. N.; TREMBLAY, O.; DESSAINT, L. A. Development of a generic fuel cell model: application to a fuel cell vehicle simulation. **International Journal of Power Electronics**, v. 4, p. 505, 2012.
- MUMTAZ, FARHAN et al. Review on non-isolated DC-DC converters and their control techniques for renewable energy applications. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, p. 3747–3763, 2021.
- NISE, NORMAN S. **Control systems engineering**.
- O'HAYRE, R. P. Fuel cells for electrochemical energy conversion. **The European Physical Journal Conferences**, 2017.
- PRASHANTH, V. et al. Implementation of high step-up power converter for fuel cell application with hybrid MPPT controller. **Scientific reports**, v. 14, 2024.
- QASEM, NAEF A. A.; ABDULRAHMAN, GUBRAN A. Q. A Recent Comprehensive Review of Fuel Cells: History, Types, and Applications. **International Journal of Energy Research**, 2024.
- RAHMAN, MD A. et al. Analysis of Fuel Cell System including Inverter Control Strategy. **International Journal of Scientific and Engineering Research**, v. 4, 2013.
- RAJU, N. I.; ISLAM, M. S.; UDDIN, A. A. Sinusoidal PWM Signal Generation Technique for Three Phase Voltage Source Inverter with Analog Circuit & Simulation of PWM Inverter for Standalone Load & Micro-grid System. **International Journal of Renewable Energy Research**, v. 3, p. 647–658, 2013.
- SARMA, U.; GANGULY, S. Modelling of the PEM Fuel Cell and Design of a Closed Loop Control Based DC-DC Boost Converter For Locomotive Application. **IEEE Milan PowerTech**, v. 42, p. 1-6, 2019.
- SILVA, MILTON R. **Modeling of a fuel cell with PI controller in Simulink — Matlab**. 2016 3rd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI). Shanghai, China: IEEE. 2016.
- STAFFELL, IAIN et al. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. **Energy & Environmental Science**, p. 463-491, 2019.
- TRUBY, JOHANNES; PHILIP, PRADEEP; LORENTZ, BERNHARD. Green hydrogen: Energizing the path to net zero. **Deloitte**, 2023.
- UNFCC. **The Paris Agreement - Publication**. Paris Climate Change Conference - November 2015. [S.I.]: [s.n.]. 2018.
- YALAVARTHY, UMA R. S.; GADI, VENKATA S. K. R. PEM Fuel Cell Powered Electric Vehicle Propelled by PMSM Using Fuzzy PID Controller- A Research. **International Journal of Engineering Trends and Technology**, v. 70, p. 66-74, 2022.

ZHANG, XIN et al. Modeling and simulation of a residential-based PEMFC-CHP system. **International Journal of Electrochemical Science**, 2024.

ZHANG, YUN et al. DC–DC Boost Converter With a Wide Input Range and High Voltage Gain for Fuel Cell Vehicles. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 34, p. 4100–4111, 2018.